

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE MATERIA
ORGANICA Y NUTRIENTES DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACION DEL
RELLENO SANITARIO DE POPAYAN
“El Ojito “

NURY ESPERANZA PINTO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2006

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE MATERIA
ORGANICA Y NUTRIENTES DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACION DEL
RELLENO SANITARIO DE POPAYAN
“El Ojito “

NURY ESPERANZA PINTO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar el título de Química

Director

Dra. OLGA LUCIA HOYOS

Asesor

Ing. ADRIANA SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2006

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCION	14
1. MARCO TEORICO	17
1.1 RESIDUOS SOLIDOS	17
1.2 RELLENO SANITARIO	19
1.2.1 Relleno Sanitario Manual	20
1.2.2 Relleno Sanitario Tradicional	20
1.2.3 Bioquímica de un Relleno Sanitario	23
1.2.3.1 Reacciones biológicas en el relleno sanitario	24
1.2.3.1.1 Hidrólisis aerobia	24
1.2.3.1.2 Hidrólisis y fermentación	24
1.2.3.1.3 Acetogènesis	25
1.2.3.1.4 Metanogènesis	25
1.2.3.1.5 Maduración y estabilización	25
1.3 LIXIVIADOS	28
1.3.1 Tratamiento de lixiviados	32
1.3.1.1 Recirculación de lixiviados	32
1.3.1.2 Evaporación de lixiviados	33
1.3.1.3 Tratamientos biológicos	33
1.3.1.3.1 Tratamientos biológicos aerobios	33

1.3.1.3.2	Tratamientos biológicos anaerobios	34
1.3.1.3.3	Proceso biológico Biomembrat	34
1.4	LAGUNAS DE ESTABILIZACION	35
1.4.1	Tipos de lagunas	35
1.4.1.1	Laguna Aerobia	36
1.4.1.2	Laguna Anaerobia	37
1.4.1.3	Laguna Facultativa	38
1.4.1.4	Laguna de maduración	39
1.4.2	Factores que influyen en le funcionamiento de una laguna	40
1.4.2.1	Factores físicos	40
1.4.2.2	Factores químicos	40
1.4.3	Parámetros para la evaluación de la eficiencia de una laguna	41
1.4.3.1	pH	41
1.4.3.2	Temperatura	41
1.4.3.3	Conductividad	41
1.4.3.4	Sólidos totales, suspendidos y disueltos	42
1.4.3.5	Oxígeno disuelto	43
1.4.3.6	Demanda bioquímica de oxígeno	43
1.4.3.7	Demanda química de oxígeno	44
1.4.3.8	Nitrógeno	44
1.4.3.9	Fósforo	45
2.	METODOLOGIA	50
2.1	EQUIPOS Y REACTIVOS	50
2.1.1	Equipos	50
2.1.2	Reactivos	51
2.2	TOMA Y PRESERVACIONDE MUESTRAS	51
2.3	SITIO DE MUESTREO	53
2.4	CARACTERIZACION DE LOS LIXIVIADOS	56

2.4.1	pH	56
2.4.2	Temperatura	56
2.4.3	Conductividad	56
2.4.4	Sólidos totales, suspendidos totales y disueltos	56
2.4.5	Oxígeno disuelto	57
2.4.6	DBO ₅	58
2.4.7	DQO	59
2.4.8	Nitrógeno total	60
2.4.9	Nitratos	61
2.4.10	Fósforo	62
2.4.11	Hierro	63
2.4.12	Cloruros	65
3.	RESULTADOS Y DISCUSION	66
3.1	VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN	67
3.2	MEDICIONES EN CAMPO	67
3.2.1	Variación de pH, temperatura y caudal	67
3.2.2	Variación de conductividad	76
3.3	RESULTADOS DE LABORATORIO	78
3.3.1	Variación de DBO ₅ y DQO	78
3.3.2	Variación de ST, SD y SST	88
3.3.3	Variación de nitrógeno y fósforo	94
3.3.4	Variación de nitratos	101
3.3.5	Variación de hierro	104
3.3.6	Variación de cloruros	107
3.4	Laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”	110
4.	CONCLUSIONES	117
5.	RECOMENDACIONES	120
6.	BIBLIOGRAFIA	121

LISTA DE TABLAS

		Pag
Tabla 1.	Norma según el artículo 72 del decreto 1594 de 1984	19
Tabla 2.	Materiales biodegradables en los residuos sólidos de Popayán	22
Tabla 3.	Composición química de la masa seca de los residuos sólidos de Popayán	23
Tabla 4.	Contaminantes de importancia en lixiviados y sus efectos indeseados	29
Tabla 5.	Contaminantes en lixiviados de rellenos sanitarios, su efecto y determinación	30
Tabla 6.	Composición de lixiviados de rellenos sanitarios, fase acética y metanogénica	32
Tabla 7.	Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo a las mediciones	53
Tabla 8.	Variación de precipitación en la ciudad de Popayán	67
Tabla 9.	Parámetros de campo-entrada de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”	68
Tabla 10.	Parámetros de campo-salida de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”	69
Tabla 11.	Valores de conductividad de la laguna de estabilización	77
Tabla 12.	Valores de DBO ₅ y DQO. Entrada y salida de la laguna de estabilización	78
Tabla 13.	Biodegradabilidad según la relación DBO/DQO	81
Tabla 14.	Biodegradabilidad del lixiviado en la laguna de	81

	estabilización según la relación DBO/DQO	
Tabla 15.	Eficiencia de remoción en carga de DBO ₅ ,DQO y SST en la laguna de estatización del relleno sanitario	83
Tabla 16.	Valores de DBO ₅ , DQO y SST. Entrada y salida de la laguna de estabilización y los porcentajes de remoción	84
Tabla 17.	Valores de ST, SD y SST. Entrada y salida de la laguna de estabilización y porcentajes de remoción	88
Tabla 18.	Eficiencia de remoción en carga de ST, SD y SST en la laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	92
Tabla 19.	Valores de nitrógeno y fósforo y su relación. Laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”	94
Tabla 20.	Eficiencia de remoción en carga de nitrógeno y fósforo en la laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	97
Tabla 21.	Variación en la eficiencia de remoción en carga de nitrógeno y fósforo de la laguna de estatización	98
Tabla 22.	Relación de NKT/ DQO en la entrada de la laguna	100
Tabla 23.	Eficiencia de remoción en carga de nitratos en la laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	102
Tabla 24.	Eficiencia de remoción en carga de hierro en la laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	105
Tabla 25.	Valores de concentración de cloruros de la laguna de estabilización	108
Tabla 26.	Eficiencia de remoción en carga de cloruros en la laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	109
Tabla 27.	Cargas volumétricas del afluyente de laguna de estatización del relleno sanitario “El Ojito”	111
Tabla 28.	Condiciones óptimas para el tratamiento anaerobio	112
Tabla 29.	Tiempos de retención e de la laguna de estabilización	115

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Relleno sanitario de Popayán “El Ojito”	16
Figura 2. Laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”	35
Figura 3. Plano del relleno sanitario	54
Figura 4. Entrada y salida de la laguna de estabilización	54
Figura 5. Entrada de la laguna de estabilización	55
Figura 6. Salida de la laguna de estabilización	55
Figura 7. Curva para nitratos	62
Figura 8. Curva para fósforo	63
Figura 9 Curva para hierro	64
Figura 10 Curva para cloruros	65
Figura 11. Variación de pH. Entrada y salida de la laguna de estabilización	71
Figura 12. Variación de temperatura. Entrada y salida de la laguna de estabilización	72
Figura 13. Variación de caudal. Entrada y salida de la laguna de estabilización	73
Figura 14. Entrada de la laguna de estabilización del relleno	74
Figura 15. Acumulación de lodo	75
Figura 16. Vegetación en le canal de los lixiviados	75
Figura 17. Entrada de la laguna de estabilización	75
Figura 18. Variación de conductividad. Entrada y salida de la laguna de estabilización	77

Figura 19.	Variación de DBO ₅ . Entrada y salida de la laguna de estabilización	79
Figura 20.	Variación de DQO. Entrada y salida de la laguna de estabilización	80
Figura 21.	Variación de la relación DBO/DQO. Entrada y salida de la laguna de estabilización	82
Figura 22.	Eficiencia de remoción en carga de DBO ₅ ,DQO y SST en la laguna de estatización	84
Figura 23.	Tratamiento anaerobio de compuestos orgánicos	85
Figura 24.	Modelo biosustrato de la degradación de DQO	87
Figura 25.	Variación de ST, SD y SST. Entrada de la laguna de estabilización	88
Figura 26.	Variación de ST, SD y SST. Salida de la laguna de estabilización	89
Figura 27.	Variación de la concentración ST de la laguna de estabilización	90
Figura 28.	Variación de la concentración SD de la laguna de estabilización	91
Figura 29.	Variación de la concentración SST de la laguna de estabilización	91
Figura 30.	Eficiencia de remoción en carga de ST, SD y SST en la laguna de estatización	93
Figura 31.	Variación de nitrógeno. Entrada y salida de la laguna de estabilización	95
Figura 32.	Variación de fósforo. Entrada y salida de la laguna de estabilización	95
Figura 33.	Variación en la eficiencia de remoción en carga de nitrógeno y fósforo en la laguna de estatización	98
Figura 34.	Ciclo biológico del nitrógeno	99

Figura 35.	Variación de nitratos. Entrada y salida de la laguna de estabilización	103
Figura 36.	Eficiencia de remoción en carga de nitratos en la laguna de estatización	103
Figura 37.	Variación de hierro. Entrada y salida de la laguna de estabilización	106
Figura 38.	Eficiencia de remoción en carga de hierro en la laguna de estatización	106
Figura 39.	Variación de cloruros. Entrada y salida de la laguna de estabilización	108
Figura 40.	Variación en la eficiencia de remoción en carga de cloruros en la laguna de estatización	110
Figura 41.	Acumulación de lodos en la laguna de estabilización	115

RESUMEN

Actualmente la disposición final de los residuos sólidos se hace en los rellenos sanitarios, donde los residuos se descomponen generando biogases y lixiviados, los cuales se tratan en diferentes sistemas de tratamiento, entre ellos las lagunas de estabilización, para después poder ser vertidos a fuentes naturales de agua. En Colombia, el control de vertimientos de residuos líquidos a fuentes de agua esta reglamentado por el *Decreto 1594 de 1984*, según el cual, los residuos líquidos deben verse con un mínimo de remoción del 80% en DBO y SST. En atención a ello, los lixiviados requieren ser tratados con sistemas que garanticen estos grados de remoción de contaminación.

En este contexto, la Unidad de Análisis Industriales del Departamento de Química de la Universidad del Cauca ha trabajado en conjunto con el Grupo de Aseo de la Secretaria de Infraestructura de la Alcaldía Municipal, realizando análisis fisicoquímicos a los lixiviados de la laguna de estabilización del relleno sanitario de Popayán "EL Ojito". Con miras en profundizar en el conocimiento del funcionamiento de la laguna de tratamiento de los lixiviados se desarrollo el presente trabajo de pasantía en el laboratorio de Aguas de la Unidad de análisis industriales de la Universidad del cauca.

Mediante este trabajo fue posible caracterizar la carga contaminante proveniente del lixiviado del relleno sanitario "el Ojito" ubicado en el kilómetro 7 via Popayán –El tambo Municipio Popayán – Cauca y evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes en la laguna de estabilización del relleno, cuyo efluente puede potencialmente contaminar el río Cauca.

Durante el muestreo de seis meses en la laguna se logró caracterizar la carga contaminante de los lixiviados del relleno, destacándose en primer término la muy alta variabilidad de la misma. Los valores de los parámetros determinados no lograron establecerse dentro de una sola fase en el relleno, ya que presentan características acetogénicas y metanogénicas, debido a que los lixiviados del bloque antiguo y el bloque nuevo son mezclados y luego canalizados a la laguna

La evaluación del funcionamiento de la laguna de estabilización del relleno sanitario de Popayán se realizó básicamente por medio de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes, comparando parámetros como DBO₅, DQO, nitrógeno, fósforo, sólidos totales, suspendidos y disueltos, cloruros, hierro y nitratos, a la entrada y salida de la laguna. Encontrándose bajos porcentajes de remoción de DBO₅, comprendidos entre 24.8-66.1%

Los resultados de este trabajo sirven como aporte para el desarrollo de un estudio continuo del funcionamiento del relleno sanitario y serán una base para plantear posibles alternativas de optimización del tratamiento de lixiviados en la laguna de estabilización.

ABREVIATURAS

DQO :	Demanda química de oxígeno
DBO₅:	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días
ST:	Sólidos totales
SST:	Sólidos suspendidos totales
SD:	Sólidos disueltos
NKT:	Nitrógeno kjeldalh total

INTRODUCCION

La continua producción de residuos sólidos durante las actividades que se desarrollan en casa de habitación, sitios de servicios privados y públicos, construcciones, demoliciones, establecimientos comerciales, etc.¹, acompañado de la poca conciencia del hombre para preservar el medio ambiente, ha generado un problema tan continuo que es considerado como una amenaza real, que atenta contra el bienestar de los seres vivos en general.

La disposición final de los residuos sólidos urbanos ha evolucionado desde vertederos a cielo abierto, hasta rellenos sanitarios altamente tecnificados donde se controlan las emisiones líquidas y gaseosas potencialmente peligrosas para el medio ambiente.²

La generación y composición de lixiviados en los rellenos sanitarios depende de muchos factores como: el grado de compactación de los desechos, la humedad inicial en la basura, la precipitación pluvial, temperatura y evaporación, tipo de desecho, nivel de degradación de los residuos entre otros, pero todos coinciden en que están compuestos por una alta carga orgánica, siendo este su principal factor contaminante. La dificultad para el tratamiento de lixiviados y causa de los pocos éxitos obtenidos, está en la gran cantidad de constituyentes presentes en estos líquidos, así como su variabilidad en el tiempo.²

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes en los que se han ensayado diferentes tratamientos, tanto biológicos (aerobios y anaerobios) como fisicoquímicos.³ Entre los procesos biológicos, se encuentran las lagunas de estabilización, el cual es un tratamiento simple, económico y confiable. Las

lagunas proporcionan la reducción de los contaminantes en una forma que no necesite consumo de energía, además no se requiere de instalaciones que sean muy costosas.

En la ciudad de Popayán y en general en el departamento del Cauca una de las fuentes naturales de agua más importantes es el río Cauca, el cual se caracteriza por su gran permeabilidad, lo que se asocia a su elevada vulnerabilidad. Por este motivo, para protegerlo es de suma importancia coleccionar, tratar y disponer adecuadamente los lixiviados generados en el relleno sanitario de Popayán, puesto que finalmente estos líquidos ya tratados serán depositados en él, siendo el más afectado sino se hace un tratamiento adecuado.

El relleno sanitario de Popayán “El Ojito” comenzó a funcionar en el año 2002 y recibe casi la totalidad de los residuos sólidos no peligrosos de la ciudad. Este es un relleno tradicional (húmedo) en el que se coloca la basura en celdas compactadas, cubiertas con tierra, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogenización y compactación (figura 1). El sistema de permeabilidad está conformado por una capa de geomembrana de polietileno de alta densidad, esta funciona directamente en contacto con los lixiviados cuando estos circulan a través de la capa de filtro. Los lixiviados se coleccionan en el cárcamo de cada una de las celdas y son transportados a través de tubos de pvc hasta la laguna de estabilización.

Este trabajo fue desarrollado mediante un convenio entre la Universidad del Cauca y el Departamento de Aseo de la Alcaldía municipal de Popayán, con el fin de hacer un estudio preliminar sobre el tratamiento biológico de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Popayán a través de una laguna de estabilización, analizando su variabilidad temporal a lo largo de seis meses, por medio de la caracterización fisicoquímica de los lixiviados antes y después de ser tratados en la laguna.

Figura 1. Relleno sanitario de Popayán “El Ojito”



1. MARCO TEORICO

1.1 RESIDUOS SÓLIDOS

El alto nivel de contaminación generado en los centros urbanos se debe principalmente a la gran producción de **residuos sólidos** durante las diferentes actividades humanas diarias. Estos residuos son cualquier elemento sólido que se abandona después de haber sido consumido o usado en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales y de servicios.

Ciertos materiales usados comúnmente en el hogar y que son depositados en los rellenos sanitarios, pueden contener químicos peligrosos. A continuación se resumen algunos de ellos:

- Detergentes para lavar ropa, quitamanchas y otros productos conteniendo solventes pueden poseer: tricloroetileno, benceno, tolueno y cloruro de metileno.
- El esmalte para uñas puede contener: xileno, dibutilaftalato y tolueno.
- Los plásticos usados normalmente pueden contener: cloruro de vinilo, polietileno, formaldehído y tolueno.

También pueden encontrarse metales pesados en los desechos urbanos:

- Los productos electrónicos como TV y radios, el vidrio, las cerámicas, los plásticos, los materiales de bronce y los aceites usados pueden contener: plomo.

- Las baterías de níquel y cadmio, los plásticos, los productos electrónicos, el lavavajillas, el lavarropas, los pigmentos, el vidrio, las cerámicas, los aceites usados y el caucho contienen: cadmio.
- Las baterías, las lámparas fluorescentes, los restos de pinturas, los termómetros, los pigmentos de tintas y los plásticos pueden contener: mercurio.⁴

La evacuación de estos residuos sólidos urbanos constituye un problema de salud pública y ambiental que preocupa permanentemente a las autoridades y la sociedad, es por eso que la gestión integrada de residuos sólidos ocupa un lugar principal dentro de la gestión ambiental.

Existen varias organizaciones internacionales y nacionales dedicadas a estudiar la contaminación causada por estos residuos entre ellas: **ISWA** (Internacional Solid Waste Association), **ARS** (Asociación para el estudio de los residuos sólidos)⁵, **IDEAM**(Instituto de Estudios ambientales), **CVC** (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), **SINA** (Sistema Nacional Ambiental), **ALBEDO** (Asociación Ambiental de Bucaramanga), la **CRC** (Corporación Regional del Cauca) y el **Ministerio del Medio Ambiente** quien es el encargado de establecer la legislación correspondiente a la preservación del medio ambiente en Colombia. El objetivo fundamental de estas organizaciones es proteger el medio ambiente y promover investigaciones, estudios, desarrollo de tecnologías y proyectos tendientes al mejoramiento de los sistemas de recolección, reciclado y disposición final de residuos sólidos.

El Ministerio de salud emitió el decreto 1594 de 1984, el cual hace énfasis en la reducción en origen, el tratamiento, la transformación y disposición final de los residuos sólidos con el fin de minimizar los riesgos que para la salud de los seres humanos y medio ambiente ocasionan estos residuos. Según el **artículo 72 del**

decreto 1594 de 1984, todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, las normas presentes en la tabla 1.

Tabla 1. Normas según el artículo 72 del decreto 1594 de 1984⁶

Referencia	usuario existente	usuario nuevo
PH	5-9	5-9
Temperatura	$\leq 40^{\circ} \text{C}$	$\leq 40^{\circ} \text{C}$
Material flotante	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos domésticos o industriales	Remoción $\geq 50\%$ en carga	Remoción $\geq 80\%$ en carga
DBO	Remoción $\geq 30\%$ en carga	Remoción $\geq 80\%$ en carga
Desechos domésticos	Remoción $\geq 20\%$ en carga	Remoción $\geq 80\%$ en carga
Desechos industriales	Remoción $\geq 20\%$ en carga	Remoción $\geq 80\%$ en carga

Fuente: ROMERO Rojas. Jairo Alberto (*et al* 1998)⁶

1.2 RELLENO SANITARIO

Actualmente, la disposición final y segura de estos residuos sólidos municipales no reciclables se debe hacer en un **relleno sanitario**, el cual debe tener un diseño adecuado y una operación adecuada para que se pueda dar un buen tratamiento a los residuos.

Un relleno sanitario esta compuesto básicamente por una depresión en el terreno, cubierta por una membrana interior, un sistema de recolección de lixiviados, un sistema de recolección de gases, y ocasionalmente una cobertura. No obstante todos estos elementos no están presentes en todos los rellenos sanitarios.

Entre las alternativas más utilizadas para la disposición de los residuos sólidos municipales en el ámbito de los países en desarrollo están:

- Relleno sanitario manual.
- Relleno sanitario tradicional.

1.2.1 Relleno Sanitario Manual

Esta técnica de disposición final constituye una alternativa apropiada para el manejo ambiental de los residuos sólidos en áreas marginales de ciudades grandes o medianas, de menos de 40.000 habitantes, que no pueden adquirir equipo pesado para el manejo de un relleno sanitario tradicional. Se utiliza principalmente la mano de obra lo que se aplica para cantidades pequeñas. El relleno sanitario manual cuenta con ciertos elementos del relleno sanitario tradicional como son el cerco perimetral, el drenaje periférico para la desviación de las aguas pluviales, la impermeabilización, el drenaje de lixiviados, el sistema de evacuación de biogás y una caseta (vigilancia y sanitarios). Mientras para la operación se aplica instrumentos de uso manual, para la preparación del sitio (las excavaciones de zanjas y /o material de cobertura y la construcción de vías internas) se recomienda el uso de maquinaria pesada.¹

1.2.2 Relleno Sanitario Tradicional

Esta tecnología consiste en la disposición final de los residuos sólidos generados por comunidades rurales y urbanas a nivel municipal de tal forma que la disposición final en el suelo no cause perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública.

Con esta tecnología se coloca la basura en celdas o en capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogenización y compactación; antes de llenar el sitio de esta manera, se prepara el suelo del futuro relleno para evitar al máximo la infiltración de líquidos

lixiviados en el suelo. Es posible usar una membrana inferior (geomembrana) que es una lámina de plástico (generalmente polietileno) de alta densidad, o se compacta el suelo existente que debe ser del tipo de arcilla o tepetate, lo que cuenta con un factor alto de protección y una baja permeabilidad. Al mismo tiempo, se construyen obras adyacentes de control y monitoreo como pozos de venteo, de observación del agua subterránea e instalaciones para la recolección y tratamiento de lixiviados. El sistema de colección de líquidos consiste en caños emplazados en el fondo del relleno. El líquido ingresa dentro de estos caños, debido a la inclinación del terreno y por gravedad es dirigido hacia el sistema de tratamiento de lixiviados.

A nivel mundial existe una mayor experiencia técnica y económica con esta tecnología, así como la estabilización de residuos sólidos municipales (RMS) y el efecto ambiental a largo plazo. Una vez que el terreno esta asignado y los componentes principales del relleno sanitario están construidos y la operación autorizada, los RSM de la población se colectan, registrando cada descarga y la disposición se realiza de acuerdo al manual de operación que contiene lo más sustancial de la operación del relleno sanitario. ¹

El municipio de Popayán cuenta con un relleno sanitario tradicional, en el que se da la disposición final de los residuos sólidos no aprovechables que produce la población, estos residuos generalmente son domiciliarios, ya que el municipio no cuenta con un gran desarrollo industrial y los residuos hospitalarios y peligrosos son depositados en una celda especial dentro del relleno sanitario. En el relleno diariamente se reciben los residuos, son dispuestos, compactados, cubiertos y es aquí donde se realiza el control ambiental, de tal manera que se produzca el mínimo daño al ambiente y a la salud de la población sometida al riesgo de sus afluentes.

La composición física y química de los residuos que son depositados en el relleno tiene importancia desde el punto de operación del mismo, ya que afecta el volumen de lixiviados y la composición de los gases que se generan durante la vida útil del relleno. La composición física de los residuos de una población tiene relación con las condiciones socioeconómicas de la misma, para el caso de Popayán, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos realizó un estudio de composición física a partir del cual se establece la composición química, estos datos están resumidos en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Materiales biodegradables en los residuos sólidos de Popayán.

Material	Porcentaje (%)	Humedad (%)	Porcentaje de material en base seca (%)
Desechos de alimentos	66.18	60	26.5
Papel y cartón	14.95	15	12.7
Madera	0.7	20	0.6
Residuos de jardín	1.69	20	1.4
Textil	1.35	15	1.1
Cuero	0.25	20	0.2
Total	85.12		42.4

Fuente : SEPULVEDA Franco Margarita R. (et al 2003).⁷

Al depositar los residuos en los rellenos, estos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los **líquidos lixiviados** y los **gases**. Tanto los líquidos como los gases pueden afectar la salud de de las poblaciones de los alrededores

Tabla 3. Composición química de la masa seca de los residuos sólidos de Popayán.⁷

MATERIAL	Carbono	Hidrogeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Ceniza
Desechos de alimentos	12.71	1.69	9.95	0.69	0.11	1.32
Papel y cartón	5.59	0.76	5.59	0.038	0.025	0.70
Madera	0.28	0.034	0.24	0.0017	0.00056	0.0084
Residuos de jardín	0.65	0.081	0.51	0.046	0.0041	0.061
Textil (algodón)	0.27	0.033	0.23	0.011	0.00055	0.0083
Textil (sintético)	0.30	0.036	0.17	0.025	0.0011	0.014
Cuero	0.12	0.016	0.023	0.020	0.00080	0.020
total	19.92	2.66	16.73	0.82	0.14	2.13
Peso atómico	12.01	1.01	16.00	14.01	32.06	
Nº moles	1.66	2.63	1.05	0.059	0.0043	
Relación	28	45	18	1	0	

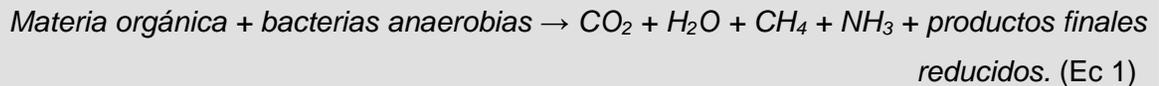
Fuente : SEPULVEDA Franco Margarita R. (*et al* 2003).⁷

1.2.3 Bioquímica en los Rellenos Sanitarios

En los rellenos sanitarios se lleva a cabo la transformación de los residuos, lo que implica la alteración física, química y biológica de los mismos y aquellos que no pueden ser aprovechados reciben un sistema de tratamientos para disminuir su peligrosidad y/o cantidad. El relleno actúa como un reactor bioquímico con residuos y aguas como entradas y con gases y lixiviados como salidas. El material almacenado en el relleno sanitario incluye: material orgánico parcialmente biodegradado y otros materiales inorgánicos de los residuos depositados.⁸

La materia orgánica constituyente de la basura es transformada en los rellenos sanitarios por bacterias facultativas y anaerobias mediante una serie de reacciones que dan por resultado la formación de metano (55%), dióxido de

carbono (40%), vapor de agua y otros (5%) (Mezcla gaseosa comúnmente conocida como biogás) (Ec. 1).³



El proceso anterior no sólo tiene lugar en los rellenos sanitarios, sino también en los vertederos a cielo abierto, aunque en menor escala.³

1.2.3.1 Reacciones biológicas en el relleno sanitario

La mayor parte de los residuos sólidos generados en las viviendas son de tipo orgánico, los cuales se degradan gradualmente mediante cinco fases (reacciones biológicas) en el relleno sanitario:

1.2.3.1.1 Hidrólisis aerobia: En esta fase los componentes orgánicos biodegradables de los residuos sólidos sufren descomposición microbiana mientras se colocan en el relleno y poco después de estar allí. Aquí se produce una descomposición biológica bajo condiciones aerobias porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del relleno sanitario, los microorganismos convierten algunos hidratos de carbono a azúcares simples, dióxido de carbono y agua.

1.2.3.1.2 Hidrólisis y fermentación: Desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el relleno sanitario se convierte en

anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El proceso implica la transformación mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo lípidos, polisacáridos, proteínas y ácido nucleico) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energías y de carbono celular.

1.2.3.1.3 Acetogénesis: Se presenta la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la fase anterior en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético y las pequeñas concentraciones de ácido fólvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase. También, se producen cantidades pequeñas de gas hidrógeno. La demanda bioquímica y la demanda química se incrementan significativamente en esta fase, debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado.

1.2.3.1.4 Metanogénesis: En esta etapa las bacterias convierten el ácido acético en metano y CO₂. Como los ácidos y el gas de hidrógeno producido por los formadores de ácidos que se han convertido en metano y CO₂, el pH dentro del relleno sanitario subirá y se reducirán las concentraciones de DQO (demanda química de oxígeno) y DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno) y el valor de la conductividad del lixiviado. Con valores mas altos de pH quedan menos constituyentes inorgánicos en la disolución y como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirán.

1.2.3.1.5 Maduración y estabilización: Durante esta fase la velocidad de generación de gas en el relleno disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el relleno sanitario son de una degradación lenta. Los principales gases del relleno siguen siendo CH₄ (metano) y CO₂, durante la fase

de maduración, el lixiviado contendrá ácidos húmicos y fúlvicos que son de difícil degradación biológica. Finalmente las condiciones pueden tornarse nuevamente aerobias y es allí cuando el relleno se encuentra estabilizado.⁸

Los factores que influyen en la producción de biogás en un relleno sanitario pueden dividirse en dos: la composición de la basura y los factores físicos ambientales. La basura depositada en los rellenos sanitarios en los países en desarrollo tiende a estabilizarse en un periodo de 10 a 15 años, ya que el alto contenido de material de rápida biodegradación se equilibra aceleradamente, en tanto que los rellenos con alto contenido de papel y cartón tardan 20 años o más, sin contar los plásticos.³

Dentro de los factores físicos que influyen en el proceso en cuestión, está el contenido de humedad dentro del relleno, la temperatura, el pH y la ausencia de aire. La humedad es esencial para el metabolismo celular de las bacterias responsables del proceso, así como del transporte de los nutrientes dentro del relleno. El contenido de humedad del relleno depende de la cantidad inicial de humedad de los residuos, del grado de infiltración de aguas lluvias y de las posibles fuentes subterráneas y, en menor escala, del total de agua producida durante el proceso.³

La temperatura y el pH también afectarán el crecimiento y la actividad de las bacterias dentro del relleno. Las temperaturas imperantes generalmente están comprendidas entre 25° y 40°C, estas temperaturas pueden existir sin ningún problema, independientemente de las existentes en el exterior del relleno. En tanto que el pH debe ubicarse entre valores de 6.8 y 7.2, pues valores de pH inferiores a 6.5 generan acumulación excesiva de ácidos orgánicos, dando por resultado la caída aún mayor del pH, que puede conducir a la interrupción de la producción de biogás durante meses o años.⁹

En el relleno sanitario también se llevan a cabo reacciones químicas y factores físicos. Se pueden presentar dos tipos de **reacciones químicas** dentro de la masa de residuos sólidos en descomposición. La primera de ellas es una reacción de oxidación a causa del oxígeno atrapado en los residuos dispuestos. El segundo tipo, es la reacción de ácido –metal, debido a la presencia de ácidos orgánicos y CO₂. Estos procesos movilizan los iones metálicos y sales que son los contaminantes potenciales. Sin embargo, una vez la generación de metano se establece en el relleno (metanogénesis) se generan menos ácidos y generalmente se retienen metales.⁸

Los **factores físicos** se dan por los efectos del agua cuando entra en contacto con los residuos dispuestos, esto hace que se favorezca la disolución de materiales solubles, los cuales quedan disponibles para procesos de absorción y adsorción.⁸

Un relleno sanitario es un sistema de conversión o estabilización de la basura en el que existe la generación de biogás y lixiviados durante el proceso de conversión; este biogás y los lixiviados deben capturarse y controlarse para evitar la contaminación del suelo, del agua y del aire.³

De acuerdo a diversas investigaciones **los gases** encontrados en un relleno sanitario generalmente son: amoníaco, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, metano, nitrógeno, oxígeno y pequeñas trazas de compuestos orgánicos, como ácidos grasos volátiles. El metano y el dióxido de carbono contribuyen significativamente al efecto invernadero, la presencia en el biogás de hidrocarburos clorados genera la reducción de la capa de ozono. La mayoría de los compuestos orgánicos volátiles son potencialmente tóxicos para el ser humano, entre ellos el cloruro de vinilo y el benceno que son cancerígenos y el metano en el aire en concentraciones de 5-15 % es explosivo. También se pueden generar problemas de olores debido a la emisión de ácido sulfhídrico y

compuestos orgánicos sulfurados durante la fase acetogénica del tratamiento de los residuos.⁸

1.3 LIXIVIADOS

El lixiviado es el líquido residual generado en la descomposición bioquímica de los residuos sólidos o como resultado de la percolación de agua a través de estos residuos en el proceso de degradación, éste tiende a salir por gravedad, por la parte inferior de los rellenos sanitarios hasta que una capa impermeable lo impida. Los filtros captadores de lixiviado estarán ubicados de tal manera que se puedan sacar del área del relleno sanitario y conducirlos a un sistema de tratamiento.

Cuando llueve, una parte del agua se pierde en la escorrentía superficial, otra se evotranspira y el agua restante se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición lo que produce la lixiviación de materiales biológicos y compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos. Este proceso da lugar a la aparición de unas corrientes líquidas características principalmente por un gran número de sustancias con valores a menudo extremos de pH, alta carga orgánica y metales pesados, así como por un intenso mal olor.⁸ Estos lixiviados, al fluir, disuelven algunas sustancias y arrastran partículas con otros compuestos químicos. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de descomposición contenidos en el lixiviado (como ácido acético, láctico o fórmico) disuelven metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado.¹¹

Las características de los lixiviados de los rellenos sanitarios dependen de los residuos depositados y de las condiciones reinantes en él como: temperatura, humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la cantidad y calidad del agua que entra en contacto con la masa de residuos

dispuestos. ⁷En las tablas 4 y 5 se presentan los contaminantes más frecuentes en los lixiviados, su efecto a nivel ambiental y sus parámetros de medida.

Tabla 4. Contaminantes de importancia en lixiviados y sus efectos indeseables⁶

Contaminantes	Importancia	Efecto
Sólidos suspendidos	Pueden conducir al desarrollo de lodos y condiciones anaerobias cuando se descargan aguas de lixiviado en un medio acuático	Deposición en los lechos de los ríos, si es orgánica se descompone y flota mediante el efecto de los gases, cubre el fondo e interfiere con la reproducción de los peces.
Materia orgánica biodegradable	Esta compuesta principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas, si no es removida previamente puede producir agotamiento del oxígeno disuelto de la fuente receptora y desarrollo de condiciones sépticas.	Desoxigenación del agua, muerte de peces, olores indeseables.
Sólidos inorgánicos disueltos	Algunos como calcio, sodio y sulfatos, son agregados al suministro doméstico original, como resultado del uso y es posible que deban ser removidos para el reuso del agua.	Incrementa la dureza, limitan los usos industriales sin tratamiento especial, incrementa el contenido de sólidos disueltos a niveles perjudiciales para los peces o la vegetación contribuyen a la eutrofización del agua.
Metales pesados	Proviene de los lixiviados de residuos comerciales e industriales y es posible que deban ser removidos para reusos del agua.	Algunos son peligrosos para la vida vegetal y animal.
Nutrientes	El C, N y P son nutrientes, cuando se descargan en los lixiviados, pueden causar crecimiento de vida acuática indeseable, cuando se descargan en cantidad excesiva sobre el suelo pueden producir contaminación del agua subterránea.	Pueden causar crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas las cuales alteran el ecosistema acuático y generan olores, etc.

Fuente: ROMERO Rojas. Jairo Alberto (*et al* 1998) ⁶

Tabla 5. Contaminantes en lixiviados de rellenos sanitario, su efecto y determinación

Contaminante	Parámetro típico de medida	Impacto ambiental
Materia orgánica biodegradable	DBO, DQO	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables.
Material suspendido	SST, SSV	Causa turbiedad en el agua y deposita lodos.
Amoniaco	NH ₄ ⁺ , N ₂	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	ortofosfatos	Puede estimular el crecimiento de algas
Materiales tóxicos	Como cada materia tóxica	Peligroso para la vida vegetal y animal
Sales inorgánicas	SDT	Limita los usos agrícolas e industriales del agua.
Energía térmica	temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones hidrogeno	pH	Riesgo potencial para organismos acuáticos.

Fuente: ROMERO Rojas. Jairo Alberto (*et al* 1998) ⁶

Las características fisicoquímicas de los lixiviados son inherentes tanto a la calidad de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario como a su grado de estabilización. Desde que los residuos son generados y aun temporalmente dispuestos, tiene lugar la degradación aeróbica. Debido a la alta compresión de los residuos, el oxígeno tomado de la atmósfera no es suficiente, para compensar la demanda de oxígeno de los microorganismos por lo que se originan condiciones

anaerobias. Esta situación es la causa del cambio de biocenosis de aerobia a anaerobia facultativa y mas tarde, a microorganismos anaerobios obligados.⁸

La fase de fermentación ácida puede durar de 3 a 7 años, dependiendo de la forma y factores ambientales que predominen. En la disposición, los lixiviados pueden presentar concentraciones muy altas de DQO y DBO₅, durante esta fase la relación DBO₅/DQO es aproximadamente 0.6. En este caso, alrededor del 90% del DBO₅ es causada por ácidos graso volátiles (AGV), lo que significa que la biodegradabilidad del lixiviado durante este lapso de tiempo es alta.

El incremento de bacterias metanogénicas, afecta negativa y progresivamente la producción de AGV. Después de un periodo de 7 a 9 años la biocenosis alcanza un estado estable, denominado fase metanogénica. La contaminación orgánica del lixiviado disminuye rápidamente lo que da como resultado que la DBO₅ presente valores más bajos que 500 mg/L y la relación DBO/DQO se acerque a 0.1 y aun más bajos. Contrario a la disminución de la contaminación orgánica del lixiviado, las concentraciones de amonio aumentan rápidamente alcanzando concentraciones de 500 – 1500 mg/L NH₄ en un periodo de 3 a 8 años y permaneciendo así por lo menos 50 años o mas. Los rangos típicos de la concentración del lixiviado según Ehlig (1989) se presentan en la tabla 6.

En la tabla 6 se identifican las características del lixiviado de un relleno sanitario según la fase acética que ocurre al momento de disponer los residuos sólidos o la fase metanogénica que ocurre en un periodo estrictamente anaeróbico.⁸

El lixiviado puede ser recolectado por una serie de sistemas de drenaje el cual debe ser diseñado teniendo en cuenta el caudal máximo de lixiviado y el del agua de escorrentía. El sistema de drenaje inferior debe asegurar que se acumule menos de 0.30 m de lixiviado sobre el estrato compuesto de impermeabilización

para minimizar la posible contaminación del agua subterránea. Una vez recolectado el lixiviado debe ser tratado antes de su vertimiento seguro.⁸

Tabla 6. Composición de lixiviados de rellenos sanitarios fase acética y metanogénica.

PARAMETRO	VALOR PROMEDIO	RANGO
FASE ACIDOGENICA		
pH	6.10	4.5 – 7.5
DBO ₅ (mg/L)	13000	4000 – 40000
DQO (mg/L)	22000	6000 – 60000
DBO / DQO	0.38	-----
Fe (mg/L)	500	70 – 1750
FASE METANOGENICA		
pH	8.0	7.5 – 9.0
DBO ₅ (mg/L)	180	20 – 550
DQO (mg/L)	3000	500 – 4500
DBO / DQO	0.06	----
CUANDO NO HAY DIFERENCIAS ENTRE LAS DOS FASES		
NH ₄ (mg/L)	750	30 – 3000
N total (mg/L)	1250	50 – 5000
NO ₃ (mg/L)	3.0	0.1 – 30
P total (mg/L)	6.0	0.5 - 140

Fuente: Guía ambiental para rellenos sanitarios. Colombia. 2002.⁸

1.3.1 Tratamiento de lixiviados

Existen diferentes tratamientos par tratar las aguas lixiviadas de un relleno sanitario entre ellos:

1.3.1.1 Recirculación de lixiviados

Un método efectivo para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos y recircularlos a través del relleno sanitario. Durante las primeras etapas del funcionamiento del relleno sanitario, el lixiviado contendrá cantidades importantes de sólidos disueltos totales (SDT), DBO₅, DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado se atenúan y diluyen los compuestos producidos

por la actividad biológica y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del relleno.

La recirculación, supone el uso del relleno como un filtro anaerobio para el tratamiento de lixiviados. Además del contenido del agua, es necesario el control de pH, el cual debe mantenerse próximo a la neutralidad. Otro factor que debe tenerse en cuenta, es la hidrología del relleno sanitario, debiéndose realizar medidas para asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y prevenir la formación de canales preferenciales a través de los residuos.⁸

1.3.1.2 Evaporación de lixiviados

Uno de los sistemas mas sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para su evaporación. El lixiviado que no se evapora se riega por encima de las porciones completadas del relleno sanitario. Los gases olorosos que pueden acumularse bajo la capa superficial se pueden extraer hacia un filtro de compost o suelo. Si el estanque no es grande se puede dejar tapado durante todo un año.⁸

1.3.1.3 Tratamientos biológicos

El tratamiento consiste en evacuar el lixiviado del relleno a través de canales y tubos hasta el lugar donde serán tratados. Una ventaja de este tratamiento consiste en que al contener los lixiviados normalmente un exceso de nitrógeno y un buen contenido de fósforo, ninguno de estos dos elementos esenciales (nutrientes) necesita ser suministrado al sistema de tratamiento.⁸

1.3.1.3.1 Tratamiento biológicos aerobios: en este proceso la materia orgánica es transformada principalmente a CO₂ y a productos biológicos sólidos (lodos). Los tratamientos aerobios que se han utilizado en condiciones limitadas son las

lagunas aerobias, los lodos activados y los biofiltros obteniéndose rendimientos en aproximadamente un 95 % en eliminación de DQO. Esto se debe a que para aplicar estos tratamientos con eficacia, se requiere condiciones más o menos estables, situación no ofrecida por los lixiviados.⁸

1.3.1.3.2 Tratamientos biológicos anaerobios: estos tratamientos son los mas utilizados en el tratamiento de lixiviados; esto se debe a que soportan muy bien las sobrecargas puntuales de contaminación que arrastra el lixiviado. En estos procesos la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla que contiene principalmente CO₂ y CH₄ y en menor medida lodos biológicos.⁸

1.3.1.3.3 Proceso biológico Biomembrat: este proceso es un método patentado por WEHRLEWERK AG para el tratamiento de lixiviado y aguas altamente contaminados; se caracteriza por la activación biológica bajo presión con retención total de biomasa en el sistema. En el proceso se realiza la digestión de la materia orgánica en reactores aerobios bajo presión. El lixiviado entra en el proceso en los reactores de desnitrificación y nitrificación en los cuales se transforma la materia orgánica por acción de los microorganismos.⁸

Adicionalmente existen otros tratamientos fisicoquímicos como: Precipitación química, oxidación química, adsorción con carbón activado, osmosis inversa y stripping de NH₃.⁸

Los procesos de tratamientos de lixiviados suponen inversiones de capital elevadas y costos de operación altos. Actualmente en diferentes lugares del mundo se esta utilizando un sistema de tratamiento biológico de lixiviados a través de lagunas de oxidación, que es un sistema natural de tratamiento de costo mínimo de operación, reconocido mundialmente como el más adaptable a todas las capacidades económicas de poblaciones de pocos recursos financieros⁶ como es el caso del municipio de Popayán, en el que opera una laguna de estabilización para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario el “El Ojito”. (Figura 2)

Figura 2. Laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”



1.4 LAGUNAS DE ESTABILIZACION

El tratamiento de lixiviados en las lagunas de oxidación es una combinación de operaciones físicas, de procesos biológicos y químicos. Existen dos grandes tipos de actividades biológicas que ejecutan los microorganismos en la descomposición de la materia orgánica de los lixiviados: la oxidación aeróbica y la oxidación anaerobia, reacciones que permiten la transformación de compuestos orgánicos altamente tóxicos en compuestos menos tóxicos o no tóxicos, minimizando así el problema ambiental: ⁶

1.4.1 Tipos de lagunas

Existen varios tipos de lagunas de estabilización entre ellas:

1.4.1.1 Lagunas aeróbicas

Como su nombre lo indica son lagunas que operan en presencia del aire, son de poca profundidad, de 1.20 a 0.80 metros, lo que propicia la proliferación de algas que suministran una buena parte del oxígeno necesario. Se logran eficiencias de DBO de 65% a 75%. En las lagunas aeróbicas las sustancias biodegradables suspendidas y disueltas son estabilizadas por la flora aeróbica microbiana.¹⁰

El proceso aerobio se caracteriza porque la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en una masa de agua que contiene oxígeno disuelto. En este proceso, en el que participan **bacterias aerobias o facultativas**, se originan compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a las algas, las cuales a su vez producen más oxígeno que facilita la actividad de las bacterias aerobias. Existe pues una simbiosis entre bacteria y algas que facilita la estabilización aerobia de la materia orgánica. El desdoblamiento de la materia orgánica se lleva a cabo con intervención de enzimas producidas por las bacterias en sus procesos vitales.

A través de estos procesos bioquímicos en presencia de oxígeno disuelto las bacterias logran el desdoblamiento aerobio de la materia orgánica. El oxígeno consumido es parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Las algas logran, a través de procesos inversos a los anteriores, en presencia de la luz solar, utilizar los compuestos inorgánicos para sintetizar materia orgánica que incorporan a su protoplasma. A través de este proceso, conocido como **fotosíntesis**, las algas generan gran cantidad de oxígeno disuelto. Como resultado final, en el estrado aerobio de una laguna facultativa se lleva a cabo la estabilización de la materia orgánica putrescible (muerta) originalmente presente en las aguas residuales, la cual se transforma en materia orgánica (viva) incorporada al protoplasma de las algas. En las lagunas de estabilización el agua residual no se clarifica como en las plantas de tratamiento convencional pero se estabiliza, pues las algas son materia orgánica viva que no ejerce DBO.

Las ventajas de estos sistemas son el área de terreno reducida que se emplea para su construcción, la alta eficiencia en remoción de sólidos y nutrientes, el control efectivo de los olores y la obtención de un efluente muy clarificado, adecuado para riegos presurizados. Sin embargo posee aspectos desfavorables como los altos costos de operación de sus equipos y de la energía utilizada, la poca eficiencia en remoción de patógenos por lo cual el proceso debe ser complementado con desinfección, el manejo permanente de lodos (disposición) y la poca cantidad de materia orgánica y nutrientes del efluente.¹¹

1.4.1.2 Lagunas anaerobias

Son lagunas con carga orgánica tan alta que no poseen zona aerobia, excepto, posiblemente en su superficie. Típicamente son usadas como lagunas primarias para residuales domésticas y municipales así como para tratamiento de aguas industriales con DBO mayor de 1000 mg/L. Trabaja con una carga orgánica de 160-800 kg DBO /m³d. El tiempo de retención es de 20-50d y generalmente hay olores y el efluente requiere de tratamiento adicional.¹²

Generalmente se usan como una primera depuración o pre-tratamiento, se puede considerar como un digestor ya que se le aplican cantidades de materia orgánica o carga orgánica por unidad de volumen, de tal manera que prevalezcan las condiciones anaeróbicas, es decir la ausencia de oxígeno, la eficiencia esperada con este tipo de lagunas varia con el tiempo de retención hidráulica; con tiempos de 1 a 10 días se obtiene una eficiencia de remoción de DBO de 20 al 60%. Una desventaja de este tipo de lagunas es la producción de malos olores que impide su localización en lugares cercanos (500 m) de zonas habitadas. Generalmente son estanques de 3.00 a 5.00 metros de profundidad.

Las reacciones anaerobias son más lentas y los productos pueden originar malos olores. Las condiciones anaerobias se establecen cuando el consumo de oxígeno

disuelto es mayor que la incorporación del mismo a la masa de agua por la fotosíntesis de las algas y el oxígeno disuelto y que la laguna se torne de color gris oscuro. El desdoblamiento de la materia orgánica sucede en una forma más lenta y se generan malos olores por la producción de sulfuro de hidrógeno. En la etapa final del proceso anaerobio se presentan las cinéticas conocidas como acetogénica y metanogénica.¹¹

Las ventajas que tienen estos sistemas de tratamiento son: el área que se requiere para su construcción es reducida, son una tecnología atractiva para desechos de altas concentraciones y desechos industriales biodegradables. Los aspectos desfavorables que presenta esta tecnología, es que son procesos muy sensibles a factores ambientales, las tasas de mortalidad bacteriana son reducidas, presentan malos olores en su operación y mantenimiento.¹¹

1.4.1.3 Lagunas facultativas

Son lagunas o estanques de tratamiento con una sección superior aerobia y una inferior anaerobia de modo tal que los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos se produzcan en forma simultánea. En la parte superior se da una fase aerobia y en la inferior una anaerobia donde se ubican los sedimentos que se van produciendo en la estabilización. El aporte de oxígeno necesario en la estabilización se produce por la acción fotosintética de las algas que conviven en el estanque con las bacterias y microorganismos que degradan la materia orgánica.¹¹

En el resultado final, en el estrado aerobio de una laguna facultativa se lleva a cabo la estabilización de la materia orgánica putrescible (muerta) originalmente presente en las aguas residuales, la cual se transforma en materia orgánica (viva) incorporada protoplasma de las algas.

El proceso que se lleva a cabo en las lagunas facultativas es diferente del que ocurre en las lagunas anaerobias. Sin embargo, ambas son efectivas para estabilizar la materia orgánica y reducir los organismos patógenos de las aguas residuales. Se puede decir que es una combinación de las dos lagunas. Se diseñan con una profundidad variando normalmente entre 1.50 a 2.00 metros y una cantidad de materia orgánica o carga orgánica por unidad de volumen que permita el crecimiento de organismos aeróbicos y facultativos (estos últimos pueden reproducirse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno). Es el tipo de lagunas más usado por su flexibilidad; requieren menos terreno que las aerobias y no producen los posibles olores de las anaerobias.

Como en todos los procesos biológicos, el factor que afecta su eficiencia es la temperatura. Las eficiencias esperadas en estas lagunas van desde el 60% hasta el 85% en remoción de DBO. La eficiencia en la remoción de bacterias, especialmente del grupo coliforme, puede alcanzar valores del 99.99%, debido a los tiempos de retención hidráulicos tan prolongados.¹³

Son las lagunas más usadas, para cargas mínimas puede ser predominantemente aeróbica. Su afluente puede ser agua residual cruda y efluentes primarios o tratados en otros procesos previos. La carga orgánica es de 22-67 Kg DBO/ha.d y el tiempo de retención es de 25-180 d.

1.4.1.4 Lagunas de Maduración

Se usan para la desinfección de las aguas residuales e incluye la destrucción de patógenos, virus, parásitos y demás organismos perjudiciales. Se construyen generalmente con tiempos de retención de 3-10 días.⁶

1.4.2 Factores que influyen en el funcionamiento de una laguna

En el funcionamiento de las lagunas de estabilización influyen diversos factores, sobre todo de tipo físico y químico, que tienen determinada incidencia en el mismo:

1.4.2.1 Físicos:

- *Temperatura*: cuando es mayor de 30 °C la actividad de las algas decrece, las bacterias consumen más oxígeno y hay mayor producción de gases en el fondo.
- *Iluminación*: las algas utilizan entre 2- 9 % de la luz solar.
- *Vientos*: favorecen el intercambio de oxígeno en la superficie.
- *Infiltración y evaporación*: si son grandes, el nivel de la laguna baja y no hay efluente (se afecta la actividad de las algas y bacterias)
- *Precipitación*: su valor equivale aproximadamente al de la evaporación

1.4.2.2 Químicos:

- *Nutrientes*: el más utilizado por las algas es el CO₂ libre.
- *Oxígeno disuelto*: depende de la actividad microbiana y varía con la temperatura.
- *pH*: relativamente estable, en condiciones anaeróbicas hay reducción.
- *Compuestos orgánicos*: algunos ofrecen resistencia a la oxidación.¹⁰

1.4.3 Parámetros para la evaluación de la eficiencia de una laguna

Los parámetros más utilizados para evaluar el comportamiento de las lagunas de estabilización de aguas residuales y la calidad de sus efluentes son los que se describen a continuación:

1.4.3.1 pH: En el tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos, el pH se debe mantener en un margen favorable para los microorganismos específicos que intervienen, porque las aguas en concentración adversa del ión hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, sin embargo, generalmente es de 6.5 a 8.5. Por estas razones y por las relaciones fundamentales que existen entre pH, la acidez y la alcalinidad es muy importante comprender los aspectos teóricos y prácticos de pH.⁶

1.4.3.2 Temperatura: Es un parámetro importante en aguas residuales por su efecto sobre las características del agua, sobre las operaciones y procesos de tratamiento así como sobre el método de disposición final. . La temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto y la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacteriana, la tasa de sedimentación en aguas cálidas es mayor que en aguas frías por el cambio en la viscosidad del agua. En general los tiempos de retención disminuyen a mayor temperatura y los parámetros de diseño de una laguna de estabilización son función de ella.⁶

1.4.3.3 Conductividad: Las mediciones de conductancia se usan frecuentemente para obtener un cálculo rápido del contenido de sólidos disueltos en la muestra de agua siendo muy útiles estas medidas para determinar cambios a corto plazo que tienen lugar en la calidad de determinadas aguas y en caso de selección entre

diversas clases de aguas, así como en un mismo río para estudiar las variaciones que sufren las aguas a lo largo del mismo.¹⁴

1.4.3.4. Sólidos totales, suspendidos, suspendidos totales, disueltos y sedimentables: La determinación de los sólidos en una muestra comprende los términos:

- **Sólidos totales:** se refieren a toda la materia sólida en suspensión, disuelta o sedimentable que se encuentra en el agua.
- **Sólidos suspendidos totales:** Están formados por las partículas que se mantienen dispersas en el agua en virtud de su naturaleza coloidal. Estos sólidos determinan el color aparente del agua y la profundidad hasta la cual penetra la luz del sol, es decir la franja aeróbica y fotosintética de un cuerpo de agua. La determinación de sólidos suspendidos es uno de los principales parámetros para evaluar la concentración de las aguas residuales domésticas y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento.
- **Sólidos disueltos:** Representan el material soluble y coloidal el cual requiere, usualmente para su remoción oxidación biológica, coagulación y sedimentación. Estos sólidos están relacionados con la conductividad del agua y también con el color verdadero. Como la conductividad puede medirse con mayor facilidad y rapidez esta propiedad frecuentemente se considera como una medida de los sólidos disueltos.¹⁵
- **Sólidos sedimentables:** Son los sólidos en suspensión que se puedan sedimentar en condiciones de quietud por influencia de la gravedad. Los sólidos sedimentables son una medida de la turbulencia del agua de donde proceden las muestras. Los lodos son acumulaciones de estos sólidos y la medición de estos es importante para definir la necesidad de unidades de sedimentación y el

comportamiento físico de las corrientes de residuos que entran en los cuerpos de aguas naturales.

1.4.3.5 Oxígeno disuelto: En los desechos líquidos el oxígeno disuelto es el factor que determina que los cambios biológicos sean producidos por organismos aeróbicos o anaeróbicos. Consecuentemente para mantener las condiciones aeróbicas, es vital hacer mediciones de oxígeno disuelto en las aguas naturales que reciben material contaminante y en los procesos aeróbicos de tratamiento que se realizan para purificar las aguas residuales domésticas e industriales. La determinación de oxígeno disuelto es la base del análisis de DBO, por tanto, son el principio para las mediciones más importantes que se usan para evaluar la magnitud de la contaminación de los desechos domésticos e industriales.

1.4.3.6 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): La prueba de DBO es el parámetro de contaminación más utilizado y suele determinarse la DBO a los cinco días (DBO₅). Se define como la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición en condiciones aeróbicas. La DBO₅ es el resultado de la degradación de tres tipos de materia: Materias orgánicas carbónicas, nitrógeno oxidable y compuestos químicos reductores (ión ferroso, sulfitos, sulfuros).

Esta prueba es muy utilizada para determinar el poder contaminante de los residuos domésticos e industriales, en términos de la cantidad de oxígeno que requieren si son descargados a las corrientes naturales de agua en las que existen condiciones aeróbicas. Esta medida es una de las más importantes en las operaciones de control de la contaminación de las corrientes, también tiene gran importancia para establecer los criterios de regulación, diseño de tratamientos biológicos, evaluar eficiencias de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.

1.4.3.7 Demanda química de oxígeno: La prueba de DQO es ampliamente utilizada para medir la concentración de la materia orgánica en los residuos domésticos e industriales. Esta prueba permite medir en un residuo la cantidad de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua. En esta prueba se da la oxidación de la mayoría de los compuestos orgánicos con unas pocas excepciones con un agente oxidante fuerte en condiciones ácidas.

La DQO en general es mayor que la DBO ya que es mayor el número de compuestos que pueden ser oxidados por vía química. La DQO tiene la ventaja de que no se necesita mucho tiempo para la evaluación porque se puede hacer la determinación en aproximadamente tres horas, pero tiene la desventaja de que no diferencia entre materia biodegradable y no biodegradable.¹⁶

1.4.3.8 Nitrógeno: El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, amoniacal nitratos y nitritos. Todas son formas inconvertibles biológicamente y componentes del ciclo de nitrógeno. Los datos de nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas por tratamientos biológicos, porque un agua residual con un contenido insuficiente de nitrógeno puede requerir la adición de nitrógeno para su adecuada biodescomposición. En otros casos cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras la remoción de nitrógeno en el agua residual puede ser una condición del tratamiento.

En aguas residuales domésticas la concentración de N-total puede ser de 30-100 mg/L, N- amoniacal de 5-20 mg/L, nitritos y nitratos menor de 1 mg/L. En aguas residuales tratadas la concentración de nitratos puede ser del orden de 30 mg/L.⁶

1.4.3.9 Fósforo: Este elemento es un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Debido al crecimiento de algas en aguas superficiales, es importante removerlo de las aguas residuales. En aguas residuales domésticas el contenido de fósforo oscila entre 6-20 mg/L, las formas mas usuales son ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos. Ortofosfatos: PO_4^{-3} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 son aptos para metabolismo biológico. La determinación de fósforo es muy importante para evaluar la productividad biológica potencial de las aguas superficiales, estas determinaciones son rutinarias en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas y residuos y en los estudios de contaminación de las corrientes de aguas en muchas áreas.¹⁶

El análisis de los lixiviados sirve para conocer la carga contaminante presente en estos líquidos y para saber si se esta haciendo un buen tratamiento de ellos en las lagunas de oxidación de los rellenos sanitarios, ya que el tratamiento inadecuado de los lixiviados puede provocar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Los principales efectos que se producen en las aguas superficiales son asfixia de las crías de peces y alteraciones en la fauna y flora del fondo y peligrosidad el amoniaco para los peces. La contaminación de las aguas subterráneas se da por la migración del lixiviado al nivel freático dándose la filtración de este a través del suelo provocando también su contaminación.

El problema de contaminación generado por los residuos sólidos y sus lixiviados es realmente grave, es por eso, que muchos investigadores se han dedicado a estudiar los sistemas de tratamiento de residuos sólidos en los rellenos sanitarios. Entre estos estudios se encuentra el realizado en **España – Málaga**. En donde se evaluó la contaminación causada por lixiviados del vertedero de residuos sólidos de la Mina (provincia de Málaga), mediante la variación espacial y temporal de los resultados correspondientes a algunos parámetros como conductividad, cloruros, Na^+ y NH_4^+ .¹⁷

A nivel de Latinoamérica ya se han adelantado estudios en cuanto al tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios. Entre estos estudios se encuentran los realizados en:

- **México Distrito Federal:** Se estudió la posibilidad del tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Santa Fe como un aporte adicional a las aguas residuales que serán tratadas en el sistema de lodos activados. Se logró producir un efluente dentro de la norma obteniéndose resultados satisfactorios. Y en el instituto politécnico nacional se realizó un estudio acerca de la descomposición de materia orgánica recalcitrante en lixiviados pretratados del relleno sanitario de Borde Poniente por medio de procesos de oxidación avanzada. ¹⁸
- **Brasil:** En *Puerto Alegre* se evaluó el desempeño del tratamiento de lixiviados del relleno sanitario realizado con un filtro anaerobio, Los resultados mostraron un excelente desempeño del sistema con excelentes remociones de DBO₅, DQO y metales pesados.¹⁹ En *Sao Paulo -Brasil:* se hizo una evaluación a escala de laboratorio del desempeño de un sistema biológico de tratamiento de efluentes líquidos, constituido por una laguna aireada aerobia en el relleno sanitario (chorume), efluente que ocasiona numerosos problemas en sistemas de tratamiento debido a elevadas concentraciones de materia orgánica y nitrógeno amoniacal, asociadas a valores de pH superiores a 8,0.²⁰ En esta ciudad también se realizó un estudio sobre la tratabilidad de líquidos percolados en rellenos cuyo objetivo era evaluar el tratamiento de los lixiviados, mediante lagunas de estabilización semejantes a las usadas en el tratamiento de efluentes domésticos. Se escogió el tipo de lagunas facultativas por ser esta alternativa la más adecuada para el ensayo propuesto.²¹
- **Panamá:** Se hizo una evaluación de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala laboratorio, para determinar cual es el efecto de la recirculación sobre fenómenos como el asentamiento, la generación de gases, y

el mejoramiento de la calidad del mismo, para implementar esta metodología en el relleno sanitario de cerro Patacón. El uso de lixiviados en la producción de compostaje (concentrado de materia orgánica obtenido de los desechos sólidos o de los resultantes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que tratados sirven como fertilizantes o abono orgánico), también forma parte de soluciones integrales que se toman en consideración en este estudio, complementando estudio actuales que se efectúan en países como Brasil y México.²²

- **Uruguay:** En *Montevideo* se hizo un estudio comparando la aplicación de un tratamiento aerobio y anaerobio a los lixiviados del relleno sanitario de Montevideo. Se llegó a la conclusión de que es preferible una combinación de tratamiento anaerobio seguido de un posterior proceso aerobio.²³
- **Colombia:** Biorecuperación de lixiviados en rellenos sanitarios. En este artículo se presenta la bioremediación como una alternativa económica, simple y prometedora para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, los investigadores plantean el uso *Terra biosa* como un medio que hace posible cambiar la combinación de microorganismos presentes en el cuerpo de agua en forma tal que los microorganismos anaerobios productores de sustancias venenosas se ven sometidos a competencia. Comienzan procesos que favorecen a las bacterias y hongos benéficos. Estas bacterias son un bloque importante en la reconstrucción de un ambiente acuático saludable y a un balance natural.³

Entre los estudios realizados a nivel nacional están:

- **Pereira:** El Instituto Alemán de Investigaciones –UFZ- y la Universidad Tecnológica de Pereira, tiene como campo de acción la fitorremediación como una alternativa económica para el tratamiento de lixiviados de rellenos

sanitarios. El trabajo en Alemania se enfocó en la investigación básica fundamental de los procesos y mecanismos de remoción usando modelos escala laboratorio y lixiviado sintético, mientras que el trabajo en Colombia se hizo a una pequeña escala piloto con un lixiviado real.²⁴

- **Medellín:** Reducción de los tiempos de estabilización en rellenos sanitarios operados con recirculación de líquidos lixiviados producidos en rellenos sanitarios. La investigación tuvo como objetivo estudiar la tratabilidad biológica de los lixiviados producidos en rellenos sanitarios a escala de laboratorio.²⁵

En la literatura también se encuentran estudios realizados en cuanto al tratamiento de lixiviados a través de lagunas de estabilización entre ellos:

- **Brasil:** Se estudió la posibilidad del aprovechamiento del efluente de las lagunas de estabilización que operan en los rellenos sanitarios de Brasil para riegos agrícolas. Para ello se evaluaron algunos parámetros contaminantes y los porcentajes de remoción de las lagunas. En la ciudad de **Campina Grande** se realizó un estudio de las especies de nitrógeno y fósforo en los lixiviados tratados mediante lagunas de estabilización y su variación en el proceso de tratamiento.²⁶
- **Venezuela:** En **Maracaibo** se estudió la eficiencia de un filtro rocoso como sistema de tratamiento para mejorar la calidad del efluente de la laguna de estabilización de Luz evaluándose parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.²⁷

En este estudio realizado en el relleno sanitario de Popayán se caracterizaron los lixiviados antes y después de haber pasado por el tratamiento en la laguna de oxidación. Esto permitió evaluar la eficiencia del tratamiento de los lixiviados y saber si se cumplían con las normas mínimas para el vertimiento a fuentes

naturales en este caso “El río Cauca” ya que al no ser debidamente tratados pueden ocasionar daños en la salud de los habitantes cercanos y al ecosistema acuático. Este estudio hizo parte de un convenio entre la Universidad del Cauca y el Grupo de aseo de la Alcaldía Municipal en el que se requería la realización de un análisis fisicoquímico de los lixiviados en el laboratorio de Aguas de la Unidad de Análisis Industriales de la Universidad del Cauca.

2. METODOLOGIA

2.1 EQUIPOS Y REACTIVOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron reactivos y solventes de grado analítico. A continuación se detallan los reactivos e instrumentos utilizados en el análisis fisicoquímico de los lixiviados de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El ojito”.

2.1.1 Equipos

- pH Metro portátil
- pH Metro METTER TOLEDO MP 120
- Electrodo de ión selectivo para cloruros. ORION-Modelo 9617B
- Conductímetro THERMO ORION- Modelo 135 A
- Electrodo Conductímetro ORION – Modelo 013010 A
- Balanza Analítica PRECISA XT220 A (220g / 0.001 g)
- Planchas de calentamiento con agitación CORNING PC-420
- Incubadora PRECISA - Modelo 815
- Espectrofotómetro Ultravioleta-Visible INTRALAB-DMS 100
- Equipo de Digestión y Destilación BÜCHI
- Horno FISCHER SCIENTIFIC - Modelo 851
- Nevera INDUCOL – Modelo CL 18

2.1.2 Reactivos

Ácido acético Glacial 99.7 % Mallinckrod	Fosfato diácido de potasio 98.0-100.5% Carlo Erba
Ácido sulfúrico 96.0% Merck	Fosfato ácido de potasio 98.0% Carlo Erba
Ácido clorhídrico 37.0% Merck	Fosfato ácido de sodio 99.0% dihidratado Carlo Erba
Ácido nítrico 65.0% Merck	Ferroína Merck
Acetato de sodio 99.0-100.5% Merck	Fluoruro de potasio 99.0% Merck
Almidón soluble Carlo Erba	Glicerina 99.9 % Fisher Scientific
Acetato de amonio 99.9% Merck	Hidróxido de sodio 98.0% Carlo Erba
Ácido bórico 99.5% Merck	Molibdato de amonio J.T Baker
Carbonato de sodio Merck	Sulfato de cobre hidratado 98.0 % Carlo Erba
Cloruro de calcio 99.0-102.0% Carlo Erba	Sulfato de sodio 99.0 % J.T Baker
Cloruro Ferrico 97.0-102.0% Carlo Erba	Sulfato de potasio 99.0 % Carlo Erba
Cloruro de hidroxilamina Mallinckrodt	Sulfato de mercurio 99.3% J.T Baker
Cloruro de amonio 100.5% J.T Baker	Sulfato de magnesio 100.7% Mallinckrodt
Cloruro estañoso dihidratado 98 % Carlo Erba	Sulfato ferroso amoniacal 98.0% Carlo Erba
Cloruro de sodio 99.5% Merck	Sulfato de plata 99.2 % Carlo Erba
Dicromato de potasio 99.9% Carlo Erba	Tiosulfato de sodio 99.5% J.T Baker
1-10 Fenantrolina monohidratada 99.5% Merck	Yoduro de potasio 99.5 % J.T Baker
Fenoltaleina 98-102 % Merck	Yoduro de sodio 99.5 % Merck

2.2 TOMA Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS

El muestreo se realizó en el relleno sanitario de Popayán “El Ojito”, generalmente en la segunda semana de cada mes durante seis meses consecutivos.

Se tomaron muestras compuestas del lixiviado del relleno antes y después de ser tratado en la laguna de oxidación. Estas muestras fueron recogidas durante un periodo de seis horas (una muestra de la entrada y otra de la salida cada hora) en frascos de plástico debidamente lavados y etiquetados.

Durante las operaciones de muestreo se llevó un registro de cada muestra, en el cual se especificó su identificación, tipo de análisis, lugar, fecha y hora de toma y descripción de los aspectos relevantes encontrados en el sitio de muestreo. Cada muestra se marcó, indicando en el formato nombre, número de la muestra, el tipo de análisis para la cual fue tomada y la fecha y hora en que se realizó el muestreo.

Las muestras de lixiviado de la entrada y la salida de la laguna se fueron almacenando apropiadamente en un refrigerador y al final del periodo de muestreo se mezclaron en proporción directa al caudal aforado en cada instante del muestreo.

Al llegar al laboratorio de Aguas de la Unidad de Análisis Industriales se tomaron diferentes porciones de cada muestra, algunas de ellas fueron analizadas de inmediato, para la determinación de DQO, DBO₅ y nitratos, las otras muestras se refrigeraron y se preservaron por separado para realizar los demás análisis (ST, SST, SD, nitrógeno, cloruros, hierro y fósforo) durante el transcurso de la semana en que fueron tomadas las muestras.

En la tabla 7 se dan los métodos de preservación utilizados para varios constituyentes: la estimación del volumen de muestra requerido para su análisis, el tipo de recipiente sugerido y el tiempo máximo de almacenamiento recomendado para muestras preservadas en condiciones óptimas.

Tabla 7. Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con las mediciones.

Determinación	Recipiente	volumen mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Conductividad	P.V	500	s.c	Refrigerar.	28 d
DBO	P.V	1000	s	Refrigerar.	48 h
DQO	P.V	100	s.c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar, o Agregar H ₂ SO ₄ a pH < 2. Refrigerar.	28 d
Fósforo total	V(A)	100	s	Refrigerar. Agregar HCL	
Nitrógeno total	P.V	500	s.c	Refrigerar; agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2	28 d
Nitrato	P:V	200	s.c	Analizar lo mas pronto posible o refrigerar	48 h
Hierro total	P.V	100	s	Refrigerar, Agregar HCl	
pH	P.V	50	s	Análisis inmediato	-
Sólidos	P.V	200		Refrigerar	2-7 días
temperatura	P.V	-	s.	Análisis inmediato	-

Fuente: Standard Methods for examination of water and waste water,²⁸

P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio; V(A) o (P) = enjuagado con HNO₃ 1+1;

S = simple o puntual; c = compuesta.

Refrigerar = almacenar a 4 °C en ausencia de luz.

2.3 SITIO DE MUESTREO

El relleno sanitario “El Ojito” se encuentra ubicado en el kilómetro 7 vía Popayán-El tambo en el municipio de Popayán-Cauca. Comprende aproximadamente 11.18 hectáreas y se encuentra a una altura de 1.770 metros sobre el nivel del mar. (Figura 3)

Figura 3. Plano del relleno sanitario de Popayán “El ojito”

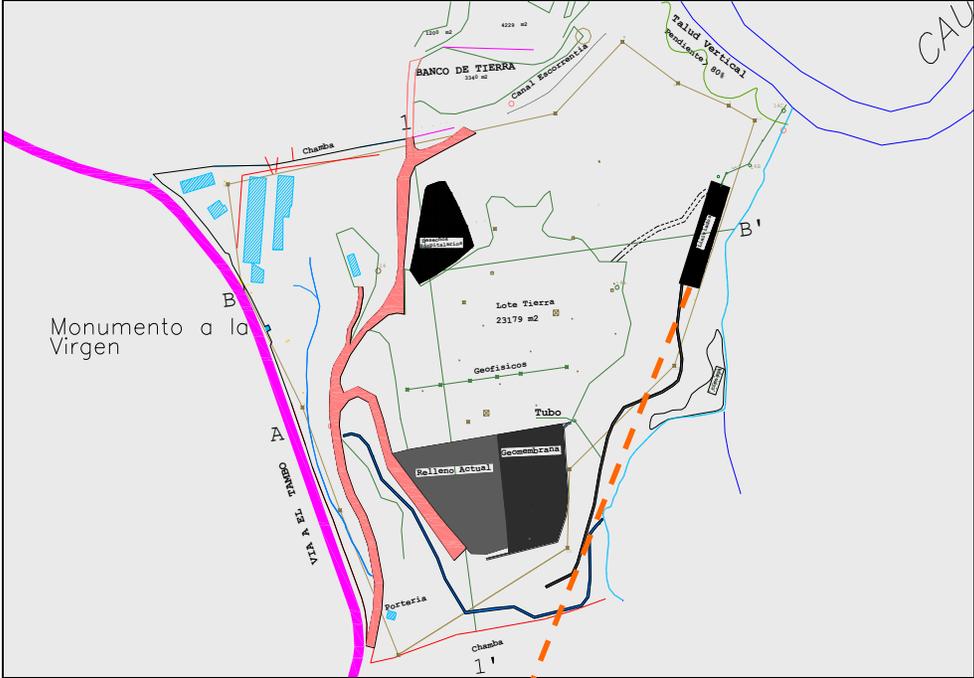


Figura 4. Entrada y salida de laguna de estabilización del relleno sanitario “El ojito”



El tratamiento de los lixiviados en el relleno sanitario se realiza en una laguna de estabilización ubicada al costado izquierdo del relleno. Esta laguna tiene aproximadamente 14 m de ancho, 76.5 m de largo y una profundidad de 1,60 m (figura 4).

La entrada de la laguna (**afluente**) que se puede observar en la figura 5, se encuentra ubicada a un lado en el extremo superior de la laguna de estabilización y está conformada por un tubo de pvc que canaliza los lixiviados provenientes del bloque 1 (antiguo) y bloque 2 (joven). En el bloque 1 fueron depositados los residuos desde 1999 hasta el año 2002 sin ningún manejo técnico de control, mientras que a partir del año 2002 el bloque 2 han sido depositados los residuos sólidos siguiendo el Plan de manejo ambiental. La salida de la laguna (**efluente**) presentada en la figura 6, está ubicada en el centro de la parte inferior de la laguna, se conforma de un tubo de pvc y tiene además una malla en el inicio de la salida que no permite el paso de sedimentos al efluente.



Figura 5. Entrada de la laguna de estabilización



Figura 6. Salida de la laguna de estabilización.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS LIXIVIADOS

Para poder obtener las características físicas y químicas de los lixiviados y evaluar el funcionamiento de la laguna, se obtuvieron 12 muestras compuestas, seis muestras correspondientes a la entrada y seis a la salida. El lixiviado se colectó en la laguna de estabilización que se encuentra a un costado del relleno sanitario, se tomaron 6 muestras tanto del afluente como del efluente de la laguna. A cada una de las muestras se le determinó cada uno de los siguientes parámetros por triplicado. Todos los Análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos oficializados en el Standard Methods²⁸ y estandarizados en el laboratorio de Aguas de la Unidad de Análisis Industriales de la Universidad del Cauca.

2.4.1 pH

Se determinó en campo mediante el uso de un pH-metro portátil.

2.4.2 Temperatura

Se midió IN SITU con un termómetro de vidrio de 10-110 °C.

2.4.3 Conductividad

La determinación se realizó IN SITU. Se leyó la conductividad de la muestra directamente en el conductímetro.

2.4.4 Sólidos totales, suspendidos totales y disueltos

2.4.4.1 Sólidos Totales (ST): se pesaron erlenmeyers de 100 mL antes del análisis. Se midieron 50 mL de la muestra con una pipeta aforada, y se adicionaron al erlenmeyer. Se evaporó la muestra hasta las dos terceras partes, evitando salpicaduras. El erlenmeyer con el residuo se llevó a la estufa y se secó a

una temperatura de 93-95°C. Se enfrió en el desecador y se pesó hasta obtener peso constante. El contenido de sólidos totales de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{ST (mg/ L)} = \frac{\text{gramos de sólido} \times 1000000}{\text{mL de muestra}}$$

2.4.4.2 Sólidos Disueltos (SD): se filtró la muestra a través de una membrana de 0.45 µm, se colocaron 50 mL del filtrado en un erlenmeyer de 100 mL previamente pesado, se evaporó en la plancha con calentamiento moderado dejando un mínimo volumen que luego se secó en la estufa a 103-105°C, durante una hora. Se dejó enfriar en el desecador y se pesó hasta obtener un peso constante. El contenido de sólidos disueltos de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{SD (mg/ L)} = \frac{\text{gramos de sólido} \times 1000000}{\text{mL de muestra}}$$

2.4.4.3 Sólidos Suspendidos Totales (SST): Se determinaron mediante la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos. El contenido de sólidos suspendidos totales de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{SST (mg/L)} = \text{ST} - \text{SD}$$

2.4.5 Oxígeno disuelto (OD)

2.4.5.1 Estandarización del tiosulfato: En un erlenmeyer de 250 mL se adicionaron 10 mL de solución de yoduro de potasio, 15 mL de solución de ácido sulfúrico 2N y 10 mL de solución de dicromato de potasio (0.025N). Se diluyeron hasta 200 mL

con agua destilada y se tituló con tiosulfato hasta un viraje de pardo oscuro a amarillo claro en la solución, inmediatamente se adicionaron tres gotas de almidón y se continuó la titulación hasta un viraje de azul claro a incoloro por la adición de una gota de tiosulfato.

2.4.5.2 Determinación de oxígeno disuelto (OD): En una botella winkler de 300 mL se adicionó una pequeña cantidad de la muestra y se llevó a un volumen de 296 mL con agua de dilución, se adicionó 1 mL de la solución de sulfato de manganeso, 1 mL de solución de álcali – yoduro y 1 mL de solución de fluoruro de potasio. Luego se invirtió la botella cuatro veces hasta observar un precipitado café, se adicionó 1 mL de ácido sulfúrico concentrado y se invirtió la botella hasta completa homogeneidad de la solución. Se tomaron 202 mL de esta solución y se tituló con la solución estandarizada de tiosulfato de sodio hasta la aparición de un color amarillo claro, momento en el cual se adicionó tres gotas de indicador de almidón y se continuó la titulación hasta un viraje de azul a incoloro.

El oxígeno disuelto de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{OD (mg/L): } \frac{V \times N \times 8000}{V_m}$$

Donde:

V: Volumen en mL de tiosulfato utilizados en la titulación de la muestra.

N: Normalidad de la solución de tiosulfato estandarizada

V_m: Volumen de muestra titulada (en este caso 202 mL)

2.4.6 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

2.4.6.1 Preparación de las muestras en botellas DBO: En dos botellas winkler de 300 mL se adicionó un pequeño volumen de muestra conocido y se agregó agua de dilución de tal manera que al insertar el tapón se desplazara todo el aire, sin

dejar burbujas. Se determinó el oxígeno disuelto inicial en una de las dos botellas y se tapó herméticamente la segunda con sello de agua, para luego incubarlo por 5 días a 20 °C.

2.4.6.2 Determinación de OD inicial: La determinación se realizó como se describe en 2.4.5

2.4.6.3 Determinación de OD final: Se determinó OD en las muestras después de 5 días de incubación como se describe en 2.4.5.

La DBO₅ de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DBO}_5 \text{ (mg/L): } \frac{\text{ODi} - \text{ODf} \times 300\text{mL}}{p}$$

Donde:

ODi = Oxígeno disuelto inicial de la muestra (mg/L)

ODf = Oxígeno disuelto final (mg/L)

p = volumen de muestra / 300 mL (volumen botella Winkler)

2.4.7 Demanda química de oxígeno (DQO)

2.4.7.1 Estandarización de la solución de sulfato ferroso amoniacal (FAS): se tomaron 5 mL de la solución de dicromato de potasio 0.25N y se aforaron a 50 mL con agua destilada. Se adicionaron cuidadosamente 15 mL de ácido sulfúrico concentrado (enfriar mezcla) y luego se tituló con FAS utilizando dos gotas de ferroína como indicador, hasta una leve coloración rojiza después de pasar por una gama de colores.

2.4.7.2 Digestión de la muestra a reflujo abierto: se colocó en cada balón 0.2 g de sulfato mercúrico, un agitador magnético y 10 mL de muestra, se adiciono 5 mL

del reactivo de ácido sulfúrico por las paredes del balón, mezclando para disolver el HgSO_4 , se dejó enfriar la mezcla para evitar posibles pérdidas de material volátil, y luego se agregó 5 mL de la solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.25N y se mezcló. Inmediatamente se conectó al sistema de reflujo y se inició la agitación. Se agregó por la parte superior del condensador 10 mL de reactivo de ácido sulfúrico lentamente. Se sometió a reflujo durante dos horas. Después se dejó enfriar a temperatura ambiente y por las paredes del condensador se adicionaron 10 mL de agua destilada tratando de arrastrar los vapores condensados. Paralelamente se montó un blanco con agua destilada, el reactivo de ácido sulfúrico y la solución de dicromato de potasio.

2.4.7.3 Titulación de la muestra: se llevó el volumen de la muestra digerida a 75 mL con agua destilada en un erlenmeyer de 100 mL, se agregó dos gotas de indicador y se tituló con la solución de FAS estandarizada. La demanda química de oxígeno de la muestra se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DQO (mg/L): } \frac{(\text{A}-\text{B}) \times \text{N} \times 8000}{m}$$

Donde:

A: Volumen en mL de FAS utilizados en la titulación del blanco.

B: Volumen en mL de FAS utilizados en la titulación de la muestra.

N: Normalidad de la solución de FAS estandarizada.

m: mL de muestra titulada (75 mL)

2.4.8 Nitrógeno total

2.4.8.1 Digestión: se colocaron 2 g de catalizador en los tubos de digestión Buchi, se añadieron 25 mL de muestra y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se realizó la digestión en la unidad de digestión Buchi por un espacio de dos horas. El color

de la solución final fue transparente. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada, catalizador y ácido sulfúrico concentrado.

2.4.8.2 Destilación: se calentó la unidad de destilación Buchi haciendo pasar vapor de agua. Se adicionó una gota de la solución de fenolftaleína a la muestra digerida y se colocó el tubo en la parte correspondiente del destilador. Se recogió el destilado en 100 mL de ácido bórico al 2 % con dos gotas de indicador de tashiro. La solución destilada se tornó de un color verde claro. Se tituló el destilado obtenido con la solución de HCl 0.1N estandarizada, hasta la aparición de una leve coloración rosa. (color del blanco).

La concentración de la muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$N \text{ (mg / L)} = \frac{\text{Normalidad de HCl} \times \text{mL de HCl consumidos}}{\text{Volumen de muestra}}$$

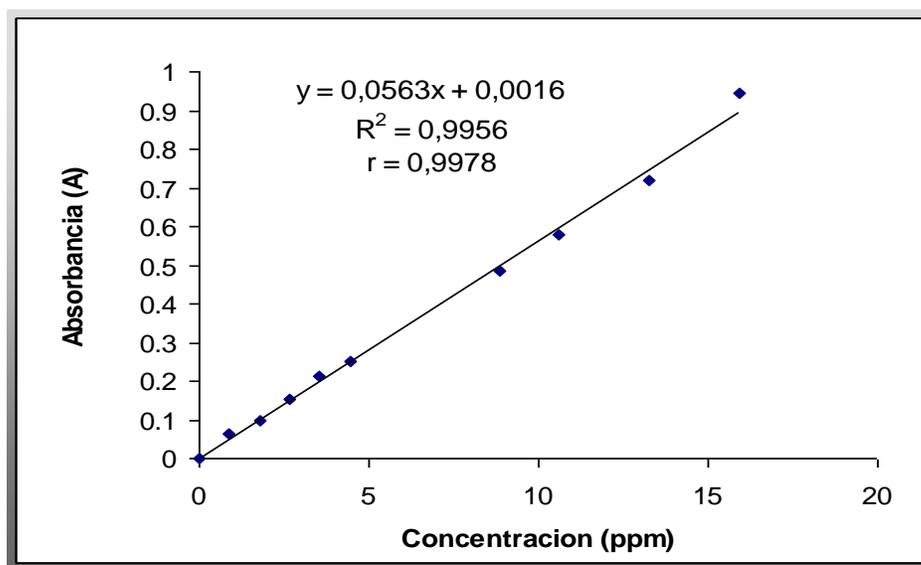
2.4.9 Nitratos

2.4.9.1 Construcción de la curva patrón (anexo 1): se prepararon soluciones a partir de la solución patrón de nitrato de potasio de tal manera que las concentraciones estuvieran comprendidas entre 0 y 30 mg/L de nitrato de potasio. Se leyó las absorbancias a 220 y 275 nm, usando como blanco agua destilada. Se restó dos veces la absorbancia leída a 275 nm de la lectura a 220 nm, para obtener la absorbancia debida al ión nitrato y se trazó una curva de absorbancia vs concentración de ión nitrato.

2.4.9.2 Preparación de la muestra: se filtró varias veces la muestra (100 mL) a través de una membrana de 0.45 µm de diámetro de poro hasta que quedó cristalina. Se tomó una alícuota de 50 mL de la muestra filtrada, se añadió 1 mL

de solución de ácido clorhídrico 1N. Se leyó la absorbancia de la muestra de igual manera que los patrones de nitrato de potasio. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada y HCL 1N. La concentración de la muestra se determinó mediante la ecuación de la curva patrón, (figura 7)

Figura 7. .Curva para nitratos método espectrofotométrico UV–VIS
longitud de onda = 220 y 275 nm



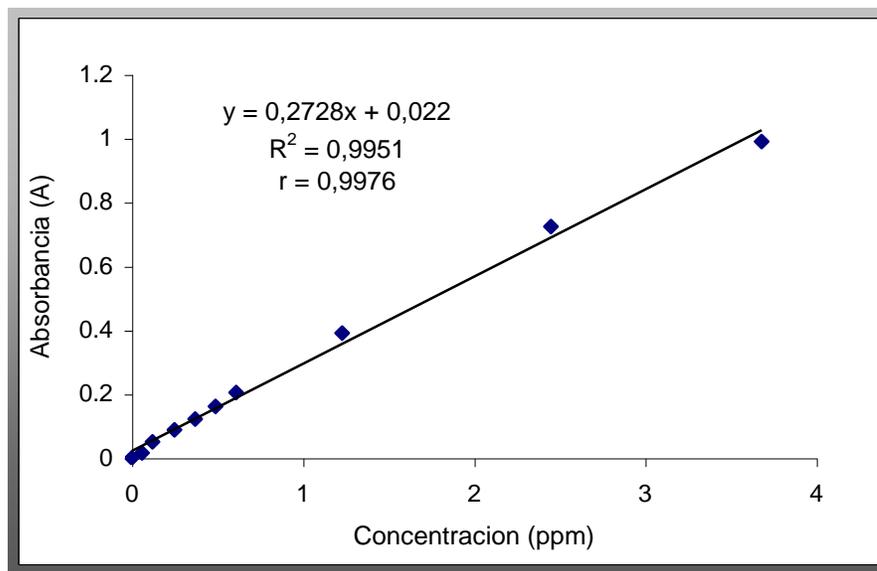
2.4.10 Fósforo total

2.4.10.1 Preparación de la curva de calibración: A partir de la solución madre de fosfato diácido de potasio se prepararon soluciones patrón en un rango entre 0.05 – 4.00 ppm de fosfato (PO_4^{3-}). Se tomó 50 mL de cada uno de los patrones, se adicionó 2.0 mL del reactivo molibdato de amonio y 0.25 mL (5 gotas) del reactivo de cloruro estañoso y después de 10 minutos pero antes de 12 minutos se midió la absorbancia en el espectrofotómetro a 690 nm. Se trazó una curva de absorbancia vs concentración de ión fosfato. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada y los reactivos calorimétricos.

2.4.10.2 Determinación sobre la muestra: se colocó una alícuota de la muestra de volumen conocido en un balón kjeldahl, se adicionó 5 mL de HNO₃ concentrado y 1 mL de H₂SO₄ concentrado, se hizo la digestión hasta obtener un volúmen aproximado de 1 mL. Al enfriar se agregó 20 mL de agua destilada, se adicionó una gota de fenolftaleina y se neutralizo con NaOH, se trasvasó la solución a un balón de 100 mL y se aforó. Se tomaron 25 mL de la solución, se aforó a 50 mL y se determinó fósforo de igual forma que en los patrones. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada y los demás reactivos mencionados anteriormente.

El contenido de fósforo de la muestra se determinó mediante la ecuación de la curva patrón. (figura 8)

Figura 8 .Curva para fósforo método espectrofotométrico UV –VIS
Longitud de onda = 690 nm



2.4.11 Hierro total:

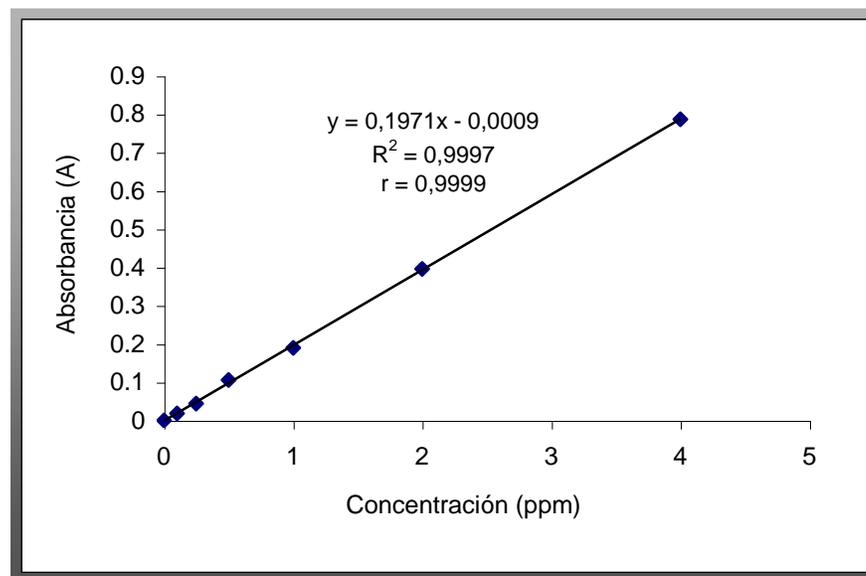
2.4.11.1 Curva de calibración: A partir del patrón de hierro se prepararon soluciones en un rango entre 0.1 – 4.00 ppm de hierro. En balones de 50 mL se

colocaron 0.25 mL de H₂SO₄ (1:3), se agregó 25 mL de los patrones, 2.5 mL de acetato de amonio, 1 mL de reactivo de hidroxilamina y 1 mL de reactivo de fenantrolina., se aforó a 50 mL, y a los de 15 minutos se leyó la absorbancia a 510 nm. Se trazó una curva de absorbancia vs concentración de hierro. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada y los reactivos calorimétricos

2.4.11.2 Determinación sobre la muestra: se colocó 5 mL de muestra en un balón kjeldahl, se adicionó 20 mL de HCl 1:1 y se concentró hasta un volúmen aproximado de 1 mL, se diluyó, se filtró y aforó a 100 mL. Se tomaron 25 mL de muestra y se hizo la determinación de hierro de igual manera que para los patrones. Se realizó paralelamente un blanco con agua destilada y se adicionó los demás reactivos mencionados anteriormente.

La concentración de hierro de la muestra se determinó mediante la ecuación de la curva patrón. (Figura 9)

Figura 9. Curva para hierro método espectrofotométrico UV –VIS
Longitud de onda = 510 nm



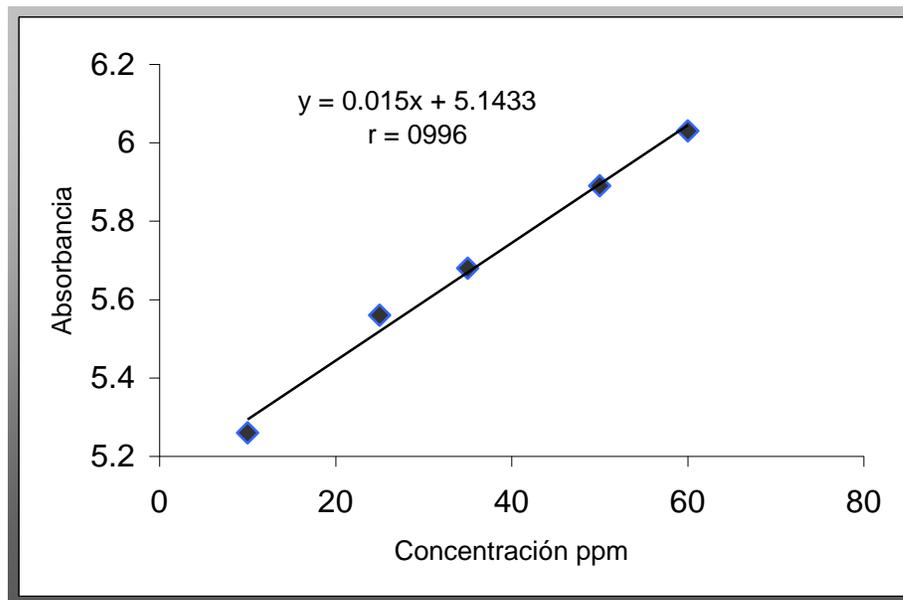
2.4.12 Cloruros

5.3.12.1 Preparación de la Curva de Calibración: A partir de la solución patrón de NaCl se prepararon soluciones en un rango entre 5.0 – 60.0 ppm de ión cloruro. En un erlenmeyer de 100 mL se colocaron 50 mL de patrón, se agregó 1 mL de ISA (5M NaNO₃) y se leyó la medida de cloruros mediante el electrodo de ión selectivo. Se trazó una curva de lectura de Cl⁻ vs concentración de Cl⁻.

2.4.12.2 Determinación sobre la muestra: Se tomaron 50 mL de muestra diluida, se adicióno 1 mL ISA y se procedió de igual manera que para los patrones.

La concentración de cloruros de la muestra se determinó mediante la ecuación de la curva patrón. (Figura 10)

Figura 10. Curva para Cloruro método electrodo de ión selectivo



3. RESULTADOS Y DISCUSION

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico realizado a las muestras de lixiviados del afluente y efluente de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito” siguiendo los procedimientos expuestos en la metodología (sección 2). Todo esto, con el fin de hacer una caracterización de la composición de estos lixiviados, para conocer su carga contaminante y a la vez evaluar la eficiencia de remoción de la laguna de estabilización.

La toma de muestras se realizó durante un periodo de seis meses comenzando en una época lluviosa a la cual corresponde el mes de abril, siguiendo con un periodo de verano comprendido entre los meses de mayo y agosto y se finalizó nuevamente en un mes de lluvia : septiembre. Así fue posible observar la variación de los diferentes parámetros contaminantes de acuerdo a las condiciones climáticas presentes en la región.

Al iniciar el muestreo en el mes de abril, el canal de entrada de lixiviados a la laguna de estabilización no estaba completamente limpio y presentaba vegetación en sus alrededores y acumulación de sedimentos (lodos) que afectaban el flujo normal de los lixiviados hacia la entrada.

El canal de entrada de la laguna también tenía grietas que dispersaban el lixiviado y dificultaban la toma de muestra y por tanto la medida de caudal. A partir del mes de mayo se modificó la entrada de la laguna, colocándose un tubo que canalizaba el lixiviado, lo que mejoró la toma de muestra y a la vez el caudal.

3.1 Variación de precipitaciones

Los datos de precipitación se obtuvieron en la estación metereológica IDEAM, ubicada en el aeropuerto Guillermo Valencia de Popayán. Los datos corresponden al promedio de las precipitaciones que se presentaron en cada uno de los meses.

Tabla 8. Variación de precipitación en la ciudad de Popayán

MES	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Precipitación (mm)	3.53	***	0.43	0.0	1.4	8.9

***: No se hizo medición de precipitación.

3.2 Mediciones en campo

Las tablas 9 y 10 muestran los resultados obtenidos de las mediciones en campo de caudal, pH y temperatura durante seis horas en la entrada y salida de la laguna de lixiviados en el relleno sanitario “El Ojito” durante el periodo de estudio (abril-septiembre).

Las mediciones de temperatura, pH y caudal se realizaron por triplicado cada hora durante seis horas, los datos en las tablas 9 y 10 corresponden al promedio de estas tres mediciones. En el análisis estadístico se establece el rango para cada parámetro, dándose el valor mínimo y máximo para cada uno de ellos, también se calculó el valor promedio y la desviación estándar de las mediciones, a través del programa de Microsoft office Excel.

3.2.1 Variación de pH, temperatura y caudal

En las figuras 11, 12 y 13 se presentan gráficamente los resultados obtenidos en campo de temperatura, pH y caudal en los muestreos realizados durante los meses de abril - septiembre del año 2005.

Tabla 9. Parámetros de campo- entrada de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”

ABRIL					MAYO				JUNIO			
	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH
	9:00	0.215	25	8.32	9:00	0.309	29	8.37	8:20	0.670	25	8.43
	10:00	0.247	25.5	8.29	10:00	0.295	31	8.34	9:20	0.677	29	8.40
	11:00	0.190	28.5	8.24	11:00	0.282	33.5	8.28	10:20	0.663	33.5	8.42
	12:00	0.210	29	8.26	12:00	0.280	32	8.32	11:20	0.631	34	8.39
	1:00	0.189	28	8.28	1:00	0.273	31	8.32	12:20	0.642	35	8.40
	2:00	0.261	28	8.29	2:00	0.273	31.5	8.33	1:20	0.632	35.5	8.38
ANALISIS ESTADISTICO												
Valor máximo		0.261	29	8.32		0.309	33.5	8.37		0.677	35.5	8.43
Valor mínimo		0.189	25	8.24		0.273	29	8.28		0.631	25	8.38
Valor promedio		0.219	27.3	8.28		0.288	31.3	8.33		0.652	32	8.40
Desviación Estándar		0.030	1.663	0.028		0.014	1.472	0.029		0.020	4.135	0.019

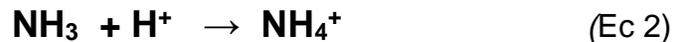
JULIO					AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH
	8:30	0.568	24	8.15	8:45	0.425	26	8.40	8:30	7.79	22.5	8.24
	9:30	0.564	29	8.12	9:45	0.424	28.5	8.42	9:30	7.89	23	8.24
	10:30	0.560	35	8.14	10:45	0.462	30.5	8.36	10:30	7.92	24	8.26
	11:30	0.570	35	8.11	11:45	0.421	33	8.30	11:30	8.01	24.5	8.26
	12:30	0.571	36	8.10	12:45	0.440	32	8.31	12:30	7.78	25	8.27
	1:30	0.582	36	8.12	1:45	0.424	32	8.34	1:30	7.93	25	8.28
ANALISIS ESTADISTICO												
Valor máximo		0.582	36	8.15		0.462	33	8.42		8.01	25	8.28
Valor mínimo		0.560	24	8.10		0.421	26	8.30		7.78	22.5	8.24
Valor promedio		0.571	32.5	8.12		0.433	30.33	8.36		7.89	24	8.26
Desviación Estándar		0.075	4.930	0.019		0.016	2.639	0.048		0.088	1.049	1.016

Tabla 10. Parámetros de campo- salida de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”

ABRIL					MAYO				JUNIO			
	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH
	9:20	0.137	21	8.37	9:10	0.206	21	8.34	8:30	0.534	23.5	8.38
	10:20	0.125	21.5	8.36	10:10	0.198	23.5	8.30	9:30	0.508	27	8.40
	11:20	0.121	23	8.33	11:10	0.190	30	8.34	10:30	0.520	28	8.37
	12:20	0.109	28.5	8.33	12:10	0.179	26	8.31	11:30	0.540	30	8.37
	1:20	0.116	28	8.34	1:10	0.185	26.5	8.37	12:30	0.502	30	8.36
	2:20	0.120	28.5	8.36	2:10	0.180	31	8.33	1:30	0.518	31	8.36
ANALISIS ESTADISTICO												
Valor máximo		0.137	28.5	8.37		0.206	31	8.37		0.534	32.5	8.40
Valor mínimo		0.109	21	8.33		0.179	21	8.30		0.502	23	8.36
Valor promedio		0.121	25.1	8.35		0.190	26.3	8.33		0.520	28.2	8.37
Desviación Estándar		0.0093	3.625	0.017		0.011	3.790	0.025		0.015	2.752	0.015

JULIO					AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH	Hora	Caudal L / s	T (° C)	pH
	8:20	0.490	22	8.12	9:0	0.400	21	8.60	8:45	7.77	20	8.21
	9:20	0.480	26	8.14	10:00	0.394	24.5	8.57	9:45	7.79	21.5	8.22
	10:20	0.488	30	8.13	11:00	0.377	28	8.59	10:45	7.80	21.5	8.23
	11:20	0.470	33	8.15	12:00	0.356	28.5	8.46	11:45	7.83	22	8.25
	12:20	0.500	32	8.16	1:00	0.310	29	8.44	12:45	7.78	23	8.26
	1:20	0.471	31	8.14	2:00	0.318	32	8.48	1:45	7.81	24	8.26
ANALISIS ESTADISTICO												
Valor máximo		0.500	22	8.16		0.400	32	8.60		7.83	24	8.26
Valor mínimo		0.470	32	8.12		0.310	21	8.44		7.77	20	8.21
Valor promedio		0.483	29	8.14		0.359	27.2	8.52		7.80	22	8.24
Desviación Estándar		0.012	4.195	0.014		0.038	3.856	0.071		0.022	1.378	0.021

Las variaciones de pH de entrada de la laguna (8.12 -8.40) indican que los lixiviados fueron caracterizados por condiciones metanogénicas con un rango de pH comprendido entre (5-9).²⁹ Este pH básico encontrado en las muestras de la laguna se debe a que durante el proceso biológico en los lixiviados, se genera la ruptura de proteínas mediante hidrólisis, en aminoácidos, los cuales son descompuestos y transformados por los microorganismos en amoníaco (NH₃), el amoníaco soluble se combina con el ión H⁺ para formar ión amonio (NH₄⁺) (Ec 2), proceso que tiende a elevar el pH,⁶ porque este compuesto produce una gran capacidad buffer a pesar de la elevada concentración de ácidos grasos volátiles.³⁰



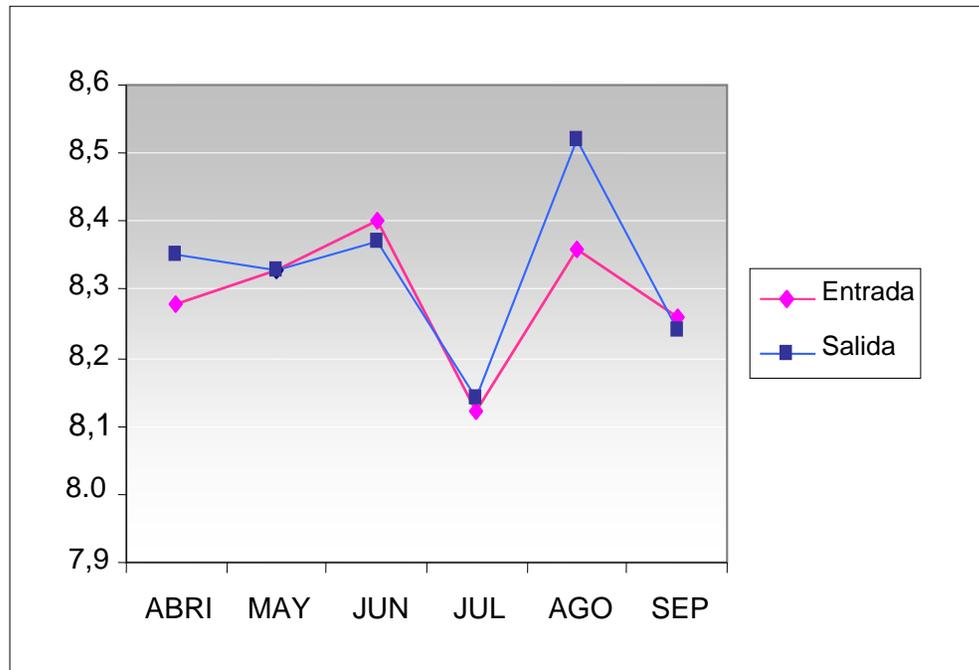
Durante el proceso de desnitrificación que se lleva a cabo en el proceso anaerobio de la laguna de estabilización, los nitratos presentes en los lixiviados al reaccionar con metanol producen iones OH⁻ que también generan un aumento del pH⁶, la reacción completa de desnitrificación es:



Los valores de pH de la salida de la laguna de estabilización indican que los procesos de degradación biológica iniciados en las celdas de digestión continúan, disminuyendo la carga contaminante.

En la figura 11 se puede observar que los valores de pH de la salida y entrada de la laguna de estabilización tienen prácticamente un mismo comportamiento y no varían de acuerdo a las condiciones climáticas.

Figura 11. Variación de pH. Entrada y salida laguna de estabilización



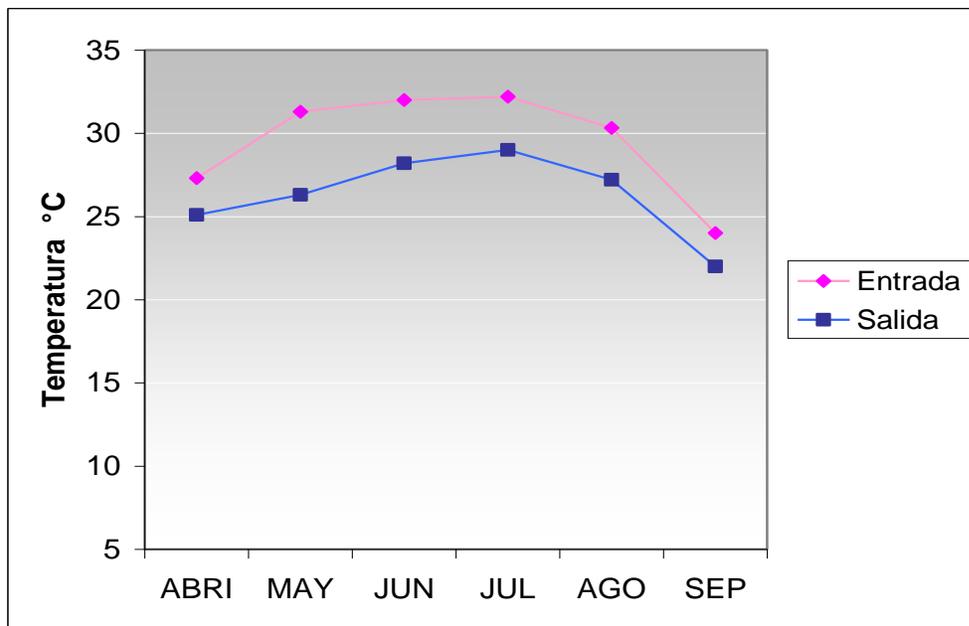
Es importante el control de pH por lo siguiente: primero, a la entrada de la laguna debe presentarse un pH cercano a 7 para que favorezca el tratamiento anaerobio y segundo, a la salida, el pH debe estar dentro de la norma nacional establecida en el Decreto 1594 de 1984 (5-9 unidades) para el vertimiento a una fuente natural.

El pH de la entrada aunque no es neutro favorece las condiciones anaerobias del tratamiento y el rango de pH encontrado en la salida de la laguna durante este periodo de seis meses oscila entre (8.12 -8.52) valores que están dentro de los límites exigidos por la norma.

Las variaciones de temperatura en la entrada y salida de la laguna obedecen a condiciones climáticas y se observa igual comportamiento en las dos muestras. La temperatura varía en un orden creciente (figura 12) conforme cambia el clima, de

invierno a verano, lo que se puede relacionar directamente con los niveles de precipitaciones hallados durante estos meses, en el último mes donde hay un aumento en la precipitación se observa que la temperatura disminuye, lo que evidencia la incidencia de la precipitación en la temperatura de la masa líquida de la laguna.

Figura 12. Variación de temperatura. Entrada y salida laguna de estabilización



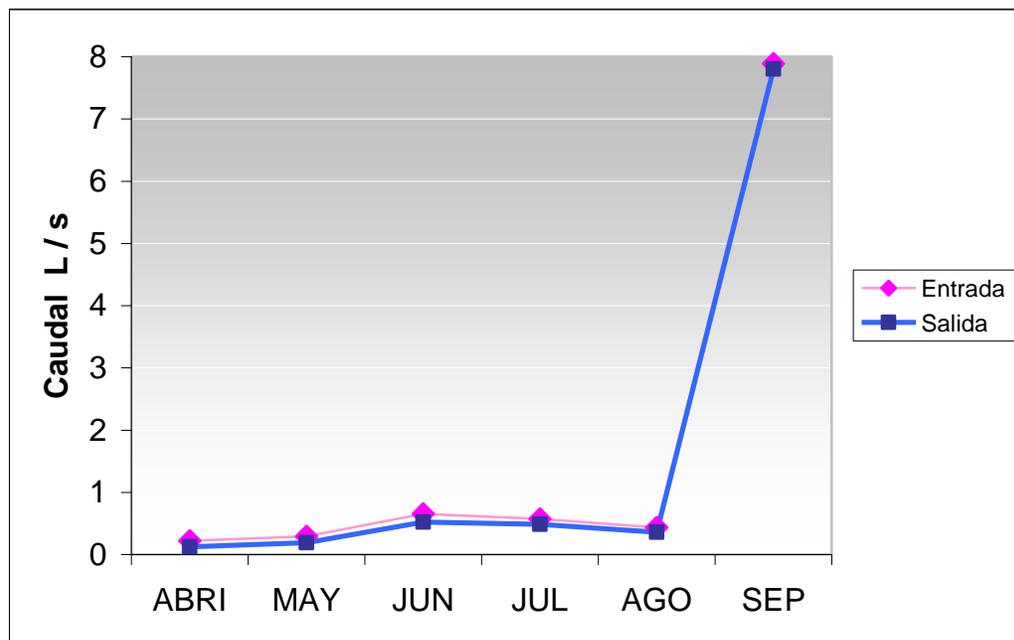
De acuerdo con el método de balance calórico por conducción propuesto por Yañez (1993) para la determinación de la temperatura de las lagunas de estabilización, la diferencia entre el calor de afluente y el calor de efluente corresponde al intercambio de calor aire-agua ³¹, para estos ensayos se observa un pérdida de calor. Puesto que los valores de temperatura de la entrada durante este periodo de análisis siempre fueron mayores a los de salida, debido posiblemente a que los lixiviados que se percolan en los bloques de basura se calientan como producto de las altas temperaturas generadas en los procesos de descomposición de los residuos sólidos, además se presenta un calentamiento

adicional de los lixiviados, por un intercambio de calor de la geomembrana (conduce los lixiviados) a estos líquidos, ya que ésta también recoge bastante calor durante los procesos de degradación biológica de las basuras.

Las temperaturas de la entrada de la laguna son mayores de 25°C, lo que favorece las condiciones anaerobias, porque no permite que el agua disuelva oxígeno. En ningún caso, la temperatura a la salida sobrepasa de 40°C, cumpliéndose con la norma nacional (40°C máximo).

En la figura 13 se puede observar una variación bastante notoria en los valores de caudal medidos durante los seis meses. Aunque se observa un igual comportamiento en la entrada y salida, la gráfica indica que los caudales no varían de acuerdo a las condiciones climáticas en cuanto a los niveles de precipitación, porque se presentaron otras variables que afectaron esta relación directa que existe entre el caudal y el nivel de precipitación.

Figura 13. Variación de caudal. Entrada y Salida Laguna de Estabilización



En la figura 13 se observa que en los meses donde la temperatura fue mayor (junio, julio y agosto) el caudal aumentó, posiblemente debido a que un aumento en la temperatura produjo una aceleración en los procesos de descomposición de los residuos biodegradables, aumentando los niveles de agua de los lixiviados, ya que este líquido es un producto de la descomposición.

Otra explicación a este comportamiento, es el hecho de que en el primer mes abril, la medición de caudal en la entrada se hizo en el canal que conduce los lixiviados a la laguna, este canal se encuentra sobre el terreno del relleno y está cubierto por geomembrana, pero la parte de conexión a la laguna no era uniforme y la geomembrana presentaba deformaciones que no permitían que el flujo de los lixiviados fuera normal, dificultando la recogida de lixiviado para la medición de caudal (Ver figura 14). Teniendo en cuenta que no se pudo obtener un caudal real, este dato no se consideró para la determinación de las eficiencias de remoción. A raíz de este acontecimiento fue modificada la entrada de la laguna.

Figura 14. Entrada de la laguna de estabilización.



Figura 15. Acumulación de lodo.



Figura 16. Vegetación en el canal



En el mes de mayo se observó que el canal de drenaje de los lixiviados estaba obstaculizado por una gran cantidad de sedimentos y también por la vegetación que crece alrededor del canal, dificultando y disminuyendo a la vez el flujo del lixiviado hacia la entrada de la laguna (ver figuras 15 y 16), lo que puede explicar el bajo caudal encontrado, a pesar de que durante este tiempo hubo mayor precipitación en comparación a los meses de junio, julio y agosto.

Figura 17. Entrada de la laguna



En el mes de Junio estaban canalizados los lixiviados, por medio de un tubo de pvc que los conducía a la laguna, lo que facilitó la recogida de la muestra y la medida de caudal, porque se tomaron los lixiviados del extremo de este tubo, el cual esta por encima de la superficie de la laguna como se puede observar en la figura 17, además, se limpiaron los canales por eso que en estos tres últimos meses donde el nivel de precipitaciones fue menor el caudal es mayor respecto a los meses de abril y mayo.

En septiembre donde el nivel de precipitación fue el mas alto (8.9mm) se observa que el caudal aumentó notoriamente comparado a los meses anteriores, lo cual es razonable, porque las constantes lluvias presentadas en este mes aumentaron la cantidad de lixiviados tanto en los bloques de basuras como en los canales que conducen los lixiviados, ya que estos están a cielo abierto.

3.2.2 Variación de conductividad

En la tabla 11 se presentan los valores de conductividad obtenidos durante los seis meses de muestreo. Como era de esperarse estos valores de conductividad son altos debido al gran contenido de sales que están presentes en los lixiviados, lo que implica la presencia de aniones y cationes, producto de reacciones de equilibrio gases-agua y la disolución de los compuestos solubles presentes en los lixiviados y en los residuos sólidos en proceso de descomposición.

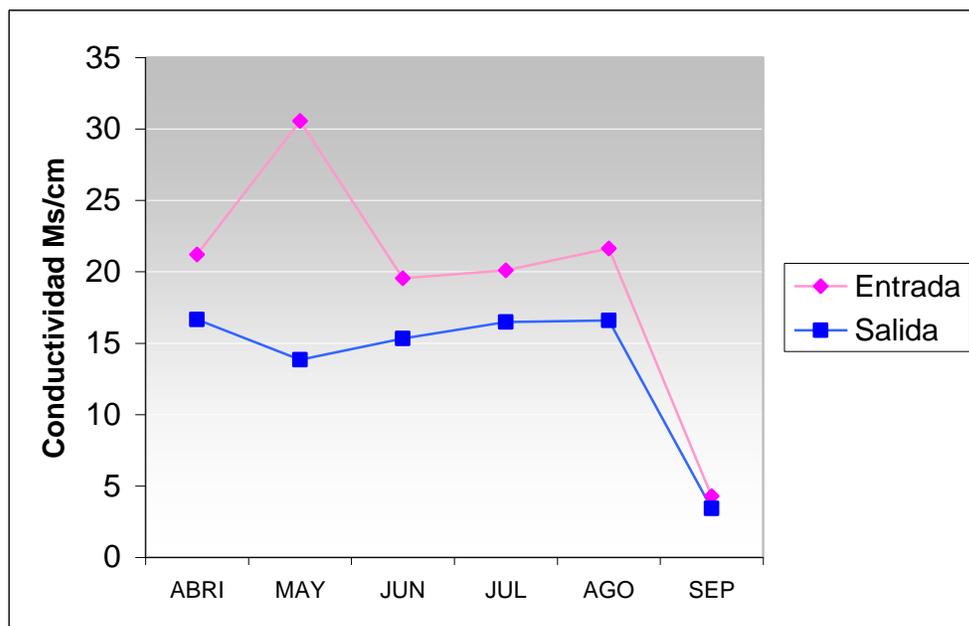
En la figura 18 se observa que en mayo se presentó el valor de conductividad mas alto, debido posiblemente a que hubo una disolución de los sólidos que se encontraban sedimentados en el canal de entrada de lixiviados a la laguna, aumentando la cantidad de iones y cationes, pero a partir de este mes hasta agosto, hay un crecimiento en estos valores, este incremento se puede explicar por el hecho de que aumentó la temperatura del lixiviado durante este periodo lo

que indica que también aumentó la actividad biológica en el bloque generándose un incremento de la descomposición anaerobia de los residuos en el relleno. Se dan procesos de mineralización que produjeron una mayor cantidad de material inorgánico disuelto en los lixiviados³² expresado en los valores altos de conductividad obtenidos, los cuales están relacionados con los valores de sólidos disueltos determinados en estas muestras

Tabla 11. Valores de conductividad laguna de estabilización

MES	Conductividad (ms / cm)	
	Entrada	Salida
ABRIL	21.2	16.66
MAYO	30.55	13.83
JUNIO	19.54	15.32
JULIO	20.1	16.48
AGOSTO	21.64	16.60
SEPTIEMBRE	4.28	3.43

Figura 18. Variación de conductividad. Entrada y salida laguna de estabilización



En septiembre se presentó una caída de la conductividad, como consecuencia del aumento de caudal presentado en este mes, relacionado directamente con el nivel de precipitaciones, porque las fuertes lluvias provocaron una dilución de la concentración de los iones y cationes presentes en los lixiviados y por tanto una disminución de la conductividad.

3.3 Resultados de laboratorio.

3.3.1 Variación de DBO₅ y DQO

En la tabla 12 se encuentran los valores determinados de la demanda química y bioquímica de oxígeno de la entrada y salida de la laguna de estabilización. La presencia de altos valores de DBO₅ y DQO en las muestras de lixiviados de la entrada y salida indica claramente la severa contaminación generada tras la descomposición de los residuos sólidos del relleno.

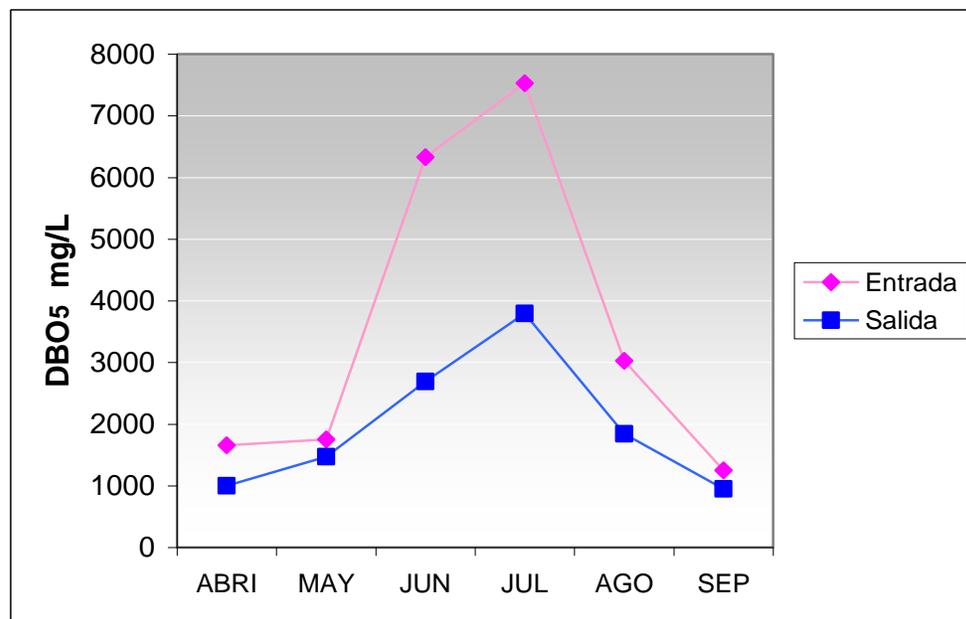
Tabla 12. Valores de DBO₅, DQO de la entrada y salida de la laguna de estabilización.

MES	DBO ₅ (mg / L)		DQO (mg / L)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
ABRIL	1656	999	4294	3191
MAYO	1752	1469	6004	4975
JUNIO	6330	2690	9970.16	6964.56
JULIO	7530	3795.6	15371.4	9945.0
AGOSTO	3024	1842	7925.40	5457.03
SEPTIEMBRE	1251	951	2448	1828

En las figuras 19 y 20 se observa un comportamiento ascendente de los valores de DBO₅ y DQO de la entrada de la laguna durante los primeros cuatro meses y un descenso en los dos meses siguientes, lo que obedece a las condiciones

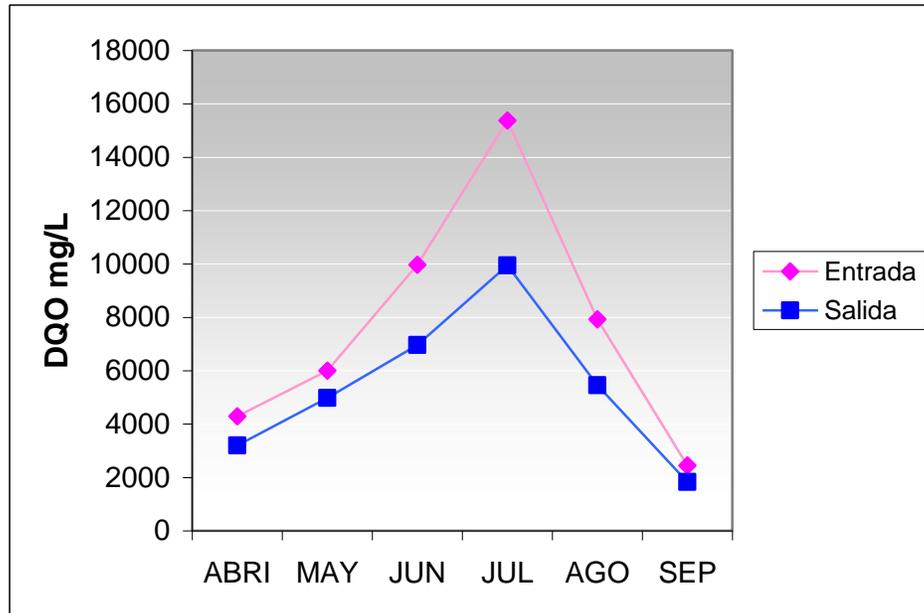
climáticas presentes durante este periodo de estudio. De abril a julio se observa un incremento de la concentración, el cual se relaciona con el incremento de la temperatura. Un incremento en la temperatura produce una mayor actividad biológica, acelerando los procesos de descomposición y a la vez aumentando la concentración de estos dos parámetros.

Figura 19. Variación de DBO₅. Entrada y salida laguna de estabilización



En junio y julio se presentaron en la entrada de la laguna los valores más altos de concentración de DBO₅ y DQO, meses en donde la temperatura fue mayor, lo que favoreció el proceso biológico de descomposición, porque a temperaturas más altas es más eficiente la digestión anaerobia. Además, un incremento en la temperatura también favorece los procesos de evaporación, generando pérdida de agua que provoca una mayor concentración de sustancias contaminantes³³. Es por eso que se observa en la grafica 19 y 20 una mayor remoción en concentración en los meses de verano.

Figura 20. Variación de DQO. Entrada y salida laguna de estabilización



De agosto a septiembre se produce un aumento en las precipitaciones, lo que provoca la dilución de la concentración de los compuestos orgánicos en los lixiviados y por tanto las valores de DQO y DBO₅ comienzan a disminuir hasta encontrarse el valor más bajo en septiembre, donde se presentó el nivel de precipitación más alto.

Mediante la relación DBO₅/DQO se puede saber el grado de biodegradabilidad que se puede dar en los lixiviados de la laguna, la tabla 14 resume estos resultados. Según los datos obtenidos en el cálculo de esta relación, los lixiviados de la entrada de la laguna presentan en general una biodegradabilidad media-alta con valores comprendidos en un rango de (0.29-0.63) como consecuencia de que su origen es básicamente doméstico, ya que los residuos sólidos pertenecen primordialmente a esta categoría, lo que quiere decir según la tabla 13 que los lixiviados son biodegradables y que pueden ser tratados mediante procesos biológicos como se está siendo actualmente en el relleno sanitario mediante la laguna de estabilización.

Tabla 13. Biodegradabilidad según la relación DBO_5 / DQO

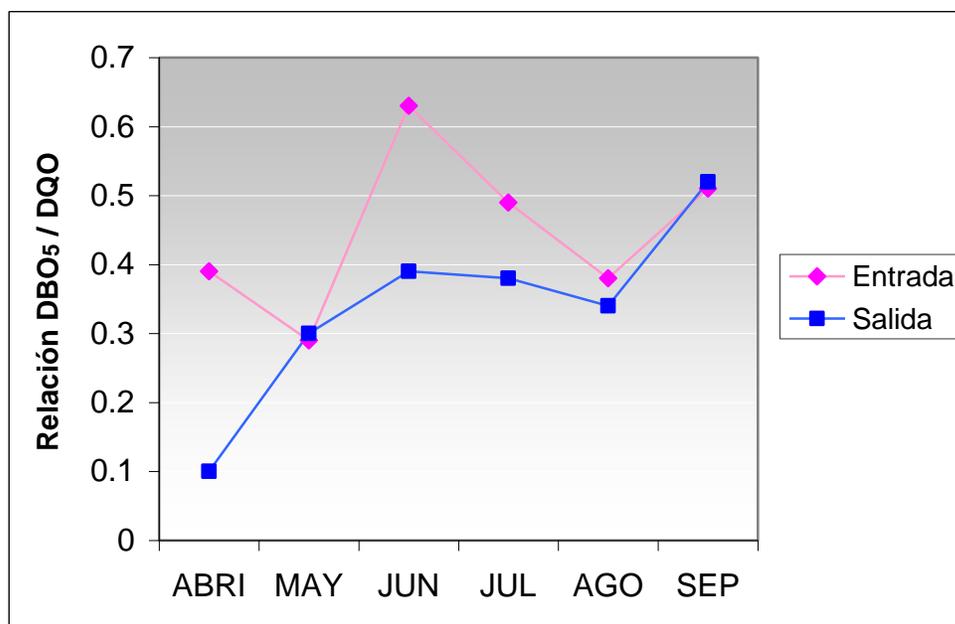
DBO_5 / DQO	Biodegradabilidad	Tratamiento
< 0.2	Baja	No es biodegradable o es poco Biodegradable y se debe emplear procesos químicos.
0.2 – 0.4	Media	Es biodegradable siendo recomendable el empleo de lechos bacterianos
>0.4	Alta	Es biodegradable, se puede utilizar sistemas biológicos por fangos activados o lechos bacterianos

Fuente: Optimización de parámetros electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales domésticas ³⁴

Tabla 14. Biodegradabilidad del lixiviado en la laguna de estabilización según la relación DBO_5 / DQO

Mes	Sitio de muestreo	DBO_5 / DQO	Biodegradabilidad
ABRIL	Entrada	0.39	Media
	salida	0.1	Baja
MAYO	Entrada	0.29	Media
	salida	0.30	Media
JUNIO	Entrada	0.63	Alta
	salida	0.39	Media
JULIO	Entrada	0.49	Alta
	salida	0.38	Media
AGOSTO	Entrada	0.38	Media
	salida	0.34	Media
SEPTIEMBRE	Entrada	0.51	Alta
	Salida	0.52	Alta

Figura 21. Variación de la relación DBO_5/DQO . Entrada y salida laguna de estabilización



En la tabla 15 se presentan las eficiencias de remoción en carga de DBO_5 , DQO y SST durante el periodo de estudio en la laguna de estabilización, determinadas a través de los valores de caudal y los datos de concentración de cada uno de los parámetros en la salida y entrada de la laguna.

Las eficiencias de remoción en carga de DBO_5 , DQO y SST oscilan en un rango de porcentajes comprendido entre (24.8 - 66.1), (26.2 - 69.7) y (29.8 - 62.2) % respectivamente, valores que no cumplen con la norma Colombiana para el vertimiento a un cuerpo de agua establecida en el decreto 1594 de 1984,⁶ porque ninguno de estos tres parámetros tienen porcentajes de remoción en carga superiores o iguales al 80% como se encuentra decretado.

Tabla 15. Eficiencias de remoción en carga de la laguna de estabilización del Relleno Sanitario “EL Ojito

Mes	Parámetro	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
		Caudal (L/s) A	Parámetro (mg / L) B	Carga (Kg / día) C	Caudal (L/s) D	Parámetro (mg / L) E	Carga (Kg / día) F	
MAYO	DBO ₅	0.288	1752	43.6	0.190	1469	24.1	44.7
	DQO		6004	149.4		4975	81.7	45.3
	SST		1196.00	29.8		1001.34	16.4	45.0
JUNIO	DBO ₅	0.652	6330	356.6	0.520	2690	120.9	66.1
	DQO		9970.16	561.6		6964.56	312.9	69.7
	SST		1664	93.7		1464	65.8	29.8
JULIO	DBO ₅	0.571	7530.00	371.5	0.483	3795.60	158.4	57.4
	DQO		15371.40	758.3		9945.00	415.0	45.3
	SST		2364.67	116.6		1056.67	44.1	62.2
AGOSTO	DBO ₅	0.433	3024	113.1	0.359	1842	57.1	49.5
	DQO		7925.40	296.5		5457.03	169.3	42.9
	SST		885.33	33.1		506.00	15.7	52.6
SEPTIEMBRE	DBO ₅	7.89	1251	852.8	7.80	951	640.9	24.8
	DQO		2448	1668.8		1828	1231.9	26.2
	SST		292	199.1		190	128.0	35.7

$$C = \frac{A \times B \times 86400}{1000000}$$

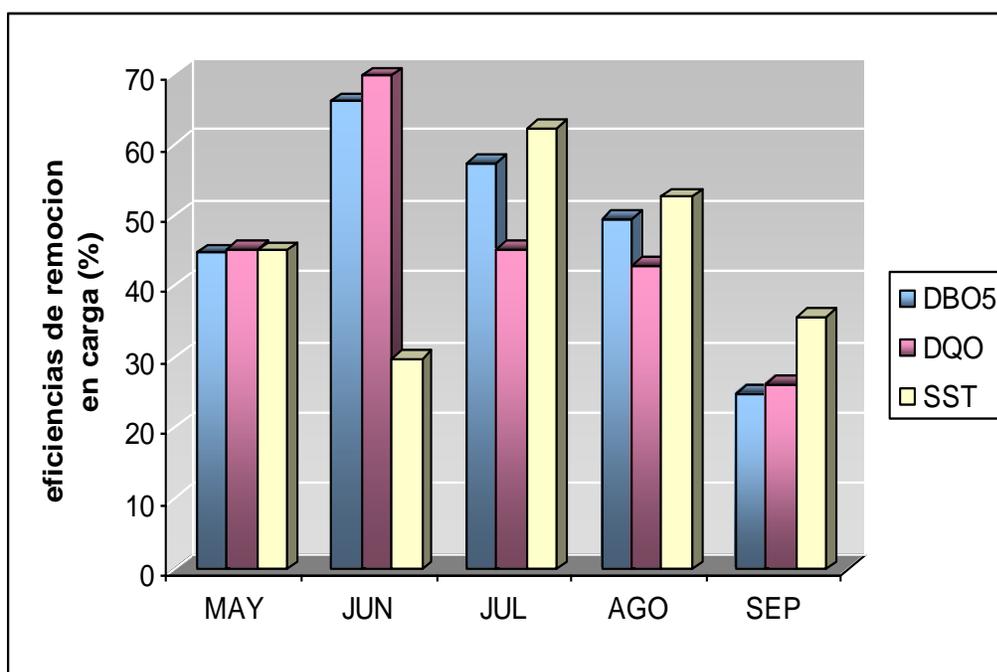
$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(C - F) \times 100}{C}$$

$$F = \frac{D \times E \times 86400}{1000000}$$

Tabla 16. Valores de DBO₅, DQO y SST de la entrada y salida de la laguna de estabilización y los porcentajes de remoción.

Mes	Eficiencias de remoción en carga (%)		
	DBO ₅	DQO	SST
MAYO	44.7	45.3	45.0
JUNIO	66.1	69.7	29.8
JULIO	57.4	45.3	62.2
AGOSTO	49.5	42.9	52.6
SEPTIEMBRE	24.8	26.2	35.7

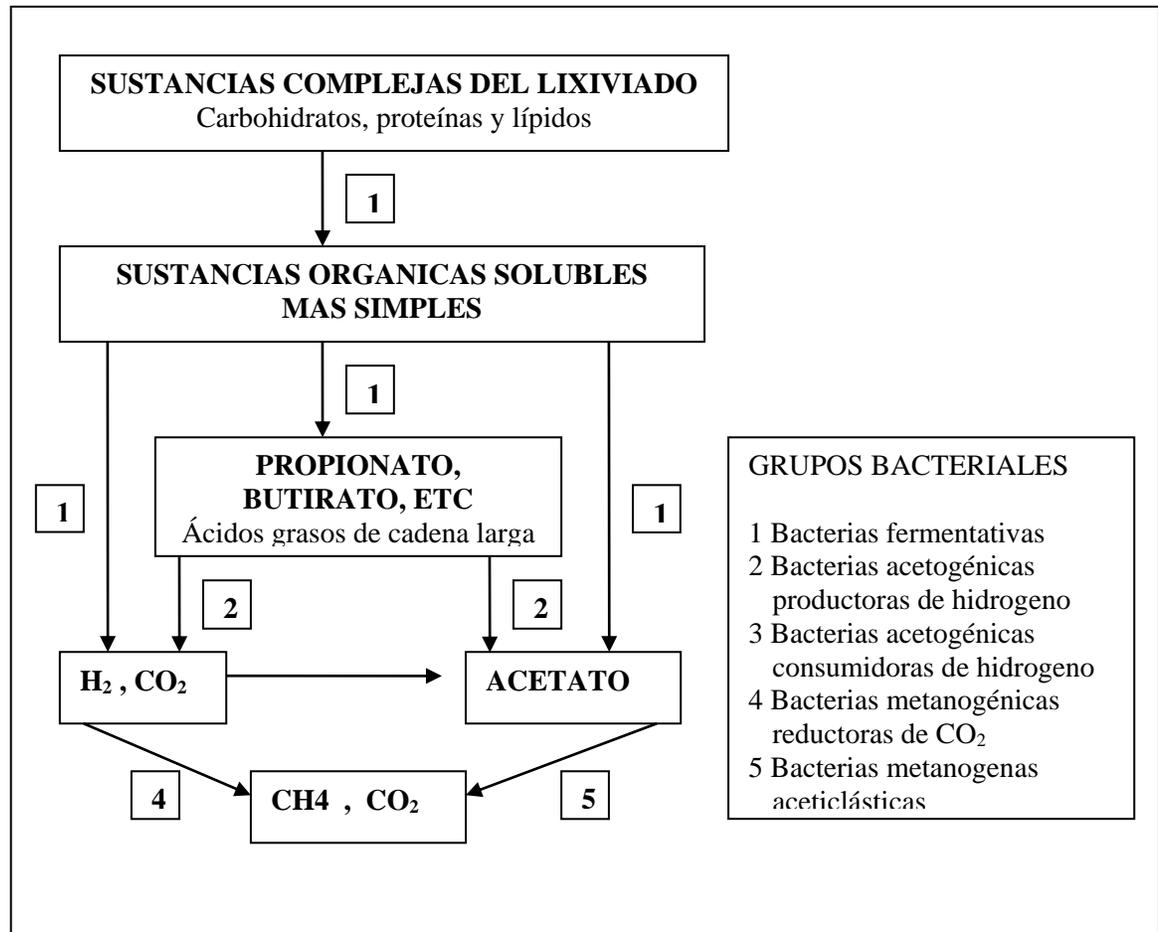
Figura 22. Eficiencias de remoción en carga de DBO₅, DQO y SST de la Laguna de Estabilización.



Según la figura 22, se observa que no hay una relación directa entre los resultados de DBO₅, DQO y SST, ya que por ejemplo en junio donde se presentó un aumento del porcentaje de remoción de DBO₅ y DQO la remoción de SST bajó y en julio donde descendió la remoción de DBO₅ y DQO, la remoción de SST aumentó.

Las eficiencias de remoción de DBO_5 oscilan en el rango de 24.8 % y 66.1% valores bajos, que se pueden explicar a través del proceso biológico que se presenta en la laguna (Figura 23).

Figura 23. Tratamiento anaerobio de compuestos orgánicos⁶



La estabilización o remoción biológica anaeróbica de DBO ocurre en la etapa de formación de metano, porque este es poco soluble en el agua y se evapora con los gases que se producen en la laguna. El CO_2 también escapa como gas o es convertido en alcalinidad bicarbonácea. La bacteria del metano es estrictamente anaeróbica y en general solo puede usar ácido acético, fórmico, metanol o hidrógeno como fuente de energía. Estas bacterias además necesitan las

condiciones optimas para llevar acabo el proceso de degradación, entre ellas pH entre 6.5 y 7.6, temperatura en el intervalo mesofílico de 30-38°C o en el intervalo termofílico de 50-60°C, ausencia de oxígeno y ausencia de sustancias toxicas. ⁶

El afluente de la laguna presenta un pH promedio de 8.27, una temperatura media de 29.8 °C y además por ser residuo líquido de la descomposición de residuos sólidos municipales presenta sustancias toxicas, metales y sulfuros, condiciones que no favorecen la formación de metano y por tanto produce una reducción de eficiencia en remoción de DBO en el proceso anaerobio de la laguna.

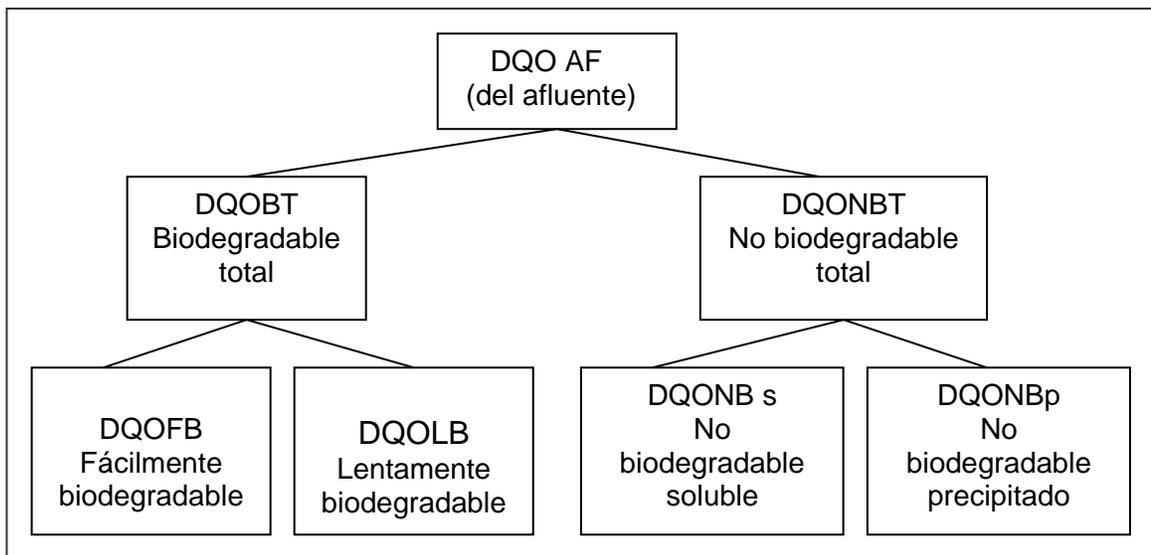
Una de las reacciones que compite con la reacción metanogénica es la reducción de sulfatos a sulfuros por las bacterias reductoras de sulfato. Las formas mas comunes de sulfuros son la de HS^- y el H_2S ; como el HS^- y el H_2S permanecen en solución, la DBO no es removida puesto que solamente se hace un cambio de materia orgánica, suceso que puede estar ocurriendo en la laguna puesto que se supone un alto contenido de sulfatos característica de lixiviados de rellenos sanitarios, lo que se puede evidenciar por el olor que se presenta en la laguna, como resultado de la liberación de sulfuro de hidrógeno (H_2S)⁶

La producción del crecimiento biológico es mínima puesto que el oxígeno de los compuestos orgánicos o sustratos, es removido y reemplazado por hidrogeno; el residuo es reducido y la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio permanece en el metano y no es utilizada en la síntesis celular por tanto el crecimiento bacteriano en la laguna es bajo. Esto indica que no hay suficientes microorganismos para descomponer las altas concentraciones de materia orgánica que diariamente entran en la laguna, valores comprendidos entre 1656-7531 mg/L.

La remoción de DQO a lo largo de estos seis meses es baja, con valores comprendidos entre 26.2 % y 69.7%, lo que indica que no se están llevando a

cabo con eficiencia los procesos de degradación de la materia orgánica más compleja presente en los lixiviados. Según el modelo de “Biosustrato” expuesto por Dold (1980) (figura 24) solo se puede estar generando la biodegradabilidad de la DQO fácilmente biodegradable (DQOFB), quedando casi intacta la DQO lentamente biodegradable (DQOLB)³⁵, ya que el medio anaerobio de la laguna no presenta las condiciones óptimas para que se dé la total degradación de esta clase de materia orgánica.

Figura 24. Modelo biosustrato de la degradación de DQO



En junio se presentó la mayor eficiencia de remoción de DQO, resultado que se vio favorecido por el incremento de temperatura, ya que para este mes la temperatura fue de 32.0°C, incrementando de alguna manera la biodegradabilidad de la DQO lentamente biodegradable (DQOLB) a través de procesos como hidrólisis y fermentación, para producir DQO soluble de diferentes clases entre ellos ácidos grasos volátiles (AGV)³⁵ además también se presentaron algo de lluvias que pudieron diluir la concentración de los compuestos orgánicos no biodegradados en la laguna, generando bajas concentraciones así en julio la temperatura fue mayor pero no hubo precipitación lo que no favoreció la dilución de la DQO en la salida de la laguna.

3.3.2 Variación de ST, SST y SD

La tabla 17 presenta las variaciones en concentración de los datos de ST, SST y SD determinados en la entrada y salida de la laguna.

Tabla 17. Valores de ST, SD y SST de la entrada y salida de la laguna de estabilización y los porcentajes de remoción.

Mes	ST (mg / L)		SD (mg / L)		SST (mg / L)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
ABRIL	10672	9400	9400	8325.30	1272	1074.70
MAYO	9869.33	7916.67	8673.33	6915.33	1196.00	1001.34
JUNIO	14582	10520	12918	9056	1664	1464
JULIO	16592.00	13050.67	14227.33	11994.0	2364.67	1056.67
AGOSTO	11941.33	10432.67	11056	9926.67	885.33	506.00
SEPTIEMBRE	3183	2526	2891	2336	292	190

Figura 25. Variación de ST, SD y SST. Entrada de la laguna de estabilización

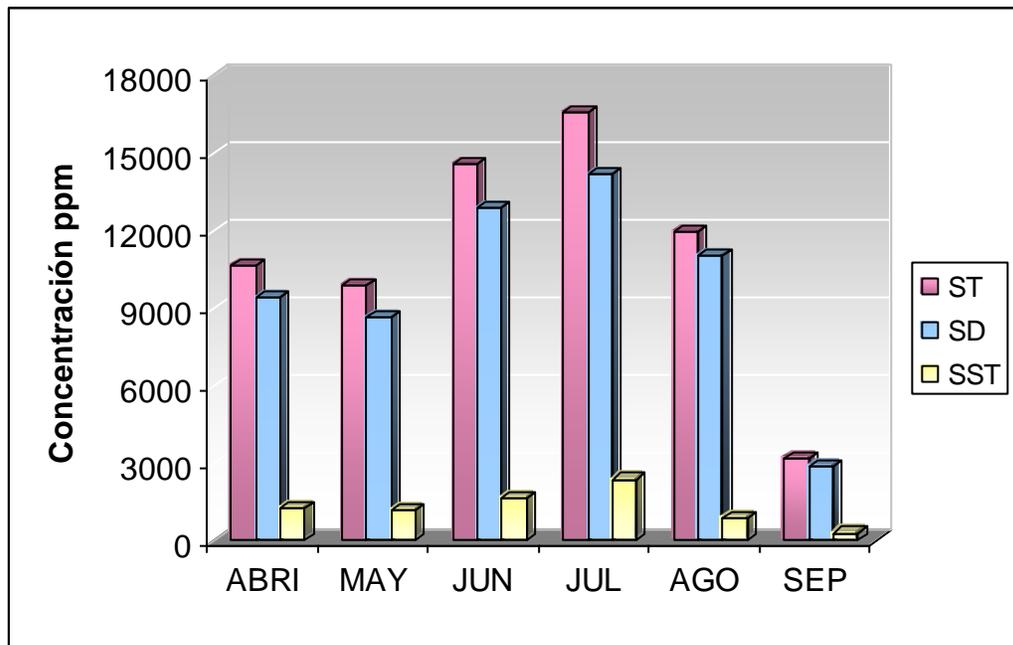
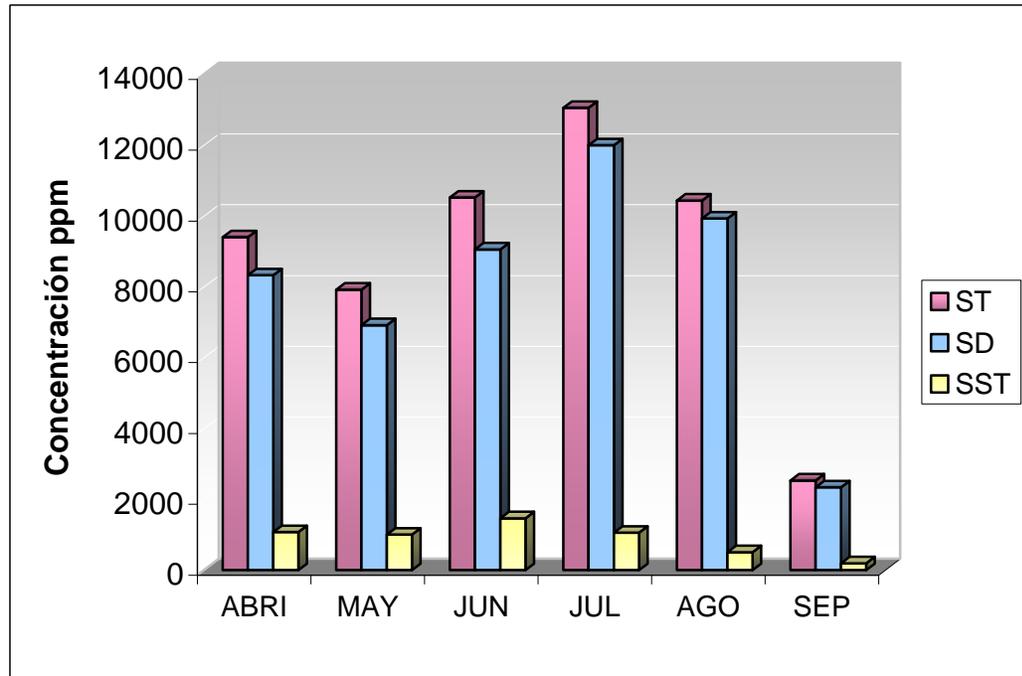


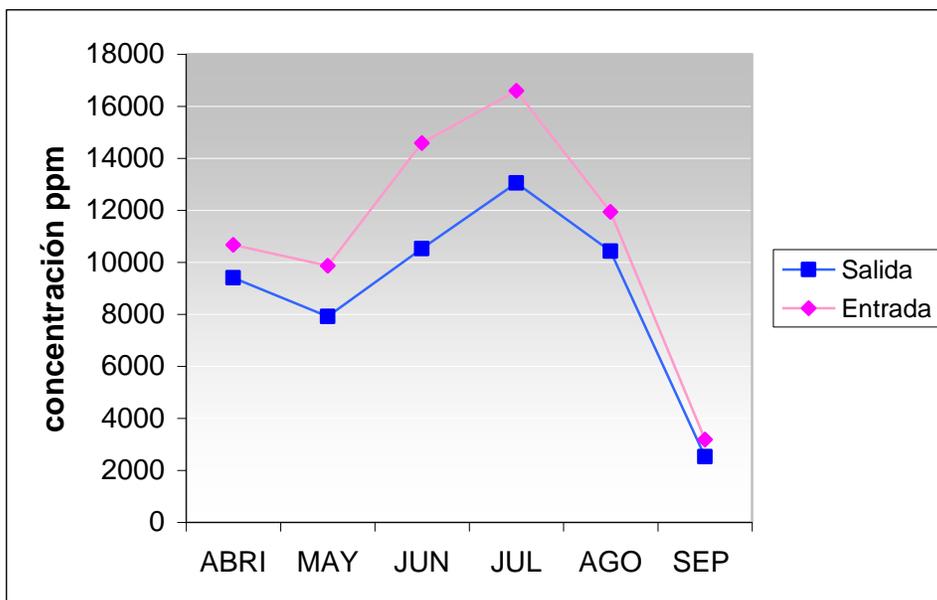
Figura 26. Variación de ST, SD y SST. Salida de la laguna de estabilización



En las figuras 25 y 26 se puede observar que los valores de ST, SD y SST tienen una misma tendencia tanto en la entrada como en la salida de la laguna de estabilización, de mayo a julio se observa un incremento de estos valores, lo que puede estar relacionado con el aumento en los valores de temperatura que se da en estos meses, porque al presentarse una mayor temperatura se van a dar procesos de evaporación que ocasionan la acumulación de lodos, los cuales no fueron removidos de la laguna ni de los canales que conducen los lixiviados, durante este periodo de estudio (abril-septiembre).

Los valores más altos de ST, SD y SST tanto en la entrada como en la salida de la laguna se encontraron en el mes de julio, donde la temperatura fue la más alta. En septiembre se observa una caída de estos valores lo que se puede explicar por las fuertes lluvias que se presentaron en este mes, que provocaron la dilución y remoción de estos lodos que se encontraban acumulados.

Figura 27. Variación de concentración de ST de la laguna de estabilización



En la figura 27 se observa que los valores de sólidos totales (ST) en la entrada de la laguna son relativamente altos e indican la gran contaminación por materia orgánica que se está generando tras la descomposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario. Los ST presentes en la salida también son bastante altos, por lo que se encontraron bajas eficiencias de remoción de ST en la laguna comprendidas en un rango de (21.5% - 47.2%).

En las figuras 28 y 29 se puede observar que los valores de SD y SST en la entrada y salida varían de acuerdo a las condiciones climáticas, encontrándose los valores más altos en los meses de verano (junio y julio) y los valores más bajos en el mes de mayor precipitación septiembre.

La tabla 18 presenta las eficiencias de remoción en carga de sólidos totales, disueltos y suspendidos. Los sólidos disueltos representan en su mayoría los compuestos inorgánicos presentes en los lixiviados, valores que son altos y generan los altos valores de conductividad encontrados

Figura 28. Variación de concentración de SD de la laguna de estabilización

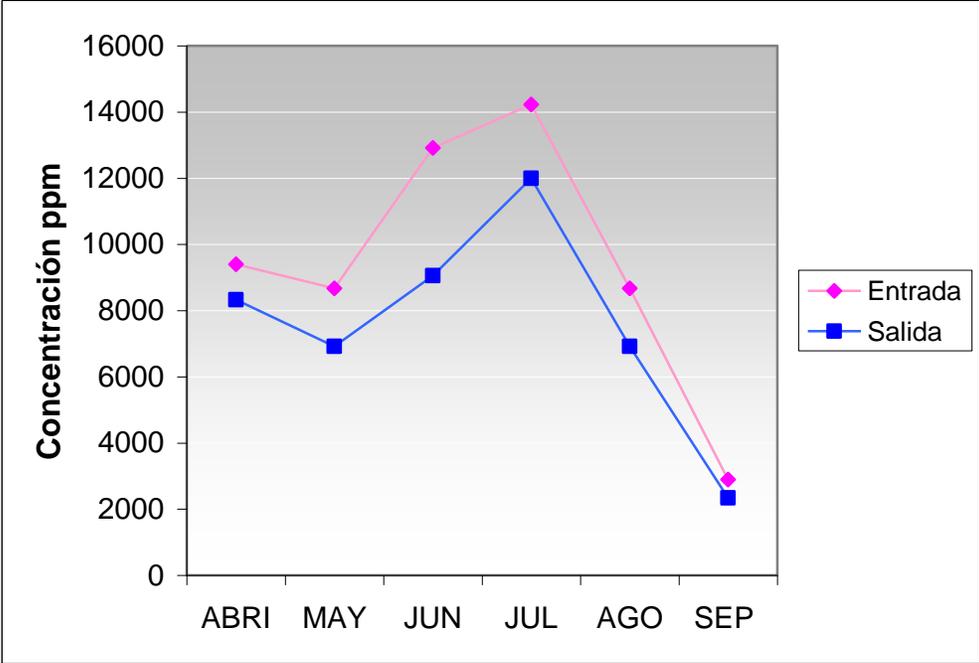


Figura 29. Variación de concentración de SST de la Laguna de Estabilización

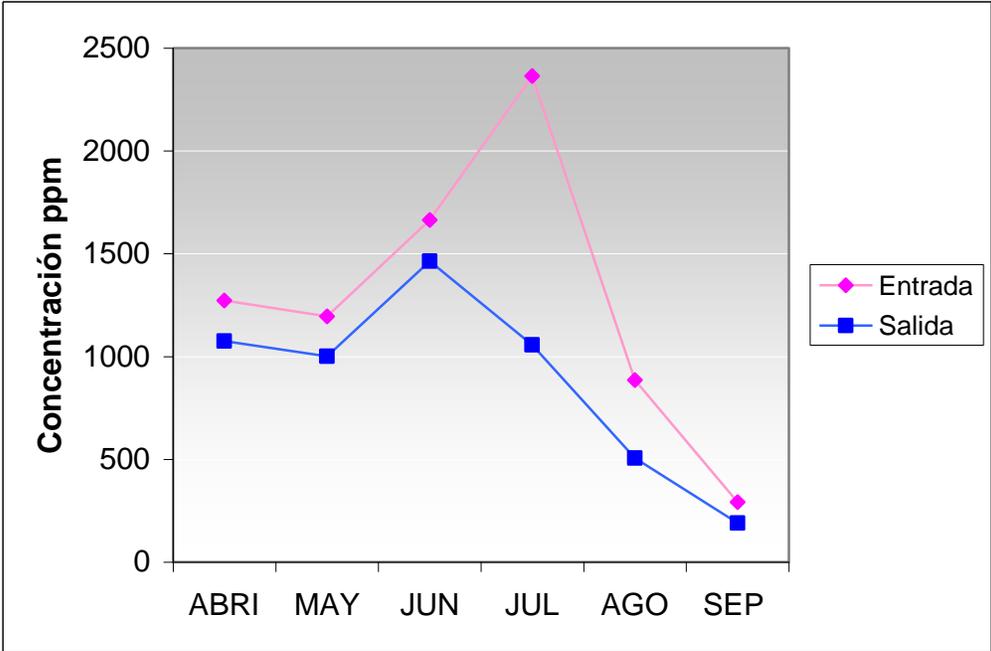


Tabla 18. Eficiencias de remoción en carga de sólidos de la laguna de estabilización del relleno sanitario “ El ojito”

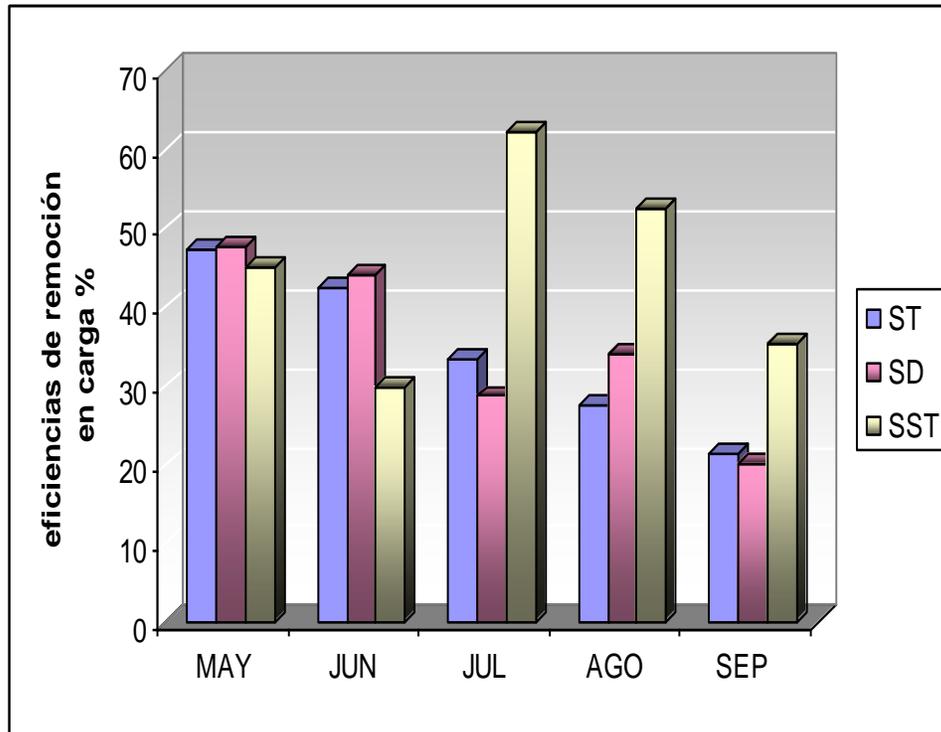
Mes	Parámetro	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
		Caudal (L/s) G	Parámetro (mg / L) H	Carga (Kg / día) I	Caudal (L/s) J	Parámetro (mg / L) K	Carga (Kg / día) L	
MAYO	ST	0.288	9869.33	246.4	0.190	7916.67	130.0	47.2
	SD		8673.33	216.6		6915.33	113.5	47.6
	SST		1196.00	29.8		1001.34	16.4	45.0
JUNIO	ST	0.652	14582	821.4	0.520	10520	472.6	42.5
	SD		12918	727.7		9056	406.9	44.1
	SST		1664	93.7		1464	65.8	29.8
JULIO	ST	0.571	16592	818.6	0.483	13050.67	544.9	33.4
	SD		14227.33	701.9		11994.0	500.5	28.7
	SST		2364.67	116.6		1056.67	44.1	62.2
AGOSTO	ST	0.433	11941.33	446.7	0.359	10432.67	323.6	27.6
	SD		8673.33	324.5		6915.33	214.5	33.9
	SST		885.33	33.1		506.00	15.7	52.6
SEPTIEMBRE	ST	7.89	3183	2169.8	7.80	2526	1702.3	21.5
	SD		2891	1970.8		2336	1574.3	20.1
	SST		292	199.1		191	128.7	35.4

$$I = \frac{G \times H \times 86400}{1000000}$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(I - L) \times 100}{I}$$

$$L = \frac{J \times K \times 86400}{1000000}$$

Figura 30. Eficiencias de remoción en carga de ST, SD y SST de la Laguna de Estabilización.



Los bajos porcentajes de remoción en carga de SD (20.1% - 47.6 %) indican que las condiciones presentes en la laguna favorecen la solubilidad de estos compuestos y no permiten que se precipiten y el volúmen y el tiempo de retención en la laguna talvez no fue suficiente para que estos sólidos logren sedimentarse.

Los porcentajes de remoción en carga de SST están en un rango de 29.8% - 62.2%, valores que indican que solo un pequeño porcentaje de los sólidos suspendidos se sedimentan y la mayor parte de ellos pasa directamente al canal de salida de la laguna, por tanto al no lograr sedimentarse no pueden sufrir los procesos de digestión anaerobia que se da en el interior de la laguna., o talvez por que estos sólidos se están produciendo como consecuencia de la degradación de bacterias en la laguna, las cuales no están

siendo removidas porque no se le ha hecho mantenimiento a la laguna. Esto puede explicar en parte los bajos porcentajes de remoción en carga de DBO₅ determinados, ya que los sólidos suspendidos comprenden en general la materia orgánica insoluble y coloidal que se encuentra en los lixiviados

3.3.3 Variación de nitrógeno y fósforo

Los valores de concentración de fósforo y nitrógeno del afluente y efluente de la laguna de estabilización se encuentran en la tabla 20, al igual que las eficiencias de remoción en carga de estos elementos. Estos dos elementos (nitrógeno y fósforo) provienen básicamente de las heces humanas y de animales y de residuos de alimentos que se encuentran en las basuras domiciliarias que se depositan a diario en el relleno sanitario el “ojito.

Tabla 19. Valores de nitrógeno y fósforo y su relación. Laguna de estabilización Relleno Sanitario “El Ojito”

Mes	Nitrógeno ppm		Fósforo ppm	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Abril	1528.96	1015.83	58.00	50.20
Mayo	1368.18	894.22	59.60	39.80
Junio	1515.81	1132.90	56.40	48.00
Julio	1678.72	1231.32	57.00	47.60
Agosto	1533.47	965.21	65.20	46.29
Septiembre	237.26	190.36	11.40	8.00

Figura 31. Variación de Nitrógeno. Entrada y salida Laguna de Estabilización

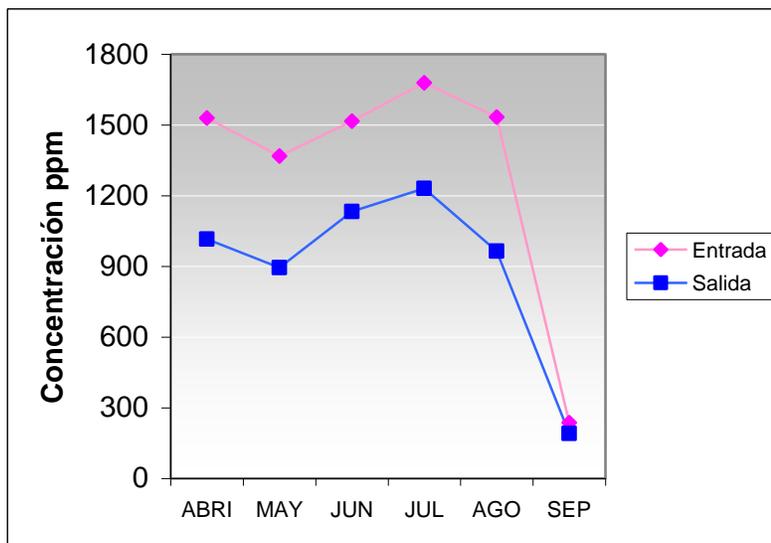
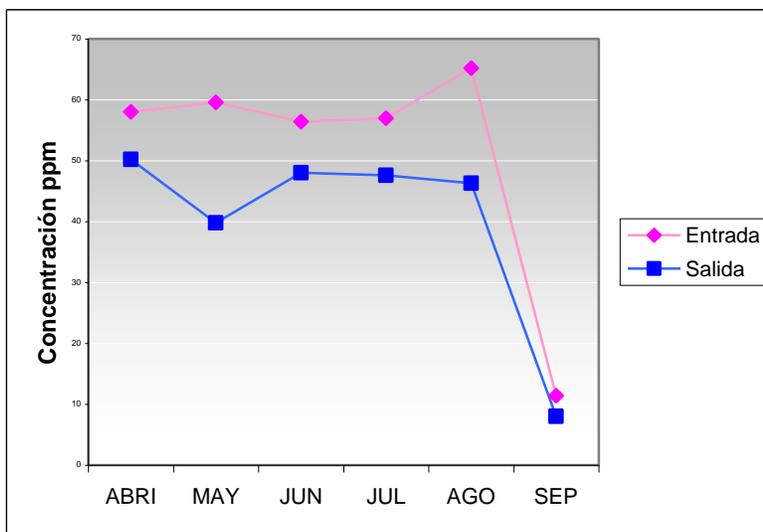


Figura 32. Variación de Fósforo. Entrada y salida laguna de estabilización



Tanto el fósforo como el nitrógeno son nutrientes esenciales y aunque no son considerados sustancias tóxicas pueden afectar el medio ambiente, porque en altas concentraciones causan problemas de eutrofización en el cuerpo de agua en el que sean vertidos, en este caso el río Cauca. Esta eutrofización provoca el crecimiento excesivo de plantas acuáticas y de algas, las cuales al morir se

sedimentan en el fondo y tras la descomposición por microorganismos pueden reducir las concentraciones de oxígeno disuelto hasta niveles tan bajos que causen la muerte de los organismos vivos medio acuático y también generar malos olores .³⁵

Las concentraciones de nitrógeno presentes tanto en la entrada como la salida de la laguna son bastante altas, se encuentran en un rango de (237.26 – 1678.72) mg/L y (190.36 – 1231.32 mg/L) respectivamente y aunque este elemento no es considerado tóxico, al ser vertido a una fuente de agua natural en gran cantidad puede causar problemas de eutrofización. Este alto contenido de nitrógeno se puede deber principalmente a la ruptura de proteínas presentes en los lixiviados a través de un proceso de hidrólisis, generándose sustancias más simples como aminoácidos los cuales pueden ser descompuestos por las bacterias en amoníaco, el cual en solución se combina con el agua produciendo iones NH_4^+ y OH^- proceso que tiende a llevar el pH.

El nitrógeno del afluente puede entrar en la laguna en forma de nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico y nitratos. Mediante el método Kjeldahl trabajado en este ensayo solo se determina el nitrógeno amoniacal y el orgánico, por tanto los altos valores encontrados solo representan estas formas de nitrógeno. El fósforo en el afluente puede estar en forma de ortofosfatos y polifosfatos y a través de la metodología desarrollada en este análisis se pudo determinar las dos formas. En la entrada de la laguna se encontraron concentraciones altas de fósforo que están en un rango de (11.40 – 65.20) mg/L y que provienen principalmente de los detergentes, excrementos y residuos de alimentos que eventualmente son desechados en las basuras y que luego son depositadas en el relleno para su posterior descomposición, aunque también se pueden encontrar compuestos de fósforo en pastas de dientes, compuestos adictivos para el tratamiento de alimentos y productos farmacéuticos, los cuales forman parte de los residuos domiciliarios que llegan diariamente al relleno.

Tabla 20. Eficiencias de remoción en carga de nitrógeno y fósforo de la laguna de estabilización del relleno sanitario “EL Ojito”

Mes	Parámetro	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
		Caudal (L/s) a	Parámetro (mg / L) b	Carga (Kg/día) c	Caudal (L/s) d	Parámetro (mg / L) e	Carga (Kg/día) f	
MAYO	Nitrógeno	0.288	1368.18	34.0	0.190	894.22	14.7	56.8
	Fósforo		59.60	1.5		39.80	0.7	53.3
JUNIO	Nitrógeno	0.652	1515.81	85.4	0.520	1132.90	50.9	40.4
	Fósforo		56.40	3.2		48.00	2.2	31.2
JULIO	Nitrógeno	0.571	1678.72	82.8	0.483	1231.32	51.4	37.9
	Fósforo		57.00	2.8		47.60	2.0	28.6
AGOSTO	Nitrógeno	0.433	1533.47	57.4	0.359	965.21	29.9	47.9
	Fósforo		65.20	2.4		46.29	1.4	41.7
SEPTIEMBRE	Nitrógeno	7.89	237.26	161.7	7.80	190.36	128.3	20.7
	Fósforo		11.40	7.8		8.00	5.39	30.9

$$c = \frac{a \times b \times 86400}{1000000}$$

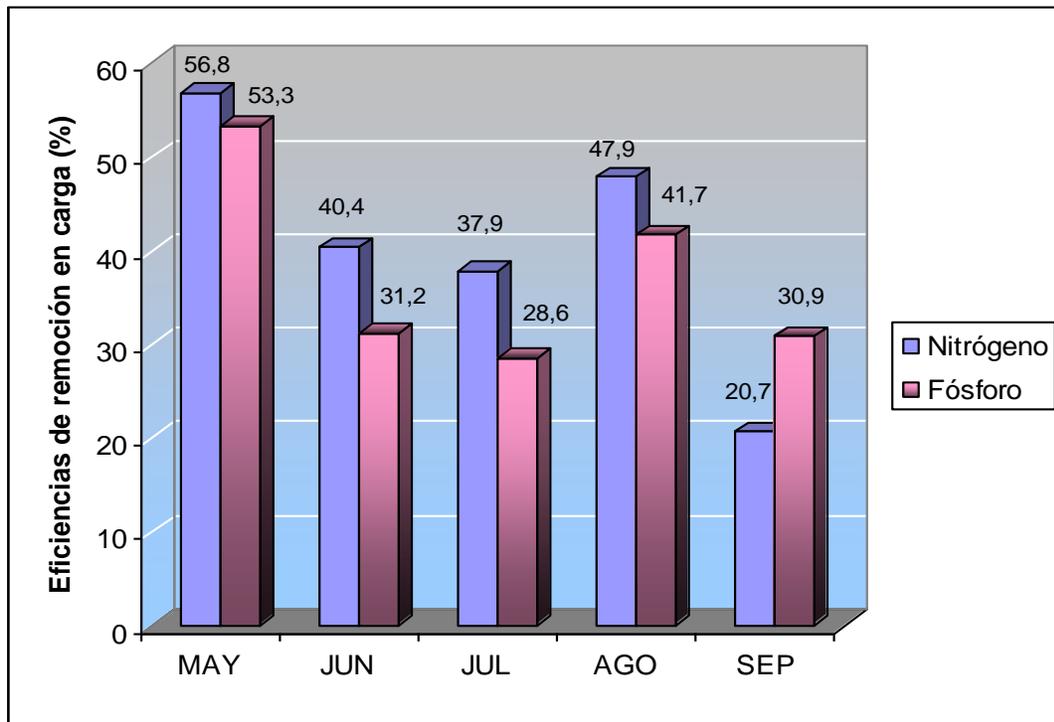
$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(c - f) \times 100}{c}$$

$$f = \frac{d \times e \times 86400}{1000000}$$

Tabla 21. Variación de la Eficiencia de remoción en carga de Nitrógeno y Fósforo de la laguna de estabilización

MES	Eficiencia de remoción en carga (%)	
	Nitrógeno	Fósforo
ABRIL	63.3	54.5
MAYO	56.8	53.3
JUNIO	40.4	31.2
JULIO	37.9	28.6
AGOSTO	47.9	41.7
SEPTIEMBRE	20.7	30.9

Figura 33. Variación de la Eficiencia de remoción en carga de Nitrógeno y Fósforo de la laguna de estabilización



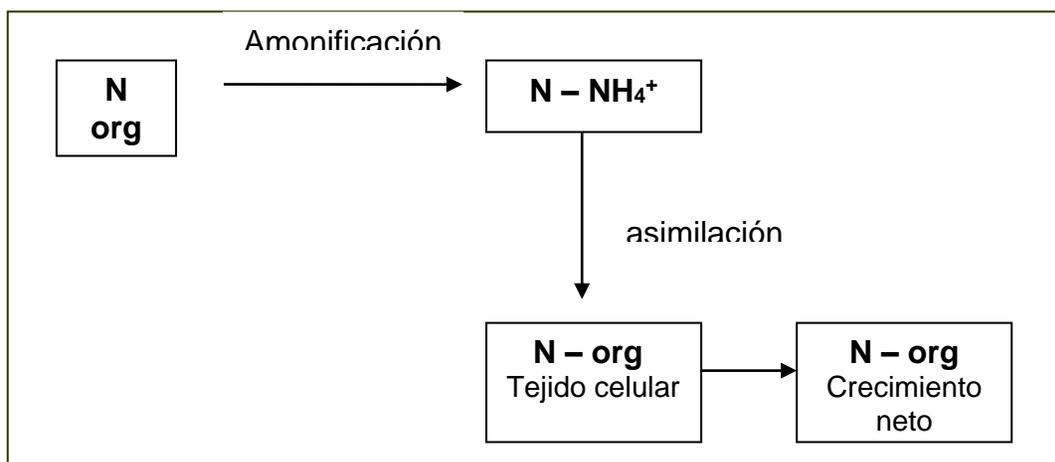
El nitrógeno y fósforo son nutrientes utilizados por las bacterias como fuente de alimento, tanto para la síntesis de nuevo tejido celular como para su respiración.

³⁵ Pero las cantidades de estos dos elementos en los lixiviados de la laguna son

altas y pueden exceder los requerimientos de los microorganismos, porque las lagunas anaerobias presentan un bajo requerimiento de nutrientes y no contienen algas que son grandes consumidoras de estos nutrientes, lo que indica que la mayor parte de fósforo y nitrógeno no es utilizado y por tanto no logra ser removido, explicando los bajos porcentajes de remoción encontrados.

Las remociones de nitrógeno encontradas oscilan en un rango de 20.7 % y 56.8 %, que son porcentajes bajos, suceso que se puede explicar teniendo en cuenta el ciclo biológico del nitrógeno propuesto por Metcalf y Eddy (1991).(fig34)

Figura 34. Ciclo biológico del nitrógeno³⁵



Las condiciones anaerobias de la laguna de estabilización favorecen la producción del ion amonio y la remoción de nitrógeno se da principalmente por la asimilación del N-amoniaco por los microorganismos, pero como en este caso no se está dando una asimilación completa del amonio, entonces casi todo el N-amoniaco está siendo descargado en la salida, generándose bajos porcentajes de remoción.

Tabla N° 22. Relación de NKT/ DQO en la entrada de la laguna de estabilización

MES	Relación NKT/ DQO
ABRIL	0.36
MAYO	0.23
JUNIO	0.15
JULIO	0.11
AGOSTO	0.19
SEPTIEMBRE	0.10

La concentración alta de fósforo que se encuentra en la salida de la laguna puede provenir también de la descomposición de microorganismos, ya que estos seres tienen un tiempo de vida corto y al morir pueden generar compuestos de fósforo, productos de la degradación de fosfolípidos contenidos en su membrana celular.

Las eficiencias de remoción de fósforo son bajas con valores comprendidos entre 31.2% y 54.5%, lo que indica que solo un bajo contenido de fósforo del afluente ha sido removido, al ser utilizado como alimento por los microorganismos presentes en la laguna. Esta asimilación según Deineno y Loosdrechht (1985) se da eficazmente a un pH de 6.5 y 8.0 ³⁵ y esta laguna no presenta estas condiciones y además gran parte del fósforo tampoco se encuentra precipitado, es decir, que la mayor parte está en solución y de esta forma se descarga en la salida.

La eliminación de fósforo se puede ver afectada por un alto contenido de nitratos y la relación NKT /DQO donde NKT equivale al nitrógeno kjeldalh total, que indica el efecto inhibitor del nitrato y del nitrito. Cuando la concentración de nitratos es alta, la cantidad de sustrato fácilmente biodegradable está menos disponible para los organismos acumuladores de fósforo, los cuales son del genero *Acinobacter*,³⁵ porque la presencia de nitratos provoca la competencia por el sustrato orgánico entre los organismos acumuladores de nitrato y los acumuladores de fósforo, ya que los acumuladores de nitrato también compiten por los ácidos grasos volátiles. Las relaciones NKT/DQO mayores a 0.14 no permiten conseguir la eliminación de

fósforo debido a la incapacidad del sistema para realizar una desnitrificación suficiente,³⁵ lo que puede explicar también las bajas remociones de nitratos encontradas, ya que esta relación en la laguna es mayor. (ver tabla 22)

El alto contenido de fósforo y nitrógeno en la salida de la laguna se puede deber también a que las condiciones anaerobias presentes en la laguna de estabilización favoreció en la resolubilización de fósforo y en menor escala de amonio.³⁴

3.3.4 Variación de nitratos

Las concentraciones de nitratos del afluente y efluente encontrados en la laguna de estabilización se presentan en la tabla 23; la figura 35 representa las eficiencias de remoción calculadas a partir de estos datos.

Los porcentajes de remoción en carga de nitratos de la laguna de estabilización oscilan entre 29.8% y 54.0 %, valores bajos que pueden indicar que solo un bajo contenido de nitratos es utilizado como receptor de electrones durante la degradación anaerobia³⁶. Esto también puede indicar que los nitratos no se están utilizando completamente como sustrato en el proceso de desnitrificación que se presente durante el tratamiento anaeróbico de los lixiviados en la laguna, o que el proceso de desnitrificación no se esta realizando efectivamente.

Según Ekama y Marais (1984) solo puede llevarse a cabo completamente la desnitrificación cuando existen relaciones de NKT/DQO menores que 0.08 sin adición de una fuente externa³⁵ y al calcular estas relaciones con cada uno de los datos de nitrógeno Kjeldalh y demanda química de oxigeno del afluente obtenidos durante estos seis meses se encontraron valores comprendidos entre 0.11 y 0.36 (ver tabla 22) que sobrepasan el dato requerido, lo que puede se puede relacionar con el bajo consumo de nitratos en el proceso de desnitrificación.

Tabla 23. Eficiencias de remoción en carga de nitratos de la laguna de estabilización del relleno sanitario “EL Ojito”

Mes	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
	Caudal (L/s) M	Parámetro (mg / L) N	Carga (Kg / día) O	Caudal (L/s) P	Parámetro (mg / L) Q	Carga (Kg / día) R	
MAYO	0.288	118.67	3.0	0.190	84.00	1.4	53.3
JUNIO	0.652	200.00	11.3	0.520	116.50	5.2	54.0
JULIO	0.571	251.30	12.4	0.483	208.70	8.7	29.8
AGOSTO	0.433	171.00	6.4	0.359	118.00	3.7	42.2
SEPTIEMBRE	7.89	48.33	32.9	7.8	33.60	22.6	31.3

$$O = \frac{M \times N \times 86400}{1000000}$$

$$R = \frac{P \times Q \times 86400}{1000000}$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(O - R) \times 100}{O}$$

Figura 35. Variación de Nitratos. Entrada y salida laguna de estabilización

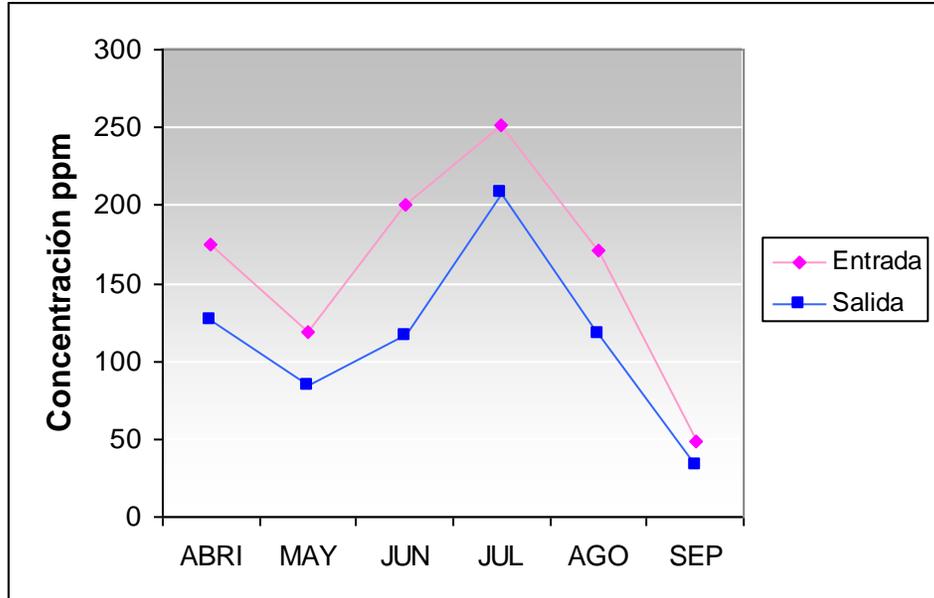
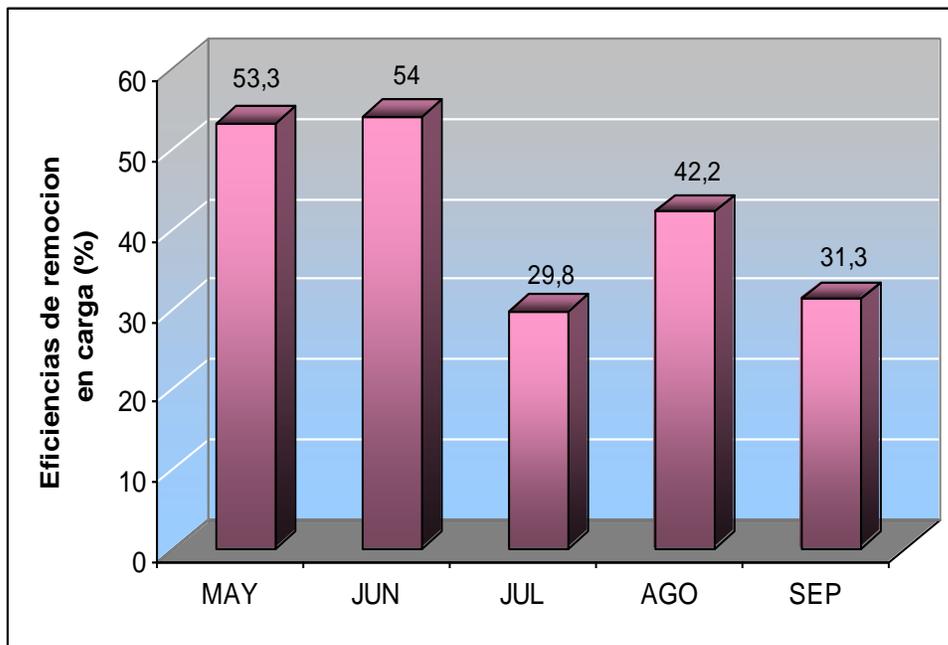


Figura 36. Eficiencias de remoción en carga de nitratos de la laguna de estabilización.



Las bacterias desnitrificantes, normalmente se inhiben ante las mismas sustancias que las aerobias, entre estas sustancias se pueden encontrar, el amonio, el nitrito, el metanol, compuestos sulfurados, el acetileno y concentraciones de metales³⁵, sustancias que pueden estar presentes en los lixiviados del relleno "El Ojito", debido a la variedad de residuos sólidos que se depositan en el, suceso que pudo provocar una inhibición del proceso de desnitrificación en la laguna.

3.3.5 Variación de Hierro

En la tabla 24 se encuentran los valores de concentración de hierro de la entrada y salida de la laguna de estabilización y los porcentajes de remoción en carga calculados en base a estos datos, están gráficamente representados en las figuras 37 y 38. El contenido de hierro presente en el efluente de la laguna puede ser producto principalmente por la disolución de este elemento a raíz de la descomposición de los residuos sólidos metálicos o de los empaques de tintes depositados en el relleno sanitario o pueden ser producto de la degradación de alimentos que lo contienen o que ha sido adicionado para enriquecer el producto.

En la figura 33 se observa que la variación en la concentración de hierro en la entrada y salida de la laguna durante este periodo de estudio (abril-septiembre) obedece a las condiciones climáticas presentes, pasando de meses de invierno a meses de verano. Por lo cual se puede observar que en los meses en donde se presentaron altas precipitaciones (abril y septiembre) la concentración fue menor por efectos de dilución del lixiviado, a medida que disminuye el nivel de precipitación, es decir, en los meses de verano (mayo, junio y julio) aumenta la concentración de hierro en los lixiviados, debido a que se produce una evaporación del lixiviado y como consecuencia una concentración de los compuestos de hierro que estaban en solución ya sea disueltos o complejados. En agosto se dio un aumento de la precipitación lo que provocó la disminución de la concentración.

Tabla 24. Eficiencias de remoción en carga de Hierro de la laguna de estabilización del Relleno Sanitario “EL Ojito”

Mes	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
	Caudal (L/s) S	Parámetro (mg / L) T	Carga (Kg / día) U	Caudal (L/s) V	Parámetro (mg / L) W	Carga (Kg / día) X	
MAYO	0.288	25.60	0.6	0.190	22.80	0.4	33.3
JUNIO	0.652	44.00	2.5	0.520	26.40	1.2	52.0
JULIO	0.571	50.80	2.5	0.483	32.00	1.3	48.0
AGOSTO	0.433	27.60	1.0	0.359	20.07	0.6	40.0
SEPTIEMBRE	7.89	17.64	12.0	7.80	10.53	7.1	40.8

$$U = \frac{S \times T \times 86400}{1000000}$$

$$X = \frac{V \times W \times 86400}{1000000}$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(U - X) \times 100}{U}$$

Figura 37. Variación de Hierro. Entrada y salida Laguna de Estabilización.

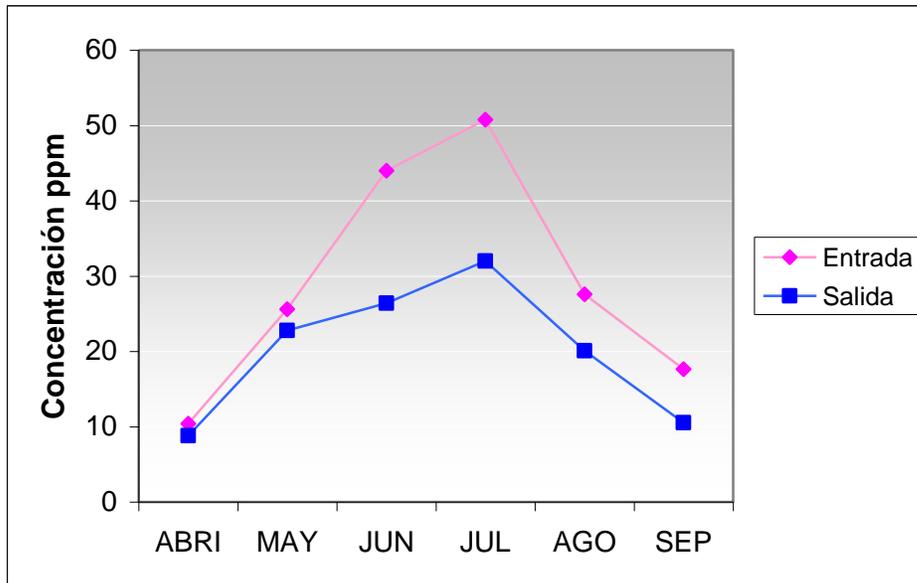
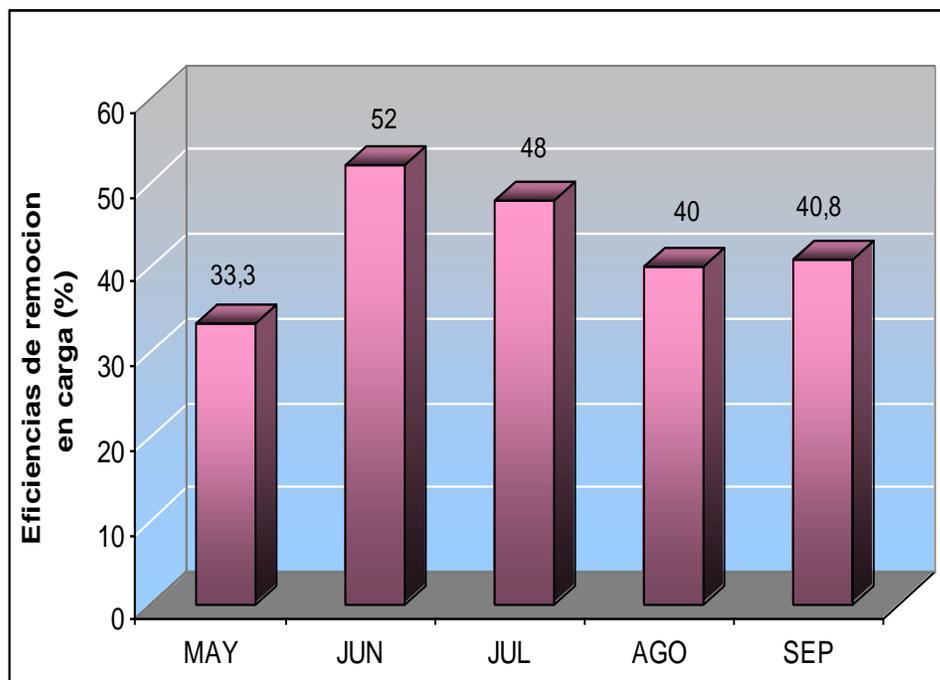


Figura 38. Variación de la Eficiencia de remoción en carga de Hierro de la Laguna de Estabilización.



En la figura 38 se puede observar que los porcentajes de remoción en carga de hierro son bajos y están en un rango de 33.3% a 52%, debido probablemente a que en la laguna no se dieron las condiciones físicas (pH) que generaran la precipitación de los compuestos de hierro, para que se sedimentaran en el fondo de la laguna y posteriormente fueran removidos con los lodos. Esto también indica que solo una pequeña fracción fue tomada por las bacterias para su funcionamiento celular, ya que muchas de las enzimas presentes en las bacterias tienen hierro en su composición o que las condiciones de laguna (pH y temperatura) al no ser las óptimas, no permiten el crecimiento y reproducción de bacterias que puedan consumir este contenido de hierro.

Además las condiciones anaerobias de laguna pudieron provocar la reducción de Fe (III) a Fe(II) que es soluble ¹⁶ y puede pasar libremente pasa al canal de la salida, disminuyendo la remoción de este metal. El hierro también pudo formar complejos estables con sustancias húmicas presentes en los lixiviados, que pueden ser mas resistentes a la oxidación, por lo cual no estaba completamente disponible para que fuera removido por los microorganismos durante sus procesos metabólicos.

3.3.6 Variación de cloruros

En la tabla 25 están los valores de cloruros determinados en las muestras de lixiviados de la entrada y salida de la laguna y la tabla presenta las eficiencias de remoción calculadas a partir de estas concentraciones.

En la figura 39 se puede observar que durante estos seis meses de análisis (abril-septiembre) en el afluente y efluente de la laguna se encontraron altas concentraciones de cloruros hasta de 2008.7 mg/L y 1255.5 mg/L respectivamente. Estas altas concentraciones de cloruros en la entrada de la laguna se debe principalmente al alto contenido de cloruros que se encuentran en

las basuras (alimentos, límpido, etc) las cuales al degradarse liberan este ión a los lixiviados, además existe una gran variedad de compuestos de cloro que se pueden encontrar en los lixiviados entre ellos: cloroformo, dicloroetano, cloruro de metileno, tetracloroetileno, tricloetileno, cloruro de vinilo pentaclorofenol, entre otros, los cuales son altamente tóxicos y afectan la salud.⁴

Tabla 25. Valores de concentración de cloruros en la laguna de estabilización relleno sanitario “El Ojito”

Mes	Cloruros mg / L	
	Entrada	Salida
ABRIL	1720.2	1249.3
MAYO	2008.7	1120.2
JUNIO	1687.4	1198.7
JULIO	1718.6	1239.4
AGOSTO	1755.5	1255.5
SEPTIEMBRE	53.79	49.56

Figura 39. Variación de cloruros. Entrada y salida laguna de estabilización

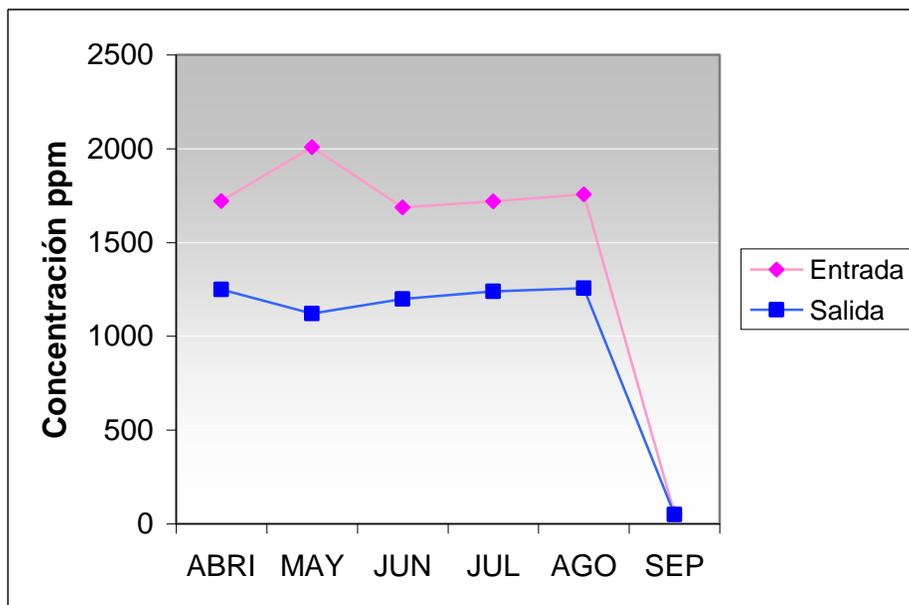


Tabla 26. Eficiencias de remoción en carga de cloruros de la laguna de estabilización del relleno sanitario “EL Ojito”

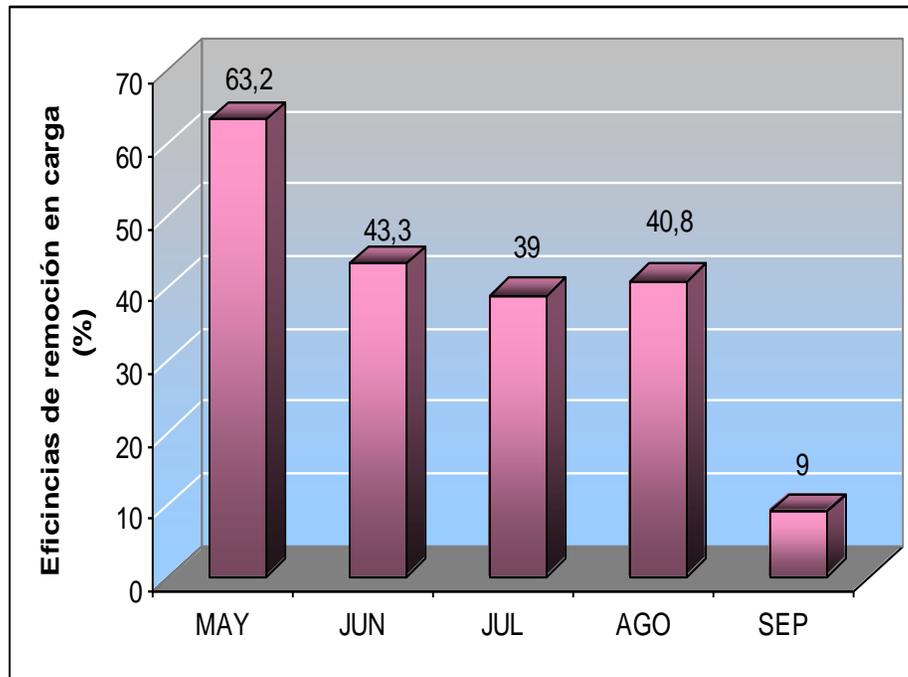
Mes	Entrada Laguna			Salida Laguna			Eficiencia de remoción en carga (%)
	Caudal (L/s) h	Parámetro (mg / L) i	Carga (Kg / día) j	Caudal (L/s) k	Parámetro (mg / L) l	Carga (Kg / día) m	
MAYO	0.288	2008.7	50.0	0.190	1120.2	18.4	63.2
JUNIO	0.652	1687.4	95.1	0.520	1198.7	53.9	43.3
JULIO	0.571	1718.6	84.8	0.483	1239.4	51.7	39.0
AGOSTO	0.433	1755.5	65.7	0.359	1255.5	38.9	40.8
SEPTIEMBRE	7.89	53.79	36.7	7.80	49.56	33.4	9.0

$$j = \frac{h \times i \times 86400}{1000000}$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(j - m)}{j} \times 100$$

$$m = \frac{k \times l \times 86400}{1000000}$$

Figura 40. Variación de la eficiencia de remoción en carga de Cloruros de la laguna de estabilización.



Las eficiencias de remoción determinadas son bajas y oscilan entre 9% y 63.2 %, que indican que la mayor parte de cloruros esta siendo descargada directamente a la salida de la laguna sin pasar por ningún tratamiento, esto se debe a que los compuestos de cloro como el cloroformo no se pueden eliminar por métodos convencionales como tratamientos biológicos. Ese pequeño porcentaje de cloruros que fue removido se pudo lograr talvez porque el cloruro reacciona con amoníaco o otros compuestos nitrogenados para formar cloroaminas o porque fue asimilado por los microorganismos.

3.4 Laguna de estabilización del relleno sanitario el “Ojito”

Trabajos realizados anteriormente en la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito” reportan la laguna como anaeróbica⁷ y teniendo en cuenta el

alto contenido de materia orgánica que contiene el afluente de la laguna se puede esperar que se comporte de esa forma, ya que con esas concentraciones tan altas de DBO₅ y DQO que entran a la laguna es casi imposible que haya oxígeno disuelto en ella y por tanto microorganismos aerobios. Lo que quiere decir que se están generando condiciones anaerobias en la laguna.

Otra característica anaerobia en la laguna es la presencia de una nata blanca en la superficie, la cual no permite que haya intercambio de oxígeno con el ambiente.

La carga volumétrica (λ_v) de la entrada de la laguna de estabilización también es un punto de referencia para saber el tipo de laguna. La carga volumétrica se calcula mediante la siguiente ecuación: ³⁷

$$\lambda_v = \frac{\text{DBO}_5 \text{ Kg/m}^3 \times \text{Caudal (m}^3/\text{día)}}{\text{Volúmen laguna (m}^3)}$$

Tabla 27 .Cargas volumétricas del afluente de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”

MES	DBO ₅ g/m ³	Caudal m ³ / día	Volumen de la laguna (m ³)	Carga volumetrica g DBO ₅ /m ³ /día
MAYO	1752	24.88	1346.8 m ³	32.36
JUNIO	6330	56.33	1346.8 m ³	264.75
JULIO	7530	49.33	1346.8 m ³	275.81
AGOSTO	3024	37.41	1346.8 m ³	84.00
SEPTIEMBRE	1251	681.7	1346.8 m ³	633.2

De acuerdo con Duncan Mara, una laguna anaerobia debe recibir un carga volumétrica menor de 400 g DBO₅ / m³/día ³⁷, laguna de estabilización estudiada cumple con ese requisito por tanto puede considerarse anaeróbica.

La laguna en estudio también presenta además olores fuertes, características de lagunas anaeróbicas debido a la liberación de H₂S y presenta una profundidad de 1.60 m que aunque no es la más adecuada para lagunas anaerobias, tampoco permite la penetración de luz hasta el fondo para que se den procesos de fotosíntesis característicos en lagunas facultativas y aeróbicas.

Sería importante determinar otros parámetros que confirmen el tipo de laguna entre ellos: flujo hidráulico, carga orgánica superficial, tiempo de retención, caracterización de microorganismos, diseño de la laguna, entre otros.

En general las eficiencias de remoción encontradas para los diferentes parámetros analizados en la laguna de estabilización fueron bajas, quizá porque la laguna no presenta las condiciones optimas necesarias para que se de un eficaz tratamiento anaeróbico (tabla 28)

Tabla 28 Condiciones Óptimas para el Tratamiento Anaeróbico³⁸

T° optimas:
Intervalo Mesófilo: 29°C a 39°C
Intervalo Termofilo: 49°C a 57°C
Nutrientes Biológicos:
Nitrógeno
Fósforo
pH : 6.6 a 7.6

Como en cualquier proceso biológico, la actividad microbiana de la laguna se ve afectada por una serie de factores entre los cuales se destacan el pH y la temperatura. La velocidad de las reacciones bioquímicas es función de la temperatura, por lo que la reducción en este parámetro ambiental se refleja en una menor capacidad de procesamiento de la laguna. Si bien en las lagunas existe una importante inercia térmica y cierto aislamiento, las variaciones estacionales de la temperatura afectan significativamente la actividad de los microorganismos.³⁹

La temperatura del agua en las lagunas es un factor fundamental en el diseño de la laguna. Los procesos de reducción de la materia orgánica por acción bacteriana son dependientes de la temperatura. Un aumento de 4-5°C en la temperatura puede aumentar enormemente la eficiencia de la laguna.

Otro factor que afecta la actividad es el pH, existiendo un rango óptimo de funcionamiento entre 6.6 y 7.4, siendo las bacterias metanogénicas las de mayor sensibilidad.⁴ El pH en la laguna depende de las características del efluente y el grado de equilibrio entre las etapas de acidogénesis y metanogénesis. Dentro de las características del efluente se destacan el pH, la capacidad buffer y la presencia de compuestos nitrogenados.³⁹

El contenido fósforo, nitrógeno, hierro y nitratos en la laguna es alto, por lo tanto las bacterias tienen los nutrientes necesarios para llevar a cabo su metabolismo microbial. El hecho de que los lixiviados sean el residuo líquido de la descomposición de basuras, hace que estos líquidos contengan infinidad de compuestos tóxicos, los cuales pueden ser los causantes de la inhibición de los procesos de degradación anaerobia, porque los microorganismos anaerobios son muy sensibles a los contaminantes tóxicos. De hecho, la operación secuencial de las asociaciones de microorganismos anaerobios les hace (y especialmente a los metanógenos, que son los organismos últimos de la cadena anaerobia) más vulnerables a los fallos en el proceso de degradación.³⁶

En cuanto al diseño de la laguna se recomienda:

- El ingreso a la laguna se hará por medio de al menos 2 emisarios sumergidos
- Superficie < 5 ha
- Profundidad > 3 m
- Tiempo de retención de 4-6 días a 14-20°C y tiempos de 3-5 días a temperaturas mayores de 20°C⁴⁰

La laguna en estudio solo presenta una entrada de lixiviados, la cual esta por encima de la superficie de laguna, posición que no es recomendable por que puede causar que el afluente fluya rápidamente hacia la salida y no se de la sedimentación de la materia orgánica, generando que solo una pequeña parte del lixiviado este por un tiempo largo en la laguna para que se de el tratamiento biológico. Esto quiere decir que posiblemente existe muy poco contacto entre la masa bacteriana anaerobia del sistema y el material no sedimentable del afluente por eso mucho material disuelto no puede ser metabolizado y es descargado en el efluente de la laguna, lo que puede explicar los bajos porcentajes de remoción encontrados en este ensayo.

Dentro del mantenimiento que se le debe realizar a las lagunas de estabilización es indispensable la remoción de los sólidos sedimentables, porque estos pueden acomplejar los nutrientes. Además una forma de remover contaminantes se logra a través de la remoción de estos lodos, porque muchos compuestos orgánicos son atrapados en el fondo de las lagunas.

Según la tabla N° 29, los tiempos de retención en la laguna de estabilización durante los primeros cuatro meses fueron aproximadamente de 23 a 54 días, con los cuales se esperarían eficiencias de remoción mejores a las encontradas en este periodo de estudio, pero si se tiene en cuenta que el volumen de la laguna ya no es igual al inicial, es decir, al de diseño, porque se encuentra saturada de lodos

(figura 41), por lo tanto ya no tiene la misma profundidad, lo que afecta tanto la geometría de la laguna como los tiempos de retención.

Tabla 29. Tiempos de retención de la laguna de estabilización

MES	Caudal m ³ / día	Volumen de la laguna (m ³)	Tiempo de retención (día)
MAYO	24.88	1346.8 m3	54.13
JUNIO	56.33	1346.8 m3	23.9
JULIO	49.33	1346.8 m3	27.3
AGOSTO	37.41	1346.8 m3	36.00
SEPTIEMBRE	681.7	1346.8m3	1.9

Figura 41. Acumulación de lodos en la laguna



Si se ha disminuido la profundidad, podría esperarse que se hayan afectado las condiciones anaerobias de la laguna, porque ya los rayos solares podrían incidir al fondo de la laguna y provocar la proliferación de algas, como consecuencia de los procesos de fotosíntesis que se pueden desarrollar; lo que podría traer también la

producción de oxígeno, afectándose la actividad de las bacterias que son estrictamente anaerobias. Estas algas que pueden estarse generando y las bacterias de la laguna, al morir, se degradan en la laguna y podrían ser en parte responsables de la materia orgánica que se esta liberando en la salida, ya que estos residuos de se sedimentan y no están siendo retirados, porque nos se le ha hecho mantenimiento a la laguna

Estos sólidos que están sedimentados en la laguna, también interfieren en el flujo del lixiviado, ya que no permite que se de un flujo laminar a través de la laguna, sino que se presente un flujo turbulento, haciendo que la mayor parte de los lixiviados se canalicen hacia la salida, disminuyendo los tiempos de retención en la laguna, lo que no permitió que la materia orgánica de los lixiviados estuviera el tiempo suficiente para que logran ser degradada por los microorganismos.

4. CONCLUSIONES

- El muestreo de abril a septiembre en la laguna de estabilización, sirvió para caracterizar la carga contaminante de los lixiviados del relleno sanitario “El ojito”, destacándose en primer lugar la muy alta variabilidad de su composición.
- Mediante los valores de los parámetros determinados en el análisis fisicoquímico de los lixiviados de la laguna de estabilización, los lixiviados no pudieron establecerse dentro de una fase, ya que presentan características acetogénicas y metanogénicas, debido a que los lixiviados del bloque antiguo y el bloque joven son mezclados y luego canalizados a la entrada de la laguna.
- En trabajo realizado anteriormente en la laguna del relleno sanitario “El ojito” reportaron la laguna como anaerobia y teniendo en cuenta el alto contenido de materia orgánica (DBO₅ y DQO) del afluente, se puede esperar que se comporte de esa manera, porque es casi imposible que haya oxígeno disuelto y por tanto microorganismos aerobios.
- Las cargas volumétricas encontradas en el afluente de la laguna fueron en general inferiores a 400 g DBO₅/m³/día, valores que según el autor Duncan Mara cumple con los requisitos de una laguna anaerobia.
- El efluente de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El ojito” no cumple con la norma colombiana para aguas de vertido establecida en el decreto 1594 de 1984, porque las eficiencias de remoción de DBO, DQO y

SST determinadas en los meses de muestreo no alcanzan el valor requerido, mayor o igual al 80%.

- La eficiencia de remoción de materia orgánica durante el periodo de estudio, expresada como DBO y DQO de la laguna de estabilización es baja, con porcentajes de remoción en carga comprendidas en un rango de (24.8 – 66.1) para DBO₅ y (26.2 – 69.7) para DQO, debido a que no se están dando las condiciones optimas para el tratamiento anaerobio y no hay mantenimiento en laguna.
- Los altos contenidos de sólidos totales, disueltos y suspendidos y las bajas eficiencias de remoción encontradas en la laguna hace necesario la remoción de los lodos en la laguna, por de esta forma es como se logra hacer la remoción de sólidos en el tratamiento.
- La laguna presenta bajas eficiencias de remoción de los nutrientes fósforo y nitrógeno, por lo tanto un alto contenido de estos elementos esta siendo vertido al río Cauca (fuente receptora) pudiendo generar problemas de eutrofización.
- Los lixiviados del afluente de la laguna presentan concentraciones altas de cloruros en un rango (53.79 – 720.20) mg/L, las cuales no son satisfactoriamente removidos porque presentan porcentajes de remoción de (9 – 63.2) quedando un alto contenido en el afluente, el cual podría causar problemas de salinización en le río Cauca.
- En general, la eficiencias de remoción determinadas en la laguna de estabilización son bajas, encontrándose el valor más bajo de 9% y el más alto de 6938%, esto no quiere decir que el tratamiento no sea el adecuado, sino que se deben optimizar las condiciones del tratamiento anaerobio y realizar

periódicamente el mantenimiento, de la laguna y de los canales que conducen los lixiviados a ella, para que no se vea afectado el volúmen de la laguna y los tiempos de retención.

5. RECOMENDACIONES

- Hacer un mantenimiento periódico de la laguna, retirando lodos y también limpiando los canales que conducen los lixiviados.
- Determinar concentraciones de metales pesados en los lixiviados para saber si estos están interfiriendo en la actividad de las bacterias anaerobias.
- Hacer una prueba de metanogénesis para saber si se esta dando eficazmente esta etapa en el tratamiento anaerobio de la laguna de estabilización.
- Separar el lixiviado joven del maduro, para que no se pierda la estabilización de la materia orgánica, que ya ha alcanzado el lixiviado maduro al estar caracterizado por condiciones metanogénicas.
- Determinar la eficiencia de la laguna evaluando otros parámetros como metales pesados, análisis bacteriológico y flujo hidráulico, que permitan conocer de una manera más completa el funcionamiento de la laguna de estabilización.

6. BIBLIOGRAFIA

1. AFFERDEN Manfred *et. al.* Alternativas de rellenos sanitarios. Secretaria de Ecología. México: 2002, p 3-7, 17-19. [Citado Julio 2005]. Disponible en internet: <www.gtz.org.mx/segem/alternativas%20RS.pdf>.
- 2 Dirección de Investigación Agroindustrial Management & Consulting S.A. Biorecuperación de Lixiviados en rellenos sanitarios. División de proyectos ALS. [Citado septiembre de 2004]: Disponible en internet: <www.agroindustria-amc.com/servicios.asp>
3. . MENDEZ Roger. *et .al.* Tratamiento de lixiviados con carbón activado. Revista Ingeniería. Universidad Autonoma de Yucatán. Volumen 6. México: 2002, p 19-20. [Citado Septiembre de 2005]. Disponible en internet <www.uady.mx/sitios/ingenier/revista/volumen6/tratamiento.pdf> >
4. Resumen de los impactos ambientales y sobre la salud de los rellenos sanitarios. Greenpeace. Argentina 2004, p 2, 5-7. [Citado marzo 2005] disponible en internet.: [www.greenpeace.org/ar/media/informes/3941.pdf]
5. LINKS. ISWA. ARS. [citado 20 Marzo del 2004]. Disponible en internet < [http//tq.educ.ar / tq 02003/ links.htm](http://tq.educ.ar/tq_02003/links.htm)
6. ROMERO Rojas. Jairo Alberto. Acuitratamiento por lagunas de estabilización Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. Santa Fé de Bogotá.1998. p 30,64-68, 100-108,139-165.

7. SEPULVEDA Franco Margarita R. Elaboración de la línea base ambiental del relleno sanitario el Ojito. Secretaria de Infraestructura, División de Aseo municipal. Popayán 2003.
8. Guía ambiental para rellenos sanitarios. Ed. Sistema Nacional Ambiental. Colombia. 2002. p 48, 51-56, 96, 147-150.
9. FORTUNECITY. Residuos sólidos. Actividad biológica en el relleno sanitario. Chile.2000. (Citado junio 2005). Disponible en internet. <www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html
10. Lagunas de estabilización. (Citado junio 2005). Disponible en internet <www.ingenieroambiental.com/?pagina=838-58k.
11. MOSCOSO Julio, MERZTHAL Gunther. Tecnología apropiada para el tratamiento sanitario de las aguas residuales domesticas. (Citado julio 2005). Disponible en internet <www.cepis.org
12. Lagunaje. Diseño. Parámetros de control y diseño. Lagunas anaerobias. Tecnologías convencionales. Master en ingeniería del agua. (Citado julio de 2005). Disponible en internet: tar5.eup.us.es/master/ponencias/modulo2/ponencias-modulo02-master-04-06/lagunaje-diseño.dod.
13. Lagunas de estabilización. (Citado abril 2005). Disponible en internet<www.ingenierocivil.com.ar/resusltados/resusltados/i-157
14. BUENO J.L, H. SAS, AG. Lavin. Contaminación e Ingeniería Ambiental. Contaminación de las aguas. Volumen 3. Editorial FICYT. Oviedo 1997, p 138

15. CARDENAS Jorge Alonso. Manual de calidad de aguas para estudiantes. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, capítulo 4.
16. SAWYER Clair, Mc CARTY Perry, PARKIN Gene. Química para Ingeniería Ambiental. Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá – Colombia. 2001, p 557-595, 610-623
17. VADILLO P. et al. Contaminación por lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos en acuíferos carbonatados: vertedero la mina. Málaga: 1998.
18. Tratamiento de los lixiviados de un vertedero en un sistema de lodos activados. (Citado junio de 2005). Disponible en internet <
www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidual/i-170
19. REICHERT Geraldo Antonio, DA SILVA Sergio Luis. Tratamiento de lixiviado de aterro sanitario realizado em filtro anaerobio em leito de brita construido sob o aterro: avalicao de desempenho. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental. Ed. ABES. Rio de Janeiro: 1997 p 1-9.
20. Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental. Lagunas de estabilización. 3ª edición. Sao Paulo. 1994.28p. (Citado mayo 2005). Disponible en internet:
< [wwwcepis.ops.oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/repindex/inpri57.>](http://www.cepis.ops.oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/repindex/inpri57.>)
21. ORTHH, Andrade Maria. Estudios sobre la tratabilidad de los líquidos percolados de rellenos. III Congreso Brasileiro de Limpieza Pública. Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental. Sao Paulo. 1978, p 1-79. [Citado 13 octubre de 2004]. Disponible en internet:
wwwcepis.ops.oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/repindex/inpri57c.html

22. HERNÁNDEZ Castilla Bríspulo. Recirculación de lixiviados en el relleno sanitario del Cerro Patacón. Publicación # 79. Panamá; 2001. [Citado 29 marzo de 2004]: Disponible en internet: <www.utp.ac/universal/79.htm>

23. BORZACCONI Liliana, LOPÉZ Iván, ARCIA Esteban, CARDELINO Luis, CASTAGNA Alvaro, VIÑAS María. Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a lixiviado de relleno sanitario. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Uruguay

24. CUERVO Diego Paredes, Juan Mauricio Castaño Rojas; Jhoniers Gilberto Guerrero Erazo. Fitorremediación de lixiviados. Instituto Colombiano para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Franc – COLCIENCIAS. Universidad Tecnológica de Pereira. Empresa de Aseo de Pereira. Cooperación Técnica Alemana Al Desarrollo - GTZ (Cooperación). Pereira- Colombia.1998. [Citado 5 septiembre de 2004]. Disponible en internet: <www.utp.edu.co/intitu/ciez/proyectos/p-ambien3htm>

25. AGUDELO Rubén Alberto. Tratabilidad de lixiviados producidos en rellenos sanitarios. Monografías- Posgrados en Ingeniería Ambiental Medellín-Colombia 1994. [Citado 10 septiembre de 2004]. Disponible en internet: <jaibana.udel.edu.co/centros/cendo/monografias/index.html>

26. BARBOSA Wilson, et al. Estudio de especies de fosforo e nitrogenio em lagoas de estabilizacao.XXVII Congreso Interamericano de Engenharia sanitaria y ambiental. ABES. CAMPINA Grande-Brasil. (Citado Julio de 2005). Disponible en internet < www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidual/l-003.

27. CARDENAS Carmen, et al.. Mejorameinto del efluente de lagunas a traves de un filtro rocoso. Universidad de Zulia. Maracaibo -venezuela XXVII Congreso Interamericano de Ingenieria sanitaria y ambiental. México 2002.
28. Standard Methods for examination of water and waste water, 20th edition. 1990.
29. CHIANG, W y QASIM, S. Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment. Texas: Technomic. P. 90, 99-101, 132-133.
30. BORZACCONI Liliana, LÓPEZ Iván, ARCIA Esteban, CARDELINO Luis, CASTAGNA Alvaro, VIÑAS María. Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a lixiviados de relleno sanitario. Universidad de la República. Uruguay.
31. YANEZ. Lagunas de estabilización. Diseño y mantenimiento. Cuenca Ecuador. Ed. Monsalve. Ecuador: 1993
32. KOUZELI-KATSIRI A; et al. Prediction of leachate quality from sanitary landfills. Journal of Environmental Engineering. Vol 10. 1999. p 125
33. ROLIN M Sergio. Sistema de lagunas de estabilización. Editorial Mc.Graw-Hill Interamericana. Colombia 2000, p 210
34. GUTIERREZ Tania M, PEÑA Clara M. Optimización de parámetros electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
35. Capitulo 3. Revisión bibliográfica. p 17, 18, 24, 39, 43, 55, 64, 97. (Citado agosto 2005). Disponible en internet: www.tdx.cesca.es/tesis-opc/available/tdx-0725105-161032/03mgb103de11

36. LEVIN Morris, GEALT Michael. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. McGraw Hill. España: 1997, p 119-120, 181
37. MARA Duncan. Waste stabilisation ponds. Lagoon technology international ltd. Inglaterra: 1992. p 16-30.
38. MIRANDA Jaime. Tratamiento analítico de las aguas servidas. Ciencia abierta n°6 Santiago de Chile. (Citado agosto 2005). Disponible en internet: cabierta.uchile.cl/revista/aguas.htm
39. MARTINEZ Javier. Evaluación del desempeño de lagunas anaerobias en el tratamiento de fuentes industriales. Universidad de la República Oriental de Uruguay. Uruguay: 2000.
40. Lagunas de estabilización. Condiciones generales para el diseño y criterios de dimensionamiento. Lagunas anaeróbicas. Citado septiembre 14 de 2005. disponible en internet.: www.ingenieroambiental.com/?pag=838-58K.

