



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE  
POSGRADO EN GESTIÓN AMBIENTAL  
**MAESTRÍA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

**REQUISITO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

*Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo*

***“Un Método de Gestión Ambiental de Lixiviados Mediante una Biobarrera Secuencial”***

Presentado por:

**ANDRÉS FELIPE ZAPATA MUÑOZ**

Ingeniero Biológico

Director:

**CARMEN ELENA ZAPATA SANCHEZ**

Ingeniera de Petróleos, MSc Water Environment Management

SEDE MEDELLÍN

2012

## RESUMEN

A partir de la descripción de las actividades propias de la operación del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, y de la caracterización fisicoquímica de sus lixiviados, se propone un método de evaluación ambiental que incluye el análisis de las interacciones entre estos, como diagnóstico para la elaboración de una matriz causa efecto, donde se identifican los impactos sobre los componentes ambientales. Con esta información se realizó una matriz de importancia donde se clasificaron los impactos de acuerdo a una escala propuesta en críticos, severos, moderados e irrelevantes y posteriormente la valoración cualitativa del impacto ambiental que permite identificar las actividades más impactantes y los factores más afectados.

Partiendo de la caracterización fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, se propone el sistema biobarrera secuencial (BBS) como alternativa para la transformación de sólidos, compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados, teniendo una descripción global de su funcionamiento.

El sistema BBS se operó en continuo durante ciento veinte días, la etapa de arranque tardó los primeros treinta días durante los cuales se desarrolló la biopelícula tanto en el reactor anaerobio como en el aerobio. A partir del día treinta se reportaron cambios en las características fisicoquímicas del lixiviado y se registraron todos los parámetros fisicoquímicos cada cinco días. Al finalizar la operación del sistema se obtuvieron las siguientes eficiencias globales de remoción 87.6% para DQO, 90.9% para DBO, 72.55% para sólidos totales (ST), 86.7% Sólidos suspendidos totales (SST) y finalmente 90% para Nitratos y Nitritos.

Como resultado del método, se determinó que la operación del relleno sanitario impacta en mayor medida los componentes físico y biótico, en especial genera efectos como: la alteración de la calidad del aire, la pérdida de especies de flora acuática y terrestre, la alteración del ciclo hidrológico y la disminución de la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

Se busca implementar este sistema en rellenos sanitarios, para ofrecer un tratamiento económico y eficiente para el manejo integrado de lixiviados.

**PALABRAS CLAVE:** Evaluación ambiental, relleno sanitario, lixiviados, componentes ambientales, matriz causa efecto, matriz de importancia, impacto ambiental, valoración cualitativa, tratamiento biológico, biopelícula, remoción de compuestos.

**ABSTRACT:** From the description of the activities of the operation of the landfill and environmental farm "Los Saltos" and the physicochemical characterization of its leachate, a method of environmental assessment was proposed that includes an analysis of its interactions as a diagnostic tool for the development of a cause-effect matrix to identify the impacts on associated environmental components. With this information, a matrix of importance was developed where the impacts were classified according to a scale of critical, severe, moderate, and irrelevant. A qualitative assessment of the environmental impact was then carried out to help identify the more heavily impacting activities as well as the more highly affected parameters.

From the physicochemical characterization of leachate from the landfill and environmental farm "Los Saltos" a biobarrier sequential system (BBS) was proposed as an alternative for the transformation of solid, organic, inorganic and nitrogenised compounds, having a comprehensive description of its operation.

The BBS system operated continuously for 120 days, the first 30 days of which consisted in a start-up period to allow for biofilm development in both the aerobic and anaerobic reactors. Beginning day 30, changes were reported on the physicochemical characteristics of the leachate, and all physicochemical parameters were recorded every five days. After operating the system, the following overall efficiencies of removal were obtained: 87.6% for COD, 90.9% for BOD, 72.55% for total solids (TS), 86.7% for total suspended solids (TSS), and 90% for nitrate and nitrite.

As a result of this method, we determined that the operation of a landfill has a greater impact on the physical and biotic components of the environment producing effects such as impaired air quality, loss of aquatic species and terrestrial flora, alteration of the hydrological cycle, and deterioration of surface and groundwater quality.

Implementing this system in landfills is desired in order to offer comprehensive leachate management that is more efficient and economic.

**KEYWORDS:** Environmental assessment, landfill, leachates, environmental components, cause and effect matrix, matrix of importance, environmental impact, qualitative assessment, biological treatment, biofilm, compounds removal.

## Índice General

|   |    |
|---|----|
| 1. Generalidades.....   | 1  |
| 1.1 Introducción.....   | 1  |
| 1.2 Objetivos.....  | 2  |
| 1.2.1 Objetivo general.....   | 2  |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....  | 2  |
| 2. Antecedentes.....  | 3  |
| 3. Área de influencia del estudio.....  | 10 |
| 4. Actividades propias de la operación del relleno sanitario y generación de<br>lixiviados.....   | 13 |
| 5. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados.....  | 17 |
| 6. Desarrollo del método de evaluación ambiental para la implementación del<br>sistema BBS.....   | 19 |
| 6.1 Interacciones entre las actividades propias de la operación del relleno y<br>la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados..... | 23 |
| 6.2 Matriz causa – efecto.....  | 24 |
| 6.3 Identificación de elementos ambientales susceptibles de recibir impacto<br>y sus indicadores.....   | 26 |
| 6.4 Matriz de importancia.....  | 31 |
| 6.5 Valoración cualitativa del impacto ambiental.....   | 32 |
| 6.6 Actividades más impactantes y factores más afectados.....   | 35 |
| 7. Evaluación del sistema biobarrera secuencial.....  | 39 |
| 7.1 Modelo propuesto.....   | 39 |
| 7.1.1 Descripción de la dinámica.....   | 40 |
| 7.1.2 Balances de biomasa y sustrato.....   | 43 |
| 7.1.3 Microbiología de la digestión anaerobia.....  | 46 |
| 7.2 Descripción del sistema experimental.....   | 50 |
| 7.2.1 Etapa de puesta en marcha o arranque .....  | 52 |
| 7.2.2 Etapa de operación.....   | 53 |
| 7.3 Evaluación hidráulica del sistema utilizando trazadores.....  | 56 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 7.4 | Remoción de compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados..... | 61 |
| 8.  | Conclusiones.....   | 74 |
| 8.1 | Conclusiones sobre el capítulo 6.....                             | 76 |
| 8.2 | Conclusiones sobre el capítulo 7.....                             | 78 |
| 9.  | Recomendaciones y trabajo futuro.....                             | 81 |

Bibliografía

## Índice de Figuras

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.1   | Proceso clásico de tratamiento de lixiviados.....   | 7  |
| 3.1   | Área de influencia de la zona de estudio.....   | 11 |
| 6.1.  | Metodología de evaluación ambiental para la implementación del sistema BBS.....                   | 22 |
| 7.1.  | Esquema de los eventos que soportan el modelo planteado.....                                      | 39 |
| 7.2.  | Esquema de la dinámica en la biopelícula para el modelo propuesto.....                            | 42 |
| 7.3.  | Principales etapas de la digestión anaerobia y grupos bacterianos involucrados.....               | 47 |
| 7.4.  | Bacterias involucradas en el proceso de digestión anaerobia.....                                  | 49 |
| 7.5.  | Sistema biobarrera secuencial.....  | 50 |
| 7.6.  | Material de soporte – Polietileno de alta densidad.....   | 51 |
| 7.7.  | Sistema biobarrera secuencial.....  | 52 |
| 7.8.  | Concentración vs Tiempo en la biobarrera secuencial.....  | 57 |
| 7.9.  | Esquema conceptual de los tiempos de residencia en la distribución de los tipos de reactores..... | 58 |
| 7.10. | Reactor anaerobio: Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo.....                                | 62 |
| 7.11. | Reactor anaerobio: Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo.....                                 | 63 |
| 7.12. | Reactor aerobio: Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo.....                                  | 63 |
| 7.13. | Reactor aerobio: Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo.....                                   | 64 |
| 7.14. | Reactor anaerobio: Demanda biológica de oxígeno (DBO) vs Tiempo.....                              | 65 |
| 7.15. | Reactor anaerobio: Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo.....                                 | 65 |
| 7.16. | Reactor aerobio: Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo.....                                  | 66 |
| 7.17. | Reactor aerobio: Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo.....                                   | 66 |
| 7.18. | Concentración de Sólidos Totales vs Tiempo.....   | 67 |
| 7.19. | % de Remoción de Sólidos Totales Relativo vs Tiempo.....  | 68 |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>7.20.</b> | <b>% de Remoción de Sólidos Totales Acumulados vs Tiempo.....</b>            | <b>68</b> |
| <b>7.21.</b> | <b>Concentración de Sólidos Suspendidos Totales vs Tiempo.....</b>           | <b>69</b> |
| <b>7.22.</b> | <b>% de Remoción Relativa de Sólidos Suspendidos Totales vs Tiempo.....</b>  | <b>70</b> |
| <b>7.23.</b> | <b>% de Remoción Acumulada de Sólidos Suspendidos Totales vs Tiempo.....</b> | <b>70</b> |
| <b>7.24.</b> | <b>Concentración de Nitratos + Nitritos vs Tiempo.....</b>                   | <b>71</b> |
| <b>7.25.</b> | <b>% de Remoción Relativo de Compuestos Nitrogenados vs Tiempo.....</b>      | <b>72</b> |
| <b>7.26.</b> | <b>% de Remoción Acumulada de Compuestos Nitrogenados vs Tiempo.....</b>     | <b>72</b> |
| <b>9.1.</b>  | <b>Alternativas de manejo de los residuos sólidos.....</b>                   | <b>81</b> |
| <b>9.2.</b>  | <b>Diagrama de proceso propuesto.....</b>                                    | <b>83</b> |
| <b>9.3.</b>  | <b>Tren de tratamiento propuesto.....</b>                                    | <b>83</b> |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Características de lixiviados según su edad.....   | 3  |
| 3.1. Identificación de áreas de influencia ambiental.....   | 12 |
| 4.1. Identificación y descripción de las actividades susceptibles de producir impactos en las etapas de construcción y operación, y clausura..... | 14 |
| 4.2. Tratamiento para lixiviados de acuerdo a las características del lixiviado.....  | 16 |
| 5.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados.....  | 17 |
| 6.1. Matriz de identificación de los componentes ambientales que pueden ser afectados por el proyecto.....  | 24 |
| 6.2. Identificación de elementos ambientales susceptibles de recibir impactos y sus indicadores.....  | 26 |
| 6.3. Identificación y descripción de los impactos del medio físico.....   | 28 |
| 6.4. Identificación y descripción de los impactos del medio biótico.....  | 29 |
| 6.5. Identificación y descripción de los impactos del medio social.....   | 30 |
| 6.6. Matriz de valoración relativa del impacto ambiental.....   | 32 |
| 6.7. Actividades más impactantes.....   | 35 |
| 6.8. Factores ambientales más impactados.....   | 37 |
| 7.1. Principales reacciones químicas que ocurren en la digestión anaerobia de la materia orgánica.....  | 48 |
| 7.2. Calculo del tiempo de residencia y de la carga hidráulica.....   | 54 |
| 7.3. Calculo de la carga orgánica.....  | 55 |
| 7.4. Principales parámetros a tener en cuenta en una curva Concentración vs Tiempo.....   | 58 |
| 7.5. Valores de los principales parámetros encontrados para la biobarrera secuencial.....   | 59 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>8.1. Beneficios del sistema biobarrera secuencial sobre el medio ambiente.....</b>  | <b>75</b> |
| <b>8.2. Comparación entre los niveles de remoción de DQO y DBO, obtenidos por la planta de tratamiento y la biobarrera secuencial.....</b> | <b>79</b> |

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El método de gestión propuesto en el presente trabajo está basado en dos etapas, la primera es una evaluación ambiental para identificar los impactos ambientales asociados a la operación del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, ubicada en el municipio de Marinilla. La segunda etapa es el diseño de una biobarrera secuencial, como alternativa para el tratamiento de los compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados.

El relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos” fue inaugurado el 13 de marzo de 2009, como alternativa de disposición de residuos sólidos de esta localidad del oriente antioqueño. Su ubicación exacta es entre las veredas salto arriba y salto abajo del municipio de Marinilla.

Dentro del diseño del relleno sanitario se incluyó la adecuación de la granja ambiental para mitigar los efectos que puedan perjudicar al ecosistema de los territorios ocupados. Esta granja obtuvo la aprobación en todo su plan de manejo ambiental por parte de Cornare.

Aunque el diseño es moderno y se han aplicado tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos, la gestión ambiental de los lixiviados jóvenes, generados a partir de la disposición en el relleno sanitario no ha sido la más adecuada.

En el momento no se conoce una opción técnica y económicamente viable, para tratar esos lixiviados correctamente, por los siguientes motivos:

1. El bajo pH no permite la aplicación de tecnologías como la volatilización de amonio (que requiere pH básico), la nitrificación o la oxidación química del hierro.
2. La alta concentración de sales disueltas y la toxicidad de metales pesados.
3. La alta DBO presente en el medio acompleja los metales manteniéndolos en solución, lo que dificulta y limita su remoción.
4. El arrastre y solubilización de compuestos orgánicos volátiles (COV), que una vez disueltos se liberan fácilmente a la atmosfera por su alta volatilidad.

Esta investigación trata de evaluar la aplicabilidad del sistema “biobarrera secuencial” en el relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, mejorando la gestión de lixiviados.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar los impactos ambientales generados por la descomposición de RSU y plantear alternativas para mejorar la gestión de los lixiviados del relleno sanitario y parque ambiental “Los Saltos” (Marinilla, Antioquia – Colombia) con un reactor no convencional de alta eficiencia. Se evaluará, además un sistema de biopelícula anaerobio-aerobio que permita tratar los compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Impulsar el desarrollo tecnológico empleando un sistema de reactores que operen con energía hidráulica.
- Incrementar el desarrollo de la capa bacteriana y la eficiencia biológica de la biopelícula, mediante el diseño de soportes con una mayor área de contacto.
- Acoplar diferentes tipos de procesos físico-químicos y biológicos en el diseño de un reactor con capacidad de remover sólidos suspendidos y disueltos, debido a la biodegradación aerobia y anaerobia.
- Aplicar una metodología de evaluación ambiental y emplear el sistema BBS como alternativa viable para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario y parque ambiental “Los Saltos”.

## 2. ANTECEDENTES

Los residuos producidos en los países en vía de desarrollo son abundantes en materia orgánica fácilmente degradable con alto contenido de humedad. Una vez dispuestos en los rellenos, esta materia orgánica es rápidamente biodegradada, generando ácidos grasos volátiles y amoníaco. Estos ácidos grasos se diluyen fácilmente en el lixiviado, reduciendo su pH y facilitando la solubilización de metales pesados presentes, generando un lixiviado “joven” altamente contaminante. Una vez transcurrido el tiempo, el relleno produce lixiviados con una elevada de demanda química de oxígeno (DQO) pero baja en DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y con una menor concentración de compuestos tóxicos. Sin embargo es posible que las concentraciones de metales que presentan reacciones de oxidación reducción en lixiviados viejos sean mayores que lixiviados jóvenes. En la Tabla 2.1, tomada textual de (Giraldo, 2001) se muestran las características más comunes de un lixiviado respecto de su edad.

**Tabla 2.1. Características de lixiviados según su edad [Giraldo et al., 2001].**

| CARACTERÍSTICA                    | LIXIVIADO JOVEN           | LIXIVIADO VIEJO       |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| DBO                               | Muy alto                  | Bajo                  |
| DQO                               | Muy alto                  | Alto                  |
| Amoniaco                          | Muy alto                  | Alto                  |
| Fósforo                           | Usualmente Deficiente (1) | Suficiente            |
| pH                                | Muy bajo                  | Bajo                  |
| Detergentes                       | Muy Altos                 | Bajos                 |
| Sales disueltas                   | Muy Altas                 | Bajas (relativamente) |
| Agentes Incrustantes (Fe, Ca, Mg) | Muy Altos                 | Bajos                 |
| Metales Pesados                   | Muy Altos                 | Bajos                 |

Las características descritas, muestran la complejidad del tratamiento de lixiviados. Las diferencias que existen entre lixiviados de distinta edad dificultan en gran medida la elección del tratamiento a seguir. Por ejemplo, la relación DBO/DQO es alta para el lixiviado joven (buena biodegradabilidad) pero baja para el lixiviado maduro (lo que indica el uso necesario de un tratamiento químico complementario). Las concentraciones de sales disueltas y de metales pesados son muy altas en lixiviados jóvenes lo que pueden generar problemas

de toxicidad si se emplean tecnologías de tratamiento biológico. Las sustancias incrustantes presentes pueden ocasionar problemas de taponamiento a tuberías, válvulas y accesorios. El pH bajo no permite la aplicación de tecnologías como la volatilización de amonio (que requiere pH básicos), la nitrificación o la oxidación química del hierro. Adicional a la toxicidad de los metales, las altas DBO presentes en el medio acomplejan los metales y los mantienen en solución, dificultando y limitando su remoción. [Giraldo et al., 2001].

Una elevada concentración de amoníaco puede generar toxicidad si se emplean procesos anaeróbicos de remoción de DBO. Aunque en valores absolutos el fósforo se encuentra en altas cantidades, en términos relativos a un tratamiento biológico de remoción de DBO, se encuentra en cantidades limitantes, haciéndose necesaria una cantidad adicional para llevar a cabo el proceso.

En algunos rellenos donde se depositan residuos de actividades industriales y comerciales, los lixiviados pueden arrastrar gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles (COV), siendo solubles en el lixiviado, se liberan fácilmente por su alta volatilidad. Estos COV son arrastrados en gran medida con el aire que se aplica en procesos aerobios y en menor proporción con el biogás producido en procesos anaerobios. Los COV son tóxicos y deben ser regulados y adecuadamente eliminados.

El tratamiento de lixiviados es muy similar a la depuración de aguas residuales, aunque con algunas diferencias debido a su alta carga orgánica. Los aspectos económicos y técnicos marcan el tipo de tratamiento más adecuado para cada caso concreto, combinándose en muchas ocasiones varios de ellos.

Los sistemas más extendidos en la actualidad son los que tratan el lixiviado en el mismo lugar (*in situ*), por los resultados de remoción obtenidos y lo oneroso de las otras opciones. Los métodos más simples están basados en la evaporación, natural o apoyada por sistemas de riego por aspersión o pulverización, o mediante inyección del lixiviado en túneles o naves cerradas. Así mismo, el mercado ofrece una gran variedad de tratamientos *in situ*, tanto biológicos como físico-químicos.

Los tratamientos biológicos presentan varios modelos: Aerobios, consistentes en la degradación de los compuestos orgánicos de los lixiviados por la acción de microorganismos en presencia de oxígeno y agitación; anaerobios, mediante una población bacteriana en ausencia de oxígeno; y lagunaje profundo, por el que se depuran los lixiviados en balsas o lagunas mediante la flora bacteriana de las mismas [Fernández et al., 2006].

Los sistemas anaerobios son muy eficientes para remover DBO y generan poca cantidad de lodos, lo cual beneficia el costo asociado. Debe tenerse cuidado con la toxicidad de sales disueltas y amoníaco. Si se presenta toxicidad, deben implementarse procesos de remoción de amoníaco o disminuir las cargas para el tratamiento. En los reactores, se presentan grandes cantidades de material inorgánico que se deposita en los distintos sistemas, llegando a disminuir la eficiencia de remoción, el volumen efectivo de trabajo o hasta colapsar todo el sistema de tratamiento.

Los sistemas aerobios pueden arrojar remociones muy altas, pero los costos son mayores si se compara con los tratamientos anaerobios. Estos sistemas son mejores, en términos de relación costo beneficio, para tratar efluentes con cargas medias- bajas de DBO. Los sistemas aerobios son preferencialmente usados como pos tratamiento de una etapa anaerobia o como sistema de tratamiento de lixiviados viejos. En los sistemas aerobios se reportan problemas con la formación de espumas, la precipitación de hierro y la alta sensibilidad a las variaciones en caudales y cargas orgánicas (si se usan lodos activados). Se presentan costos adicionales por la cantidad de lodos formados que deben tratarse, además de la necesidad de tratamiento del aire inyectado en el tanque que arrastra COV.

Los tratamientos físico-químicos son más costosos que los anteriores, pero necesitan instalaciones más pequeñas y sencillas y son menos sensibles a las variaciones del medio. En este caso, las técnicas empleadas son: Precipitación química, que consiste en acelerar la decantación de los sólidos en suspensión agregando determinadas sustancias generando gran cantidad de lodos; oxidación química, en la que se degradan los compuestos orgánicos del lixiviado mediante agentes oxidantes; adsorción, donde se utiliza un filtro de carbón activo para depurar las sustancias contaminantes; y osmosis inversa, por la que se filtra el líquido a través de membranas a diferentes presiones [Fernández et al., 2006].

Una opción que soluciona el problema del tratamiento de lixiviado y de emisiones gaseosas contaminantes, aprovechando integralmente la energía contenida en los residuos, es la utilización de la energía del biogás generado en las rellenos para evaporar el lixiviado, y tal vez una segunda etapa en la que se caliente la mezcla gas-vapor de agua, con el objeto de eliminar completamente los COV. El resultado es un lodo que se dispone nuevamente en el relleno y vapor de agua. La quema del metano adicional es una alternativa interesante para

aprovechar la energía contenida en los residuos orgánicos, ya que permite reducir de forma considerable las emisiones gaseosas y el impacto por gases invernaderos. Junto con los vapores pueden arrastrarse cantidades considerables de amoníaco y ácidos grasos, por ello se han propuesto sistemas de evaporación múltiple que permiten controlar los distintos componentes por separado o el ajuste del pH durante el proceso evaporativo (Tanaka, y otros, 2005). Lo que en últimas se realiza es la transferencia de la contaminación a la fase gaseosa.

La aplicación de sistemas de membranas en general se emplea para el reemplazo de unidades de sedimentación y como complemento a los procesos de tratamiento. La principal ventaja es la alta eficiencia de remoción, principalmente debido a un incremento importante de la biomasa disponible para la reacción, pero la complejidad operativa de estos sistemas reducen su aplicación; además puede reducir la eficiencia en la transferencia de masa en los tanques aireados, en contra de las ganancias derivadas de tamaños de reactor más pequeños y altas concentraciones celulares. Otro inconveniente reportado para los sistemas con membranas es la obstrucción que sufren a lo largo del tiempo, reduciendo las eficiencias de remoción mientras la membrana no se reemplaza.

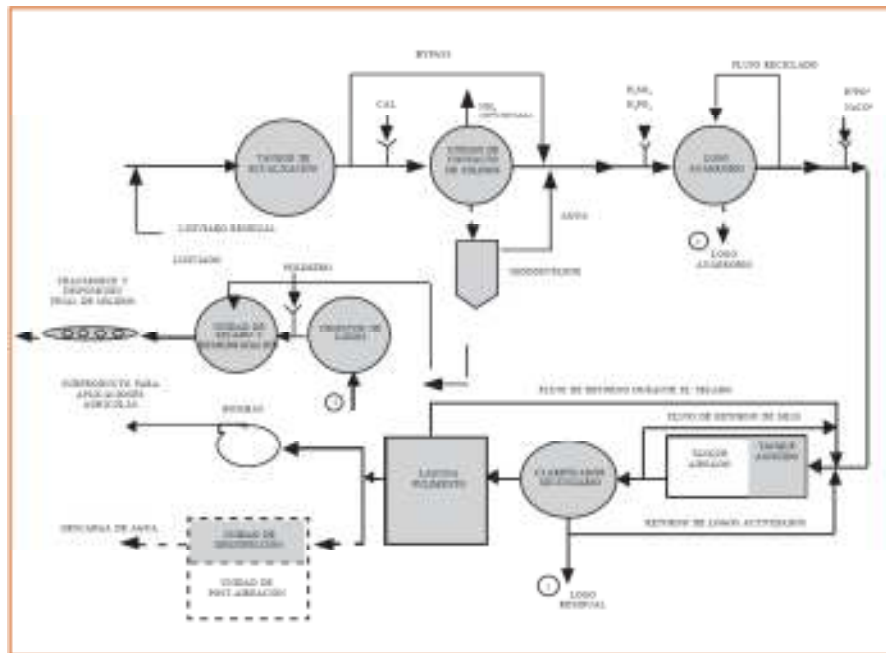
Para lixiviados con relaciones DQO/DBO muy elevadas, diversos procesos de oxidación avanzada pueden ser aplicados, entre los que se encuentran fotooxidación, ozonización, fotocátalisis, foto-fenton (proceso Fenton). (J.Wiszniowski, et al., 2006), (Giraldo, 2001).

Los principales problemas esperados para el tratamiento de lixiviados se relacionan con la acumulación de precipitados, la toxicidad del amoníaco y metales pesados para los microorganismos, la presencia de COV's, la formación de espumas y el exceso de materia orgánica. Al volatilizar o aspersar los lixiviados se exporta la contaminación a otros lugares.

En un tren clásico de tratamiento, existe una etapa previa al tratamiento biológico que permite mejorar o acondicionar el lixiviado para someterlo a tratamientos fisicoquímicos y biológicos. Como se muestra en la figura 1, en la etapa previa se eleva el pH para favorecer la precipitación de metales, la volatilización de amoníaco y la sedimentación. Es necesario asegurar sistemas de regulación para disminuir los efectos de las variaciones de las cargas hidráulicas y orgánicas. Una vez se pase de la remoción fisicoquímica, se adiciona una fuente de fósforo que regule el pH a niveles típicos de un proceso biológico y que equilibre la proporción de nutrientes en el medio. La primera etapa del proceso biológico en general es anaerobia, ya que permite altas

remociones de DBO a bajos costos, pero debe asegurarse que la toxicidad del afluente no sea limitante para los microorganismos. En la segunda etapa aerobia, se logra una remoción final de DBO que permite lograr efluentes de buena calidad. La remoción de nitrógeno se efectúa mediante procesos de nitrificación, desnitrificación, volatilización. Los tratamientos propuestos se complementan con una etapa final en la que se remueven organismos patógenos (etapa de desinfección).

**Figura 2.1 Proceso clásico de tratamiento de lixiviados (Giraldo, 2001).**



De las tecnologías empleadas en tratamiento de lixiviados, la evaporación presenta eficiencias comparables con los demás procesos, con menos complejidad técnica, menor producción de lodos y aparentemente a menores costos. Los tratamientos con sistemas naturales también demuestran altas eficiencias y simplicidad de operación, a costo de altos tiempos de residencia que se traducen en requerimientos elevados de terrenos (Nivala, et al., 2007).

Adicional a los contaminantes antes mencionados, los lixiviados contienen ácidos húmicos, compuestos xenobióticos y sales inorgánicas. Los procesos de remoción biológica de nitrógeno son eficientes y económicos, sin embargo, estos procesos se ven inhibidos por la presencia de hidrocarburos poliaromáticos (HPA's), halógenos orgánicos absorbibles (AOX's) y bifenoles policlorados (BPC's). La remoción de compuestos nitrogenados se hace muy difícil para lixiviados estables, en los que predominan los compuestos como el

humus. Los tratamientos como el *stripping*, coagulación, floculación, son generalmente costosos y de difícil manejo, y se usan principalmente como pretratamiento. (Gu, et al., 2006), (Cheung, et al., 1997).

El tratamiento con sustancias adsorbentes, como los carbones activados y los biosorbentes, solo transfieren la contaminación a otro lugar y no solucionan el problema ambiental (Kargi, et al., 2003). Los procesos avanzados de oxidación (PAO) son eficientes para el tratamiento de compuestos orgánicos recalcitrantes, pero su aplicación en procesos a gran escala no es económicamente aceptable.

Los niveles de tratamiento requeridos en el lixiviado dependen del fin que se pretenda dar al efluente tratado, ya sea para descarga en sistemas de recolección o para riego en suelos. Aunque algunos autores lo han mencionado como una posibilidad, el tratamiento conjunto de lixiviados y aguas residuales domésticas en una PTAR no es recomendable, ya que la presencia de sustancias contaminantes, halogenados y metales pesados puede afectar de manera importante el lodo activado, o generaría un lodo que no podría usarse con fines agrícolas.

EL objetivo del tratamiento biológico es convertir la materia orgánica coloidal soluble y nutrientes (N-P-K-S-Ca) en tejido celular y compuestos estables gaseosos ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ), mediante la interacción de comunidades microbianas que con los contaminantes del medio. Actualmente existe la necesidad de pensar ingenierilmente en términos de comunidades dinámicas y no en cajas negras con organismos misteriosos. (J.Wiszniowski, et al., 2006).

La eficiencia de los procesos biológicos y las tasas de remoción dependen del grado de adaptación los microorganismos a su microambiente; El control de parámetros como el tiempo hidráulico de residencia (HRT), la relación de alimentación-microorganismos (F/M), el tiempo de residencia celular (llamado edad del lodo) y el índice de volumen de lodos (SVI), permiten optimizar las condiciones del entorno próximo del ecosistema celular. En este sentido, es importante mencionar que el uso de materiales de soporte en los reactores sobre los cuales crece la biomasa celular, mejoran las condiciones del microambiente; Las tasas de crecimiento son menores, pero la actividad y estabilidad de las enzimas se incrementa, y junto con el aumento considerable de la densidad celular, se alcanzan tasas de remoción muy altas (Ghannoum, et al., 2004).

Uno de los procesos empleados para el tratamiento de lixiviados por métodos biológicos es el uso de "reactores de lecho disperso" conocidos como "*moving*

*bed biofilm reactors*". (Chen, et al., 2007) muestra la implementación de un proceso anaerobio-aerobio para la remoción simultánea de carbono y nitrógeno presente en un lixiviado. Obtuvieron remociones superiores al 90% para carbono (principalmente en la etapa anaerobia) y superiores al 97% para amonio. Este tipo de sistemas combina los reactores de lodos activados y de lecho fluidizado, en los que se logra una alta capacidad de remoción, tolerancia los cambios en la carga orgánica y mantenimiento de una alta densidad celular con bajas producciones de lodos, evitando problemas de *bulking*.

En el país se reportan varios casos concretos de investigaciones a nivel piloto de remoción de nitrógeno. (Contreras, et al., 2006) Compara un sistema de biodiscos, con el que reportan eficiencias de remoción superiores al 90%, y reactor tipo UASB con el que se logran remociones superiores al 52% (esta baja eficiencia se atribuye a la mala operación del sistema). (Chavarro, et al., 2006) utilizan un sistema de filtros de flujo ascendente anaerobio en serie con el que logran eficiencias de remoción comprendidas entre el 60% y 90% con tiempos de retención de 1.2 días.

### 3. ÁREA DE INFLUENCIA DEL ESTUDIO

El Relleno Sanitario y Granja Ambiental los Saltos de Marinilla tiene un sistema de áreas de influencia que va desde lo municipal a lo puntual, con una franja lineal de conexión entre ambas delimitada por la vía intermunicipal de Marinilla – El Peñol. En dichas áreas el proyecto afecta de manera directa o indirecta, positiva o negativa, sus componentes físico-bióticos y sociales.

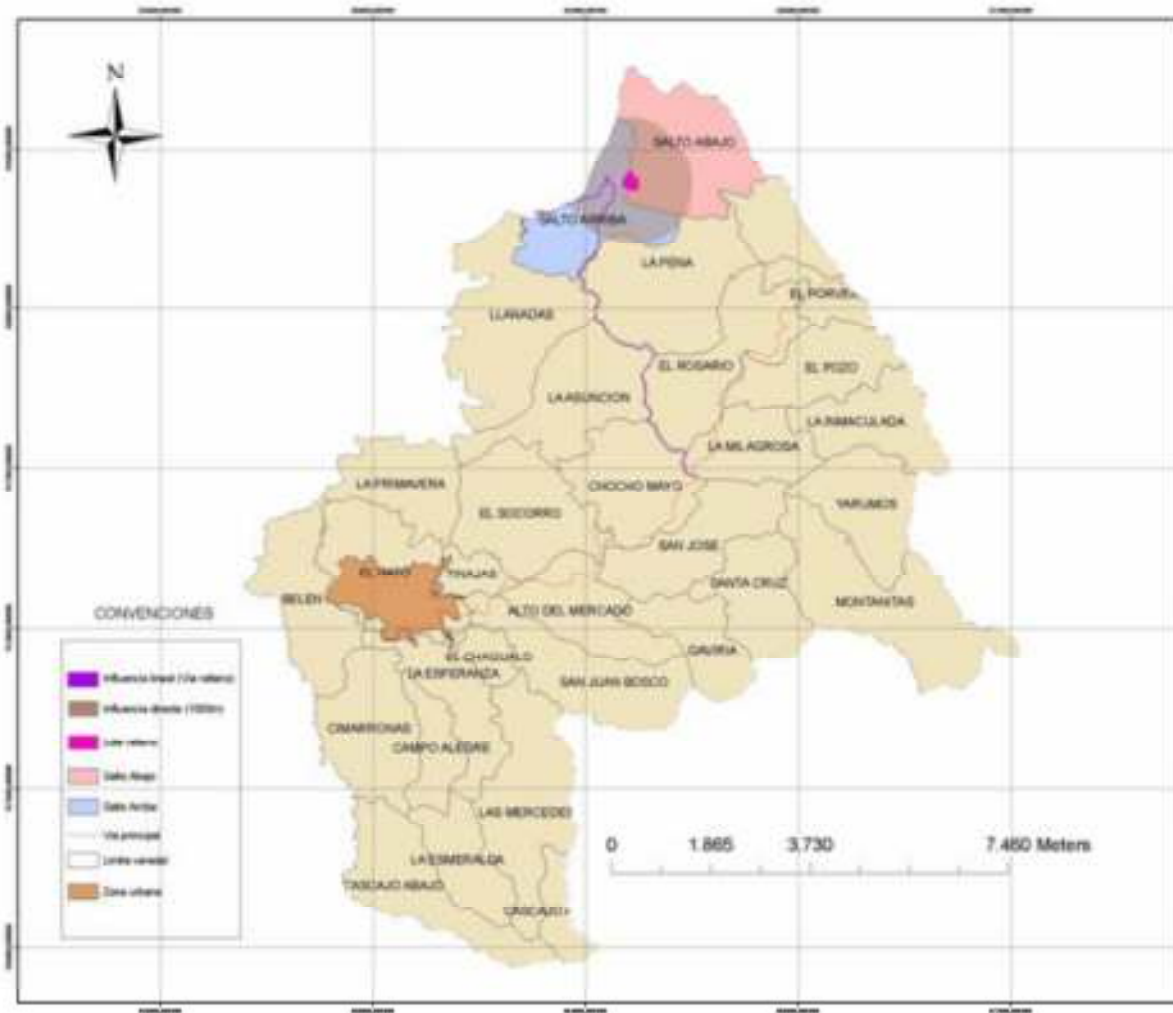
El área de influencia local, corresponde al sector del municipio que produce los diferentes residuos sólidos, en su mayor parte de tipo residencial, seguido del comercial e industrial, que constituye la materia prima del proyecto. Es importante anotar que los residuos dispuestos en el actual relleno corresponden al 70% de todos los recolectados de la población de Marinilla; sin embargo, según las metas establecidas en el PGIRS municipal, este porcentaje de aprovechamiento variaría del 30% actual a un 80% a 15 años.

El *área de influencia lineal* (área directa) coincide con la franja de la vía (5m a lado y lado de ésta) que es afectada por el proyecto en forma bi-direccional. Esta vía tiene unos 18 Km, de los cuales, 8Km son por carretera destapada desde el alto del Chocho hasta el lote. Esta área se ve afectada especialmente en su tramo destapado por el paso de los vehículos recolectores que generan ruidos, material particulado y gases.

El *área de influencia directa* corresponde a las veredas circundantes al emplazamiento del proyecto pertenecientes a Salto Arriba y Salto Abajo, cuya principal vocación es agropecuaria.

Finalmente, el área de influencia puntual o de carácter mediato, es el lote de la Finca “El Lago”, donde se emplazará el proyecto. Sin embargo, para efectos de este estudio, se describe por cada uno de los componentes ambientales, las respectivas áreas de influencia, directa e indirecta, que puede ser en primer caso, a nivel del predio o, veredal y municipal para el sistema social; y para el segundo de tipo veredal.

Figura 3.1. Área de influencia de la zona de estudio



\*Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – SANEAR S.A, 2006.

**Tabla 3.1. Identificación de Áreas de Influencia Ambiental**

| MEDIO   | COMPONENTE                   | ELEMENTO  | AREA DE INFLUENCIA AMBIENTAL                                    |  |
|---------|------------------------------|---|---|--|
|         |                              |   | DIRECTA   | INDIRECTA  |
| FÍSICO  | Geomorfológico               | Elementos del paisaje   | Área de emplazamiento del proyecto                              | Veredas circundantes Los Saltos (Salto Arriba y Salto Abajo)             |
|         | Suelo                        | Cobertura vegetal   | Área de emplazamiento del proyecto                              |  |
|         | Paisaje                      | Aspecto visual  | Área de emplazamiento del proyecto                              | Veredas circundantes Los Saltos  |
|         | Hidrológico                  | Calidad de aguas superficiales                                  | Quebrada El Rey y microcuenca Honda                             | Cuenca Alta del Rionegro   |
|         | Hidrogeológico               | Calidad de aguas subterráneas                                   | Quebrada El Rey y microcuenca Honda                             | Cuenca Alta del Rionegro   |
|         | Geotécnico                   | Estabilidad del suelo   | Área de emplazamiento del proyecto y vía de acceso al lote      |  |
|         | Atmosférico                  | Calidad del aire  | Área de emplazamiento del proyecto y vía Alto del Chocho – lote | Veredas circundantes Los Saltos  |
| Ruido   |                              | Área de emplazamiento del proyecto y vía Alto del Chocho – lote | Veredas circundantes Los Saltos                                 |  |
| BIÓTICO | Flora terrestre              | Diversidad florística   | Área de emplazamiento del proyecto                              | Veredas circundantes Los Saltos y la vía de acceso al sitio del relleno. |
|         | Fauna                        | Diversidad faunística   | Área de emplazamiento del proyecto                              | Veredas circundantes Los Saltos y la vía de acceso al sitio del relleno. |
|         | Flora acuática               | Diversidad de flora acuática                                    | Nacimientos de la quebrada El Rey y microcuenca Honda           | Cuenca Alta del Rionegro   |
|         | Macroinvertebrados acuáticos | Bioindicadores acuáticos  | Nacimientos de la quebrada El Rey y microcuenca Honda           | Cuenca Alta del Rionegro   |
| SOCIAL  | Demográfico                  | Población, salud, servicios, educación                          | Municipio de Marinilla (local), y Veredas Los Saltos            |  |
|         | Económico                    | Tierras, empleo, actividades económicas                         | Municipio de Marinilla (local), y Veredas Los Saltos            |  |
|         | Cultural                     | Tejido social, identidad, arraigo, patrones de comportamiento   | Municipio de Marinilla (local), y Veredas Los Saltos            |  |
|         | Político-organizativa        | Organizaciones comunitarias, lazos sociales                     | Municipio de Marinilla (local), y Veredas Los Saltos            |  |

\*Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – SANEAR S.A, 2006.

#### **4. ACTIVIDADES PROPIAS DE LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO Y GENERACIÓN DE LIXIVIADOS**

Durante la operación de los rellenos sanitarios, existen diferentes actividades que contribuyen a aumentar las cargas contaminantes y a mezclar diferentes tipos de sustancias, haciendo más difícil el tratamiento de los lixiviados generados. En este capítulo se pretenden identificar las actividades propias de la operación del relleno sanitario que dificultan su posterior tratamiento.

Con el propósito de identificar con precisión las actividades que contribuyen a la generación de lixiviados en el relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, se realizaron visitas donde los ingenieros encargados, ampliaron la información que se tenía frente a la operación que se lleva a cabo dentro de las instalaciones.

Se consultaron además, otras fuentes como el estudio de evaluación de impactos ambientales, la guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales (Jaramillo J., et al 2002) y la guía básica para el manejo ambiental de rellenos sanitarios (Programa Nacional de Competitividad, Costa Rica 2007).

En el estudio de evaluación de impactos ambientales suministrado por la Empresa de Servicios Públicos de Aseo San José de la Marinilla, se consideraron tres etapas para la elaboración del proyecto: construcción de obras civiles y adecuación del terreno, construcción y operación, y clausura.

Para efectos de análisis de la generación y tratamiento de lixiviados, se detallaron en la Tabla 4.1., las actividades correspondientes a las etapas de construcción y operación, y clausura, ya que en ellas se hacen necesarias medidas de gestión para el tratamiento de lixiviados.

Luego de analizar las actividades del proyecto se determinó que en la etapa de construcción y operación, la actividad 8. Disposición de residuos sólidos, debe tener especial atención, ya que allí se producen los lixiviados. Dependiendo de las prácticas que se realicen en esta etapa, los lixiviados adquieren sus características fisicoquímicas y microbiológicas, por lo que se recomienda hacer una separación exhaustiva, para eliminar desechos con contenido tóxico, metales pesados y compuestos recalcitrantes.

**Tabla 4.1. Identificación y descripción de las actividades susceptibles de producir impactos en las etapas de construcción y operación, y clausura.**

| ETAPAS DEL PROYECTO      | ACTIVIDADES   | DESCRIPCIÓN  |
|--------------------------|---|--|
| CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN | 1. Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso          | Obras para el mantenimiento de las vías de acceso (externas e internas) al sitio de disposición de residuos; además en la medida que se intervienen las áreas es necesaria la construcción de nuevas vías.   |
|                          | 2. Excavaciones y disposición del suelo                           | Comprende la remoción de las capas del suelo (seco y húmedo) dependiendo de la cantidad de desechos a depositar y de la cantidad de material de cobertura que se requiere; y el adecuado manejo de la cobertura de los residuos durante la operación.  |
|                          | 3. Construcción del sistema de drenaje                            | Incluye la construcción del filtro recolector de aguas subterráneas (cota 2088 msnm) e instalación de las tuberías que permiten encausarlas a la quebrada El Rey; además de la construcción de las cunetas de recolección de aguas lluvias en cada plataforma y la disposición de sus redes de conducción.   |
|                          | 4. Establecimiento de zonas de protección y distancias de retiros | Consiste en la construcción de un jarillón/dique para proteger parte de la zona húmeda del lote que corresponde al nacimiento de la quebrada El Rey.   |
|                          | 5. Adecuación de zonas de disposición de residuos                 | Comprende: -Impermeabilización del área de disposición, donde se dispone una capa de arcilla, aproximadamente de 0.30 metros, sobre todo el terreno; para luego colocar una cubierta de geomembrana y así impermeabilizar el fondo del relleno. Esta impermeabilización se hace tanto para el fondo como para los taludes.<br>-Colocación y nivelación de capas, una de arena de 0.30 metros y luego una de grava de 0.20 metros para la posterior disposición de los residuos sólidos. También incluye la adecuación de los taludes del terreno con pendientes de 0.3:1 (H:V) de tal manera que no causen erosión y puedan darle buena estabilidad al terreno y al relleno. |
|                          | 6. Construcción del filtro recolector de lixiviados               | Se construye, por etapas, un filtro y se instalan las tuberías de conducción de lixiviados que permitirán llevarlos a la red principal para luego conducirlos a la planta de tratamiento.  |
|                          | 7. Construcción de chimeneas de gases                             | Consiste en la construcción, por etapas, de chimeneas (tuberías verticales) para la conducción y extracción de gases originados por la descomposición de los residuos orgánicos.   |
|                          | 8. Disposición de residuos sólidos                                | Comprende la recepción, registro, transporte interno, vaciado, y compactación de los residuos sólidos en forma definitiva, disponiéndolos por día en las celdas diseñadas. Para esta etapa se deben implementar las medidas para el monitoreo y manejo de gases, material particulado, y lixiviados.   |
|                          | 9. Construcción y adecuación de celdas                            | Conformación y adecuación de celdas, día a día, según las indicaciones del diseño. Las celdas planteadas en el diseño tienen áreas que varían de 25 a 62 m <sup>2</sup> /día, y alturas de 1.5 a 2.3 metros, según la cantidad diaria de residuos sólidos a disponer.  |
|                          | 10. Manejo de material de cobertura en llenos                     | Esta actividad consiste en la colocación diaria de 0.10 metros de cobertura sobre los residuos dispuestos.   |
|                          | 11. Manejo y tratamiento de residuos líquidos                     | Incluye el tratamiento y vertido de las aguas residuales producidas por los trabajadores del relleno, además del manejo de los lixiviados generados por la descomposición de los residuos sólidos que consiste básicamente en el monitoreo, tratamiento y descarga de estos.   |
|                          | 12. Operación y mantenimiento de                                  | Corresponde a las labores de operación y mantenimiento de  |

| ETAPAS DEL PROYECTO | ACTIVIDADES  | DESCRIPCIÓN  |
|---------------------|--|--|
|                     | maquinaria y equipos   | los vehículos recolectores/compactadores y del buldózer (D4-40a) que son de circulación permanente en el relleno.  |
|                     | 13. Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno          | Convocatoria, selección, capacitación y vinculación de personal idóneo para las diversas actividades de operación del relleno y de la granja ambiental. También incluye asignación de recursos, toma de decisiones oportunas, manejo y suministro de los insumos y materiales requeridos para la ejecución de las actividades y obras del relleno y de la granja, dentro de las cuales están los diversos cursos de capacitación ofrecidos a la comunidad del municipio. Además comprende las actividades para informar y negociar con la comunidad en los procesos de participación y resolución de conflictos. |
| CLAUSURA            | 1. Cierre del relleno  | Planeación del cierre del relleno que consiste en determinar la fecha y hora, notificar a los entes reguladores, y establecer canales de notificación a la comunidad. Además comprende la colocación de una capa de cobertura final de residuos y de la cobertura vegetal para la posterior revegetalización de la zona.   |
|                     | 2. Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados | En el cierre y posclausura, los residuos se continúan descomponiendo y siguen interactuando con el ambiente por un período prolongado; por tal razón es necesario mantener el sistema de manejo del biogás final, el monitoreo y tratamiento de los lixiviados y el programa de monitoreo de aguas.  |
|                     | 3. Funcionamiento granja ambiental                               | Incluye la asignación de recursos, manejo y suministro de los insumos y materiales requeridos para la ejecución de las actividades y obras de la granja. Además incluye las acciones que se llevarán a cabo en el mediano y largo plazo, con el propósito de darle un nuevo uso a las áreas ocupadas por el relleno.   |

\*Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – SANEAR S.A , 2006.

También cabe resaltar que en la actividad 11. Manejo y tratamiento de residuos líquidos, se deben incorporar tecnologías adecuadas, según las características del lixiviado. Esta actividad es el producto del plan de manejo de residuos sólidos, por tanto se obtendrán mejores resultados, si se hace un proceso de separación minucioso y se realizan tratamientos específicos para cada tipo de residuo. En el caso ideal, la mayor cantidad de los residuos se deben llevar a plantas de reciclaje, que se encarguen de llevar nuevamente estos materiales a las cadenas productivas.

En la Tabla 4.2., se presentan algunas metodologías empleadas para el tratamiento de lixiviados, dependiendo de sus características.

En la etapa de clausura, la actividad 2. Programas de monitoreo, control de gases, aguas y lixiviados, tiene un fuerte impacto social, ya que se planea construir una granja ambiental y por tanto se puede ver perjudicada la salud de la comunidad. La descomposición de los residuos depositados en el relleno, se sigue presentando en los años posteriores a su clausura, por tanto se hace necesario diseñar un tratamiento de lixiviados in situ, preferiblemente aplicando estrategias de biodigestión para aprovechar el gas metano generado.

**Tabla 4.2. Tratamiento para lixiviados de acuerdo a las características del lixiviado.**

| Metodología   | Características del lixiviado  | Referencia   |
|---|--|--|
| Procesos de oxidación avanzada (fotooxidación, ozonización, fotocátalisis, foto-fenton) | Relación DQO/DBO muy elevada.<br>Recalcitrantes.                               | [Wiszniowski et al., 2006]<br>[Giraldo et al., 2001]   |
| Pretratamientos como el <i>Stripping</i> , floculación y coagulación.                   | Alto contenido de ácidos húmicos, compuestos xenobióticos y sales inorgánicas. | [Gu, et al., 2006]<br>[Cheung, et al., 1997]           |
| Evaporación   | Lixiviados viejos.   | [Nivala, et al., 2007]                                 |
| Tratamiento con sustancias absorbentes (Carbón activado y biosorbentes)                 | Lixiviados viejos.   | [Kargi, et al., 2003]                                  |
| Tratamiento biológico   | Alto contenido de materia orgánica coloidal soluble y nutrientes (N-P-K-S-Ca). | [Wiszniowski et al., 2006]<br>[Ghannoum, et al., 2004] |

## 5. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LIXIVIADOS

La caracterización fisicoquímica se realizó en cuatro puntos: el primero en la entrada a la planta, el segundo en la salida de la planta, el tercer punto antes de ingresar a la biobarrera secuencial y por último a la salida de la biobarrera.

Los protocolos de los análisis de los parámetros reportados, se realizaron de acuerdo con los recomendados por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21<sup>th</sup>, estandarizados y validados en el CENSA.

Laboratorio acreditado por el IDEAM para los parámetros: pH, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda química de oxígeno (DQO-O<sub>2</sub>), Sólidos Suspendidos Totales, Aceites y Grasas, Magnesio, Sodio, Potasio, Nitratos, Sólidos Totales, Turbiedad, Nitrógeno Total Kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, Cloruros, Dureza total, Aluminio, Cromo, Cobre, Plomo, Zinc, Sólidos Disueltos Totales, Detergentes, Calcio disuelto, Coliformes totales, Coliformes fecales, *Escherichia coli* y sulfatos según Resolución 0031 del 19 de Febrero de 2008.

**Tabla 5.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados (Tomado de Análisis de Aguas – Cornare 2010)**

### Entrada a la planta

| Parámetro  | Concentración | Método de Análisis                 |
|--|---------------|------------------------------------|
| Temperatura (°C)   | 20,0          | Termométrico / Medición en campo   |
| pH (Unidades de pH)  | 7,99          | Electrométrico / Medición en campo |
| Demanda química de oxígeno total (mg/L DQO-O <sub>2</sub> )  | 2392          | MicroDQO                           |
| Demanda Bioquímica de oxígeno total (mg/L DBO <sub>5</sub> ) | 305           | Incubación 5 días / Oxímetro       |
| Sólidos totales (mg/L)                                       | 6020          | Gravimétrico                       |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L)                           | 1222          | Gravimétrico                       |
| Caudal (L/s)   | 0,025         | Medición en campo                  |

## Salida de la planta

| Parámetro  | Concentración | Método de Análisis               |
|--|---------------|----------------------------------|
| Temperatura (°C)   | 21            | Termométrico / Medición en campo |
| pH (Unidades de pH)  | 8,07          | Electrométrico                   |
| Demanda química de oxígeno total (mg/L DQO-O <sub>2</sub> )  | 977           | MicroDQO                         |
| Demanda Bioquímica de oxígeno total (mg/L DBO <sub>5</sub> ) | 139           | Incubación 5 días /Oxímetro      |
| Sólidos totales (mg/L)                                       | 4663          | Gravimétrico                     |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L)                           | 254           | Gravimétrico                     |
| Caudal (L/s)   | 0,025         | Medición en campo                |
| Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N)             | 0,166         | Reducción Cadmio - Cobre         |
| Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N)             | 0,944         | Diazotización                    |
| Nitratos + Nitritos (mg/L - N)                               | 1,16          | Diazotización                    |

## Análisis de metales pesados por polarografía

### Condiciones del análisis

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Equipo:</b>               | Polarografo va processor 693 con va Stand 694. Metrohm |
| <b>Electrodo de trabajo:</b> | HMED (Electrodo de mercurio de gota suspendida)        |
| <b>Potencial inicial:</b>    | -1500 mV   |
| <b>Potencial final:</b>      | 150 mV   |

| Parámetro                      | Concentración | Método de Análisis |
|--------------------------------|---------------|--------------------|
| Cadmio (µg/L Cd)               | 4,63          | Voltametría        |
| Cromo (µg/L Cr <sup>+6</sup> ) | <0,146        | Voltametría        |
| Zinc (µg/L Zn)                 | 16,0          | Voltametría        |
| Plomo (µg/L Pb)                | 105,3         | Voltametría        |
| Niquel (µg/L Ni)               | <0,127        | Voltametría        |

## 6. DESARROLLO DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA BBS

Con el propósito de evaluar los impactos ambientales generados por la operación del relleno y la inadecuada disposición de los lixiviados, se ha propuesto emplear la metodología de Connesa Fernandez–Vitora (1997) modificada. Es necesario analizar en primera instancia el estado actual de la zona del relleno y la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados, así como las actividades propias de la operación del relleno sanitario, para evidenciar las principales interacciones entre actividades y dimensiones ambientales.

El proceso de la evaluación de impactos ambientales, partirá entonces de la identificación de estas interacciones, para posteriormente evaluar y clasificar los principales impactos ambientales, este proceso se realizará a partir de la cuantificación de la Importancia, medida en función de los siguientes atributos<sup>1</sup>:

**Naturaleza (+ ó -).** El signo del impacto hace alusión al carácter beneficioso (+) o perjudicial (-), de las actividades del rellenos que actúan sobre las diferentes dimensiones ambientales.

**Intensidad (I).** Este término se refiere al grado de incidencia de la actividad del relleno sobre el componente ambiental, en el ámbito en que actúa. El rango de valoración estará comprendido entre:

| INTENSIDAD (I) |       |
|----------------|-------|
| Efecto         | Valor |
| Baja           | 1     |
| Media          | 2     |
| Alta           | 4     |
| Muy alta       | 8     |

---

<sup>1</sup> V. Connesa- Vitara. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. 3era Edición.1997.

**Reversibilidad (RV).** Se refiere a la posibilidad de reconstrucción del factor ambiental impactado por el relleno sanitario, es decir, de retornar a las condiciones iniciales por medios naturales, una vez se controle la inadecuada disposición de lixiviados. El rango de valoración está comprendido entre:

| REVERSIBILIDAD (RV) |       |
|---------------------|-------|
| Efecto              | Valor |
| Corto Plazo         | 1     |
| Mediano Plazo       | 2     |
| Irreversible        | 4     |

**Efecto (EF).** Este atributo se refiere a la relación causa- efecto, es decir, la forma de manifestación del impacto sobre un componente ambiental, como consecuencia de una actividad de operación del relleno. Este atributo toma los siguientes valores:

| EFECTO    |       |
|-----------|-------|
| Efecto    | Valor |
| Indirecto | 1     |
| Directo   | 4     |

**Recuperabilidad (MC).** Es la posibilidad de reconstrucción total o parcial del componente afectado, como consecuencia de la actividad del relleno, es decir, retornar a las condiciones iniciales por medio de intervención humana.

| RECUPERABILIDAD                 |       |
|---------------------------------|-------|
| Efecto                          | Valor |
| Recuperable de manera inmediata | 1     |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Recuperable a medio plazo | 2 |
| Mitigable                 | 4 |
| Irrecuperable             | 8 |

Finalmente, por medio de la Matriz de Valoración de Importancia, se realizará una valoración relativa de la importancia de los impactos identificados, está permitirá priorizar las actividades impactantes y factores más impactados debido a la ejecución de las diferentes actividades del relleno sanitario, tomando en cuenta las unidades de importancia de ponderación de los factores ambientales.

La metodología para ponderar estos factores se basa en la evaluación ambiental de cada una de las dimensiones, de esta manera se le dio a cada componente un peso ponderal, expresado en unidades de importancia (UIP), y el valor asignado resulta de de la distribución relativa de 1000 unidades asignada al total de los componentes ambientales. (Medio ambiente de calidad optima, Estevan Bolea, 1984).

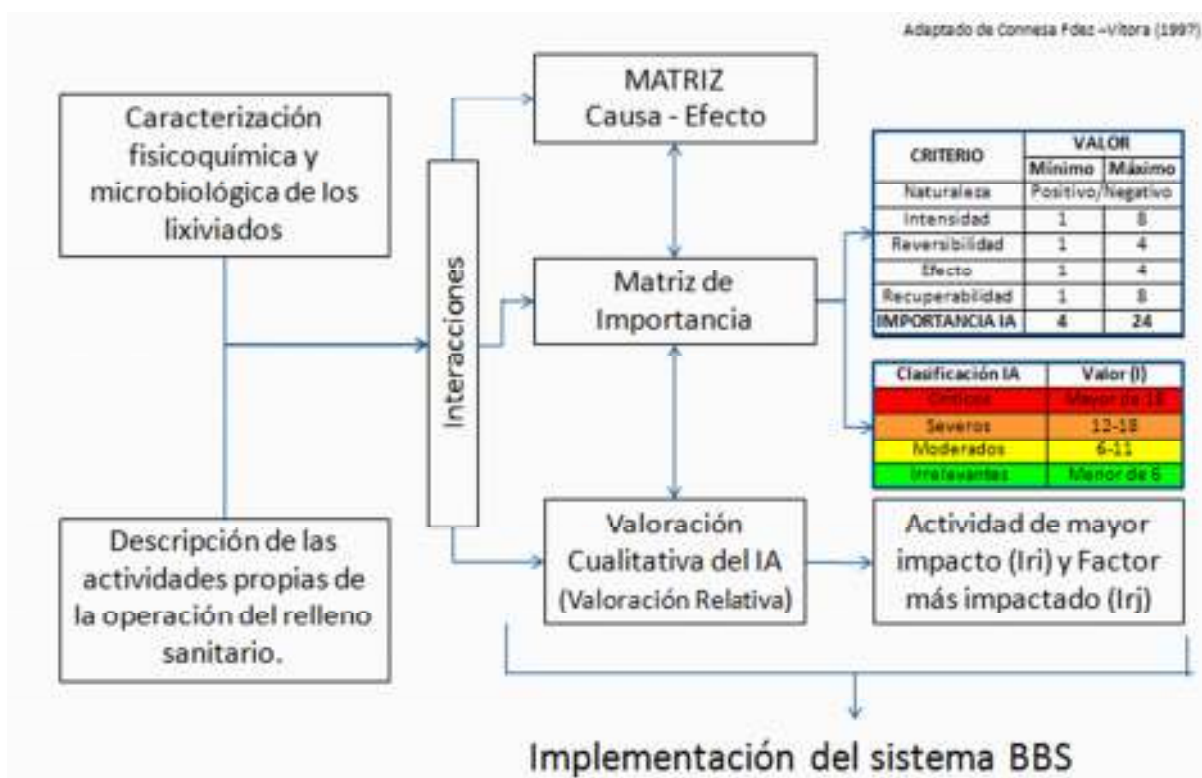
En este caso, se le asigno 450 unidades al componente social, 350 unidades al componente físico y 200 unidades al componente biótico, para un total de 1000 unidades.

La matriz de importancia permite establecer cuáles son las actividades de la operación del relleno más impactantes o agresivas (altos valores negativos) y los componentes ambientales impactados en mayor o menor grado por las estas actividades.

Finalmente con la implementación de la biobarrera secuencial se busca minimizar el impacto ambiental generado por la inadecuada disposición de los lixiviados del relleno sanitario la pradera.

A continuación se presentan la ruta metodológica planteada, conforme lo descrito en los párrafos anteriores.

**Figura 6.1. Metodología de evaluación ambiental para la implementación del sistema BBS**



### 6.1 INTERACCIONES ENTRE LAS ACTIVIDADES PROPIAS DE LA OPERACIÓN DEL RELLENO Y LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LIXIVIADOS.

Existe una relación directa entre las actividades propias de la operación del relleno sanitario y la calidad de los lixiviados, debido a que estos son el producto de la descomposición del material depositado.

Por tratarse de un relleno sanitario rural, y apoyados en la caracterización que se le realiza a los residuos sólidos recolectados, se ha estimado que un 75% de estos, corresponde a residuos orgánicos fácilmente biodegradables como son: residuos de alimentos, desperdicios del sector agrícola, residuos de poda de árboles y maderas; el 10% corresponde a material reciclable como: bolsas plásticas, papel, cartón, vidrio, latas, empaques metalizados, papel aluminio y caucho; el 15% restante está constituido por materiales no reciclables como: residuos higiénicos, residuos hospitalarios, baterías, residuos tecnológicos e industriales.

De la anterior caracterización se pueden desarrollar varias estrategias para mejorar la calidad de los lixiviados y aumentar la vida útil del relleno sanitario, como son:

1. Sensibilizar a la población sobre los beneficios de la separación de los residuos sólidos mediante campañas socioambientales, e iniciar su separación en tres grupos: orgánicos, reciclables y no reciclables.
2. Realizar semanalmente una ruta de recolección de material reciclable por el municipio y establecer dentro de la granja ambiental un acopio que permita devolver parte de este a las cadenas productivas.
3. Crear en el municipio de Marinilla un sitio para recolección de pilas usadas, ya que los materiales de desecho generados por estas son altamente tóxicos.
4. Crear incentivos en las tasas retributivas de aseo para las comunidades rurales que implementen el compostaje y disminuyan la producción de residuos sólidos orgánicos.
5. Disponer adecuadamente los residuos peligrosos provenientes de la industria o de hospitales, evitando su mezcla con los demás residuos.

## **6.2 MATRIZ CAUSA – EFECTO**

Siguiendo la ruta metodológica propuesta en la Figura 6.1, se analizaron las interacciones existentes entre la descripción de las actividades propias de la operación del relleno sanitario y la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados.

A partir de esta relación y en base al estudio de evaluación de impacto ambiental realizado por la empresa SANEAR. S.A, se obtuvo la Tabla 6.1. Matriz de identificación de los componentes ambientales que pueden ser afectados por el proyecto, y se establecieron los indicadores para cada medio de la Tabla 6.2. Identificación de elementos ambientales susceptibles de recibir impactos y sus indicadores.

Tabla 6.1. Matriz de identificación de los componentes ambientales que pueden ser afectados por el proyecto.

| ETAPAS DEL PROYECTO      | ACTIVIDADES   | COMPONENTES* | MEDIO          |       |        |                            |                |            |                                    |                 |       |                |                              |             |           |          |                       |   |
|--------------------------|---|--------------|----------------|-------|--------|----------------------------|----------------|------------|------------------------------------|-----------------|-------|----------------|------------------------------|-------------|-----------|----------|-----------------------|---|
|                          |   |              | FISICO         |       |        |                            |                |            |                                    | BIÓTICO         |       |                |                              | SOCIAL      |           |          |                       |   |
|                          |   |              | Geomorfológico | Suelo | Pasaje | Hidrologico (calidad agua) | Hidrogeológico | Geotécnico | Atmosférico (calidad aire y ruido) | Flora terrestre | Fauna | Flora acuática | Macroinvertebrados acuáticos | Demográfico | Económico | Cultural | Político-organizativa |   |
| CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN | 1. Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso          |              | X              | X     | X      | X                          | X              | X          | X                                  | X               | X     | X              | X                            | X           | X         | X        |                       |   |
|                          | 2. Excavaciones y disposición del suelo                           |              | X              | X     | X      | X                          | X              | X          | X                                  | X               | X     | X              | X                            |             |           | X        |                       |   |
|                          | 3. Construcción del sistema de drenaje                            |              |                | X     |        | X                          | X              | X          |                                    |                 |       | X              | X                            |             | X         | X        |                       |   |
|                          | 4. Establecimiento de zonas de protección y distancias de retiros |              | X              | X     | X      | X                          | X              | X          |                                    | X               | X     | X              | X                            |             |           |          |                       |   |
|                          | 5. Adecuación de zonas de disposición de residuos                 |              | X              | X     | X      | X                          | X              | X          | X                                  | X               | X     | X              | X                            |             |           |          |                       |   |
|                          | 6. Construcción del filtro recolector de lixiviados               |              |                |       |        | X                          | X              | X          |                                    | X               | X     | X              | X                            |             |           |          |                       |   |
|                          | 7. Construcción de chimeneas de gases                             |              |                |       | X      |                            |                | X          | X                                  |                 |       |                |                              |             | X         | X        |                       |   |
|                          | 8. Disposición de residuos sólidos                                |              | X              | X     | X      | X                          | X              | X          | X                                  | X               | X     | X              | X                            | X           | X         | X        |                       | X |
|                          | 9. Construcción y adecuación de celdas                            |              | X              |       | X      |                            |                | X          | X                                  |                 |       |                |                              |             |           |          |                       |   |
|                          | 10. Manejo de material de cobertura en llenos                     |              |                | X     | X      | X                          |                | X          | X                                  |                 |       |                |                              |             |           |          |                       |   |
|                          | 11. Manejo y tratamiento de residuos líquidos                     |              |                |       |        | X                          | X              | X          |                                    | X               | X     | X              | X                            |             |           |          |                       |   |
|                          | 12. Operación y mantenimiento de maquinaria y equipos             |              |                | X     | X      | X                          | X              |            | X                                  | X               | X     | X              | X                            | X           |           |          |                       |   |
|                          | 13. Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno           |              |                |       |        |                            |                |            |                                    |                 |       |                |                              |             |           | X        | X                     | X |

|  |             | MEDIO        |                |                       |         |                             |                |            |                                    |                 |       |                |                              |             |           |          |                       |
|--|-------------|--------------|----------------|-----------------------|---------|-----------------------------|----------------|------------|------------------------------------|-----------------|-------|----------------|------------------------------|-------------|-----------|----------|-----------------------|
|  |             | FISICO       |                |                       |         |                             |                |            | BIÓTICO                            |                 |       |                | SOCIAL                       |             |           |          |                       |
| ETAPAS DEL PROYECTO  | ACTIVIDADES | COMPONENTES* | Geomorfológico | Suelo                 | Paisaje | Hidroológico (calidad agua) | Hidrogeológico | Geotécnico | Atmosférico (calidad aire y ruido) | Flora terrestre | Fauna | Flora acuática | Macroinvertebrados acuáticos | Demográfico | Económico | Cultural | Político-organizativa |
|  |             |              | CLAUSURA       | 1. Cierre del relleno |         |                             |                | X          | X                                  |                 | X     | X              | X                            | X           | X         | X        | X                     |
| 2. Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados |             |              |                |                       | X       | X                           | X              | X          |                                    |                 |       |                |                              |             |           |          |                       |
| 3. Funcionamiento granja ambiental                               |             |              |                |                       |         |                             |                |            |                                    |                 |       |                |                              | X           | X         | X        | X                     |

\*Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – SANEAR S.A , 2006.

### 6.3 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE RECIBIR IMPACTO Y SUS INDICADORES

Tabla 6.2. Identificación de elementos ambientales susceptibles de recibir impactos y sus indicadores.

| MEDIO               | COMPONENTE       | ELEMENTO   | INDICADOR   | MEDIDA   |                             |
|---------------------|------------------|--|---|--|-----------------------------|
| FÍSICO              | Geomorfológico   | Superficie intervenida   | Comparación de áreas alteradas en planta  | Área modificada del lote/Área total del lote   |                             |
|                     | Suelo            | Lisos del suelo  | Comparación de áreas alteradas en planta para cada uno de los usos actuales del suelo | Áreas modificadas/Áreas originales cultivos o bosques  |                             |
|                     | Paisaje          | Calidad visual   | Comparación de áreas alteradas en planta  | Área modificada del lote/Área total del lote   |                             |
|                     | Hidrológico      | Calidad de aguas superficiales   | Demanda química de oxígeno (DQO)  |  | mgO <sub>2</sub> /l         |
|                     |                  |  | Oxígeno disuelto  |  | mgO <sub>2</sub> /l         |
|                     |                  |  | Nitratos  |  | mgNO <sub>3</sub> /l        |
|                     |                  |  | Nitritos  |  | mgNO <sub>2</sub> /l        |
|                     |                  |  | Nitrógeno Amoniacal   |  | mg N-NH <sub>3</sub> /l     |
|                     |                  |  | Conductividad   |  | µmhos/cm <sup>2</sup>       |
|                     |                  |  | pH  |  | U de pH                     |
|                     |                  |  | Sólidos totales   |  | mg/l                        |
|                     |                  |  | Sólidos suspendidos   |  | mg/l                        |
|                     |                  |  | Sólidos disueltos   |  | mg/l                        |
|                     |                  |  | Cadmio  |  | mgCd/l                      |
|                     |                  |  | Cromo   |  | mgCr/l                      |
|                     | Plomo            |  | mgPb/l  |  |                             |
|                     | Níquel           |  | mgNi/l  |  |                             |
|                     | Hidrogeológico   | Dinámica fluvial   | Comparación de caudales de salida antes del proyecto y después del proyecto           |  | Caudal después/Caudal antes |
|                     |                  |  | Calidad de aguas subterráneas   | Nitratos   |                             |
|                     |                  | Nitritos   |   |  | mgNO <sub>2</sub> /l        |
|                     |                  | Nitrógeno Amoniacal  |   |  | mg N-NH <sub>3</sub> /l     |
|                     |                  | Conductividad  |   |  | µmhos/cm <sup>2</sup>       |
|                     |                  | pH   |   |  | U de pH                     |
| Sólidos totales     |                  |  |   | mg/l   |                             |
| Sólidos suspendidos |                  |  |   | mg/l   |                             |
| Sólidos disueltos   |                  |  |   | mg/l   |                             |
| Cadmio              |                  |  | mgCd/l  |  |                             |
| Cromo               |                  | mgCr/l   |   |  |                             |
| Plomo               |                  | mgPb/l   |   |  |                             |
| Níquel              |                  | mgNi/l   |   |  |                             |
| Geotécnico          | Estabilidad      | Excavaciones   |   | m <sup>2</sup>   |                             |
|                     |                  | Comparación de pendientes de excavación con las pendientes naturales preexistentes por zona y bancadas de excavación. Intervienen las variables tiempo y áreas protegidas. |   | (Pendientes excavación*Áreas con protección)/(pendientes naturales*alturas de las bancadas*tiempo de exposición) |                             |
| Atmosférico         | Calidad del aire | Material particulado (PST)   |   | µg/m <sup>3</sup>  |                             |
|                     |                  | Monóxido de carbono (CO)   |   | mg/m <sup>3</sup>  |                             |
|                     | Ruido            | Niveles de ruido   |   | dba  |                             |
| BIÓTICO             | Flora terrestre  | Especies colectadas  | Índices de diversidad, similitud, equidad, dominancia y riqueza.                      | Número de especies   |                             |
|                     | Fauna            | Especies observadas  | Diversidad, similitud, equidad, dominancia y riqueza.                                 | Número de especies   |                             |
|                     | Flora acuática   | Especies colectadas  | Diversidad, similitud, equidad, dominancia y riqueza.                                 | Número de especies   |                             |

| MEDIO  | COMPONENTE                   | ELEMENTO                    | INDICADOR  | MEDIDA   |
|--------|------------------------------|-----------------------------|--|--|
|        | Macroinvertebrados acuáticos | Especies colectadas         | Diversidad, similitud, equidad, dominancia y riqueza.  | Número de especies   |
| SOCIAL | Demográfico                  | Población                   | Desplazamiento-inmigración   | Número de personas que llegan o salen de la vereda   |
|        |                              | Salud                       | Enfermedades transmitidas por vectores y otras asociadas al relleno, presentes en la población | Número de personas enfermas y de enfermedades antes, durante y después del proyecto  |
|        |                              | Servicios                   | Calidad y cobertura en salud   | Disminución de la oferta y la calidad de los servicios de salud  |
|        |                              | Educación                   | Calidad y cobertura en educación   | Número de aspirantes nuevos a las escuelas   |
|        | Económico                    | Tierras                     | Valor de las tierras   | Precio en que se estima el m <sup>2</sup> del predio y la vivienda antes y después del proyecto  |
|        |                              | Empleo                      | Personas con vinculación a actividades diferentes a las tradicionales                          | Número de personas de las veredas vinculadas al proyecto   |
|        |                              | Actividades económicas      | Surgimiento de otras actividades productivas   | Número de nuevas actividades alternativas productivas y su rentabilidad a nivel social y económico   |
|        | Cultural                     | Tejido social               | Rompimiento de lazos comunitarios  | Manifestación de distanciamiento social entre grupos y personas de la comunidad  |
|        |                              | Identidad                   | Aculturación   | -Cambios en el comportamiento<br>-Registros del montaje de establecimientos públicos asociados al licor y otras actividades no tradicionales en la comunidad |
|        | Político-organizativa        | Organizaciones comunitarias | Fortalecimiento social y comunitario   | -Cantidad de reuniones, foros, encuentros y otras actividades<br>-Número de grupos y organizaciones nuevas   |
|        |                              | Proyección comunitaria      | Montaje y ejecución de nuevos proyectos  | Número y calidad de proyectos implementados  |

\*Fuente: Estudio de Impacto Ambiental – SANEAR S.A , 2006.

## 6.4 IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS IMPACTOS

Tabla 6.3. Identificación y descripción de los impactos del medio físico.

| MEDIO                             | IMPACTO  | DESCRIPCIÓN   |
|-----------------------------------|--|---|
| FISICO                            | Activación de procesos erosivos  | Se presenta una activación temporal de los procesos erosivos durante las operaciones de excavación en general. Se dice temporal si se emplean medidas de mitigación.  |
|                                   | Cambio en las geoformas  | Se afectan las formas que caracterizan el terreno y que revelan su constitución. Este impacto es más visible en las etapas preliminares y de construcción del relleno, y en menor grado en operación.   |
|                                   | Conservación de las geoformas y de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.   | Como resultado del establecimiento de zonas de protección y distancias de retiros, se preservan las formas del terreno y su integridad ya que se evitan procesos erosivos que pueden desencadenar en desestabilizaciones. También se conservan las coberturas de suelo presentes, el paisaje, las condiciones hidrológicas, hidrogeológicas y geotécnicas favorables. |
|                                   | Pérdida de las capas de suelo  | Hay remoción del suelo como efecto del proceso constructivo ya sea en la fase preliminar como en la de construcción y operación, que trae como consecuencia la generación de erosión de tipo laminar y concentrada. También afecta la hidrogeología y el ciclo hidrológico del lote del relleno.  |
|                                   | Alteración del paisaje   | Se alteran las unidades del paisaje como resultado de las excavaciones en las fases preliminares y de construcción y operación; también este se ve alterado por la disposición de residuos y la geometría final del relleno sanitario.  |
|                                   | Disminución de la calidad de aguas superficiales y subterráneas  | En cierto grado las aguas pueden verse alteradas por el principal agente contaminante que son los lixiviados, este efecto se mitigaría con las medidas de manejo ingenieriles como su conducción hacia el sitio de tratamiento de lixiviados y la separación entre aguas subterráneas provenientes de manantiales de estos líquidos mencionados.                      |
|                                   | Alteración del ciclo hidrológico   | Este ciclo (alteración del nivel freático y de la red de drenaje) se ve afectado por las excavaciones que rompen las líneas de flujos subterráneos, también al perderse la protección superficial del suelo se alteran las humedades del mismo.   |
|                                   | Establecimiento de condiciones geotécnicas favorables  | Esto se logra mediante la implementación de drenajes a las aguas subterráneas y superficiales, también al establecimiento de zonas de protección. También contribuye a estas condiciones la implementación de refuerzos en los taludes.   |
|                                   | Deterioro de las condiciones geotécnicas   | Esto se genera al efectuar las excavaciones propias de la geometría anterior a la construcción del relleno, como también el movimiento de tierras para la construcción de las vías.   |
|                                   | Restitución del paisaje  | La restitución del paisaje se presenta durante la etapafase de clausura al disponer/colocar un espesor de suelo y correspondiente capa vegetal.   |
| Alteración de la calidad del aire | Este impacto está asociado a la liberación de <i>materia particulada</i> a causa de la construcción de vías de acceso y de obras complementarias, el vaciado de residuos, la exposición de residuos sin compactar, y la explotación y manejo de material de cobertura.<br>La afectación a la calidad del aire también se presenta por la <i>generación de gases</i> que provienen de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos, y la producción de olores que tiene que ver con la emisión de estos gases y la de material particulado.<br>Por otro lado, el <i>incremento de los niveles de presión sonora</i> está asociado al tráfico automotor y a la operación de maquinaria y equipos. |   |

**Tabla 6.4. Identificación y descripción de los impactos del medio biótico.**

| MEDIO   | IMPACTO   | DESCRIPCIÓN  |
|---------|---|--|
| BIÓTICO | Perturbación de la flora terrestre  | Este impacto hace referencia a la disminución y fragmentación de lugares propios para el desarrollo, albergue, y alimentación de la fauna asociada a estos hábitats. También se altera las zonas de drenaje y regulación hídrica afectando la calidad y cantidad del recurso hídrico.<br>En la etapa de construcción de obras civiles y adecuación del terreno, es donde se presenta el mayor impacto a la flora terrestre, asociado al desarrollo de actividades como: Construcción de vías de acceso, retiro y disposición de la cobertura vegetal y descapote, y la construcción de obras complementarias.  |
|         | Disminución de la población de fauna  | La fauna asociada a estos hábitats se disminuirá por la pérdida del componente florístico, ya que es el que genera todos los recursos para su subsistencia.<br>Las alteraciones sobre la flora hacen que las poblaciones faunísticas migren a otras zonas buscando satisfacer todos los requerimientos para poder sobrevivir y mantenerse como especie, lo cual las hace vulnerables a cualquier agente que se encuentre en el nuevo hábitat.<br>El mayor impacto en la población faunística se presenta en la etapa de construcción de obras civiles y adecuación del terreno, seguido por la fase de construcción y operación; y con pocas afectaciones en la etapa de clausura. |
|         | Pérdida de especies de la flora acuática                                    | Todos los agentes mecánicos y físico-químicos que sean involucrados a todos los cuerpos de agua de la zona van a afectar directamente la constitución del componente de flora acuática. Este impacto es más notorio en la fase de construcción de obras civiles y adecuación del terreno, seguido por la de construcción y operación.  |
|         | Cambios en la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos | Las alteraciones físico químicas de todos los cuerpos de agua van a afectar directamente las estructuras de las poblaciones de macroinvertebrados, haciendo que estas desaparezcan y aparezcan otras que soportan estas nuevas condiciones. Para este impacto, al igual que los anteriormente mencionados, la mayor afectación se presenta en la primera fase de construcción, como también en la de construcción y operación.   |

**Tabla 6.5. Identificación y descripción de los impactos del medio social.**

| MEDIO   | IMPACTO   | DESCRIPCIÓN  |
|---|---|--|
| SOCIAL  | Migración no planificada  | Los foráneos llegan a las veredas en busca de oportunidades de trabajo y causan alteración a la dinámica social de las familias. Las personas pueden recibir influencias de los foráneos que cambien su comportamiento y activen factores de descomposición social.  |
|   | Emigración de población   | Las familias abandonan su vivienda para evitar la cercanía al proyecto y se pierde el tejido social vecinal y el sentido de pertenencia con relación al lugar.   |
|   | Presencia de enfermedades en la población   | Los elementos dañinos tales como, los gases, el material particulado, las charcas de agua, los olores, el ruido y los vectores que produce el proyecto durante su construcción y operación generan diferentes tipos de enfermedades a la población, se incluyen cambios en el comportamiento y estados de ánimo. Los perfiles epidemiológicos varían hacia condiciones negativas para la salud comunitaria con énfasis en la población infantil y el grupo del adulto mayor. |
|   | Pérdida del acceso al recurso agua  | Las familias que se abastecen de las aguas que se intervienen con la construcción del proyecto pierden la posibilidad de su uso.   |
|   | Cambio en las condiciones de movilización y accesibilidad para la población   | Cambio en el tiempo del recorrido que realiza la comunidad para su movilización en cumplimiento de sus actividades sociales.   |
|   | Mejoramiento de la infraestructura comunitaria  | El proyecto aporta una sede que estará al servicio de la comunidad para diferentes actividades comunitarias.   |
|   | Mejoramiento de la proyección social y cultural   | Una vez se clausure el relleno sanitario, el lote se destinará a un espacio comunitario de proyección social y cultural, su especificidad la define la comunidad.  |
|   | Potenciación organizacional comunitaria   | El proyecto potencia actividades organizativas comunitarias que cualifican el liderazgo y los procesos comunitarios. La comunidad mejora sus conocimientos y capacidad de gestión social con la llegada del proyecto.  |
|   | Rompimiento de lazos comunitarios e interpersonales   | Los miembros de la comunidad se distancian por diversidad de criterios y posiciones frente al proyecto.  |
|   | Competencias intracomunitarias negativas  | La comunidad entra a disputar las oportunidades de vinculación al proyecto lo que conlleva a conflictos entre los que logran ingresar y los que quedan por fuera.  |
|   | Cambios en la dinámica económica  | Las actividades de la población pueden cambiar con la llegada del proyecto, abandono de las actividades agrícolas, cambios en la economía familiar.  |
|   | Desvalorización de la tierra.   | Las propiedades pierden valor comercial con la presencia del proyecto.   |
|   | Activación de áreas productivas asociadas al proyecto   | El proyecto dinamiza nuevas actividades que generan ingresos a la comunidad y otras opciones económicas.   |
|   | Cambios en el desarrollo local y regional   | El grado de incidencia del proyecto al desarrollo de la zona, a escala veredal, municipal, y regional. El proyecto comienza a generar una dinámica importante entre investigadores, comunidad educativa y demás visitantes que enlazan actividades de diferente orden para el desarrollo.  |
|   | Modificación en los planes de ordenamiento territorial  | Cambios que definen la visión futura de la zona, y en los esquemas de organización espacial dispuestos.  |
| Generación de expectativas                      | La comunidad espera grandes cambios en sus condiciones de vida provenientes de la llegada del proyecto, estos en general sobrepasan la realidad ya que el proyecto tiene limitantes para atender el acumulado de necesidades de la población. |  |
| Cambio del entorno por modificación del paisaje | Cambio en la percepción espacial y sensorial de los lugares que son referentes de localización y elementos identitarios del entorno natural que hacen parte del goce estético de los habitantes.  |  |

## **6.5 MATRIZ DE IMPORTANCIA**

Para realizar la matriz de importancia, se construyo antes una matriz causa efecto más detallada en compañía de los ingenieros del relleno sanitario, ya que se debía desglosar cada uno de los componentes en factores ambientales, para poder realizar una valoración más precisa.

Debido a su tamaño, la matriz causa efecto detallada se encuentra en el Anexo N°1 y la matriz de importancia en el Anexo N°2.

La calificación se hizo según la metodología propuesta y finalmente esa información se procedió a realizar la Tabla 6.6 Matriz de valoración relativa del impacto ambiental, la cual se presenta a continuación.

## 6.6 VALORACIÓN CUALITATIVA DEL IMPACTO AMBIENTAL

Tabla 6.6. Matriz de valoración relativa del impacto ambiental

| COMPONENTE                    | Factor Ambiental   | UIP | Construcción y operación                              |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | Clausura  |   |                    | Importancia Relativa (Irj) | Importancia Relativa (Iri) |   |                                       |
|-------------------------------|--|-----|---|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|
|                               |  |     | Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso | Excavaciones y disposición del suelo | Construcción del sistema de drenaje | Establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros | Adecuación de zonas de disposición de residuos | Construcción del filtro recolector de lixiviados | Construcción de chimeneas de gases | Disposición de residuos sólidos | Construcción y adecuación de celdas | Manejo de material de cobertura en llenos | Manejo y tratamiento de residuos líquidos | Operación y mantenimiento de maquinaria y equipos | Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno | Cierre del relleno |                            |                            | Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados | Funcionamiento de la granja ambiental |
|                               |  |     | 1   | 2                                    | 3                                   | 4   | 5  | 6  | 7                                  | 8                               | 9                                   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14                 |                            |                            | 15  | 16                                    |
| GEOMORFOLÓGICO                | Activación de procesos erosivos  | 30  | 22  | 24                                   |                                     |   | 14   |  |                                    |                                 | 12                                  |   |   |   |   |                    |                            | 22                         | -22   |                                       |
|                               | Cambio en las geoformas  | 50  | 24  | 24                                   |                                     |   | 16   |  |                                    | 14                              | 16                                  |   |   |   |   |                    |                            | 47                         | -47   |                                       |
|                               | Conservación de las geoformas y de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas. | 20  |   |                                      |                                     |   | 12   |  |                                    |                                 |                                     |   |   |   |   |                    |                            | 2                          | 2   |                                       |
| SUELO                         | Pérdida de las capas del suelo   | 30  | 24  | 24                                   | 24                                  | 12  | 20   |  |                                    |                                 | 12                                  |   | 10  |   |   |                    |                            | 126                        | -126  |                                       |
| PAISAJE                       | Alteración del paisaje   | 30  | 24  | 18                                   |                                     |   | 14   |  | 14                                 | 24                              | 16                                  | 12  |   | 10  |   |                    |                            | 79                         | -79   |                                       |
|                               | Restitución del paisaje  | 20  |   |                                      |                                     | 8   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   |   | 20  |                    |                            | 11                         | 11  |                                       |
| HIDROLÓGICO (CALIDAD DE AGUA) | Disminución de la calidad de aguas superficiales y subterráneas                    | 40  | 7   | 7                                    | 7                                   |   | 7  | 6  |                                    | 11                              |                                     | 7   | 12  |   | 9   | 12                 |                            | 85                         | -85   |                                       |
| HIDROGEOLÓGICO                | Alteración del ciclo hidrológico   | 30  | 9   | 11                                   | 11                                  |   | 7  | 9  |                                    | 14                              |                                     |   | 10  | 12  |   | 10                 |                            | 93                         | -93   |                                       |
| GEOTÉCNICO                    | Establecimiento de condiciones geotécnicas favorables                              | 30  |   |                                      | 14                                  | 12  |  |  |                                    |                                 |                                     | 14  |   |   |   | 14                 |                            | 27                         | 27  |                                       |
|                               | Deterioro de las condiciones geotécnicas   | 30  | 24  | 24                                   |                                     |   | 14   | 14   | 12                                 | 24                              | 14                                  |   | 10  |   | 16  |                    |                            | 76                         | -76   |                                       |

| COMPONENTE                            | Factor Ambiental   | UIP | Construcción y operación                              |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | Clausura  |   |                    | Importancia Relativa (Ir) | Importancia Relativa (Irr) |   |                                       |
|---------------------------------------|--|-----|---|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|--------------------|---------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|
|                                       |  |     | Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso | Excavaciones y disposición del suelo | Construcción del sistema de drenaje | Establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros | Adecuación de zonas de disposición de residuos | Construcción del filtro recolector de lixiviados | Construcción de chimeneas de gases | Disposición de residuos sólidos | Construcción y adecuación de celdas | Manejo de material de cobertura en llenos | Manejo y tratamiento de residuos líquidos | Operación y mantenimiento de maquinaria y equipos | Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno | Cierre del relleno |                           |                            | Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados | Funcionamiento de la granja ambiental |
|                                       |  |     | 1   | 2                                    | 3                                   | 4   | 5  | 6  | 7                                  | 8                               | 9                                   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14                 |                           |                            | 15  | 16                                    |
| ATMOSFÉRICO (CALIDAD DE AIRE Y RUIDO) | Alteración de la calidad del aire  | 40  | 14  | 18                                   |                                     |   | 18   |  | 9                                  | 12                              | 9                                   | 9   |   | 14  |   | 14                 | 12                        |                            | 129   | -129                                  |
| FLORA TERRESTRE                       | Perturbación de la flora terrestre   | 50  | 18  | 10                                   |                                     |   | 12   | 10   |                                    | 10                              |                                     |   | 10  | 10  |   | 12                 |                           |                            | 92  | -92                                   |
| FAUNA                                 | Disminución de la población de fauna                                       | 50  | 18  | 10                                   |                                     |   | 12   | 10   |                                    | 10                              |                                     |   | 10  | 10  |   | 12                 |                           |                            | 92  | -92                                   |
| FLORA ACUÁTICA                        | Pérdida de especies de la flora acuática                                   | 50  | 18  | 10                                   | 10                                  |   | 12   | 10   |                                    | 10                              |                                     |   | 10  | 10  |   | 12                 |                           |                            | 102   | -102                                  |
| MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS          | Cambio en la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos | 50  | 18  | 10                                   | 10                                  |   | 12   | 10   |                                    | 10                              |                                     |   | 10  | 10  |   | 12                 |                           |                            | 102   | -102                                  |
| DEMOGRÁFICO                           | Migración no planificada   | 15  | 9   |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   |   |   | 6                  |                           | 6                          | 3   | -3                                    |
|                                       | Emigración de la población   | 15  | 5   |                                      |                                     |   |  |  |                                    | 5                               |                                     |   |   |   |   |                    |                           |                            | 2   | -2                                    |
|                                       | Perdida del acceso al recurso agua   | 30  |   |                                      | 9                                   |   |  |  |                                    | 9                               |                                     |   |   |   |   |                    |                           |                            | 5   | -5                                    |
|                                       | Presencia de enfermedades en la población                                  | 40  |   |                                      |                                     |   |  |  |                                    | 12                              |                                     |   |   | 18  |   | 24                 |                           |                            | 22  | -22                                   |
| ECONÓMICO                             | Cambios en la dinámica económica   | 15  | 7   |                                      | 5                                   |   |  |  |                                    | 12                              |                                     |   |   |   | 7   | 10                 |                           | 7                          | 5   | -5                                    |
|                                       | Desvalorización de la tierra   | 50  | 18  |                                      |                                     |   |  |  |                                    | 18                              | 22                                  |   |   |   |   |                    |                           |                            | 20  | -20                                   |
|                                       | Generación de expectativas   | 50  | 13  |                                      |                                     |   |  |  |                                    | 13                              |                                     |   |   |   | 13  |                    |                           |                            | 13  | -13                                   |
|                                       | Activación de áreas productivas asociadas al proyecto                      | 30  |   |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   |   | 16  |                    |                           | 16                         | 7   | 7                                     |
| CULTURAL                              | Cambio del entorno por modificación del paisaje                            | 50  | 24  | 24                                   | 16                                  |   |  |  | 18                                 |                                 |                                     |   |   |   | 24  |                    |                           | 24                         | 54  | -54                                   |

| COMPONENTE              | Factor Ambiental   | UIP | Construcción y operación                              |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | Clausura  |   |                    | Importancia Relativa (Iri) | Importancia Relativa (Irj) |   |                                       |
|-------------------------|--|-----|---|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|
|                         |  |     | Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso | Excavaciones y disposición del suelo | Construcción del sistema de drenaje | Establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros | Adecuación de zonas de disposición de residuos | Construcción del filtro recolector de lixiviados | Construcción de chimeneas de gases | Disposición de residuos sólidos | Construcción y adecuación de celdas | Manejo de material de cobertura en llenos | Manejo y tratamiento de residuos líquidos | Operación y mantenimiento de maquinaria y equipos | Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno | Cierre del relleno |                            |                            | Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados | Funcionamiento de la granja ambiental |
|                         |  |     | 1   | 2                                    | 3                                   | 4   | 5  | 6  | 7                                  | 8                               | 9                                   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14                 |                            |                            | 15  | 16                                    |
| CULTURAL                | Mejoramiento de la infraestructura comunitaria                               | 10  | 15  |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | 16  |   |                    | 16                         | 4                          | 4   |                                       |
|                         | Rompimiento de lazos comunitarios e interpersonales                          | 10  | 11  |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | 12  |   |                    |                            | 2                          | -2  |                                       |
|                         | Mejoramiento de la proyección social y cultural                              | 30  |   |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | 20  |   |                    | 20                         | 10                         | 10  |                                       |
|                         | Cambio en las condiciones de movilización y accesibilidad para la población. | 10  | 18  |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   |   |   |                    |                            | 2                          | -2  |                                       |
|                         | Competencias intracomunitarias negativas                                     | 10  |   |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | 6   |   |                    |                            | 1                          | -1  |                                       |
| POLITICO - ORGANIZATIVO | Modificación de los planes de ordenamiento territorial                       | 40  |   |                                      |                                     |   |  |  |                                    |                                 |                                     |   |   | 24  |   |                    | 24                         | 24                         | 24  |                                       |
|                         | Cambios en el desarrollo local y regional                                    | 40  |   |                                      |                                     |   |  |  | 24                                 |                                 |                                     |   |   | 24  |   |                    |                            | 24                         | 24  |                                       |
| <b>Iri</b>              |  |     | <b>10</b>   | <b>7</b>                             | <b>4</b>                            | <b>1</b>  | <b>5</b>                                       | <b>3</b>   | <b>3</b>                           | <b>8</b>                        | <b>2</b>                            | <b>2</b>                                  | <b>3</b>                                  | <b>3</b>  | <b>5</b>  | <b>4</b>           | <b>1</b>                   | <b>4</b>                   |   |                                       |

## 6.7 ACTIVIDADES MÁS IMPACTANTES Y FACTORES MÁS AFECTADOS

A partir de los resultados de la matriz de valoración relativa del impacto ambiental, se identificaron las actividades más impactantes y los factores más afectados.

En la Tabla 6.7., encontramos las actividades más impactante organizadas de mayor a menor, tanto para la etapa de construcción y operación, como para la etapa de clausura.

**Tabla 6.7: Actividades más impactantes.**

| <b>ACTIVIDADES MÁS IMPACTANTES</b>                            |            |
|---|------------|
| <b>Construcción y operación</b>                               | <b>Iri</b> |
| Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso         | 10         |
| Disposición de residuos sólidos                               | 8          |
| Excavaciones y disposición del suelo                          | 7          |
| Adecuación de zonas de disposición de residuos                | 5          |
| Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno           | 5          |
| Construcción del sistema de drenaje                           | 4          |
| Construcción del filtro recolector de lixiviados              | 3          |
| Construcción de chimeneas de gases                            | 3          |
| Manejo y tratamiento de residuos líquidos                     | 3          |
| Operación y mantenimiento de maquinaria y equipos             | 3          |
| Construcción y adecuación de celdas                           | 2          |
| Manejo de material de cobertura en llenos                     | 2          |
| Establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros | 1          |

| Clausura  | Iri |
|---|-----|
| Cierre del relleno  | 4   |
| Funcionamiento de la granja ambiental                         | 4   |
| Programas de monitoreo y control de gases, aguas y lixiviados | 1   |

Como se puede observar en la Tabla 6.7., en la etapa de construcción y operación existen cinco actividades que generan un gran impacto sobre los componentes ambientales:

**a) Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso (10):** Luego de hacer el análisis fue considerada como la actividad más impactante, debido a que influye de manera directa sobre todos los factores ambientales de los medios físico y biótico y social, exceptuando el factor político – organizativo. El mantenimiento de las vías y la apertura de nuevos caminos, activa procesos erosivos, altera de forma permanente el paisaje y cambia las características del entorno.

**b) Disposición de los residuos sólidos (8):** Esta actividad es crucial no solo por que impacta todos los factores ambientales, sino porque de ella dependen las características del lixiviado y de los gases generados. Es una actividad en la cual se debe tener rigurosidad, ya que los residuos se deben separar según sus características (orgánicos, reciclables y no reciclables), evitando la mezcla de contaminantes y posterior impacto sobre la comunidad. La inadecuada disposición de los residuos sólidos en el relleno, puede traer consecuencias negativas para los ecosistemas y la población que rodea el relleno.

**c) Excavaciones y disposición de suelo (7):** Esta actividad trae cambios drásticos principalmente en el medio físico y biótico, debido a que rompe las líneas de flujo de agua subterránea, alterando el ciclo hidrológico. También tiende a perderse la protección superficial del suelo, variando la humedad del mismo. En general los movimientos de tierra alteran las unidades de paisaje y deterioran las condiciones geotécnicas del terreno.

**d) Adecuación de zonas de disposición de residuos (5):** Esta actividad genera fuertes impactos sobre todos los factores ambientales de los medios físico y biótico,

ya que este proceso comprende la impermeabilización del área de disposición, donde se dispone una capa de arcilla de 0,3m sobre todo el terreno. Esto genera un efecto negativo en el paisaje, deteriora las condiciones geotécnicas e impide el paso de agua al interior del suelo.

**e) Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno (5):** Este impacto toca de manera profunda el medio social, ya que se lleva a cabo el proceso de convocatoria, selección y vinculación de personal idóneo para las diversas actividades de operación del relleno. Además comprende actividades para informar y negociar con la comunidad, en los procesos de participación y resolución de conflictos.

Durante la etapa de clausura se presentaron dos actividades, con mayor impacto sobre los componentes ambientales:

**a) Cierre del relleno (4):** Esta actividad repercute sobre los tres medios (físico, biótico y social), debido a que luego del cierre, se seguirán presentando procesos de descomposición de materia, los cuales continuaran generando cambios en el entorno. El proceso de revegetalización de la zona, es complejo, debido a que se ha perdido la estructura del suelo y el ecosistema tardara en reponerse al impacto que ha sufrido. Por otro lado, hay que comunicar a la comunidad sobre el cierre y el cuidado que deben tener permanentemente en la zona.

**b) Funcionamiento de la granja ambiental (4):** Esta actividad tiene efectos principalmente en el medio social, ya que requiere la asignación de los recursos económicos para desarrollar los programas pertinentes para ejecutar las actividades y obras de la granja.

A continuación se presentan los factores ambientales más impactados por las actividades desarrolladas por el proyecto, con este fin se construyo la Tabla 6.8., donde se muestran los factores ambientales con la valoración obtenida, organizados según su naturaleza desde el impacto más negativo hasta el más positivo.

En color amarillo encontramos los factores ambientales correspondientes al medio físico, en color verde los impactos asociados al medio biótico y en color rosa los impactos que corresponden al medio social.

**Tabla 6.8. Factores ambientales más impactados.**

| <b>FACTORES AMBIENTALES MÁS IMPACTADOS</b>   |            |
|--|------------|
| <b>FACTORES AMBIENTALES</b>  | <b>Irj</b> |
| Alteración de la calidad del aire  | -129       |
| Pérdida de las capas del suelo   | -126       |
| Pérdida de especies de la flora acuática   | -102       |
| Cambio en la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos         | -102       |
| Alteración del ciclo hidrológico   | -93        |
| Perturbación de la flora terrestre   | -92        |
| Disminución de la población de fauna   | -92        |
| Disminución de la calidad de aguas superficiales y subterráneas                    | -85        |
| Alteración del paisaje   | -79        |
| Deterioro de las condiciones geotécnicas   | -76        |
| Cambio del entorno por modificación del paisaje                                    | -54        |
| Cambio en las geoformas  | -47        |
| Activación de procesos erosivos  | -22        |
| Presencia de enfermedades en la población  | -22        |
| Desvalorización de la tierra   | -20        |
| Generación de expectativas   | -13        |
| Cambios en la dinámica económica   | -5         |
| Perdida del acceso al recurso agua   | -5         |
| Migración no planificada   | -3         |
| Emigración de la población   | -2         |
| Rompimiento de lazos comunitarios e interpersonales                                | -2         |
| Cambio en las condiciones de movilización y accesibilidad para la población        | -2         |
| Competencias intracomunitarias negativas   | -1         |
| Conservación de las geoformas y de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas. | 2          |
| Mejoramiento de la infraestructura comunitaria                                     | 4          |
| Activación de áreas productivas asociadas al proyecto                              | 10         |
| Restitución del paisaje  | 11         |
| Modificación de los planes de ordenamiento territorial                             | 24         |
| Cambios en el desarrollo local y regional  | 24         |
| Establecimiento de condiciones geotécnicas favorables                              | 27         |

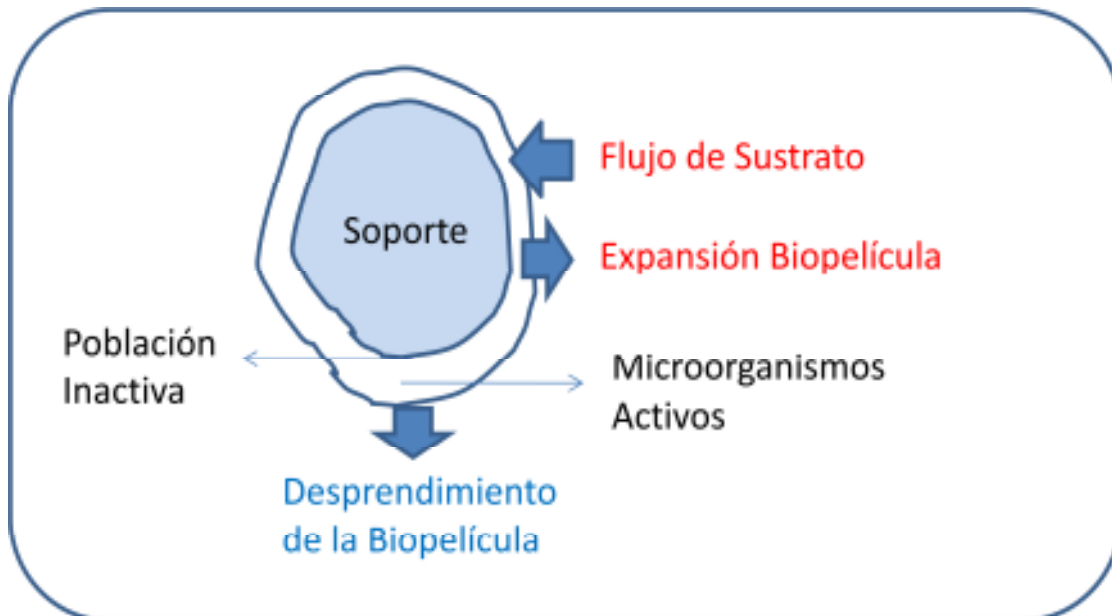
## 7 EVALUACIÓN DEL SISTEMA BIOBARRERA SECUENCIAL

### 7.1 MODELO CONCEPTUAL

El sustrato disuelto presente en el afluente (DBO), ingresa a la unidad de tratamiento donde entra en contacto con el material de empaque. Sobre la superficie del mismo, se desarrolla una matriz de polisacáridos en la cual se alberga una población de microorganismos degradadores (de diferentes especies).

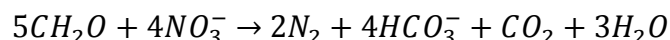
Los microorganismos crecen, se multiplican y generan la estructura denominada biopelícula, a expensas de la energía que obtienen de la degradación del sustrato disponible (DBO). Como resultado de la actividad metabólica, se generan compuestos gaseosos (proceso anaerobio) que escapan de la unidad y se agota el sustrato presente en el medio; Las poblaciones de microorganismos degradadores sufren procesos de decaimiento endógeno, cuando el espesor de la biopelícula es muy grande e impide la llegada de nutrientes, lo cual genera luego un desprendimiento de la biopelícula, la cual posteriormente puede ser renovada si existen nutrientes y sustrato disponibles en el medio. En la Figura 7.1., se muestra un esquema de los eventos que tienen lugar en cada partícula al interior de la columna.

**Figura 7.1. Esquema de los eventos que soportan el modelo planteado.**



### 7.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA

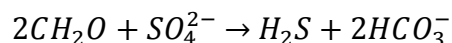
Bajo condiciones aerobias, predominantemente están presentes  $\text{NO}_3^-$ , y  $\text{N}_2$ , especies que permanecen relativamente en concentraciones constantes ya que las poblaciones microbianas no pueden usarlas. Bajo condiciones anaeróbicas, sin embargo, pueden presentarse reacciones de desnitrificación:



El incremento en el pH afecta el balance del ion bicarbonato, generándose entonces precipitados que pueden taponar la BRP:



Aunque las bacterias reductoras de sulfatos como *Desulfovibrio* no se aclimatizan bien en estos sistemas, lo cual conduce a que se mantengan altas concentraciones de sulfatos durante el tratamiento, las reacciones que pueden tener lugar son:



La reducción de sulfato además en presencia de hierro puede generar un precipitado de color negro ( $\text{FeS}$ ) que puede adicionalmente afectar el comportamiento hidráulico de la barrera, al reducir sustancialmente su permeabilidad. Las condiciones extremas a las que opera una barrera reactiva permeable, a pesar de las posibilidades mencionadas, no favorecen el crecimiento de comunidades microbianas.

Se ha observado que el comportamiento de un reactor operado como biofiltro es muy a menudo inestable, debido principalmente a que la carga de contaminante no es completamente constante y por que las poblaciones bacterias exhiben una dinámica propia; No solo un tipo de especie microbiana está presente en una superficie del material de empaque. Por tratarse de un sistema abierto, múltiples especies crecen, interactúan entre sí y modifican la naturaleza misma de la biopelícula.

Una biopelícula puede ser generalizada como “una comunidad de microorganismos asociados a una superficie y dispersos al interior de una matriz extracelular” (Ghannoum, et al., 2004). Aunque la matriz extracelular, compuesta fundamentalmente por exopolisacáridos, preserva las colonias y mantiene un microambiente adecuado para el crecimiento celular, las condiciones externas y los flujos de aire, agua y contaminantes, tienen una influencia directa en el estado y composición de la población microbiana.

Aunque se conocen bien los mecanismos de transporte que tienen lugar para la formación y crecimiento de las biopelículas y se han desarrollado modelos adecuados para describir estos eventos, la dificultad para la determinación de los parámetros cinéticos y para el seguimiento constante de las poblaciones microbianas, ha limitado la aplicación de los modelos para el diseño (Devinny, y otros, 2005); El ajuste de parámetros y la validación de modelos con plantas piloto, siguen siendo las herramientas disponibles para el ingeniero de diseño.

Un adecuado modelo debe incluir una descripción de los fenómenos de transporte así como la dinámica de las poblaciones, es decir, la interacción que se presenta entre las múltiples especies presentes. Adicional a ello el modelo puede considerar la producción de sustancias extracelulares y algunos productos de interés, además de la biomasa inactiva formada en las capas más cercanas a la superficie del material de empaque (Laspidou, y otros, (2002)); (Saravanan, y otros, 2006); (Rittmann, y otros, 2006).

La degradación de compuestos orgánicos volátiles, presentes en el afluente, está acompañada además por intermediarios formados por el metabolismo inicial así como productos derivados de la lisis de organismos que mueren constantemente durante el proceso de tratamiento. Particularmente son estas especies, las que se alimentan de restos celulares, organismos heterótrofos llamados saprófitos, los que dominan la comunidad en una biopelícula (Ghannoum, et al., 2004).

(Hekmat, y otros, 2006) proponen un modelo que asume la existencia de dos clases de poblaciones bacterianas, los degradadores y los saprófitos y que existen dos clases de sustratos, aquellos que sirven como fuente inicial de carbono (generalmente el contaminante) y el grupo de compuestos intermediarios derivados del metabolismo de los primeros. La población de degradadores puede usar ambas compuestos mientras que los saprófitos solo pueden usar los compuestos intermediarios. Tanto las poblaciones de saprófitos como las poblaciones de degradadores sufren procesos de decaimiento, estado en el que harán parte de la población no viable, además todas las tres poblaciones son susceptibles de lisis celular. El modelo propuesto es una modificación que solo tiene en cuenta una población global de microorganismos degradadores, una población inactiva y un solo tipo de sustrato (en general compuestos intermediarios del metabolismos primario); Ello puede considerarse ya que en general los lixiviados contienen compuestos derivados del metabolismo de microorganismos presentes en los rellenos sanitarios.

La población de degradadores e inactiva está sometida a procesos de decaimiento y lisis celular (que incrementan la carga de contaminante) y la biopelícula se



### 7.1.3 BALANCES DE BIOMASA Y SUSTRATO

La ecuación general de balance para biomasa y sustrato, parte de suponer una advección global de biopelícula en sentido opuesto al flujo de contaminante que ingresa a la estructura:

$$-v_l * V_l \approx v_x * (1 - V_l) \quad (1)$$

Con  $v_l$  y  $v_x$  las velocidades de advección de líquido que ingresa a la biopelícula y de la biopelícula ( $[m^3/s]$ ) y  $V_l$  el volumen ocupado por el líquido al interior de la biopelícula ( $[m^3]$ ).

El balance para la biomasa y para el sustrato queda como:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = -\frac{\partial(v_x * X_i)}{\partial X} - \frac{\partial J_i}{\partial X} + r_i \quad (2) \quad \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial(v_l * V_l * S)}{\partial X} - \frac{\partial J_i}{\partial X} + r_s \quad (3)$$

El primer término de las ecuaciones 2 y 3 considera la dinámica de las concentraciones de biomasa y sustrato globalmente. El primer término del lado derecho considera la advección de la biopelícula y del sustrato (sentidos opuestos). El segundo término involucra el flujo másico difusivo de contaminante por área superficial disponible y el último término tiene que ver con las reacciones bioquímicas para formación de biomasa (degradadores o población inactiva) y consumo de sustrato.

Adicionalmente se cumple que:

$$\frac{X_a}{\rho_a} + \frac{X_l}{\rho_l} = 1 \quad (4)$$

Con:

$X_a$ ,  $X_l$  población activa e inactiva ( $[g/m^3]$ ) y  $\rho_a$ ,  $\rho_l$  sus respectivas densidades ( $[g/m^3]$ ).

La cinética de reacción se expresa mediante la ecuación de *Monod*:

$$r_a = \left( \frac{\mu_{m,a} * S}{k_s + S} - k_e - I_a \right) * X_a \quad (5) \quad r_l = (k_e + I_a) * X_a - I_l * X_l \quad (6)$$

Con:

$\mu_{m,a}$ : tasa máxima de crecimiento celular ( $[1/d]$ )

$k_s$ : Constante de saturación ( $[g/m^3]$ )

$k_e$ : Constante de inactivación ( $[1/d]$ )

$I_a$ ,  $I_l$ : Constante de lisis celular para degradadores y población inactiva ( $[1/d]$ )

Para el sustrato se tiene que:

$$r_s = -\left(\frac{1}{Y_{as}}\right) * \left(\frac{\mu_{m,a} * S}{k_s + S}\right) * X_a + \left(\frac{1}{Y_{Is}}\right) * I_I X_I \quad (7)$$

Con:

$Y_{as}$ ,  $Y_{Is}$ : Coeficientes de rendimiento biomasa sustrato.

El complejo entramado de poros al interior de una biopelícula, que permite el transporte de nutrientes en la estructura, permite asumir una distribución homogénea de sustrato y población bacteriana en todo el espesor (Ghannoum, et al., 2004);(Hekmat, y otros, 2006), entonces:

$$\frac{\partial X_i}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial J}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Los balances respectivos quedan como:

Biomasa activa: 
$$\frac{\partial X_a}{\partial t} = -\frac{X_a}{(1-v_l)} * \frac{(r_a+r_l)}{\rho} + r_a \quad (9)$$

Biomasa inactiva: 
$$\frac{\partial X_I}{\partial t} = -\frac{X_I}{(1-v_l)} * \frac{(r_a+r_l)}{\rho} + r_I \quad (10)$$

El primer término del lado derecho de las ecuaciones 9-10, representan el efecto de dilución que tiene lugar al expandirse la biopelícula, mientras que el segundo término tiene en cuenta la formación de biomasa.

Sustrato: 
$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{S}{(v_l)} + \frac{1}{v_l} \left( r_s + \frac{J}{L_b} \right) \quad (11)$$

Siendo  $L_b$  el espesor de la biopelícula. El primer término del lado derecho de la ecuación 11 representa la advección de sustrato al interior de la biopelícula. El segundo término involucra tanto la tasa de consumo como el transporte global por área interfacial dividido por el espesor (sería el flujo volumétrico de contaminante). EL balance para el espesor puede expresarse como:

$$\frac{\partial L_b}{\partial t} = \frac{L_b}{(1-v_l)} * \frac{(r_a+r_l)}{\rho} \quad (12)$$

Efectuando un balance de masa simple en una columna, asumiendo comportamiento de flujo pistón, se obtiene:

$$J = (S_0 - S) * \frac{F}{L * a * A} \quad (13)$$

$S_0$ ,  $S$ : Sustrato inicial y sustrato residual ( $[g/m^3]$ ).

$F$ : flujo de contaminante en la columna ( $[m^3/d]$ ).

L: Longitud de la columna ([m]).

A: Área transversal de la columna ([m<sup>2</sup>]).

A: Área superficial específica del material de empaque ([m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]).

La anterior ecuación supone que todo el sustrato degradado es equivalente al sustrato que se transporta al interior de la biopelícula. Si bien es cierto, los procesos de transporte incluyen difusión de contaminante a través de una delgada película líquida y/o gaseosa, y tanto la biodegradación como la adsorción reducen la concentración del sustrato (Devinny, y otros, 2005) para condiciones de operación estables y adecuada distribución de flujo, la suposición es válida.

### 7.1.3 MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Se denomina digestión anaerobia al proceso en virtud del cual la materia orgánica es convertida en metano, dióxido de carbono e hidrógeno, en ausencia de oxígeno y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas. La formación de metano y dióxido de carbono corresponde a la última etapa de una serie de reacciones en las cuales los compuestos orgánicos son degradados completamente.

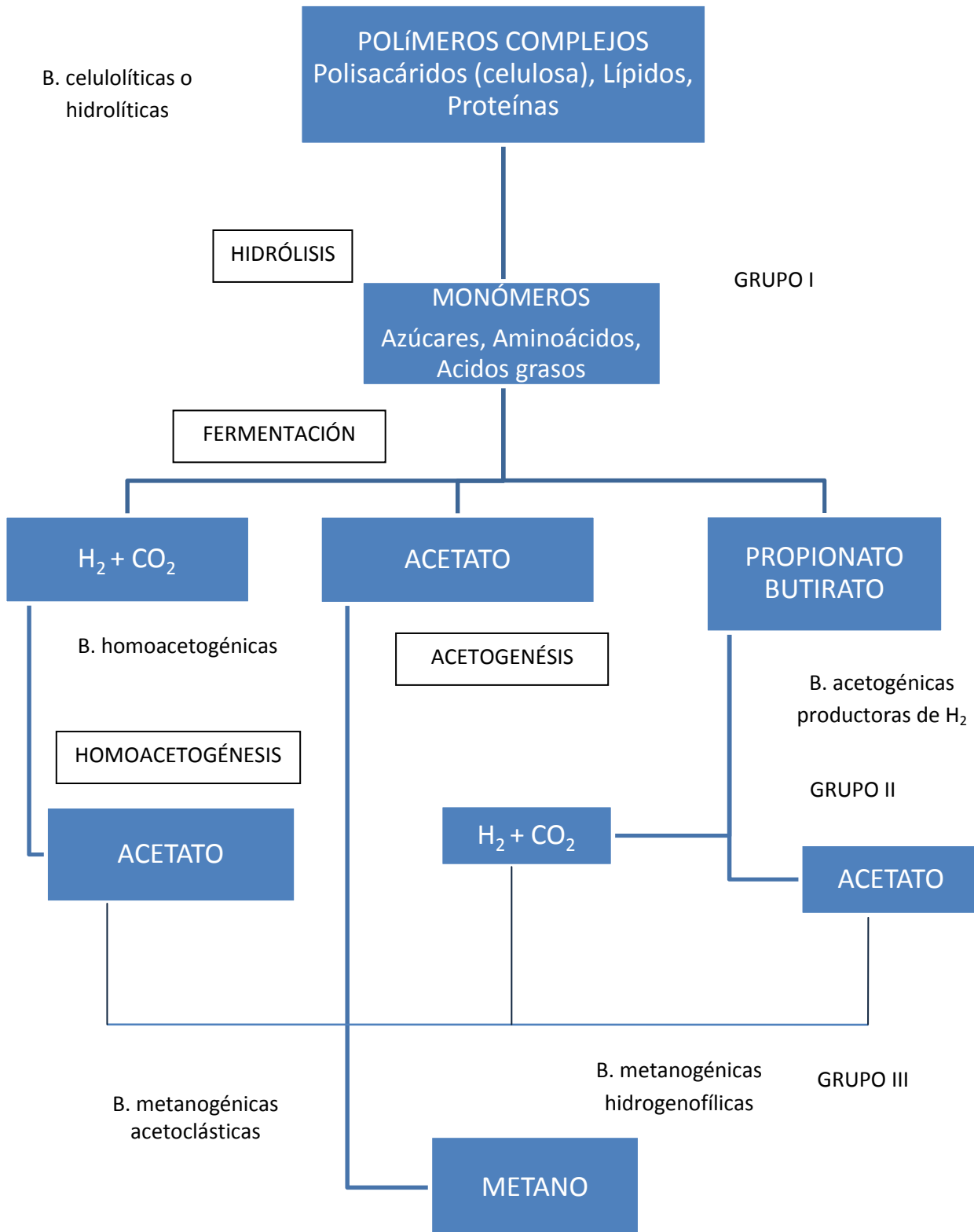
En el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica intervienen diversos grupos de bacterias anaerobias facultativas y aerobias estrictas las cuales utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo según el esquema presentado en la Figura 7.3. El flujo de carbonos y electrones generado durante la degradación anaerobia de los compuestos orgánicos involucra tres grandes grupos tróficos:

- Grupo I: bacterias hidrolíticas y fermentativas.
- Grupo II: bacterias acetogénicas.
- Grupo III: bacterias metanogénicas.

El proceso se inicia con la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos por la acción de enzimas extracelulares producidas por las bacterias del Grupo I. Los productos de esta reacción son moléculas de bajo peso molecular como los azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes, los cuales son transportados a través de la membrana celular; posteriormente son fermentados a ácidos grasos con bajo número de carbonos como los ácidos acético, fórmico, propiónico y butírico, así como compuestos reducidos como el etanol, además de  $H_2$  y  $CO_2$ . Los productos de fermentación son convertidos a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, por la acción de las bacterias del Grupo II, las cuales son conocidas como bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno.

Finalmente, las bacterias del Grupo III o metanogénicas convierten el acetato de metano y dióxido de carbono, o reducen el dióxido de carbono a metano. Estas transformaciones involucran dos grupos metanogénicos que son los encargados de llevar a cabo las transformaciones mencionadas anteriormente. En menor proporción compuestos como el metanol, las metilaminas y el ácido fórmico pueden también ser usados como sustratos del grupo metanogénico.

**Figura 7.3. Principales etapas de la digestión anaerobia y grupos bacterianos involucrados.**

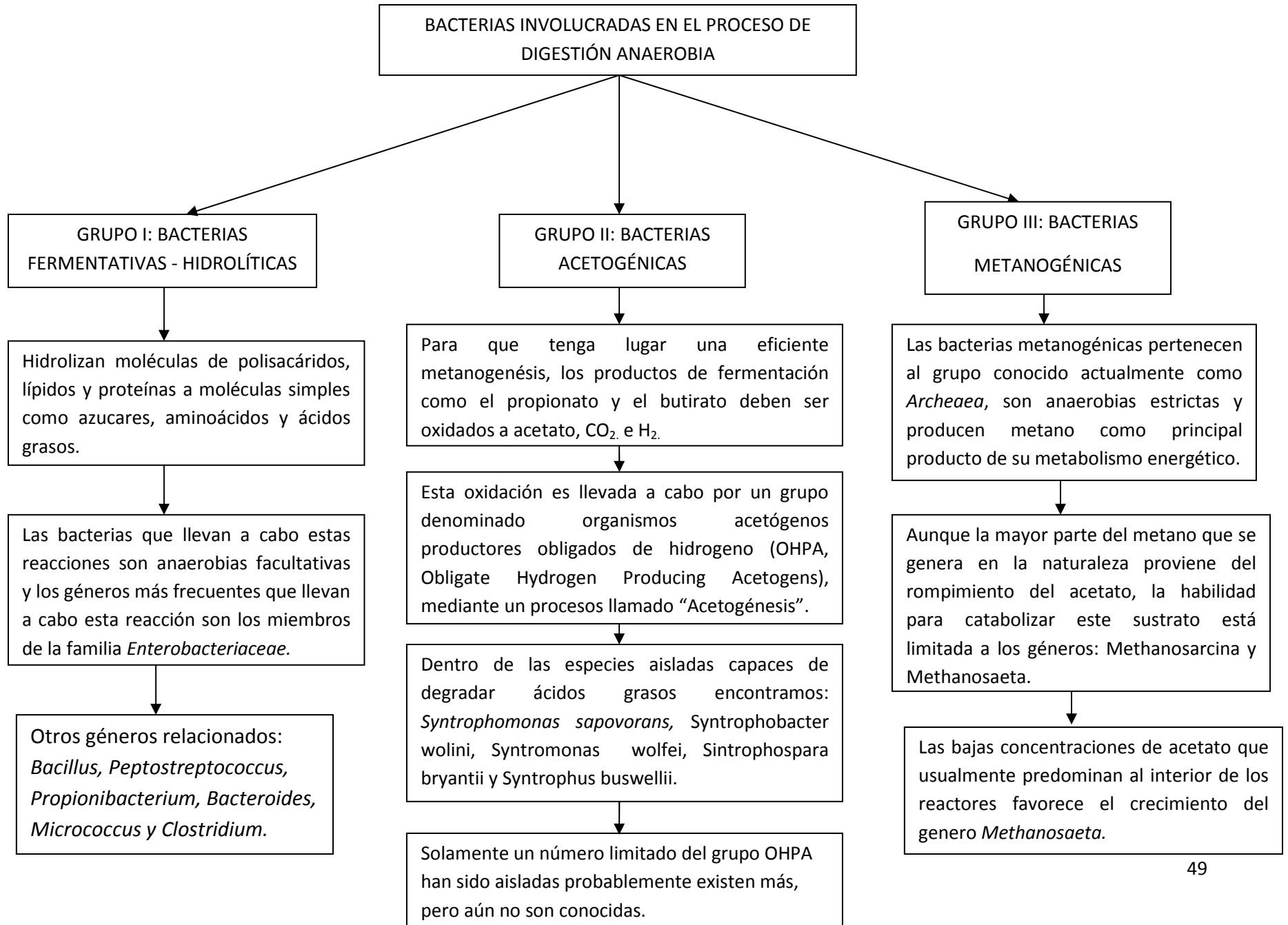


**Tabla.7.1 Principales reacciones químicas que ocurren en la digestión anaerobia de la materia orgánica.**

| Tipo de Reacción   | Ecuación  | $\Delta G^{\circ}$ (KJ/reacción) | $\Delta G^{\circ'}$ (KJ/reacción) |
|--|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| Fermentación de glucosa a acetato  | Glucosa + 4H <sub>2</sub> O $\longrightarrow$ CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + 4H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub>                                  | -207                             | -319                              |
| Fermentación de la glucosa a butirato  | Glucosa + 2H <sub>2</sub> O $\longrightarrow$ C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 3H <sup>+</sup>       | -135                             | -284                              |
| Fermentación del butirato a acetato e H <sub>2</sub>   | Butirato + 2H <sub>2</sub> O $\longrightarrow$ 2CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub>                                  | +48.2                            | -17.6                             |
| Fermentación del propionato a acetato  | Propionato + 3H <sub>2</sub> O $\longrightarrow$ CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> | +76.2                            | -5.5                              |
| Acetogénesis a partir de H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>  | 4H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> $\longrightarrow$ CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + 2H <sub>2</sub> O             | -105                             | -7.1                              |
| Metanogénesis a partir del CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub>  | 4H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> $\longrightarrow$ CH <sub>4</sub> + 3H <sub>2</sub> O                              | -136                             | -3.2                              |
| Metanogénesis a partir del acetato   | Acetato + H <sub>2</sub> O $\longrightarrow$ CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 4H <sup>+</sup>                                      | -31                              | -24.7                             |
| <sup>1</sup> Condiciones estándar: solutos 1 molar, gases 1 atmósfera.   |   |                                  |                                   |
| <sup>2</sup> Condiciones típicas en un reactor anaerobio: AGV = 1mM, HCO <sub>3</sub> = 20mM, Glucosa = 10mM, CH <sub>4</sub> = 0.6 mM, H <sub>2</sub> = 10 <sup>-4</sup> mM |   |                                  |                                   |

Fuente: Zinder, 1984

**Figura 7.4. Bacterias involucradas en el proceso de digestión anaerobia.**



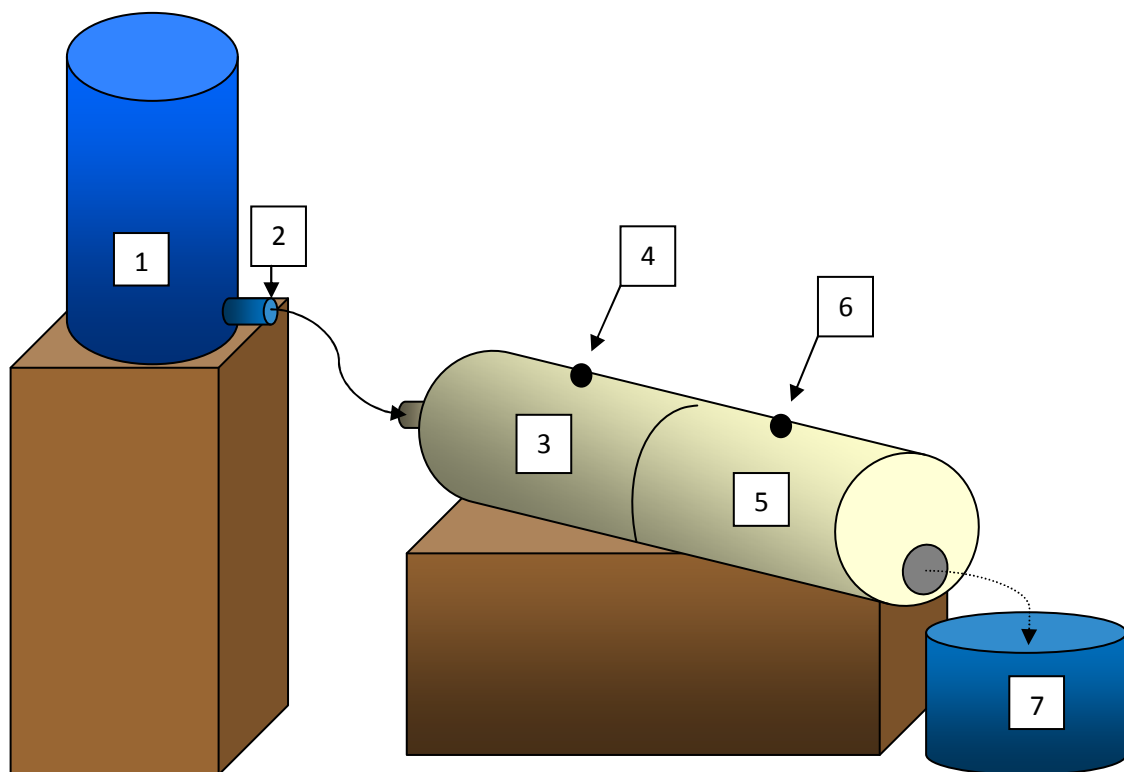
## 7.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema biobarrera secuencial es alimentado mediante un tanque, que se regula por medio de una válvula la cual determina el caudal de entrada al reactor anaerobio. Posteriormente ingresa al reactor aerobio y finalmente llega al tanque de descarga.

Luego de pasar por este proceso, el lixiviado es recirculado nuevamente al tanque de alimentación hasta que logre las características deseadas.

En la Figura 7.5, se observa el sistema de tratamiento propuesto.

**Figura 7.5. Sistema biobarrera secuencial.**



### **Númeración de la Figura 7.5.**

1. Tanque de alimentación
2. Válvula de entrada
3. Reactor Anaerobio
4. Punto de control del reactor aerobio
5. Reactor Aerobio
6. Punto de control del reactor anaerobio
7. Tanque de descarga

Tanto el reactor anaerobio como el aerobio, están totalmente llenos de pequeños recortes irregulares de polietileno de alta densidad, el cual sirve como soporte para el desarrollo de la biopelícula, facilitando el proceso de adhesión de las bacterias y propiciando la formación de consorcios microbianos.

**Figura 7.6. Material de soporte – Polietileno de alta densidad.**



La biobarrera secuencial, se construyo con un tubo de policloruro de vinilo (PVC), de 1.59 cm de largo y 6 pulgadas de ancho. En sus dos extremos se colocaron dos láminas de acrílico y los tapones en los puntos de muestra fueron de caucho. Se eligieron estos materiales, por sus propiedades químicas, ya que son inertes y no reaccionan con el lixiviado.

**Figura 7.7. Sistema biobarrera secuencial.**



En la Figura 7.7, se observa el tanque de alimentación (caneca de color azul), conectado mediante la válvula a la biobarrera secuencial ( tubo de PVC) y finalmente la descarga.

### **7.2.1 ETAPA DE PUESTA EN MARCHA O ARRANQUE**

Debido a que el diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados esta directamente condicionado al caudal y las características del lixiviado generado en el relleno sanitario, en esta investigación se realizaron monitoreos de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos al lixiviado generado en el relleno sanitario, durante el año 2010 para determinar las características del lixiviado en diferentes épocas.

La biobarrera secuencial fue cargada con lixiviado crudo proveniente del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, con el propósito de que los microorganismos presentes en el lixiviado, formaran colonias sobre el soporte y formaran la biopelícula.

El periodo de tiempo durante el cual los microorganismos se adaptaron y formaron una biopelícula definida fue aproximadamente cuarentacinco días, pero a partir del día treinta se reportaron cambios significativos en las características del lixiviado, el cual fue monitoreado cada cinco días.

La biopelícula presentaba bacterias filamentosas adheridas al polietileno, se cree que los polímeros extracelulares excretados por los microorganismos contribuyeron a dar más firmeza a la adherencia. Se observó formación de flocs o conglomerados con estructura suelta, ya que crecían alrededor de un soporte y no se unían totalmente con los consocios adyacentes.

A diferencia de los microorganismos libremente suspendidos, la formación de flocs incrementa el aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el agua, lo cual se manifiesta en un incremento en la capacidad de degradación.

La cantidad de biopelícula que se obtuvo, no presentó variaciones cualitativamente con el tiempo, y la calidad de los efluentes fue mejorando cada que se recirculo en la biobarrera.

En base al trabajo de algunos autores, se identificó el final del proceso de arranque en lo que respecta a la biomasa, con la aparición del fenómeno de formación de una biopelícula o floc estable (Weimin *et al.*, 1986; Lane, 1986; Francese y Siñeriz, 1990, 1994; Campos y Anderson, 1991; Weiland y Rozzi, 1991).

### **7.2.2 ETAPA DE OPERACIÓN**

La operación rutinaria de la biobarrera secuencial se inició una vez superada la etapa de arranque, cuando se alcanzaron las condiciones de diseño de carga hidráulica y la eficiencia de remoción de materia orgánica proyectada.

En esta etapa el reactor funcionó en condiciones de estado estacionario o estable, en el cual las variables de salida del sistema se mantuvieron relativamente constantes, a pesar de las variaciones temporales en calidad del afluente y cumpliendo con la cinética propuesta.

El volumen total del reactor fue de  $29000\text{cm}^3$ , del cual se tomaron solo  $11600\text{cm}^3$  como volumen útil, ya que se presentaba una mayor remoción cuando se disminuía el caudal, ocupando un menor volumen.

La carga hidráulica aplicada sobre el sistema biobarrera secuencial, se puede definir como la relación entre el caudal del afluente y el volumen útil del sistema; por lo tanto, la carga hidráulica es igual al inverso del tiempo de retención hidráulico.

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo promedio de permanencia del líquido en el reactor, el cual se define mediante la siguiente relación:

$$Lh = \frac{Qa}{Vr} = \frac{1}{Trh}$$

Donde,

$Lh$  = Carga hidráulica

$Qa$  = Caudal del afluente

$Vr$  = Volumen útil del reactor

$Trh$  = Tiempo de retención hidráulico

En la Tabla 7.2., se muestran los resultados obtenidos para el tiempo de retención hidráulico y carga hidráulica, a partir del volumen útil del reactor y el caudal.

**Tabla 7.2: Calculo del tiempo de residencia y de la carga hidráulica.**

| Parámetro |                                | Resultado  |
|-----------|--------------------------------|--|
| $Lh$      | Carga hidráulica               | $4.99 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} = 0.03 \text{ min}^{-1}$ |
| $Qa$      | Caudal del afluente            | $5.79 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$                   |
| $Vr$      | Volumen útil del reactor       | $0.0116 \text{ m}^3$   |
| $Trh$     | Tiempo de retención hidráulico | $2003 \text{ s} = 33 \text{ min}$                            |

Por carga orgánica volumétrica se entiende la relación entre la masa de material orgánico aplicado por unidad de tiempo y por unidad de volumen del reactor y se define así:

$$Lo = \frac{Qa * Ca}{Vr} = \frac{Ca}{Trh}$$

Donde,

$Lo$  = Carga orgánica

$Ca$  = Concentración de DQO del afluente

En la tabla 7.3., se muestran los resultados obtenidos para la carga orgánica, a partir de la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico.

**Tabla 7.3: Calculo de la carga orgánica**

| Parámetro |                                   | Resultado    |
|-----------|-----------------------------------|--------------|
| <i>Lo</i> | Carga orgánica                    | 0.488 mg/L*s |
| <i>Ca</i> | Concentración de DQO del afluente | 977mg/L      |

Durante la operación del reactor, hubo una alta retención de microorganismos adheridos, lo que aumento la carga orgánica a tratar como se muestra en la Tabla 7.3.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue suficiente para permitir un estrecho contacto entre los reactantes, teniendo en cuenta la baja velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas, y que el 90% de la energía que utiliza esta población es para la producción de metano y sólo el 10% para síntesis celular, el tiempo que se requiere para formar una biomasa activa implica que el tiempo de residencia de la biopelícula con el lixiviado se incremente, como se hizo durante el arranque.

### 7.3 EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA UTILIZANDO TRAZADORES

Cuando se aplican trazadores en un reactor y luego se hace un análisis detallado de las muestras tomadas a la salida del reactor cada cierto período de tiempo, se puede obtener una curva de concentración versus tiempo. En dicha curva, se pueden observar cómo la concentración de trazador crece a medida que pasa el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo, y luego comienza a decrecer. Estos métodos son conocidos como métodos de estímulo-respuesta. En estas metodologías se puede utilizar cualquier tipo de señal de entrada, tales como señales al azar, una señal periódica, una señal escalón (Levenspiel, 1998), o como es el caso de este trabajo, una señal en forma de impulso.

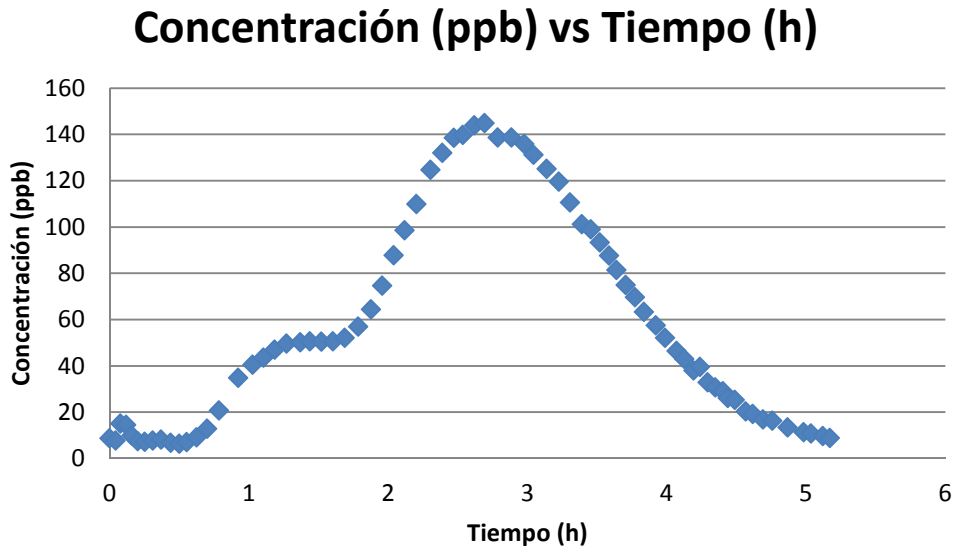
Teóricamente cuando el tiempo tiende a infinito, el valor de la concentración debe ser cero. Dicho valor infinito de tiempo, debe entenderse como un tiempo muy grande, incluso mayor que el tiempo de retención teórico de la secuencia de reactores en estudio.

La prueba de trazadores se realizó en el reactor tipo biobarrera secuencial, disolviendo 1 ml de rodamina WT, en 20 ml de agua. Luego, se introdujo la solución en la zona de entrada de manera instantánea, lo cual físicamente genera un derrame a manera de pulso instantáneo. Se seleccionó rodamina como trazador, por su carácter inerte, por lo cual no reacciona con ninguno de los componentes que se encuentran en el reactor.

Una vez aplicado el trazador, se procedió a tomar muestras periódicas a la salida del reactor durante cinco horas. Todas las muestras fueron analizadas en un fluorímetro, cuyas medidas se comportan de forma lineal en el rango comprendido entre 0 y 300 ppb, por lo que se calculó que la concentración máxima de rodamina WT debía ser 150 ppb. Este valor es arbitrario y su único objetivo es no sobrepasar el rango lineal del instrumento de medición, evitando así mayor incertidumbre en las medidas.

En la Figura 7.8. Se muestra la gráfica que describe la variación de la concentración del trazador (rodamina WT) en función del tiempo.

**Figura 7.8. Concentración vs Tiempo en la biobarrera secuencial.**



De la forma de la distribución de las concentraciones en el tiempo, se puede hacer una primera aproximación visual, acerca del comportamiento del reactor en estudio: como un reactor en flujo pistón, o, como reactor con mezcla completa. Los detalles del comportamiento de reactores se pueden consultar en Chabra (1997) y Levenspiel (1998). Así, si la distribución tiende a parecerse a una campana de Gauss, se puede decir que hay una combinación de efectos, tanto de flujo pistón como de mezcla completa. En este caso se supone cierta simetría de dicha campana, luego cuanto más pequeña sea la desviación estándar de dichas mediciones, más angosta será la campana, lo cual indica que hay predominio de flujo pistón. Si la desviación de la campana se hace más plana y mostraría entonces, que hay una combinación de efectos, tanto de flujo pistón como de mezcla completa (Levenspiel, 1998).

Cuando las distribuciones de concentración en el tiempo son asimétricas, el comportamiento del reactor tiende a parecerse más a uno de flujo completamente mezclado, así cuanto más asimétrica sea la distribución, menos similar será a un reactor flujo pistón (Levenspiel, 1998).

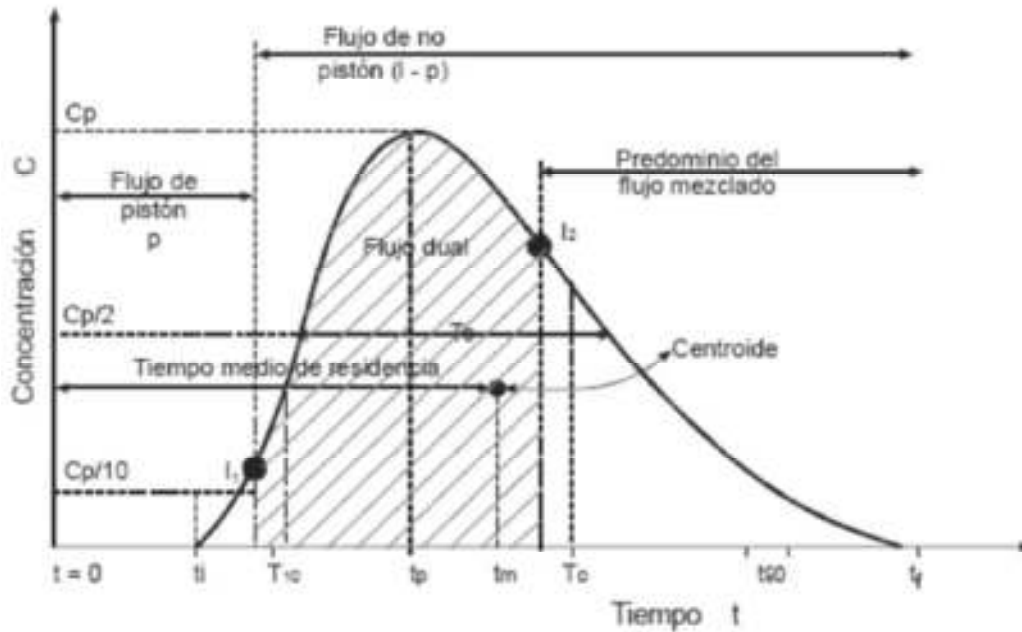
En la Figura 7.8., se puede observar que la biobarrera secuencial tiene un comportamiento similar al reactor mezcla completa, ya que presenta una campana asimétrica.

En la Figura 7.9., se muestra un esquema conceptual, en el cual se explica a que tipo de reactor corresponde cada zona de esta curva, de acuerdo a los

tiempos de residencia del trazador y a las concentraciones para esos mismos tiempos. Los parámetros de la Figura 7.9 se describen en la Tabla 7.4.

En la Tabla 7.4, se presentan los parámetros de los valores obtenidos para ambos reactores.

**Figura 7.9. Esquema conceptual de los tiempos de residencia en la distribución de los tipos de reactores (Tomado de Pérez, 1992).**



**Tabla 7.4: Principales parámetros a tener en cuenta en una curva Concentración vs Tiempo.**

| Parámetro | Descripción  |
|-----------|--|
| $t_i$     | Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que este aparece en el efluente               |
| $t_{10}$  | Tiempo correspondiente al paso del 10 % de la cantidad total de trazador                           |
| $t_p$     | Tiempo modal, corresponde al tiempo para el cual se presenta la máxima concentración en el reactor |
| $t_m$     | Tiempo mediano, corresponde al paso del 50% del trazador   |
| $t_o$     | Tiempo teórico de retención  |
| $t_{90}$  | Tiempo correspondiente al paso del 90 % del trazador   |
| $t_f$     | Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador                                |
| $t_c$     | Tiempo para el cual la concentración es mayor que $C_p/2$  |
| $C_o$     | Concentración inicial  |
| $C_p$     | Concentración máxima   |

**Tabla 7.5. Valores de los principales parámetros encontrados para la biobarrera secuencial**

| Parámetro | Biobarrera Secuencial |
|-----------|-----------------------|
| $t_i$     | 0.0425                |
| $t_{10}$  | 1.3695                |
| $t_p$     | 2.6918                |
| $t_m$     | 2.787                 |
| $t_0$     | 24                    |
| $t_{90}$  | 4.0716                |
| $t_f$     | Indeterminado         |
| $t_c$     | 1.9580                |
| $C_p$     | 145                   |

A continuación, se establece una serie de relaciones cualitativas que permiten establecer la presencia de cortocircuitos, zonas muertas, zonas de retención, procesos de difusión, a su vez permite establecer a qué tipo de reactor se asimila el reactor en estudio, entre otros (Pérez, 1992).

a)  $t_i / t_0$ : Mide cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo pistón y a 0 para flujo mezclado. Valores mayores a 0.3 indican la presencia de cortocircuitos. Para el caso de la biobarrera secuencial el valor encontrado fue de 0.0018, este valor que es muy próximo a cero, muestra dos cosas: la primera de ellas es que hay un predominio del modelo de flujo completamente mezclado, y la segunda es que no hay indicadores de presencia de cortocircuitos fuertes en el reactor.

b)  $t_m/t_0$ : Si esta relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos, mientras que si es mayor de la unidad, hay dos posibilidades; la primera de ellas es que haya errores de medición, la segunda es que en el reactor haya presencia de espacios muertos, es decir zonas donde el fluido se queda estancado, para luego, salir lentamente. Esto hace que la rama descendente de la curva se presente algo alargada, por lo cual el centroide del área bajo la curva de concentración se desplaza hacia la derecha, aumentando el valor del parámetro  $t_m$ . Para mayor claridad del lector mirar la Figura Xv. Para el caso de la biobarrera secuencial el valor de este parámetro es de 0.1161 lo cual indica que hay presencia de cortocircuitos débiles.

c)  $t_p / t_0$ : Indica la relación de flujo pistón y de flujo completamente mezclado. Cuando esta relación es igual a 1, existe únicamente flujo pistón, mientras que si es 0 existe presencia de flujo completamente mezclado. A su vez cuando esta relación se aproxima a 1 y la relación  $t_i / t_0$  es mayor que 0.5, se puede concluir que existe predominio de flujo pistón, y cuando se aproxima a cero, existe predominio del flujo

mezclado. Para el caso de la biobarrera secuencial esta relación presenta un valor de 0.1121, lo que confirma una vez más el predominio de flujo completamente mezclado en este reactor.

d)  $t_c / t_0$ : Este parámetro está relacionado en general con el fenómeno de difusión. Para el flujo completamente mezclado es del orden de 0.7. Para la biobarrera secuencial se encontró un valor de 0.08, lo cual es razonable, ya que por ser un biorreactor, este fenómeno está asociado a la biopelícula y cuando se realizó la prueba de trazadores, no habían microorganismos en el medio.

## 7.4 Remoción de compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados

En la presente investigación se tomaron lixiviados provenientes de la planta de tratamiento de la granja ambiental “Los Saltos”, las cual aplica tratamientos fisicoquímicos con el propósito de disminuir la carga orgánica en sus efluentes.

La DQO a la entrada de la planta es en promedio 2392 mg/L DQO-O<sub>2</sub> y luego de la secuencia de tratamientos aplicados en la planta este parámetro se reduce a 977 mg/L DQO-O<sub>2</sub>. Según los datos reportados en el análisis fisicoquímico del año 2010, la eficiencia del proceso realizado, con respecto a este parámetro corresponde a 59.16%.

Los lixiviados con DQO inferior a 7000mg/L DQO-O<sub>2</sub>, se encuentran reportados como producto de rellenos sanitarios con una edad igual o menor a dos años, como es el caso del relleno sanitario y granja ambiental “Los saltos” en los días de muestreo.

La DBO a la entrada de la planta es en promedio 305 mg/L DBO<sub>5</sub> y luego de la secuencia de tratamientos aplicados en la planta este parámetro se reduce a 139 mg/L DBO<sub>5</sub>. Según estos datos reportados en el análisis fisicoquímico del mes del año 2010, la eficiencia del proceso realizado, con respecto a este parámetro corresponde a 54.42%.

La relación DBO<sub>5</sub>:DQO en la entrada en la planta es de 0.1275 y a la salida de la misma es de 0.1423, lo que indica que la materia orgánica es fácilmente biodegradable (Tsilogeorgis J, 1994).

La fase experimental de este estudio se realizo con lixiviado crudo, que ya había sido tratado por la planta de tratamiento pero que aun tenía un alto contenido de compuestos orgánicos, inorgánicos y nitrogenados. El ensayo en el laboratorio se realizo durante cuatro meses, distribuidos así: el primer mes se realizo la prueba con el trazador, para identificar el tipo de flujo predominante en el reactor, y posteriormente se cargo el reactor con lixiviado crudo, que ya había sido tratado por la planta de la granja ambiental “Los saltos”. Durante este mes se realizo un monitoreo constante para verificar el desarrollo de la biopelícula y las variaciones en la carga.

Durante los primeros veinte días no hubo ningún cambio significativo en las características fisicoquímicas del lixiviado, pero se observo el desarrollo de la biopelícula alrededor del material de soporte (polietileno de baja densidad), donde se desarrollaron consorcios microbianos estratificados, de aproximadamente 3 mm de ancho.

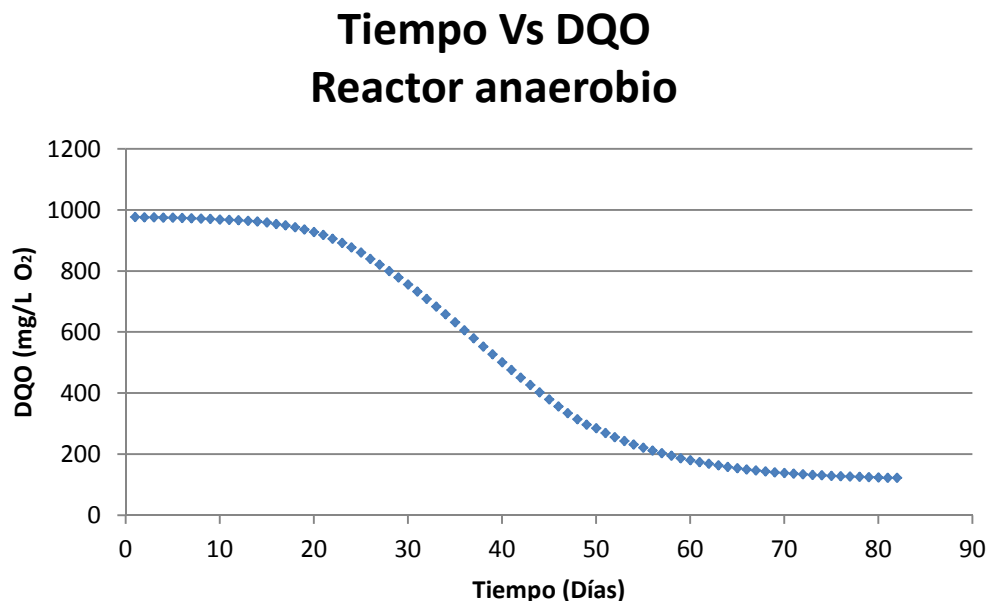
A partir del día treinta se registraron cambios en el contenido de sólidos y en la demanda biológica de oxígeno (DBO), por lo que se inicio el registro de diferentes parámetros como: demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), sólidos suspendidos totales (SST), solidos totales (ST), nitritos y nitratos.

El registro se realizo durante un periodo de 90 días, la DQO se realizo cada 24 horas, mientras que las demás pruebas se realizaron cada 5 días.

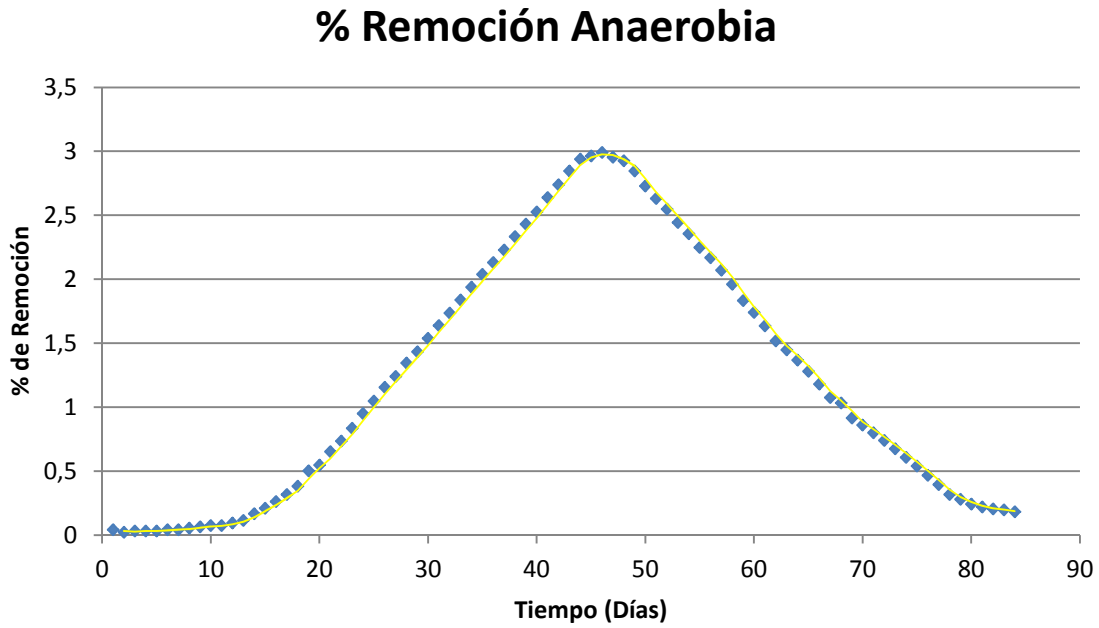
A continuación se analizaran cada uno de los parámetros monitoreados:

1. **Demanda química de oxígeno (DQO):** El lixiviado crudo proveniente de la planta de tratamiento “Los Saltos” presentaba una DQO de 977 mg/L DQO-O<sub>2</sub>, luego de 30 días de operación del sistema la DQO registrada fue 976.4 mg/L DQO-O<sub>2</sub>, presentando una leve variación, ya que las bacterias tardaron este tiempo en adaptarse al medio para iniciar su proceso de remoción. A partir de este día se tomaron muestras durante los 90 días siguientes, tanto en el reactor anaerobio, como en el aerobio y se construyeron los siguientes gráficos.

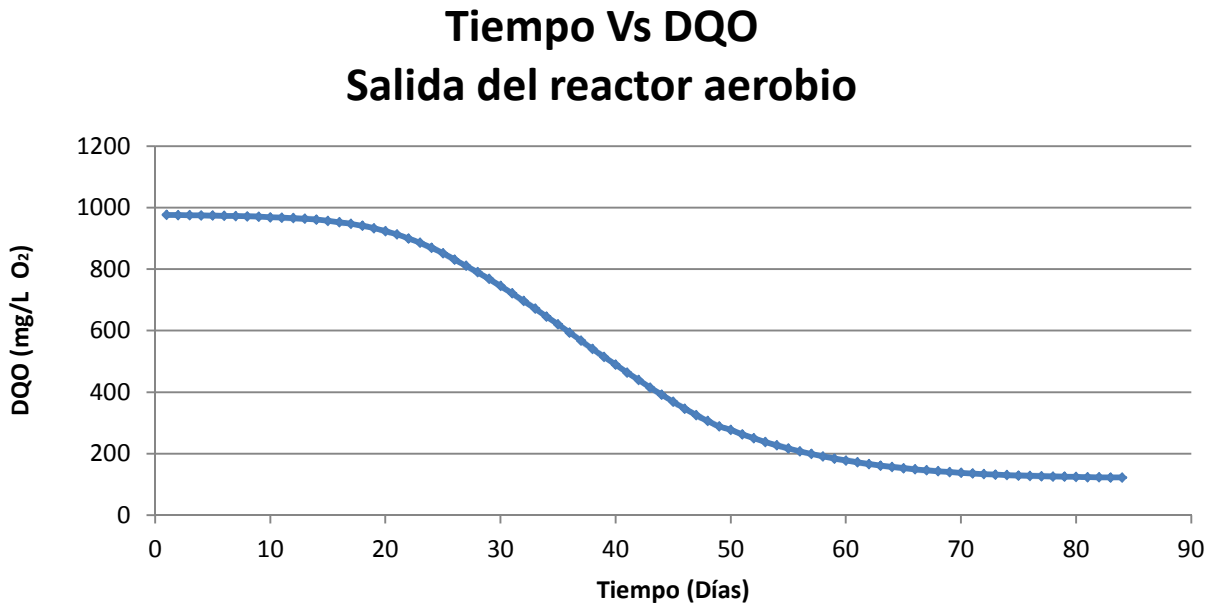
**Figura 7.10. Reactor anaerobio:  
Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo**



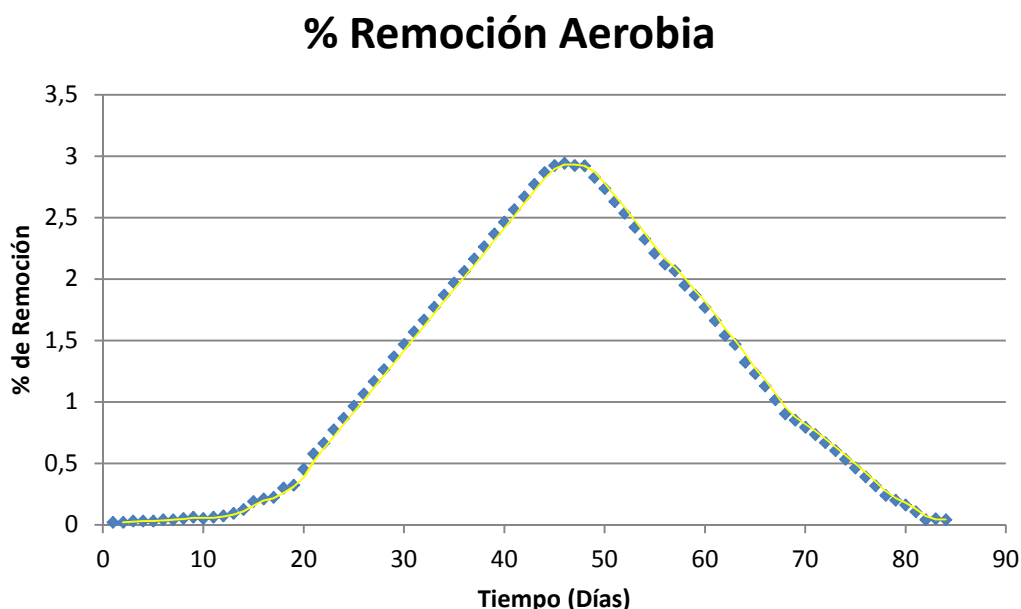
**Figura 7.11. Reactor anaerobio:  
Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo**



**Figura 7.12. Reactor aerobio:  
Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo**



**Figura 7.13. Reactor aerobio:  
Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo**



Como podemos observar en estos gráficos, las diferencias entre el proceso anaerobio y aerobio son mínimas, debido a que el sistema biobarrera secuencial y el flujo completamente mezclado, garantizan que el proceso de remoción se haga conjuntamente, en etapas consecutivas y continuas.

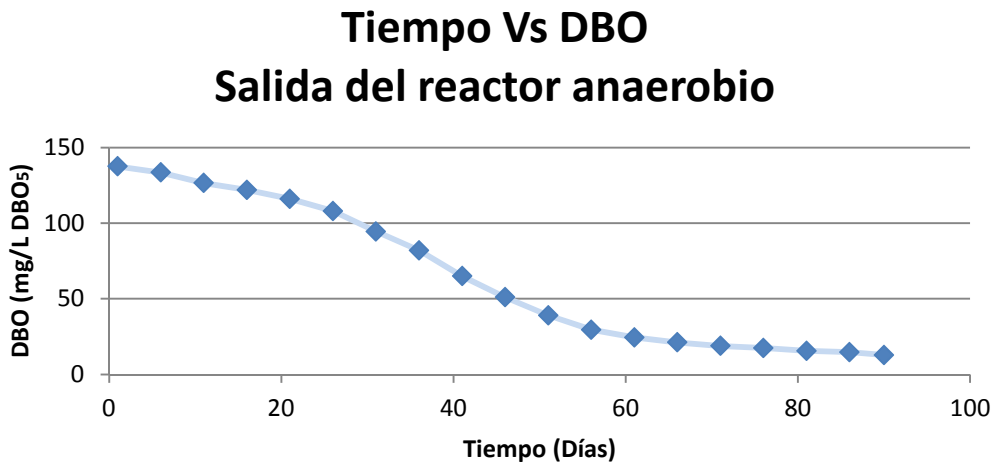
En la Figura 7.12, se puede observar como la concentración final corresponde a un valor de 121.12 mg/L DQO-O<sub>2</sub>, lo que corresponde a una remoción total del 87.6% con respecto a los 977 mg/L DQO-O<sub>2</sub> que se tenían al inicio.

Observando la Figura 7.13, se puede inferir que entre los días 20 y 50 hay una disminución de un 66% en la demanda química de oxígeno, pasando de 928.2 mg/L DQO-O<sub>2</sub> a 277.5 mg/L DQO-O<sub>2</sub>, lo que indica que es el tiempo de mayor remoción, ya que hay una disminución de las sustancias que hay disueltas en el medio, susceptibles de ser oxidadas por medios químicos.

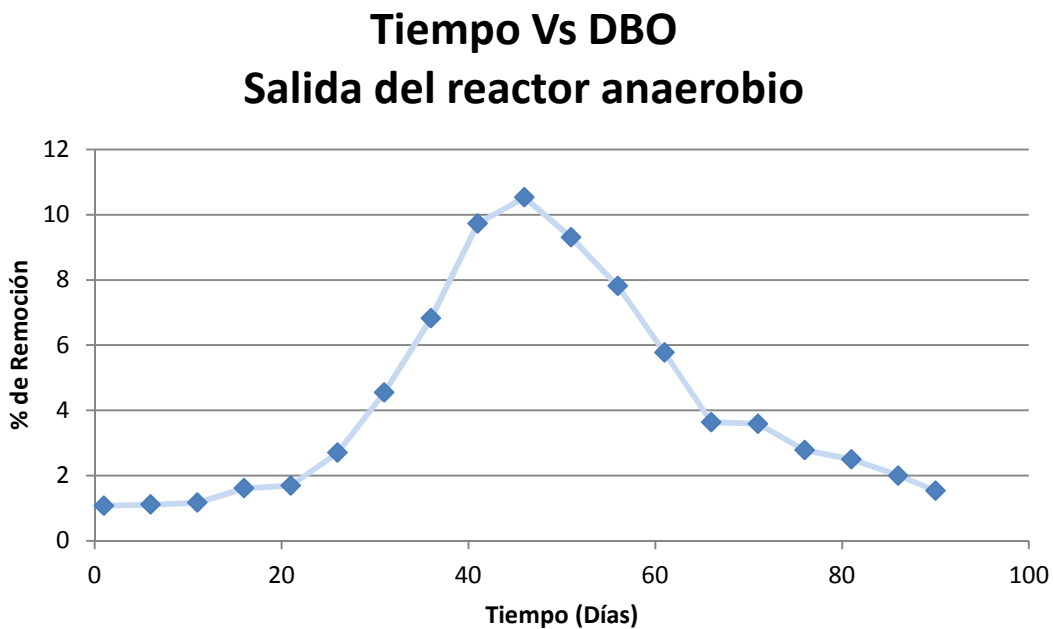
- 2. Demanda biológica de oxígeno (DBO):** El lixiviado crudo proveniente de la planta de tratamiento “Los Saltos” presentaba una DBO de 139 mg/L DBO<sub>5</sub>, luego de 30 días de operación del sistema la DBO registrada fue 135 mg/L DBO<sub>5</sub>, presentando una leve variación, ya que las bacterias tardaron este tiempo en adaptarse al medio para iniciar su proceso de remoción.

A partir de este día se tomaron muestras cada cinco días, durante los 90 días siguientes, tanto en el reactor anaerobio, como en el aerobio y se construyeron los siguientes gráficos.

**Figura 7.14. Reactor anaerobio:  
Demanda biológica de oxígeno (DBO) vs Tiempo**

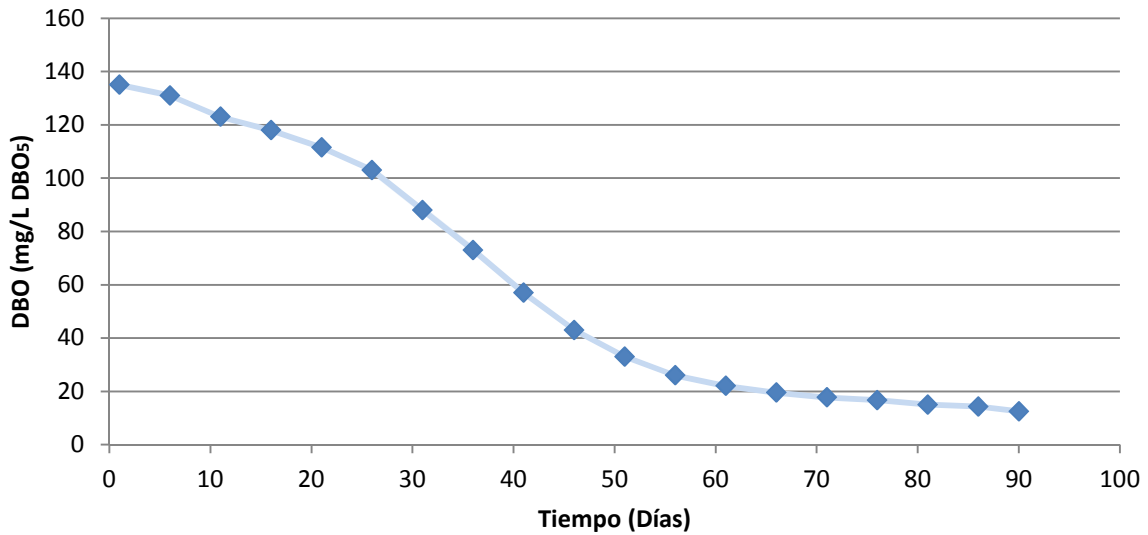


**Figura 7.15. Reactor anaerobio:  
Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo**



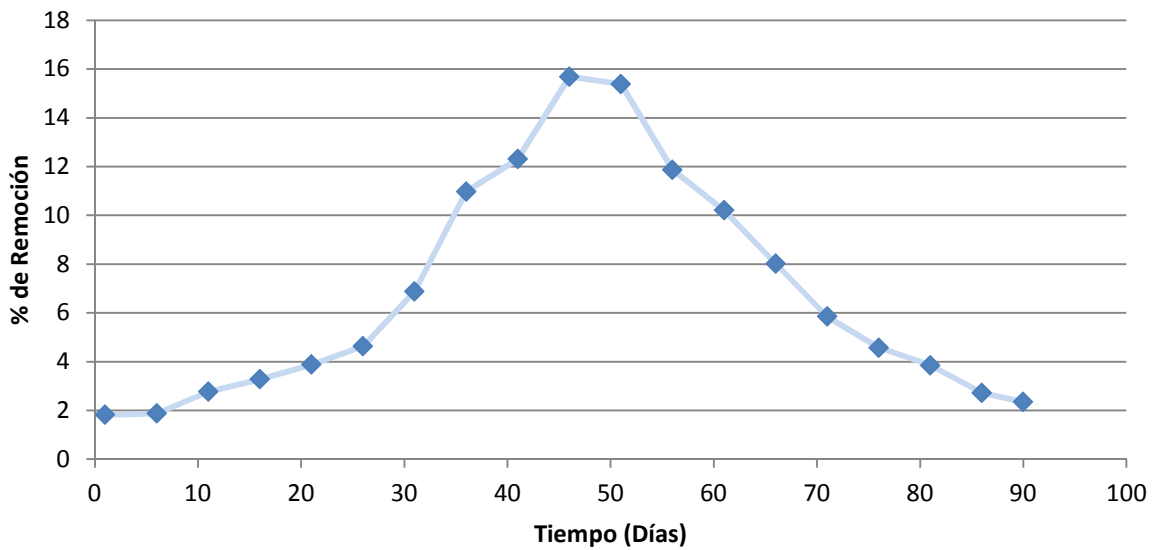
**Figura 7.16. Reactor aerobio:  
Demanda química de oxígeno (DQO) vs Tiempo**

**Tiempo Vs DBO  
Salida del reactor aerobio**



**Figura 7.17. Reactor aerobio:  
Porcentaje de Remoción Relativo vs Tiempo**

**Tiempo Vs DBO  
Salida del reactor aerobio**



Como se puede observar en estos gráficos, las diferencias entre el proceso anaerobio y aerobio son considerables, debido a que en el reactor aerobio se alcanzan porcentajes de remoción relativos hasta 15%, mientras que en el reactor anaerobio solo se logra un nivel máximo de 10,5%. Esto se puede presentar, debido a que la digestión aeróbica es mucho más rápida.

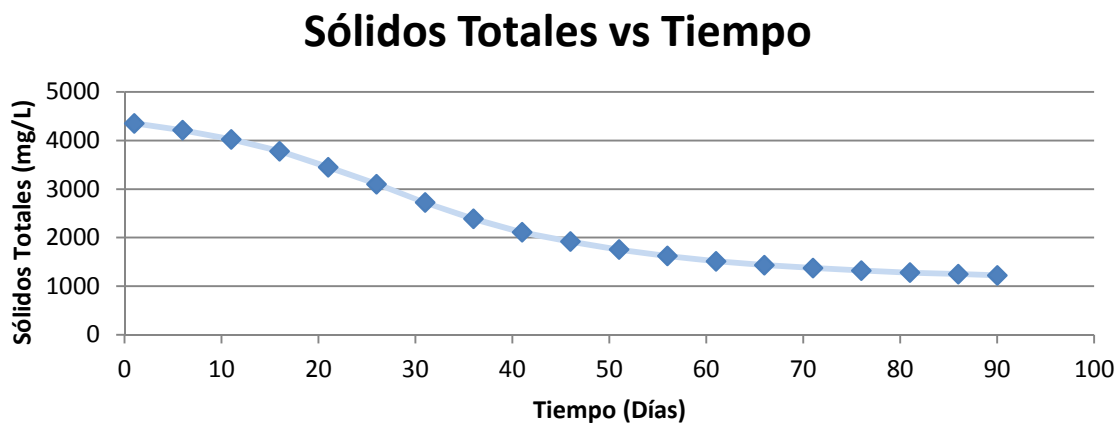
Observando la Figura 7.17, se puede inferir que entre los días 20 y 50 hay una disminución de un 60% en la demanda biológica de oxígeno, pasando de 118 mg/L DBO<sub>5</sub> a 33 mg/L DBO<sub>5</sub>, lo que indica que es el tiempo de mayor remoción, ya que hay una disminución de las sustancias susceptibles de ser consumidas u oxidadas por medios biológicos.

En la Figura 7.16, se puede observar como la concentración final corresponde a un valor de 12.5 mg/L DBO<sub>5</sub>, lo que corresponde a una remoción total del 90.9% con respecto a los 139 mg/L DBO<sub>5</sub> que se tenían al inicio.

**c) Sólidos totales:** El lixiviado crudo proveniente de la planta de tratamiento “Los Saltos” presentaba un nivel de sólidos totales de 4663 mg/L, luego de 30 días de operación del sistema los sólidos totales registrados fueron 4463 mg/L, presentando una variación considerable, lo que indica que el proceso microbiano inicio durante este tiempo.

A partir de este día se tomaron muestras cada cinco días, durante los 90 días siguientes, tanto en el reactor anaerobio, como en el aerobio y se construyeron los siguientes gráficos.

**Figura 7.18. Concentración de sólidos totales vs Tiempo.**



**Figura 7.19. % de Remoción de Sólidos Totales Relativo vs Tiempo**

## % de Remoción de Sólidos Totales Relativo vs tiempo

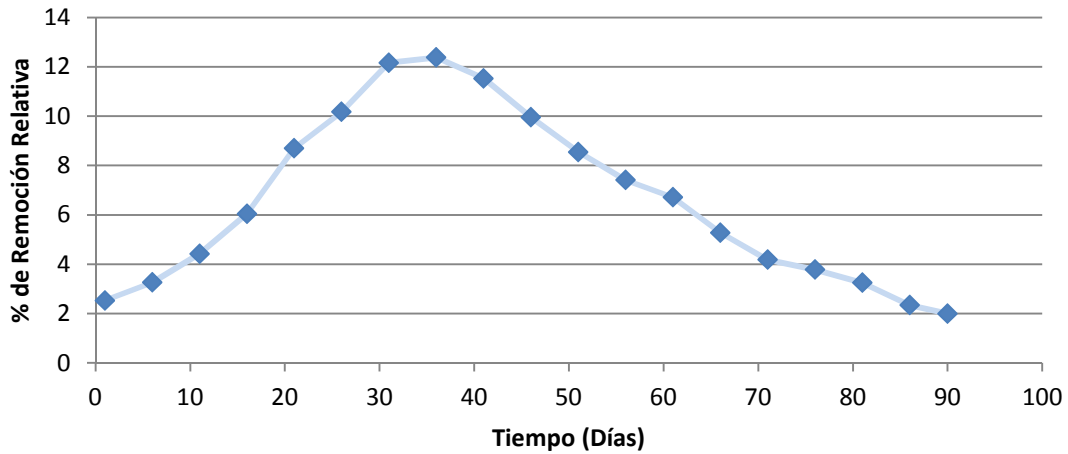
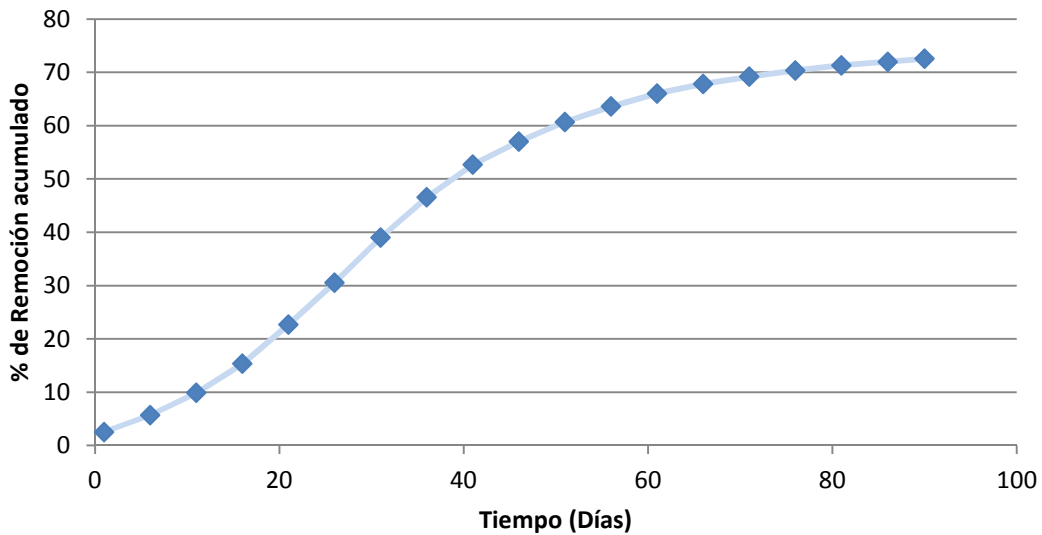


Figura 7.20. % de Remoción de Sólidos Totales Acumulado vs Tiempo

## % de Remoción de Sólidos Totales Acumulado vs Tiempo



Como podemos observar en estos gráficos, la prueba de sólidos totales se aplicó al inicio y al final del sistema, integrando los procesos anaerobio – aerobio.

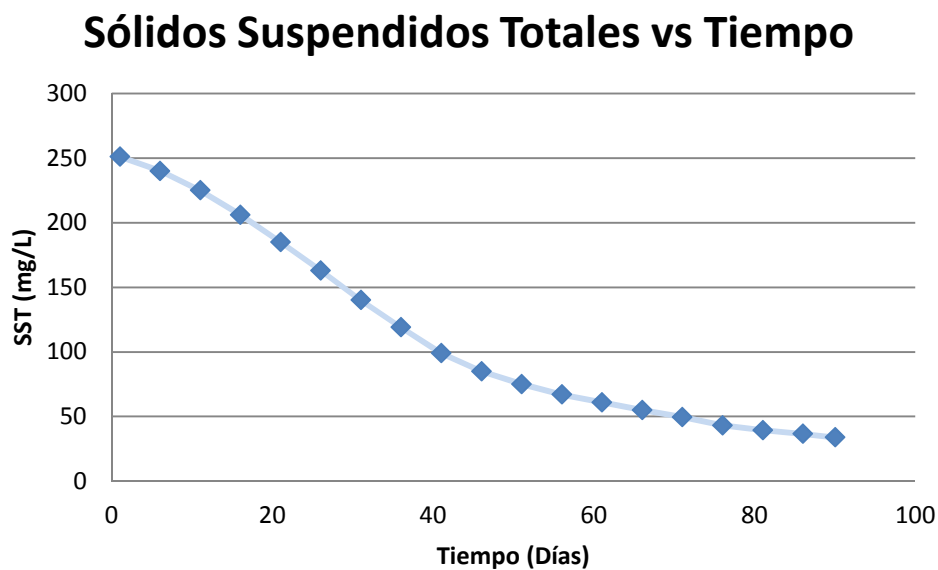
Observando la Figura 7.19, se puede inferir que entre los días 21 y 51 se presenta la mayor remoción de sólidos, alcanzando un porcentaje de remoción del 60% de los sólidos totales presentes en el lixiviado, pasando de 3779 mg/L a 1754 mg/L, lo que indica que es el tiempo de mayor remoción, ya que hay una disminución de partículas, que incluye a los sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables.

En la Figura 7.20, se puede observar como la concentración final de sólidos totales corresponde a un valor de 1225 mg/L, lo que corresponde a una remoción total del 72.55% con respecto a los 4463 mg/L que se tenían al inicio.

**d) Sólidos suspendidos totales:** El lixiviado crudo proveniente de la planta de tratamiento “Los Saltos” presentaba un nivel de sólidos suspendidos totales de 254 mg/L, luego de 30 días de operación del sistema los sólidos suspendidos totales registrados permanecían constantes, lo que indica que el proceso microbiano no tuvo efecto sobre los sólidos suspendidos totales en este tiempo.

A partir de este día se tomaron muestras cada cinco días, durante los 90 días siguientes, tanto en el reactor anaerobio, como en el aerobio y se construyeron los siguientes gráficos.

**Figura 7.21. Concentración de sólidos suspendidos totales vs Tiempo.**



**Figura 7.22. % de Remoción Relativa de Sólidos Suspendidos Totales vs Tiempo.**

### % de Remoción de SST vs Tiempo

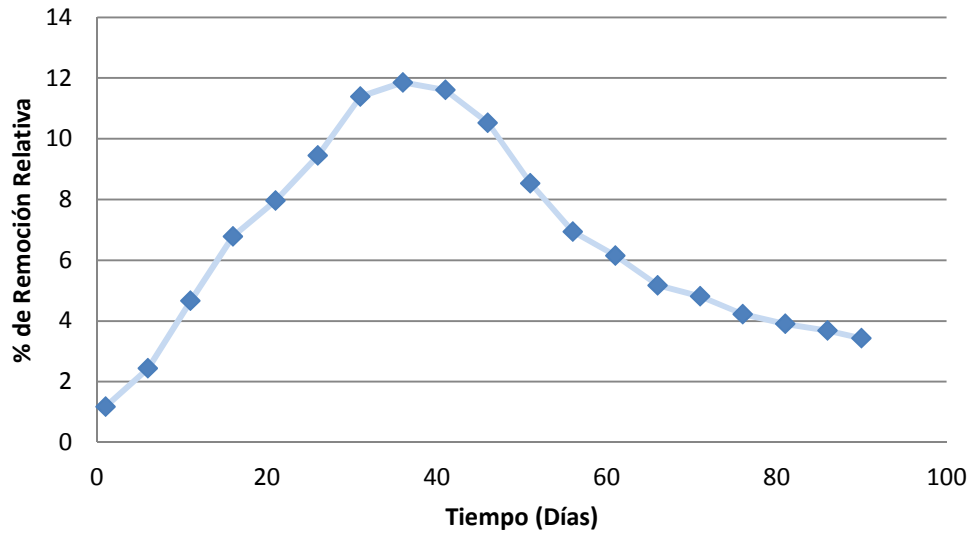
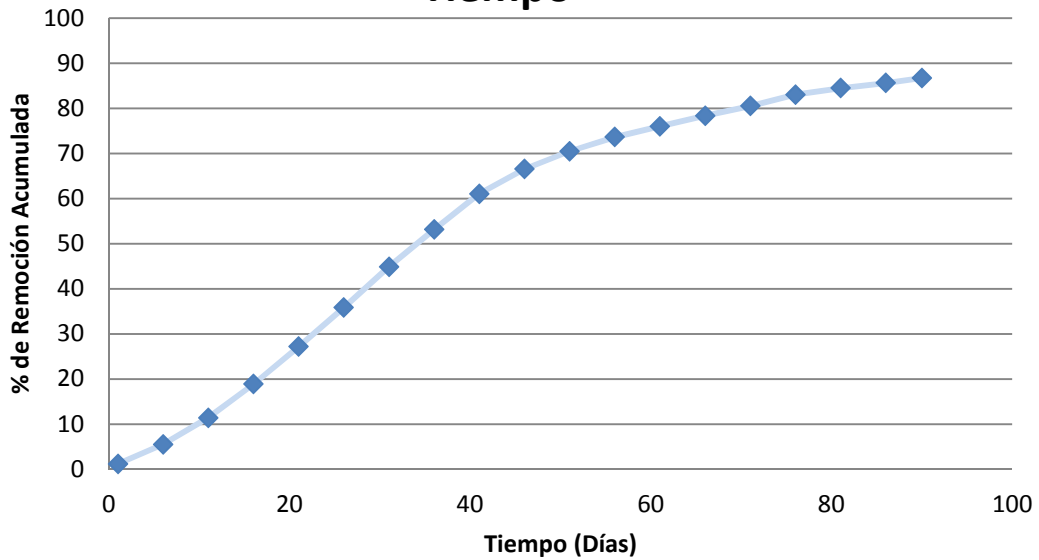


Figura 7.23. % de Remoción Acumulada de Sólidos Suspendidos Totales vs Tiempo.

### % de Remoción de SST Acumulada vs Tiempo



Como podemos observar en estos gráficos, la prueba de sólidos suspendidos totales se aplicó al inicio y al final del sistema, integrando los procesos anaerobio – aerobio.

Observando la Figura 7.22, se puede inferir que entre los días 21 y 51 se presenta la mayor remoción de sólidos, alcanzando un porcentaje de remoción del 70% de los sólidos suspendidos totales presentes en el lixiviado, pasando de 201 mg/L a 75 mg/L, lo que indica que es el tiempo de mayor remoción, ya que hay una disminución de las partículas que flotan, tales como: partículas de alimentos, restos de papel, madera en descomposición, entre otros.

Este es un gran avance, ya que en promedio estos sólidos son 70% orgánicos y 30% inorgánicos, lo que permite inferir que hay una transformación biológica de los compuestos que flotaban en el agua.

En la Figura 7.23, se puede observar como la concentración final de sólidos suspendidos totales corresponde a un valor de 33.8 mg/L, lo que corresponde a una remoción total del 86.7% con respecto a los 254 mg/L que se tenían al inicio.

**e) Compuestos nitrogenados:** El lixiviado crudo proveniente de la planta de tratamiento “Los Saltos” presentaba un nivel de compuestos nitrogenados (nitratos + nitritos) de 1,16 mg/L, luego de 30 días de operación del sistema los la concentración de nitratos era de 0.994 mg/L y la de nitritos era de 0.166 mg/L, lo que indica que el proceso microbiano no tuvo efecto sobre los compuestos nitrogenados en este tiempo.

A partir de este día se tomaron muestras cada cinco días, durante los 90 días siguientes, tanto en el reactor anaerobio, como en el aerobio y se construyeron los siguientes gráficos.

**Figura 7.24. Concentración de Nitratos + Nitritos vs Tiempo**

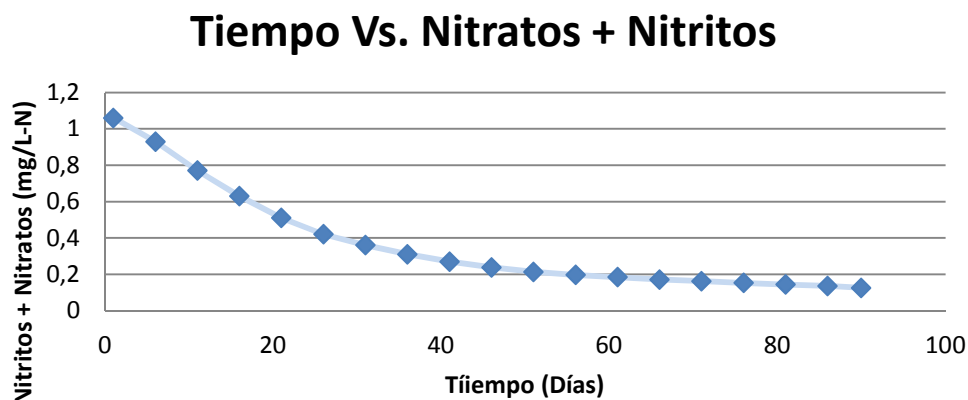


Figura 7.25. % de Remoción Relativa de Compuestos Nitrogenados vs Tiempo.

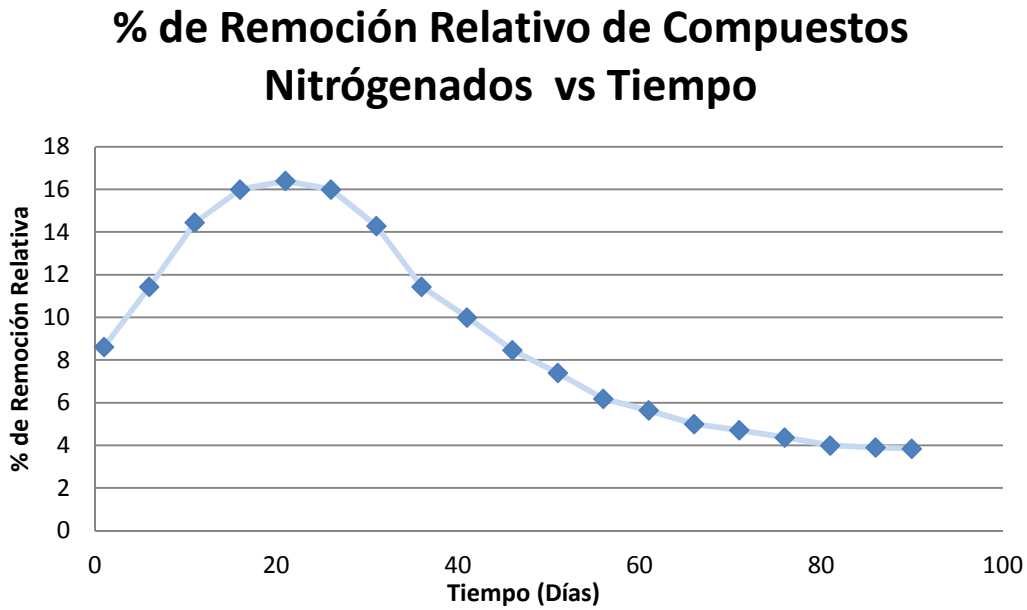
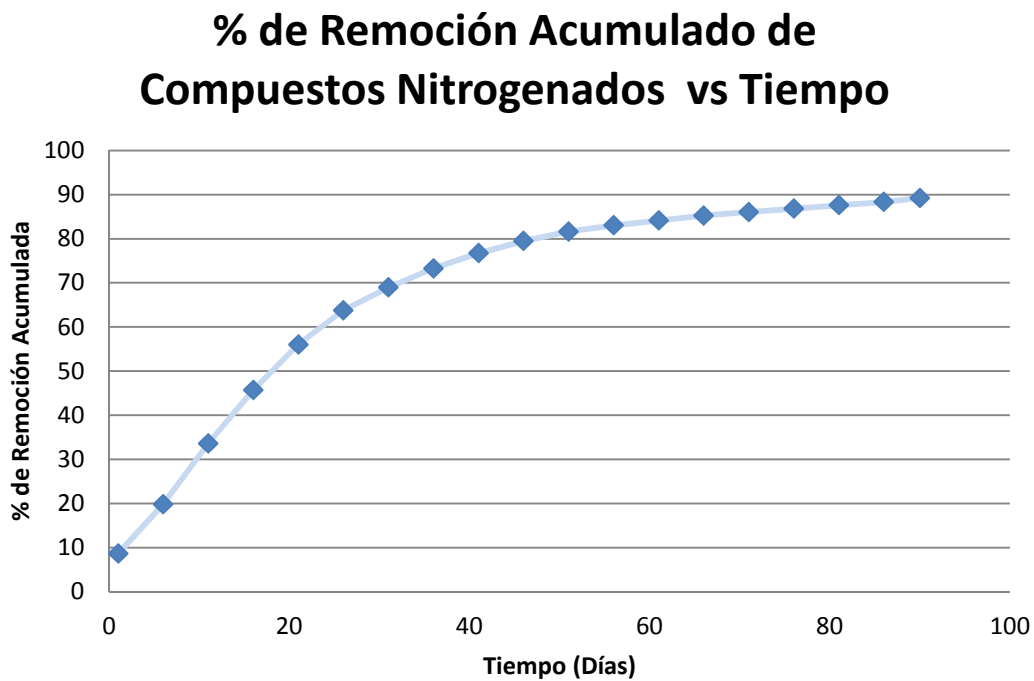


Figura 7.26. % de Remoción Acumulada de Compuestos Nitrogenados vs Tiempo.



Como podemos observar en estos gráficos, la prueba de nitratos y la de nitritos se aplico al inicio y al final del sistema, integrando los procesos anaerobio – aerobio.

Observando la Figura 7.25., se puede observar que durante los primeros 40 días se presento la mayor remoción de compuestos nitrogenados (nitratos + nitritos), alcanzando un porcentaje de remoción acumulado del 76% de los nitritos + nitratos presentes en el lixiviado, pasando de 1.16 mg/L a 0.7 mg/L, lo que indica que hubo un gran desarrollo de especies nitrificantes durante esta etapa.

Este es un gran avance, ya que el nitrógeno genera efectos negativos como la disminución de oxígeno disuelto (OD) en aguas receptoras y su consecuente toxicidad para la vida acuática.

En la Figura 7.26., se puede observar como la concentración final de compuestos nitrogenados corresponde a un valor de 0.115 mg/L, lo que corresponde a una remoción total del 90.08% con respecto a los 1.16 mg/L que se tenían al inicio.

## 8. Conclusiones

Esta investigación ha contemplado el problema de la generación de lixiviados desde tres puntos de vista, en primer lugar analizando la inadecuada disposición de los residuos sólidos del municipio de Marinilla; en segundo lugar desde la gestión ambiental, evaluando los impactos ambientales generados por la construcción, operación y clausura del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos” y finalmente una tercera mirada como la oportunidad para implementar un sistema de tratamiento biotecnológico, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales y la salud de las comunidades adyacentes al proyecto.

Se realizó una revisión de literatura sobre el tipo de tratamientos que se han aplicado a los lixiviados, encontrando que la transformación total de los contaminantes es lograda principalmente por métodos químicos y biológicos. La idea de emplear tratamientos biológicos como estrategia, surge de observar el comportamiento actual de la planta de tratamiento por métodos fisicoquímicos y de las características de los residuos depositados en el relleno sanitario.

Durante la presente investigación se ha resaltado que el grado de dificultad del tratamiento de lixiviados, incrementa debido a la mezcla de los residuos sólidos recolectados; tal vez, la solución final y racional, consista en no producir lixiviados con esas características, disminuyendo su impacto contaminante sobre el medio ambiente. Sin embargo, esta solución se podrá dar, cuando se analice de forma global el flujo de materiales y se tenga una conciencia sobre los costos ambientales generados en la cadena productiva de los materiales, desde su concepción hasta su disposición final. Mientras tanto, el problema continuara siendo apremiante para la sociedad.

El área donde se construyó el relleno sanitario “Los Saltos”, por ser una montaña poco intervenida, daba lugar a un cuerpo de agua totalmente sano, con especies de macroinvertebrados, calidad fisicoquímica y biológica característica de un ambiente acuático limpio en término de contaminantes y aerobio por naturaleza. Por esta razón, el plan de manejo ambiental para los lixiviados, es el plan más importante y complejo en cuanto a cuidado de las aguas, dicho plan se contempla desde el diseño mismo del relleno, y debe ser pensado para cada una de sus etapas: producción, recolección, transporte, almacenamiento y tratamiento posterior.

En la Tabla 8.1., se presentan algunos beneficios que genera el sistema biobarrera secuencial sobre el medio ambiente.

**Tabla 8.1. Beneficios del sistema biobarrera secuencial sobre el medio ambiente.**

| MEDIO          | BENEFICIOS   |
|----------------|--|
| <b>FÍSICO</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- No consume energía eléctrica ni reactivos químicos.</li> <li>- Transforma especies químicas contaminantes en biomasa.</li> <li>- Disminuye la concentración de compuestos contaminantes en las aguas de descarga.</li> <li>- Contribuye a preservar la armonía del paisaje.</li> </ul>                          |
| <b>BIÓTICO</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contribuye a la conservación de los ecosistemas acuáticos.</li> <li>- Disminuye la acumulación de nutrientes en los cuerpos de agua.</li> <li>- Contribuye a la conservación del hábitat de las especies terrestres.</li> </ul>   |
| <b>SOCIAL</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Su instalación no requiere una alta inversión económica.</li> <li>- Tiene bajos costos de operación.</li> <li>- No requiere grandes espacios.</li> <li>- Permite que la comunidad emplee el agua para algunas actividades económicas.</li> <li>- Disminuye la generación de vectores y enfermedades.</li> </ul> |

Como se observa en la Tabla 8.1., el sistema biobarrera secuencial puede beneficiar los tres medios ambientales que se trabajaron en la evaluación ambiental de esta investigación, lo que ratifica su utilidad en el relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”.

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo, presentadas por capítulo.

## **8.1. CONCLUSIONES SOBRE EL CAPÍTULO 6**

En el proceso de evaluación ambiental, se realizó una matriz causa efecto general, una matriz causa efecto detallada y una matriz de valoración, a partir del análisis de los impactos generados por la construcción y operación del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”. En la Tabla 6.7 se observa que las actividades más impactantes fueron:

- a)** Mantenimiento y construcción de nuevas vías de acceso (10).
- b)** Disposición de los residuos sólidos (8).
- c)** Excavaciones y disposición de suelo (7).
- d)** Adecuación de zonas de disposición de residuos (5).
- e)** Funcionamiento de la granja ambiental y del relleno (5).

Durante la etapa de clausura del relleno sanitario, se identificaron dos actividades que generaban mayor impacto:

- a)** Cierre del relleno (4).
- b)** Funcionamiento de la granja ambiental (4).

Como se observa en la Tabla 6.8., los factores más impactados de forma negativa corresponden principalmente a los medios físico y biótico.

En el medio físico, los componentes aire, suelo, hidrológico, hidrogeológico y paisaje, en su respectivo orden, son quienes sufren mayores consecuencias con la operación del proyecto. Aunque hay impactos que afectan en momentos específicos, como el mantenimiento y construcción de vías, durante el primer año. Existen otros, como el manejo y tratamiento de residuos líquidos que afectan durante todo el tiempo de la operación del relleno los diferentes componentes. A la hora de realizar el plan de manejo ambiental se debe priorizar la atención y realizar una evaluación exhaustiva a estos componentes, ya que por tratarse de un proyecto concentrado la sinergia de actividades puede aumentar el efecto del impacto sobre este medio.

En el caso de medio biótico, sus cuatro componentes se ven muy comprometidos con la operación del relleno, en especial la flora y los macroinvertebrados acuáticos quienes requieren unos niveles de oxígeno disuelto para sobrevivir, debe tenerse en cuenta que de la eficiencia del tratamiento realizado en la planta, dependen

comunidades de individuos que pueden desaparecer por los vertimientos con exceso de materia orgánica en descomposición o con niveles altos de nutrientes.

Los impactos positivos, en su mayoría están concentrados en los medios social y físico. En el medio social el proyecto puede ser visto como una alternativa de desarrollo a nivel político organizativo, ya que es una solución al problema de los residuos sólidos generados en el municipio, lo que genera una modificación en el plan de ordenamiento territorial y conlleva a cambios en el desarrollo local y regional.

Por otra parte la apertura de vías y la sede comunitaria que brinda el proyecto, mejora la infraestructura comunitaria de la zona, y se pretende dinamizar otras actividades que le generen ingresos a la comunidad.

En el medio físico las acciones preventivas, como el establecimiento de zonas de protección y distancia de retiros, genera impactos positivos a la hora de evaluar como son la conservación de las geoformas y de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del terreno. Además, la construcción del sistema de drenaje, permite tener unas condiciones geotécnicas favorables.

Por último, en la etapa del cierre del relleno sanitario, se pretende restituir la mayor parte del paisaje, aunque para alcanzar este propósito, hay que desarrollar el plan de manejo con rigurosidad.

## 8.2. CONCLUSIONES SOBRE EL CAPITULO 7

La biobarrera secuencial es un sistema que alcanzo altos niveles de remoción de sólidos, DBO, DQO y compuestos nitrogenados de los lixiviados del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, debido a que los residuos de esta región, en su mayoría son orgánicos, y permiten emplear la secuencia de tratamientos biológicos propuestos.

Al comparar los valores obtenidos para la DQO dados en mg/L DQO – O<sub>2</sub>, el lixiviado que llega a la planta presenta una DQO de 2392 mg/L y al salir de la planta llega aproximadamente a 977 mg/L, lo que indica que la eficiencia del proceso es 59.2%.

Al entrar a la biobarrera secuencial presenta el mismo valor de la salida de la planta, pero al pasar por la secuencia de tratamientos se reduce hasta un nivel de 121.12 mg/L, lo que permite concluir que la eficiencia se incrementa a un 87.6%. No obstante hay que considerar que el tiempo que el lixiviado permaneció en la biobarrera es de 90 días, pero se podría realizar un escalado que se ajuste al volumen generado en el relleno y que obtenga un porcentaje de remoción mayor al que se tiene actualmente.

Si comparamos la DQO a la salida del relleno, con la obtenida después de haber sido tratada por la biobarrera secuencial obtenemos una eficiencia total del 94.9%, lo que indica que el sistema biobarrera secuencial puede ser empleado como un tratamiento complementario en la planta, debido a que permite cumplir con la remoción del 80% de la DQO exigida en el “**decreto 3930 de 2010: Usos del recurso hídrico y vertimientos**”\*, generando un beneficio para la comunidad y finalmente para la conservación del recurso hídrico de la región.

En el caso de la DBO, el registro en la entrada a la planta nos muestra que el valor promedio es 305 mg/L y después del proceso es de 139 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 54.4%. Luego de ser tratada en la biobarrera secuencial se reduce hasta una concentración de 12.5 mg/L, lo que demuestra una remoción del 91%.

Al comparar los resultados obtenidos con los valores de entrada a la planta, se concluye que la eficiencia total combinando los procesos de la planta con la biobarrera secuencial es de 95.9%.

A continuación se presenta una tabla resumen, que contiene los niveles obtenidos por ambos sistemas de tratamiento de manera independiente.

---

\*El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, publicó el Decreto 3930 de 2010 en la edición **N° 47.873 del Diario Oficial** (25 de octubre de 2010).

**Tabla 8.2. Comparación entre los niveles de remoción obtenidos por la planta de tratamiento y la biobarrera secuencial.**

| <b>Parámetro</b>                              | <b>Entrada a la Planta</b> | <b>Salida de la Planta</b> | <b>Entrada al sistema BBS</b> | <b>Salida del sistema BBS</b> |
|---|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>DQO (mg/L DQO – O<sub>2</sub>)</b>         | 2392                       | 977                        | 977                           | 121.12                        |
| <b>DBO<sub>5</sub> (mg/L DBO<sub>5</sub>)</b> | 305                        | 139                        | 139                           | 12.5                          |
| <b>DBO<sub>5</sub>:DQO</b>                    | 0.12750836                 | 0.14227226                 | 0.14227226                    | 0.10320343                    |
| <b>Sólidos totales (mg/L)</b>                 | 6020                       | 4663                       | 4663                          | 1225                          |
| <b>Sólidos suspendidos totales (mg/L)</b>     | 1222                       | 254                        | 254                           | 33.8                          |
| <b>Nitratos + Nitritos (mg/L – N)</b>         | -----                      | 1.16                       | 1.16                          | 0.115                         |

Como se observa en la Tabla 7.6., la relación DBO<sub>5</sub>: DQO disminuye a la salida del sistema BBS, con respecto a la inicial, lo que indica que se ha removido parte de la materia orgánica presente en el medio.

Con respecto a los sólidos totales, en el momento que el lixiviado ingreso a la planta presentaba una concentración de 6020 mg/L, luego del proceso de tratamiento realizado en la planta su concentración disminuyo a 4663 mg/L. Con los resultados anteriores la eficiencia del proceso era de 22.54% para sólidos.

Luego de realizar la prueba de sólidos totales, el lixiviado se llevo a la biobarrera secuencial, allí bajo el nivel de sólidos hasta alcanzar una concentración de 1225 mg/L, calculando la eficiencia de este proceso se obtuvo una remoción del 73.7% de los sólidos; pero si comparamos el valor obtenido al pasar por la biobarrera con el de la entrada de la planta se obtiene una eficiencia del 79.65%. Este resultado nos demuestra que la biobarrera secuencial tiene es un buen mecanismo para el tratamiento de sólidos y que puede ser empleada como un tratamiento adicional dentro de la planta.

Para sólidos suspendidos totales se tuvo un nivel de 1222 mg/L a la entrada de la planta y de 254 mg/L a la salida. Luego de pasar por la biobarrera secuencial, el nivel de sólidos suspendido totales descendió a 33.8 mg/L, obteniendo una eficiencia de remoción del 86.7%. Si se compara el nivel de sólidos suspendidos totales de la entrada de la planta con el que se obtiene des pues de pasar por la biobarrera, la eficiencia alcanza un valor de 97.2%.

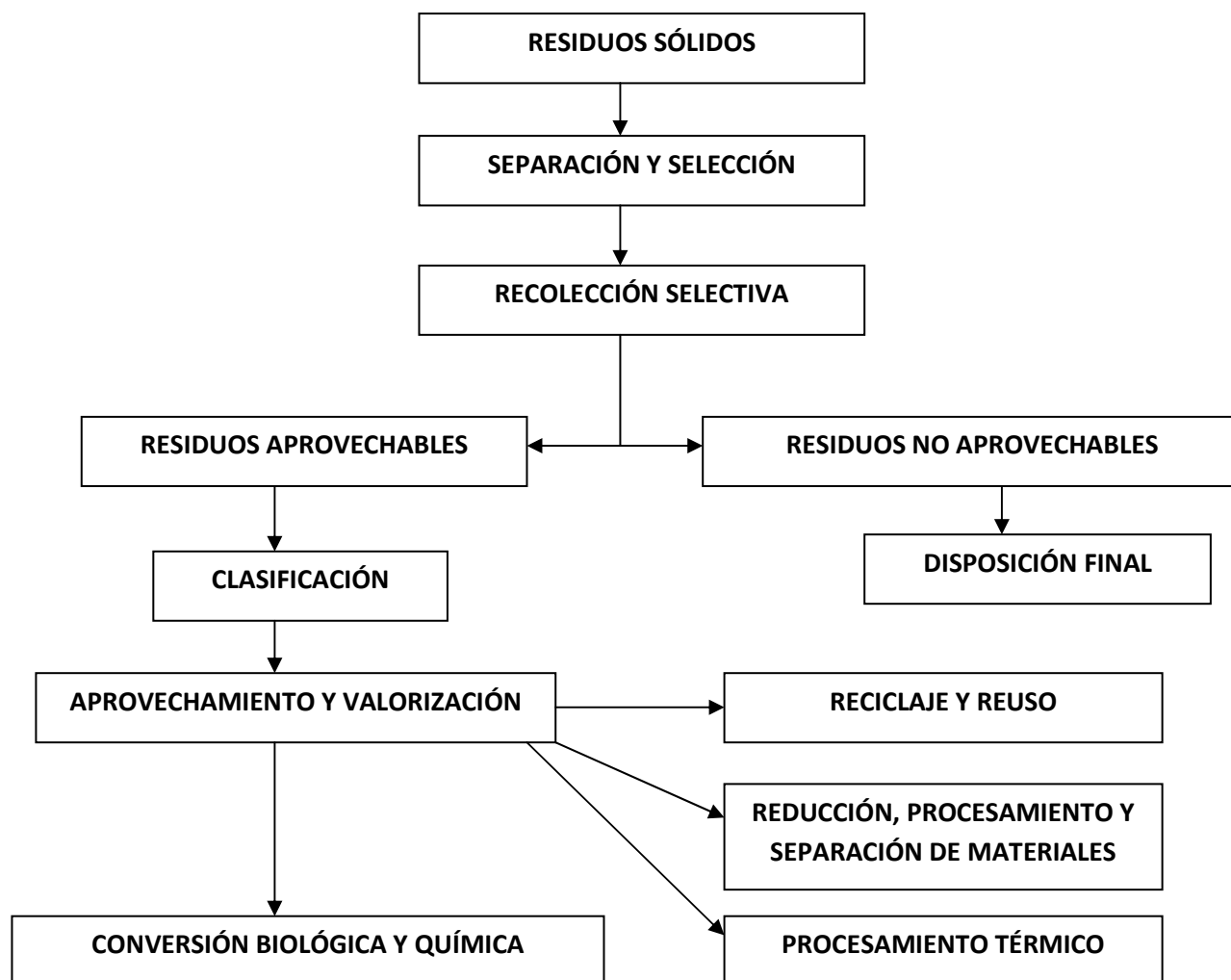
Finalmente para compuestos nitrogenados se evaluó la concentración de nitratos y nitritos a la salida de la planta en la cual se obtuvo una concentración de 1.16 mg/L, luego de pasar por el sistema biobarrera secuencial el nivel de compuestos nitrogenados disminuyó a 0.115 mg/L, para un porcentaje de remoción del 90%.

## 9. Recomendaciones y trabajo futuro.

El tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios es uno de los problemas más complejos en el área de tratamiento de aguas, debido a la variedad de características que se pueden encontrar en este tipo de aguas, y aunque hay muchas tecnologías e investigaciones aplicadas en esta área, todavía hay mucho campo para la investigación y la innovación.

La dificultad para diseñar un tratamiento adecuado para los lixiviados, viene de la mezcla de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios, por lo que se propone una separación de acuerdo al tipo de material, en residuos aprovechables y residuos no aprovechables como lo indica la Figura 9.1.

**Figura 9.1. Alternativas de manejo de los residuos sólidos.**



Fuente: Dimate, 2009.

Los residuos aprovechables comprenden todos los materiales, objetos, sustancias o elementos sólidos, que no tienen valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo. Ejemplo: papel, cartón, vidrio, plástico, metales y aceite usado.

Por el contrario, se entiende por residuo no aprovechable, todos los materiales, objetos, elementos sólidos o sustancias, que no ofrecen ninguna posibilidad de aprovechamiento. Son residuos que no tienen valor comercial y solamente se pueden llevar a disposición final (Dimate, 2009).

También se deben separar los residuos especiales, que son aquellos objetos, elementos o sustancias que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y que por su naturaleza, uso, contacto, cantidad, concentración o características, son infecciosos, tóxicos, combustibles, inflamables, explosivos, corrosivos, radioactivos, reactivos o volatilizables y pueden causar riesgo a la salud humana o deteriorar la calidad ambiental hasta niveles que causen riesgo a la salud humana.

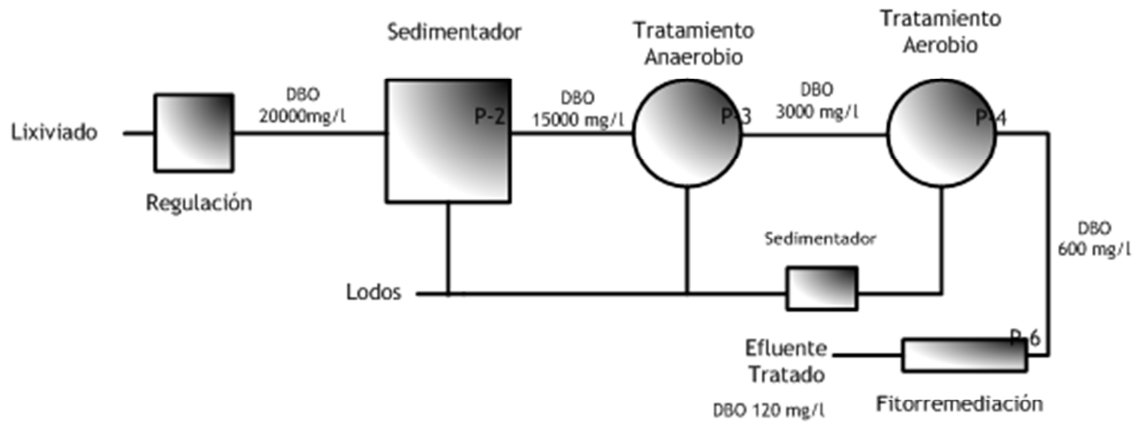
Así mismo se consideran residuos peligrosos los empaques, envases y embalajes, que hayan estado en contacto con dichos residuos y requieren un manejo especial. Quedan incluidos en esta denominación los residuos que en forma líquida o gaseosa se empaquen o envasen.

Para el caso especial del relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”, se recomienda capacitar a los habitantes de la zona rural del municipio, en el manejo de compostaje de los residuos orgánicos, con el propósito de disminuir la presencia de estos en el relleno, debido a que se pueden biodegradar y generar un mejorador de suelos útil para la agricultura.

El sistema biobarrera secuencial puede ser un excelente tratamiento complementario y se puede acoplar luego del proceso realizado en la planta de tratamiento de lixiviados, se recomienda hacer un escalado siguiendo las instrucciones planteadas en la investigación y realizar un monitoreo permanente durante el arranque para determinar un tiempo de residencia, que permita una remoción similar a la encontrada en el piloto.

A continuación se propone una solución eficiente acoplando los tratamientos que actualmente se aplican, con el sistema biobarrera secuencial y una laguna de fitorremediación para obtener mejores resultados.

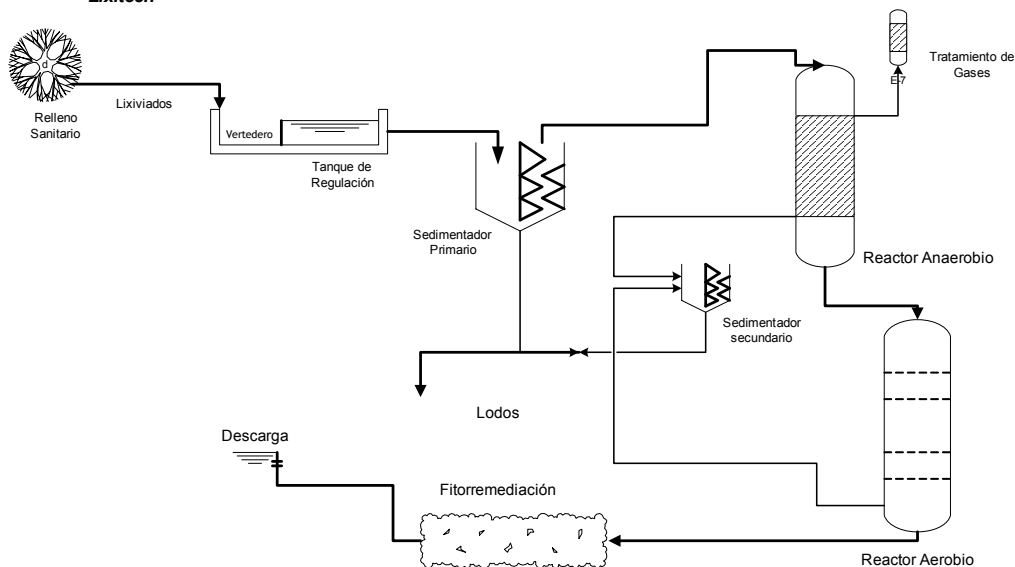
**Figura 9.2. Diagrama de proceso propuesto [Suárez, et al., 2009]**



Como se aprecia en las Figuras 9.2 y 9.3, esta propuesta pretende generar alternativas eficientes y económicamente competitivas para el tratamiento de lixiviados, presentando un sistema integral que incluye una unidad de sedimentación y una torre para volatilizar amonio como pretratamiento. Un reactor experimental de biopelícula anaerobia es operado como BBS, acoplado con un reactor de nitrificación que funciona con aireación natural, aerobia, y finalmente se refina el tratamiento mediante biorremediación en un humedal artificial de flujo subsuperficial.

**Figura 9.3. Tren de tratamiento propuesto.**

Esquema Tratamiento de Lixiviados  
*Lixitech*



## **BIBLIOGRAFÍA**

**ÁLVAREZ A, SUÁREZ J, 2006.** Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. Ingeniería & Desarrollo N°20 ISSN: 0122-3461 Julio - Diciembre 2006.

**BITTON G, 2005.** Wastewater Microbiology [Book]. - Hoboken New Jersey : Wiley, - Vol. Third Edition.

**BODZEK M, LOBOS E, ZAMOROWSKA M, 2006.** Removal of organic compounds from municipal landfill leachate in a membrane bioreactor. Desalination 198: 16–23.

**CALLI B, MERTOGLU B, ROEST K, INANC B, 2006.** Comparison of long-term performances and final microbial compositions of anaerobic reactors treating landfill leachate. Bioresource Technology 97: 641–647.

**CAMPOS, C.M y Anderson, G.K. (1991).** “The effect of the liquid upflow velocity and the substrate concentration on the start-up and the steady state periods of lab scale UASB reactors”, In 6° International Symposium on Anaerobic Digestion. Sao Paulo, Brasil.

**CARDONA S, 2009.** Sistema de tratamiento pasivo de paredes para tratar lixiviados y agua subterránea contaminada. Sometido. Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

**CHANTAL CENENS, ILSE Y. SMETS, VINCENT G. RYCKAERT, JAN F. VAN IMPE, 2000.** Modeling the competition between floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge wastewater treatment systems. II. evaluation of mathematical models based on kinetic selection theory. Water research Vol. 34, No. 9: 2525-2534.

**CHAVARRO M, 2006.** Evaluación de la tratabilidad de los lixiviados en el relleno sanitario de Pereira mediante filtros anaerobios de flujo ascendente a escala piloto [Journal]. Vol: 30 399-304. Scientia et Technica Año XII.

**CHEN S, SUN D. C, JONG S, 2007.** Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic–aerobic moving-bed biofilm reactor system [Journal]. Waste Management 28: 339-346.

**CHEREMISINOFF, N. P, 1996.** Biotechnology for waste y wastewater treatment [Book]. - Westwood, New Jersey : Noyes publications.

**CHEUNG K. C, CHU L. M. AND WONG M. H, 1997.** AMMONIA STRIPPING AS A PRETREATMENT FOR LANDFILL LEACHATE [Journal]. Vol 94: 209–221. Water, Air, and Soil Pollution.

**CONESA FERNANDEZ –VITORA, V, 1997.** Guía metodologica para la evaluación del impacto ambiental. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

**CONTRERAS A, GELVEZ H, SUÁREZ J, 2006.** Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario el Guayabal de la ciudad de San Jose de Cúcuta. [Journal]. Vol: 20. INGENIERÍA & DESARROLLO.

**CORNARE, 2010.** Informe de resultados – Analisis de calidad de aguas, relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”.

**DEVINNY J. S, Y RAMESH J, 2005.** A phenomenological review of biofilter models [Publicación periódica] // Chemical Engineering Journal 113: 187–196.

**DIAZ M, ESPITIA S y MOLINA F, 2002,** Digestión anaerobia: una aproximación a la tecnología. Instituto de biotecnología – Universidad Nacional de Colombia.

**DIMATE C, 2009,** Manejo de Residuos Sólidos. Corporación Ambiental Empresarial CAEM , filial Camara de Comercio de Bogotá CCB.

**Estudio de Evaluación de Impactos Ambientales, 2006.** Contrato N° 006 Empresa de servicios públicos de aseo San José de la Marinilla- SANEAR S.A.

**FERNÁNDEZ A, 2006.** Contaminación por Lixiviados. [Journal] Medio Ambiente Urbano. Consumer Eroski.

**FRANCESE A. y SIÑERIZ F,1990,** “Puesta en marcha de reactores anaerobicos tipo UASB”. Memorias del XXII Congreso de AIDIS, San Juan de Puerto Rico.

**FRANCESE, A. y SIÑERIZ, F, 1994,** “Puesta en marcha de reactores anaerobicos tipo UASB”. Memorias del III Taller y Seminario Latinoamericano “Tratamiento anaerobio de aguas residuales”. Montevideo, (Uruguay).

**GÁLVEZ A, GIUSTI L, ZAMORANO M, RAMOS A, 2009.** Stability and efficiency of biofilms for landfill leachate treatment. Bioresource Technology 100: 4895–4898

**GHANNOUM M, O'TOOLE G, 2004.** Microbial Biofilms [Book]. - Washington : ASM Press.

**GIRALDO E, 2001.** Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes [Journal] // Revista Facultad de Ingenieria Universidad de los Andes 14: 44-55.

**GU Q.B, 2006.** Preparation and Performance of Inorganic Coagulant for Landfill Leachate Pretreatment [Journal]. Vol: 76:98–104. Bull. Environ. Contam. Toxicol.

**HARRY FUTSELAAR, HENK SCHONEWILLE, DICK DE VENDE, LUTE BROENS, 2007.** NORIT AirLift MBR: side-stream system for municipal waste water treatment. Desalination 204: 1–7

**HEKMAT D,Y OTROS, 2006.** Modelling of multispecies biofilm population dynamics in a trickle-bed bioreactor used for waste gas treatment [Publicación periódica] // Process Biochemistry 41: 1409–1416.

**HUO L, SHAO Z, YAN S, PING F, JING L, 2009.** Advanced treatment of landfill leachate by a new combination process in a full-scale plant. Journal of Hazardous Materials 172: 408–415.

**KARGI FIKRET, PAMUKOGLU M. Y, 2003.** Powdered activated carbon added biological treatment of pre-treated landfill leachate in a fed-batch reactor [Journal]. Vol: 25: 695–699. Biotechnology Letters.

**LANE A.G. (1986)** “Start up, operating requirements and granule formation during upflow sludge bed treatment of a strong food processing effluent”. Environmental Technology Letters, Vol. 7.

**LASPIDOU C, RITTMANN B, 2002.** Non-steady state modeling of extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [Publicación periódica] // Water Research 36: 1983–1992.

**LEVENSPIEL O, 1998.** “Ingeniería de las reacciones químicas”. Editorial Reverté. Barcelona, España.638p.

**LOUKIDOU M.X, ZOUBOULIS A.I, 2001.**Comparison of two biological treatment processes using attached growth biomass for sanitary landfill leachate treatment [Journal]. Environmental Pollution 111: 273-281.

**MADIGAN M, MARTINKO J, PARKER J, 2004.** Biología de los Microorganismos [Book]. - ciudad : Prentice Hall, 2004. Décima Edición.

**MARTIENSSEN M, SCHOPS R, 1997.** Biological treatment of leachate from solid Waste landfill sites--alterations in the Bacterial community during the Denitrification process. Water research Vol. 31, No. 5: 1164-1170

**MEHMOOD M, ADETUTU E, NEDWELL D, BALL A, 2009.** In situ microbial treatment of landfill leachate using aerated lagoons. Bioresource Technology 100: 2741–2744.

**METCALF y EDDY, 1995.** “Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización”. Tercera Edición. Editorial Mc Graw Hill, España, 1485 p.

**NIVALA J, HOOS M, CROSS C, WALLACE S, PARKIN G, 2007.** Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. Science of the Total Environment 380: 19–27

**PÉREZ, J, 1992.** “Análisis de flujos y factores que determinan los períodos de retención”. CEPIS/OPS, Manual de Evaluación. Tomo II programa regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad Del Agua para Consumo Humano.

**PEREZ, J, 1997.** Manual de Potabilización de Agua. Universidad Nacional de Colombia. Tercera Edición, 504p.

**PINEDA S.I, 1998.** Manejo y disposición de Residuos Sólidos. Bogotá: Panamericana, 351p.

**RAMALHO R.S, 1996.** Tratamiento de Aguas Residuales [Book]. - ciudad : Reverté.

**RENOU S, GIVAUDAN J, POULAIN S, DIRASSOUYAN F, MOULIN P, 2008.** Landfill leachate treatment: Review and opportunity. Journal of Hazardous Materials 150: 468–493.

**RITTMANN B. E, STILWELLA D, OHASHIB A, 2006.** The transient-state, multiple-species biofilm model for biofiltration processes [Publicación periódica] // Water Research 36: 2342–2356.

**SALEM Z, HAMOURI K, DJEMAA R, ALLIA K, 2008.** Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. Desalination 220:108–114.

**SARAVANAN V. Y SREEKRISHNAN T.R, 2006.** Modelling anaerobic biofilm reactors—A review [Publicación periódica] // Journal of Environmental Management 81: 1-18.

**SAWAITAYOTHIN V, POLPRASERT C, 2007.** Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate. Bioresource Technology 98: 565–570.

**SMAKA-KINCL V, STEGNAR P, LOVKA M, TOMAN M, 1996.** The evaluation of waste, surface and ground water quality using the Allium test procedure. Mutation Research 368: 171 - 179

**SUÁREZ E, CARDONA S, 2009.** Modelación Fenomenológica de una Biopelícula Anaerobia en un Sistema de Barrera Reactiva Permeable para el Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios. Artículo sometido revista DYNA.

**TANAKA N, TOJO Y, MATSUTO T, 2005.** Past, present, and future of MSW landfills in Japan [Publicación periódica] // J Mater Cycles Waste Manag. Vol 7:104–111.

**TCHOBANOGLOUS G, THEISSEN, H y VIGIL S, 1994.** Gestión integral de residuos sólidos, tomo I Madrid: Mc Graw – Hill, 436 p.

**TRABELSI I, SELLAMI I, DHIFALLAH T, MEDHIOUB K, BOUSSELMI L, GHRABI A, 2009.** Coupling of anoxic and aerobic biological treatment of landfill leachate. *Desalination* 246: 506–513.

**TSILOGEORGIS J, ZOUBOULIS A, SAMARAS P, ZAMBOULIS D, 2008.** Application of a membrane sequencing batch reactor for landfill leachate treatment. *Desalination* 221: 483–493.

**WEILAND, P y Rozzi, A. (1991).** “The start-up operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems. Discovers reports”. *Water Science Technology*, 24(8): 252-257.

**WEIMIN W, JIWI H y XIASHENG G, 1986.** “Effect of granulation of sludges in the upflow reactor in solid-liquid separation”. *Uanjing Kexue Xuebae*, 6 (1): 86-95.

**WELANDER L. U., HENRYSSOW T. AND WELANDER T, 1997.** NITRIFICATION OF LANDFILL LEACHATE USING SUSPENDED-CARRIER BIOFILM TECHNOLOGY [Journal]. No. 9, Vol: 31: 2351-2355. . *War. Res.*

**WISZNIOWSKI, J., ROBERT, D. SURMACZ-GORSKA J, 2006.** Landfill leachate treatment methods: A review. *Environ. Chem. Lett.* Vol: 4: 51–61.

**WU L, PENG Y, ZHANG S, PENG Y, 2009.** Nitrogen removal via nitrite from municipal landfill leachate. *Journal of Environmental Sciences* 21: 1480–1485.

**XU Y, ZHOU Y, WANG D, CHEN S, 2008.** Occurrence and removal of organic micropollutants in the treatment of landfill leachate by combined anaerobic-membrane bioreactor technology. *Journal of Environmental Sciences* 20: 1281–1287.

**YANG Z, ZHOU S, 2008.** The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system. *Chemosphere* 72: 1751–1756.

**ZIYANG L, YOUCAI Z, TAO Y, YU S, HUILI C, NANWEN Z, RENHUA H, 2009.** Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. *Science of the Total Environment* 407: 3385–3391.

**ZINDER S.H. y Koch M, 1984,** “Non-acetoclastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by a thermophilic syntrophic co-culture”. *Arch. Microbiology*, 138: 263 - 272.