

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO  
SANITARIO " EL OJITO" DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**



**ÁNGELA MARÍA ASTAÍZA PINO**

**ELVER RENGIFO BOLAÑOS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2008**

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO  
SANITARIO " EL OJITO" DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

**ÁNGELA MARÍA ASTAÍZA PINO  
ELVER RENGIFO BOLAÑOS**

**Trabajo de grado en Investigación presentado como requisito parcial para optar al  
título de Ingeniero Ambiental**

**Director  
CARLOS CÉSAR CABEZAS CÓRDOBA  
Ingeniero Químico, M. Sc**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2008**

## RESUMEN

Este trabajo presenta la evaluación fisicoquímica e hidráulica del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” ubicado en el suroccidente de la ciudad de Popayán en el departamento del Cauca.

El estudio se realizó durante los meses comprendidos entre Octubre de 2007 a Enero de 2008, teniendo en cuenta periodos de invierno y verano.

Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron los siguientes: Potencial de Hidrógeno (pH), DQO, DBO<sub>5</sub>, Alcalinidad, Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Volátiles, Dureza Total y Dureza Cálctica. Los datos presentan una alta variabilidad, comparado con algunos informes de monitoreo efectuados anteriormente por la alcaldía municipal y con otros estudios realizados sobre el lixiviado. La remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO para época de invierno fue de 64% y 71% respectivamente. En verano, se obtuvieron remociones en DBO<sub>5</sub> del 49% y DQO del 41%.

Se hicieron aforos de caudal. Los valores encontrados para la época de invierno a la entrada y a la salida fueron de 1.61 L/s y 1.52 L/s respectivamente; para la época de verano se registraron caudales de 0.89 L/s en la entrada y 0.71 L/s a la salida.

Se efectuó una prueba de trazadores en el laboratorio utilizando Cloruro de Sodio (NaCl) como trazador; se concluyó que si se logra la perturbación siempre y cuando se hagan controles a la entrada y a la salida; pero no es una buena sustancia trazadora para tratar este tipo de lixiviados debido a que el tiempo experimental esperado es de 27 minutos, situación que no ocurrió ya que el trazador salló a los 14.5 minutos, con un porcentaje de error del 54%, valor que no es aceptable para la utilización de esta sustancia.

Finalmente se hizo una prueba de sedimentabilidad mediante el cono imhoff donde se encontraron velocidades de sedimentación promedio del orden de 0.717 cm/s. De acuerdo a la investigación realizada en el presente trabajo se optó por proponer como alternativa para mejorar el tratamiento de estos líquidos contaminantes, un sedimentador convencional antes de la laguna de estabilización.

## DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza necesaria para superar los obstáculos.

A mi Maestro y guía espiritual VMA DESOTO por sus enseñanzas.

A mis padres y hermano por brindarme un hogar cálido y enseñarme a valorar las cosas simples de la existencia.

A mis amigos y compañeros por su apoyo y aliento.

### ÁNGELA MARÍA ASTAÍZA PINO

A Dios por darme la vida.

A mi esposa y mis dos hijas por su amor.

A mis padres y hermanos por su apoyo constante.

A mis compañeros y amigos por todas las experiencias que con ellos compartí.

### ELVER RENGIFO BOLAÑOS

A todos y cada uno de los profesores del departamento de Ingeniería Ambiental, en especial al ingeniero Carlos César Cabezas por brindarnos los conocimientos necesarios para la elaboración de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por sus bendiciones, por darnos la vida, la salud y el deseo constante de superación.

A nuestros padres, hermanos, familiares por su constante amor y apoyo incondicional.

A nuestro director el Ingeniero Carlos César Cabezas Córdoba por orientar este trabajo de grado.

A nuestros profesores del departamento de Ingeniería Ambiental quienes contribuyeron en nuestra formación como Ingenieros Ambientales.

A Reynel Camayo por otorgarnos el permiso de ingreso al relleno sanitario "El Ojito".

Al laboratorio de Ingeniería Ambiental por facilitarnos las herramientas materiales y humanas para desarrollar nuestro proyecto.

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

**Firma Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

## TABLA DE CONTENIDO

Página

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>NOTA DE ACEPTACIÓN</b> .....	<b>VI</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE APÉNDICES</b> .....	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>1 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 ANTECEDENTES</b> .....	<b>16</b>
<b>4 CONTEXTUALIZACIÓN</b> .....	<b>18</b>
4.1 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN POPAYÁN [15].....	18
4.2 GENERALIDADES DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” .....	19
4.3 LIXIVIADOS .....	19
4.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS.....	20
4.5 DINÁMICA DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS .....	22
4.6 MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.....	23
4.6.1 Evaporación.....	23
4.6.2 Ósmosis Inversa.....	23
4.6.3 Dilución .....	24
4.6.4 Recirculación .....	24

<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
5.1	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL ESTUDIO .....	25
5.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	26
5.3	AFOROS DE CAUDAL .....	29
5.4	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN .....	31
5.5	PRUEBA DE TRAZADORES .....	32
<b>6</b>	<b>CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA .....</b>	<b>34</b>
6.1	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	35
6.1.1	Potencial de Hidrógeno (pH).....	36
6.1.2	Alcalinidad.....	36
6.1.3	Sólidos Totales (ST).....	37
6.1.4	Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) .....	39
6.1.5	Sólidos Disueltos Totales (SDT) .....	40
6.1.6	Demanda química de oxígeno (DQO) .....	41
6.1.7	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	42
6.1.8	Dureza Total y Dureza Cálcica .....	44
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO” EL OJITO” .....</b>	<b>46</b>
7.1	CAUDAL.....	46
7.2	CLASIFICACIÓN DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS.....	48
7.3	ASPECTOS HIDRODINÁMICOS .....	50
7.4	PRUEBA DE TRAZADORES .....	52
7.4.1	Consideraciones técnicas de la prueba de trazadores en campo.....	54
<b>8</b>	<b>ALTERNATIVA PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO ACTUAL DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” .....</b>	<b>55</b>
8.1	SEDIMENTADOR CONVENCIONAL: MODELO HAZEN Y CAM.....	55
8.2	DIMENSIONAMIENTO.....	56
8.2.1	Velocidad de Sedimentación.....	56
8.2.2	Caudal .....	56
8.2.3	Área superficial.....	56
8.2.4	Geometría de la estructura .....	57
8.2.5	Volúmen requerido.....	57
8.2.6	Altura de sedimentador (H) .....	57
8.3	METODOLOGÍA PROPUESTA POR EL RAS.....	58
8.3.1	Área Superficial (A) .....	58

8.3.2	Geometría de la estructura .....	58
8.3.3	Volúmen requerido.....	59
8.3.4	Profundidad.....	59
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>61</b>
9.1	CONCLUSIONES .....	61
9.2	RECOMENDACIONES .....	62
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>APÉNDICES .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición física de los residuos sólidos en Popayán .....	18
Tabla 2. Características comunes de los Lixiviados .....	20
Tabla 3. Composición de los Lixiviados de rellenos sanitarios fases Acética y Metanogénica.....	21
Tabla 4. Resultados promedio de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado en invierno. ....	34
Tabla 5. Resultados promedio de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado en verano .....	35
Tabla 6. Factor de biodegradabilidad (fd).....	43
Tabla 7. Caudales de Lixiviados Medidos en Época de Invierno y Verano .....	46
Tabla 8. Determinación del tiempo de retención hidráulico teórico (TRH) y carga orgánica volumétrica (COV) en la laguna.....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Balance de agua en el relleno sanitario.....	22
Figura 2. Plano del relleno sanitario de Popayán “El Ojito”[7]. .....	26
Figura 3. Entrada y salida de lixiviados .....	27
Figura 4. Montaje experimental en el laboratorio .....	33
Figura 5. Canal perimetral que recoge el lixiviado del relleno sanitario “El Ojito “ .....	38
Figura 6. Limpieza realizada a la laguna de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” en 2006.....	47
Figura 7. Pérdidas de caudal en la laguna por rebosamiento en época de invierno .....	48
Figura 8. Dimensiones de la laguna de lixiviados relleno sanitario “El Ojito” .....	51
Figura 9. Formación de líneas preferenciales en época de invierno en la laguna de lixiviados.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 10. Curva de recuperación del trazador (NaCl).....	53
Figura 11. Laguna de estabilización de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” en el 2006. ....	55
Figura 12. Curva de calibración para la entrada de la laguna de estabilización de lixiviados “El Ojito” .....	100

## LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de invierno y verano analizados estadísticamente .....	69
Apéndice 2. Análisis Comparativo de entradas y salidas en los periodos de Verano- Invierno .....	73
Apéndice 3. Cálculo de la Velocidad de Sedimentación .....	83
Apéndice 4. Metodología empleada para la realización de los análisis fisicoquímicos de acuerdo al Estándar Métodos [29]. .....	86
Apéndice 5. Capacidad de Evaporación en algunas ciudades colombianas .....	88
Apéndice 6. Análisis comparativo simple entre la época de Invierno - Verano .....	91
Apéndice 7. Valores de Sólidos Totales (ST), Sólidos Disueltos (SD) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) de la laguna de estabilización de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” .....	93
Apéndice 8. Velocidades de sedimentación para época de invierno y verano .....	94
Apéndice 9. Determinación de Cloruros en la entrada .....	97
Apéndice 10. Determinación de Cloruros en la salida .....	98
Apéndice 11. Cantidad de trazador necesario .....	99
Apéndice 12. Curvas de calibración para la prueba de trazadores .....	100
Apéndice 13. Datos para la determinación de Cloruros .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## INTRODUCCIÓN

Los Residuos Sólidos Urbanos han sido tradicionalmente dispuestos en botaderos o vertederos controlados que en la mayoría de los casos no cumplen con las mínimas normas para mitigar la contaminación ambiental y visual y no cuentan con sistemas apropiados de recolección de subproductos como los residuos líquidos denominados lixiviados, los cuales, sin un sistema apropiado de almacenamiento y tratamiento para su disposición, representan un riesgo de contaminación tanto del suelo y el subsuelo como de las corrientes superficiales y subsuperficiales aledañas debido a la comunicación hidráulica que poseen los acuíferos [26].

Desde que los residuos sólidos son generados y 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 la biocenosis de aerobia a anaerobia facultativa y más tarde a microorganismos anaerobios obligados [8].

Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios municipales representan un grave problema de contaminación, por el alto contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden alterar significativamente la calidad fisicoquímica y microbiológica de las corrientes de aguas naturales, nacimientos y pozos vecinos [21]. Los lixiviados pueden llegar a contaminar los cuerpos superficiales de agua por escurrimientos no controlados, o bien, infiltrarse y contaminar los acuíferos originando así la inutilización de estos recursos para su aprovechamiento futuro. Además de lo anterior, la contaminación de los suelos y la disminución de su productividad, debido al contacto que pueden tener con los lixiviados que se generan en cualquier sitio de disposición final de los residuos sólidos urbanos, son impactos negativos que afectan a la agricultura y hasta pueden causar la desvalorización de los predios.

La calidad del lixiviado está determinada principalmente por la composición de los residuos sólidos, por los procesos de reacción bioquímica y por las condiciones ambientales que se dan dentro del relleno [1].

La dificultad en el tratamiento de los lixiviados no sólo se debe a que es un agua residual muy compleja, sino a sus variaciones temporales en concentración y caudal [2].

## 1 JUSTIFICACIÓN

Según los estudios más recientes que se han realizado a la Laguna de Estabilización de lixiviados de este relleno, se evidencia claramente que el aporte de Sólidos es muy significativo, en promedio de 12731 mg/L [7]; como también lo muestra el informe de monitoreo realizado por el municipio de Popayán en el año 2006 con unos datos de Sólidos Totales de 23872 mg/L [3]. Como consecuencia de esto, la laguna se colmató y hubo la necesidad de vaciarla con el fin de limpiarla y modificar la hidráulica del sistema, razón por la que es necesario evaluar su sistema de tratamiento, realizando diferentes pruebas que permitan conocer cuál es su comportamiento hidráulico actual. Un manejo inapropiado o una falla en el sistema pueden repercutir en serios problemas de contaminación hídrica, como es el caso de las aguas subterráneas y superficiales aledañas al relleno, así como la del pozo ubicado en la finca “Damasco”.

De acuerdo al informe de monitoreo del lixiviado efectuado por la alcaldía municipal en el 2006 se presentan datos de la caracterización del lixiviado generado en el relleno sanitario “ El Ojito”. Este informe sirve como base para comparar los cambios que sufre el lixiviado en cuanto a sus características fisicoquímicas con la información que será recolectada en el presente trabajo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” ubicado al Occidente de la ciudad de Popayán.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer cuál es la distribución de la contaminación a través de la evaluación de parámetros fisicoquímicos en la entrada y la salida de la laguna de estabilización de lixiviados.
- Evaluar el comportamiento hidráulico del sistema de tratamiento de lixiviados generados en el sistema de relleno sanitario “El Ojito”.
- Proponer una alternativa que contribuya a mejorar el tratamiento de los lixiviados para generar una calidad de efluente que cause un menor impacto hacia el medio ambiente.

### 3 ANTECEDENTES

Los Lixiviados de los rellenos sanitarios de los países en desarrollo presentan concentraciones mucho mayores de  $DBO_5$ , Amoníaco, metales y sustancias precipitables que aquellos de países desarrollados; debido a que los primeros son de vocación agrícola, además tienen un contenido de humedad alto degradándose rápidamente en el relleno sanitario. Como consecuencia, los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenadas producen un lixiviado altamente contaminante, denominado lixiviado joven, a partir de ese momento, las concentraciones de las sustancias en el lixiviado de la basura depositada en el relleno sanitario disminuyen continuamente en el tiempo, esto ocurre como regla general. Teniendo en cuenta que un relleno sanitario se opera por lustros o décadas, siempre va a haber una parte del relleno que aporta lixiviado joven, mientras que otras partes del relleno tienen lixiviado maduro, y otras lixiviado viejo, aquellas que tienen más de cinco años [2].

Para tratar los lixiviados es necesario conocer qué tipo de proceso es el que se quiere manejar; es decir si es de tipo anaerobio o aerobio con el fin de proponer diferentes alternativas para su tratamiento. Para el caso de un lixiviado joven, en especial lixiviados de rellenos con altos contenidos de materia orgánica biodegradable, un alto contenido de materia orgánica pareciera idealmente apropiado para la aplicación de los procesos anaerobios de tratamiento, de hecho existen numerosos reportes de trabajo de todo tipo de tecnologías anaerobias, desde las más simples lagunas anaerobias, hasta complicados sistemas de lecho fluidizado, pasando por filtros anaerobios y reactores UASB. En términos de las reducciones de  $DBO_5$  se reportan muy altas eficiencias a cargas razonables. Usualmente se usan para llegar a niveles de tratamiento secundario, pero cuando se requieren eficiencias superiores se utilizan como pretratamiento, precediendo a sistemas aerobios como los lodos activados [8].

Las principales ventajas que tienen los procesos anaerobios son la mayor simplicidad en el sistema de tratamiento y la menor producción de lodos. Esto se refleja en menores costos de operación, mantenimiento, y menores requisitos técnicos en el personal que opera el sistema. Sin embargo existen varias precauciones que hay que tener en cuenta al aplicar este tipo de procesos. Los altos contenidos de amoníaco y minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos.

Esto implicaría una remoción previa del amoníaco en caso de que este fuera el problema, o la aplicación de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por motivo de la toxicidad [21].

Existen variados antecedentes de tratamiento aerobio de lixiviado, desde experiencias de laboratorio a experiencias a escala real; en este último caso el tipo de tratamiento más extendido es lodos activados o lagunas aireadas. Los datos reportados para DQO en lixiviados varían entre 3000 mg/L y 48000 mg/L, los tiempos de residencia hidráulicos van desde 2.5 a 20 días y las eficiencias de remoción reportadas son mayores al 70% [16].

Los costos de inversión, operación y mantenimiento son significativamente superiores a los de los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, como es el caso de un lixiviado joven, por lo que se logran mejores relaciones costo/beneficio cuando se utilizan para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de DBO. Por esta razón, y dependiendo de las exigencias del vertimiento, se usan preferencialmente como postratamiento a los sistemas anaerobios, o para lixiviados viejos con bajos niveles de DBO<sub>5</sub> [31].

En función de las experiencias realizadas hasta el momento se considera que es preferible una combinación de tratamiento anaerobio seguido de un posterior proceso aerobio. En la etapa anaerobia se consigue una primera reducción de la carga orgánica que puede complementarse luego con el sistema aerobio. Por otra parte al ubicar en primer lugar la etapa anaerobia se puede lograr una importante reducción absoluta de la carga sin los inconvenientes de los procesos aerobios tales como la generación de lodos y el gasto de energía [16].

Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, también se han propuesto como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Tienen la ventaja de la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento, hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse. La combinación de las lagunas y los humedales puede manejar adecuadamente muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra al tener tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acomodar variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados, junto con una baja producción de gases y por lo tanto de espumas [28].

## 4 CONTEXTUALIZACIÓN

### 4.1 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN POPAYÁN [15].

Según lo presentado en la Tabla 1, un mayor porcentaje de los residuos sólidos urbanos, son biodegradables, de ahí la naturaleza de los lixiviados que están llegando al sistema de tratamiento del Relleno Sanitario “El Ojito” del municipio de Popayán.

Tabla 1. Composición física de los residuos sólidos en Popayán

Elemento	% en peso
Vidrio	2.52
Papel archivo	1.6
Papel sucio	10.18
Cartón	1.06
Plástico	7.85
Soplado	0.61
Plástico lny	0.66
Pasta	0.66
plegadiza	2.11
textil	1.35
Madera	0.70
Cuero	0.25
Aluminio	0.87

<b>Elemento</b>	<b>% en peso</b>
Tierra	0.22
Residuos de jardín	1.69
Latas	0.15
Icopor	0.69
Material orgánico	66.18
Caucho	0.39
Otros	0.31
Total	100

De acuerdo a la información suministrada por la oficina de Parques y Aseo de la alcaldía de Popayán, éste municipio produce 150 toneladas diarias de basura, que en proporción al número de habitantes (258.653 según el censo del 2005), equivale a una PPC de 0.58Kg/hab. día [14].

#### **4.2 GENERALIDADES DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO”**

El actual botadero de basura funciona desde el año 1986. El diseño del sistema de disposición final, fue elaborado por la Universidad del Valle, con los requerimientos técnicos que permitieran un adecuado manejo integral de los residuos sólidos. Con el transcurso del tiempo, el manejo de estos no se realizó con el estricto cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas, como consecuencia de la no aplicación del Manual de Operación del Relleno sanitario de la ciudad, el sistema se convirtió en un botadero a cielo abierto sin ningún manejo técnico de control. El actual botadero de basura tiene entonces 13 años de vida [4].

#### **4.3 LIXIVIADOS**

Los lixiviados son líquidos residuales generados por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de las basuras, bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas, o como resultado de la percolación de aguas a través de los residuos en proceso de degradación. Muchas son las definiciones al respecto, y algunos autores toman como sinónimo de lixiviado a percolado, o filtrado [25]. El lixiviado generado en un relleno sanitario es producto de múltiples factores, tales como: Composición de la basura, edad del relleno, balance de agua, diseño y operación del relleno

sanitario, solubilidad de los desechos, procesos de conversión microbiológica y química y la interacción del lixiviado con el medio ambiente [19].

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS

Los lixiviados además de poseer un alto contenido de materia orgánica también se componen de altas concentraciones de Nitrógeno y Fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados tales como: Plomo, Cadmio y Mercurio [28]. El Plomo procede principalmente de las baterías de los carros y de aparatos eléctricos, plásticos, vidrio, cerámica, pigmentos, etc depositados en el relleno sanitario. Las fuentes de Cadmio y Mercurio son fundamentalmente las pilas. El Cadmio, además, se encuentra en los aparatos electrónicos, plásticos, etc [27].

Los compuestos orgánicos presentes en los lixiviados son: Proteínas, carbohidratos, compuestos hidroxiaromáticos, alcoholes, y principalmente los ácidos grasos volátiles, [26]. Los contenidos de Cloruros, Hierro, Sodio, Potasio y Ácido Carbónico, son normalmente muy elevados [19].

El aspecto de los lixiviados es negro, de olor fuerte y penetrante, fluido y en zonas de acumulación y/o estancamiento, presenta una capa superficial de varios centímetros de espuma [25].

En la Tabla 2 se presentan los valores característicos de los lixiviados tomados en el relleno sanitario "Curvas de Rodas en la ciudad de Medellín".

Tabla 2. Características comunes de los Lixiviados<sup>1</sup>

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MINIMO	VALOR MEDIO	VALOR MÁXIMO
pH		5.40	6.84	8.10
DBO <sub>5</sub>	mg/L	108.00	14018.14	32500.00
DQO	mg/L	290.00	18099.88	51200.00

<sup>1</sup> Estos valores medios fueron calculados para 41 muestras tomadas en el Relleno Sanitario "Curvas de Rodas" de Medellín

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MINIMO	VALOR MEDIO	VALOR MÁXIMO
Cloruros	mg/L	2028.00	1886.26	5120.00
Sulfatos	mg/L	5.00	491.89	7000.00
Dureza Total	mg/L	96.00	5166.07	17500.00
N total	mg/L	70.00	1191.56	8260.00
P total	mg/L	0.05	64.54	1249.00
Na	µg/g	30.29	1146.96	2113.33
Fe total	µg/g	13.50	208.94	1000.00
Ca	µg/g	----	104.00	----
Potasio	µg/g	----	2760.00	----

El valor medio así como el rango en el que se encuentran los parámetros del Potencial de Hidrógeno (pH), DBO<sub>5</sub> y DQO en los lixiviados según la fase en que estos se encuentran, se presenta en la Tabla 3. [8]

Tabla 3. Composición de los Lixiviados de rellenos sanitarios fases Acética y Metanogénica

Fase	Parámetro	Valor medio	Rango
<b>Acidogénica</b>	Potencial de Hidrógeno(pH)	6.10	4.5-7.5
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	13000.00	4000- 40000
	DQO(mg/L)	22000.00	6000- 60000
	DBO <sub>5</sub> /DQO	0.58	-----
<b>Metanogénica</b>	Potencial de Hidrógeno(pH)	8.00	7.5- 9
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	180	20 -550

Fase	Parámetro	Valor medio	Rango
	DQO(mg/L)	3000.00	500- 4500
	DBO <sub>5</sub> /DQO	0.06	-----
	Alcalinidad(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	6700.00	300- 11500

#### 4.5 DINÁMICA DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

Los lixiviados se originan por la circulación de agua en la basura, la cual a su paso va disolviendo los elementos presentes en los residuos [22]. La dinámica de generación de los lixiviados se puede apreciar en la Figura 1.

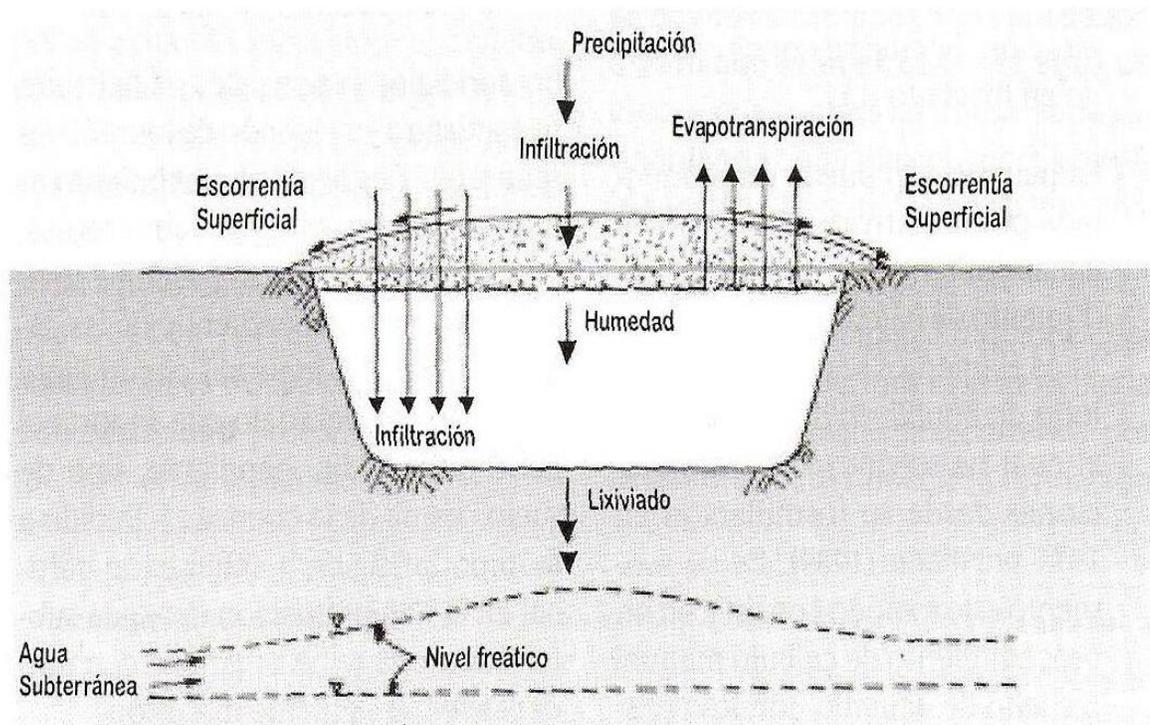


Figura 1. Balance de agua en el relleno sanitario

El agua que se introduce en el seno de la masa de residuos, debido principalmente a fuentes externas (agua lluvia, drenaje superficial aguas subterráneas, entre otras), 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 [8].

## **4.6 MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS**

### **4.6.1 Evaporación**

Este método consiste en captar el lixiviado y esparcirlo sobre grandes superficies con el ánimo de propender la evaporación. El lixiviado que sale del relleno sanitario llega por tubería a un tanque de almacenamiento a donde se bombea a otro tanque en la parte más alta del relleno sanitario o directamente a unos aspersores colocados sobre las áreas que no han sido cubiertas donde se encuentra depositada la basura, sobre las plataformas o pisos terminados y cubiertos con material de cobertura o sobre áreas destinadas para ello. La forma de esparcir estos lixiviados sobre las superficies depende de muchos factores tales como: La cantidad de evaporación, precipitación, pendiente, tipo de suelo entre otros [1].

Su ventaja principal se relaciona con la simplicidad en la tecnología de los equipos, y los bajos costos comparativos con otras tecnologías similares. Una de las desventajas es la formación de espumas por la turbulencia generada en el proceso de evaporación, el incrustamiento de precipitados en el sistema. Igualmente cuando los lixiviados son jóvenes y existen altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y amoníaco, y dependiendo del pH al cual se realice la evaporación, estos compuestos se pueden arrastrar junto con el vapor de agua [28].

En el Apéndice 1, se muestra que en ciudades donde la relación EVP (Evaporación Potencial)/Precipitación  $> 1$ , la evaporación es mayor que la precipitación y mientras mayor sea el número, la diferencia se hace más grande. Para el municipio de Popayán la relación anteriormente mencionada está en el orden de 0.6, donde evidentemente el método de la evaporación puede tener serios problemas y se deben buscar otras alternativas para el tratamiento de estos lixiviados [8].

### **4.6.2 Ósmosis Inversa**

En general se reportan buenos porcentajes de remoción para la mayoría de los contaminantes. Igualmente se observa que las aplicaciones han sido para lixiviados con concentraciones de DBO relativamente bajas, menores a 1000 mg/L, es decir, lixiviados viejos, o lixiviados a los cuales se les ha realizado un pretratamiento.

Una ventaja que presenta este tipo de tratamiento son los bajos consumos energéticos que requiere la tecnología cuando se compara con otras tecnologías como la oxidación biológica o la evaporación. Se han reportado problemas de colmatación asociados a la precipitación del Calcio y el Hierro en las membranas, obligando a la incorporación de sistemas de pretratamiento que minimicen estos efectos [28].

#### **4.6.3 Dilución**

Este es el método más utilizado en Colombia y es el causante de los problemas serios de contaminación de las fuentes hídricas no sólo de las aguas subterráneas sino de las superficiales. En Colombia la aplicación de este método ha traído graves problemas de contaminación en los ríos Bogotá, Cali, Medellín, Magdalena y Cauca. En su totalidad, las pequeñas poblaciones arrojan sus lixiviados a los ríos y quebradas más cercanas donde el impacto negativo se siente mas cuando se vierten caudales altos de lixiviado en pequeños afluentes [13].

#### **4.6.4 Recirculación**

Actualmente este método está siendo muy utilizado y consiste en sacar el lixiviado y volverlo a introducir dentro de la basura para utilizarla como un gran filtro. Este método parece que está dando resultado pero es muy peligroso debido a que con facilidad se aumenta el nivel piezométrico, originando así derrumbes como el sucedido en el relleno sanitario “Doña Juana” ubicado en las afueras de la ciudad de Bogotá en Septiembre de 1997 [5].

Este sistema aporta importantes ventajas entre las que se destacan las reducciones en el tiempo necesario para la estabilización del vertedero, en el volumen de lixiviados por evaporación y en los costos finales de tratamiento. Los inconvenientes más importantes que presenta son el alto costo de mantenimiento de los sistemas de recirculación de lixiviados, la emisión de olores en las balsas de almacenamiento, producción de insectos y la necesidad de diseño de sistemas de recolección de lixiviados para cargas hidráulicas más altas [21].

## 5 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la ubicación geográfica del sitio de estudio, los procedimientos empleados para determinar el número de muestreos, el aforo de los caudales tanto para la época de invierno como para la época de verano y la metodología empleada para determinar la velocidad de sedimentación del lixiviado así como las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la toma y recolección de las muestras.

### 5.1 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL ESTUDIO

El presente estudio se realizó en la laguna de estabilización de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito”. El actual vertedero de residuos se encuentra ubicado al pie de la carretera que de Popayán conduce al Tambo, a una distancia de 3 kilómetros del límite urbano; colinda al Nor-Oriente con el río Cauca y al Sur-Oriente con la quebrada “El Ojito”, del mismo nombre. Tiene una área disponible de casi 11,2 ha [30]. La laguna de almacenamiento de lixiviados está a una altura de 1768 msnm en la zona oriental del relleno, con coordenadas  $02^{\circ} 27' 51,09''$  de latitud Norte y  $76^{\circ}39'10,1''$  de latitud Oeste [14].

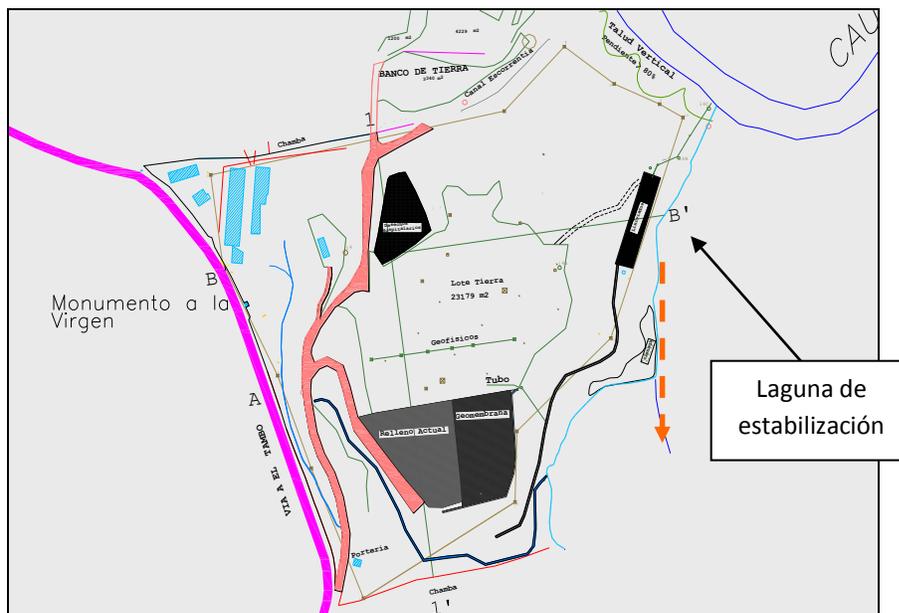


Figura 2. Plano del relleno sanitario de Popayán “El Ojito” [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.].

## 5.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los análisis se efectuaron en época de invierno y verano, mediante un muestreo simple y puntual en la tubería de entrada y salida de lixiviados de la laguna de estabilización como se puede apreciar en Figura 3. El tipo de muestreo se escogió de acuerdo al estudio previo presentado por PINTO [7] y a los informes de monitoreo presentados por parte de la alcaldía municipal y de la CRC.

Los meses de invierno fueron Octubre y Noviembre de 2007 tomando muestras 1 vez por semana; mientras que el mes de verano solo fue en Enero. En este período se tomaron muestras 2 veces por semana.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca después de haber sido tomadas; en ninguno de los muestreos fueron preservadas. La recolección de las mismas se realizó en recipientes de plástico con una capacidad de 2 litros, debidamente tapados y rotulados.

Las pruebas fisicoquímicas se realizaron por duplicado, según las especificaciones del Estándar Métodos [29], consignadas en el Apéndice 4. Se hicieron diluciones en todos los parámetros excepto para el caso de los Sólidos, la dilución fue del 1% debido a que los lixiviados son considerados altamente contaminantes.



### Figura 3. Entrada y salida de lixiviados

Los parámetros fisicoquímicos obtenidos experimentalmente en el presente estudio fueron los siguientes: Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Volátiles, Sólidos Disueltos, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, Dureza Total, Dureza Cálcica y Alcalinidad.

De acuerdo con el informe de monitoreo de agua y aire [3] y el estudio preliminar de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes de la laguna de estabilización del relleno sanitario de Popayán “El Ojito” [7], se encontró que los sólidos son los parámetros más representativos, por esta razón estos datos se tomaron como referencia para determinar el número de muestras. Para este trabajo el número de muestras mínimo calculado fue de 12: 6 muestras en la entrada y 6 muestras a la salida para cada parámetro fisicoquímico analizado.

Según lo expuesto anteriormente, se tomó un nivel de confianza del 95% que le corresponde un valor del coeficiente  $Z_c = 1.96$ , con un error estimado del 42%. Los valores de la desviación estándar tenidos en cuenta para efectuar el cálculo necesario se pueden observar en el Apéndice 7.

De acuerdo a la Ec. 1 se tiene que:

$$n = \frac{z_c^2 \times s_x^2}{e^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $n$  : Tamaño de la muestra.
- $z_c$  : Nivel deseado de confianza.
- $s_x$  : Desviación estándar.
- $e$  : Máximo error permisible.

Luego de haber realizado el anterior procedimiento, se hizo la prueba Q con el fin de descartar datos dudosos. Para aplicar el criterio Q, se divide la diferencia entre el resultado dudoso y el más próximo a él, por el intervalo de la serie completa. La relación resultante,  $Q_{exp}$  se compara con unos valores de rechazo que son críticos para un grado de confianza determinado. Para este caso se usó un nivel de confianza del 95% el cual corresponde a un  $Q_{criterio}$  de 0.64. Si  $Q_{exp}$  es más pequeño que  $Q_{criterio}$  no se rechaza el resultado sospechoso; si  $Q_{exp}$  es mayor que  $Q_{criterio}$ , se rechaza el dato.

Posteriormente se determinó el promedio con los datos que quedaron después de realizada la anterior prueba. Luego se calculó la desviación estándar de acuerdo con la Ec. 2

$$x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_p)^2}{N-1}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$N$ : Número de datos.

$x_i$ : Valor del dato.

$x_p$ : Promedio.

Seguido de esto, determinó el intervalo de confianza de los datos con el objetivo de analizar si los datos estaban dentro de los valores esperados para un nivel de confianza del 95%.

El intervalo de confianza se obtuvo de acuerdo a la Ec. 3.

$$\mu = X_p \pm \frac{z \times \sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\mu$ : Intervalo de confianza

$\sigma$ : Desviación estándar

$X_p$ : Promedio

$N$ : tamaño de la muestra

$z$ : 1.96

Con el fin de analizar el comportamiento de los datos entre las épocas de invierno y verano, se realizó la prueba T mediante un análisis comparativo simple de cada uno de los parámetros. El procedimiento de esta prueba se describe a continuación:

Primero se calculó la varianza según la Ec.4

$$S_p^2 = \frac{(N_1-1) \times S_1^2 + (N_2-1) \times S_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$S_1$ : Desviación Estándar para invierno

$S_2$ : Desviación Estándar para Verano

$N_1$ : Tamaño de la muestra de invierno

$N_2$ : Tamaño de la muestra de verano.

Una vez realizado el procedimiento anterior se efectuó una prueba de hipótesis para hallar el valor de  $t_0$  asumiendo que la desviación estándar es igual para las dos épocas en cada uno de los parámetros, de acuerdo a la Ec. 5.

$$t_0 = \frac{Y_1 - Y_2}{S_p \times \sqrt{\left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)}} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$Y_1$ : Promedio de invierno

$Y_2$ : Promedio de verano

$S_p$ : Desviación Estándar

$N_1$ : Tamaño de la muestra de invierno

$N_2$ : Tamaño de la muestra de verano.

Se calculó los grados de libertad de acuerdo a la Ec. 6

$$\text{Grados de Libertad} = N_1 + N_2 - 2 \quad \text{Ec. 6}$$

Con los grados de libertad se determinó el valor de  $t$  para un  $\alpha/2$  de 2.5% de acuerdo al **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Luego se comparó con los valores de  $t_0$  calculados anteriormente:

$$\text{Si } |t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, N_1 + N_2 - 2}; \text{ se rechaza la hipótesis } H_0$$

### 5.3 AFOROS DE CAUDAL

Los caudales se tomaron a la entrada y la salida aleatoriamente el mismo día de haber sido recogida la muestra tanto para época de invierno como para época de verano. El número de muestreo fue de 12: seis a la entrada y seis a la salida para cada época.

El método de aforo fue el volumétrico, esto se hizo con la ayuda de una jarra de plástico numerada para diferentes volúmenes en mL y un cronómetro. Se registraron varios volúmenes para un mismo tiempo y se determinaron los caudales de acuerdo a la

$$Q = V/t \quad \text{Ec. 7}$$

$$Q = V/t \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

Q: caudal (L/s)

V: volumen (L)

t: tiempo(s)

Luego se obtuvo un dato promedio de los caudales de la entrada y de la salida en época de invierno y verano.

#### 5.4 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Se hicieron 6 muestreos: 3 en Diciembre de 2007 para época de invierno y 3 en Enero de 2008 durante el verano. Se tuvieron en cuenta únicamente las muestras de entrada.

El procedimiento para determinar la velocidad de sedimentación, consistió primeramente en homogeneizar la muestra antes de llenar el cono imhoff hasta la marca de 1L, dejándose sedimentar durante 45 minutos. En este tiempo se removió suavemente las paredes con una varilla para facilitar la sedimentación de los sólidos adheridos a las paredes del mismo y finalmente se dejó la muestra en reposo y se registró el volumen de sólidos sedimentables.

Los datos para obtener la velocidad de sedimentación promedio se encuentran consignados en el Apéndice 3. Se registraron los tiempos con la ayuda de un cronómetro, durante una hora para cada uno de los volúmenes de sólidos sedimentados. Luego de esto, se midió por medio de un metro, las alturas en el cono, coincidiendo éstas con la marcación volumétrica del cono. Posteriormente se halló la distancia que recorrieron los sólidos desde el momento en que fue agregada la muestra de lixiviados.

Esta distancia se encontró de acuerdo a la Ec. 8

$$X = HT - H_i \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

X: Distancia recorrida por los sólidos (cm)

HT: Altura total del cono (37.71cm)

H<sub>i</sub>: Altura que ocupan los sólidos en el cono imhoff.

Una vez efectuado el procedimiento anterior, se determinó el tiempo real de sedimentación según la Ec. 9

$$\Delta t = t_f - t_i \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$\Delta t$ : Tiempo real de sedimentación (s)

t<sub>f</sub>: Tiempo final experimental(s)

t<sub>i</sub>: Tiempo inicial experimental (s)

Finalmente se halló la velocidad de sedimentación de acuerdo a la Ec. 10

$$V_s = \frac{X}{\Delta t} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- $V_s$ : Velocidad de sedimentación (cm/s)
- X: Distancia recorrida por los sólidos (cm)
- t: Tiempo real.

Se hizo un promedio compuesto de los datos y finalmente un promedio simple.

## 5.5 PRUEBA DE TRAZADORES

Para realizar esta prueba primero se construyó la curva de calibración mediante el siguiente procedimiento: Se recolectó una muestra puntual del lixivado a la entrada en un recipiente de plástico de una capacidad de 1L. Seguido de esto se tomaron 10 alícuotas en beakers de 5mL agregando concentraciones conocidas de NaCl a las cuales se les midió la conductividad mediante el conductivímetro y la concentración de Cloruros por medio de titulación con  $\text{AgNO}_3$ . Seguido de esto se graficó la conductividad vs concentración de NaCl con el fin de encontrar la ecuación que se ajusta a la curva de tendencia de dicha gráfica, de acuerdo al Apéndice 12.

La prueba de trazadores se realizó en el laboratorio de acuerdo con el montaje experimental ilustrado en la Figura 4, utilizando dos recipientes de plástico con capacidad de 5 L, garantizando un caudal constante.

Luego, se calculó el Tiempo de Retención Teórico y finalmente se determinó la cantidad necesaria de trazador de acuerdo a la Ec.11

$$w = \frac{v \times c \times k}{p \times 1000}$$

$$w = \frac{v \times c \times k}{p \times 1000} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- w: Peso del trazador requerido (Kg).
- k: Constante de corrección para estimar el valor de w en función del compuesto o elemento que será cuantificado durante el ensayo. Si se utiliza NaCl este valor es 1.65
- p: Grado de pureza del trazador utilizado (99%)
- c : Concentración promedio en mg/L de Cloruros
- v: Volumen del reactor en  $\text{m}^3$ .

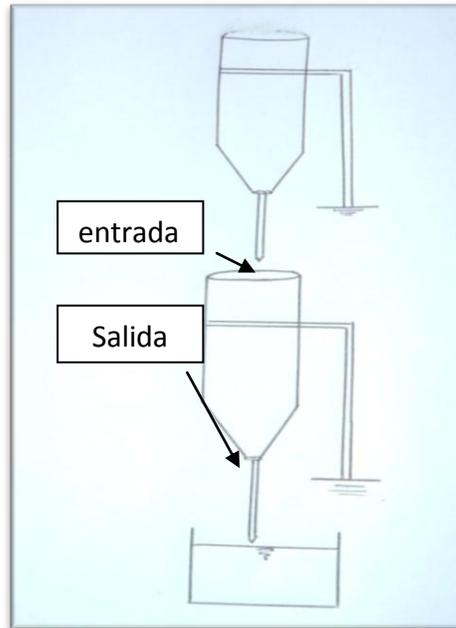


Figura 4. Montaje experimental en el laboratorio

Se tomó una muestra de lixiviado y mediante dosificación instantánea se agregó la cantidad de trazador requerida, recolectando cada minuto muestras a la entrada y a la salida. Finalmente a cada muestra se le midió la conductividad y la concentración de Cloruros. Los datos de esta prueba se encuentran consignados en los Apéndices 9 y 10.

## 6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

En este capítulo se presentan los resultados promedio obtenidos durante la evaluación de los lixiviados generados en el relleno sanitario en periodos de invierno y verano. Además se efectúa el análisis del comportamiento observado en cada uno de los parámetros estudiados.

La totalidad de datos obtenidos durante los diferentes muestreos son presentados en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, al igual que el análisis estadístico de acuerdo con lo planteado en la metodología. La mayoría de los datos presentan una alta desviación estándar y un intervalo de confianza bastante amplio, lo cual indica una alta dispersión. Esto se pudo haber presentado por la concentración variable del lixiviado, la mezcla del lixiviado antiguo con el lixiviado joven o por fallas en el mantenimiento de los canales perimetrales que conducen los lixiviados hasta la laguna, así como errores experimentales propios del muestreo.

Tabla 4. Resultados promedio de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado en invierno.

PARÁMETRO	UNIDADES	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN
Potencial de Hidrógeno	pH	8.10	8.08	-
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	20334	5961	71
DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	1768	641	64
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1889	945	50
Sólidos totales	mg/L	7435	5296	29
Sólidos totales volátiles	mg/L	722	628	13
Sólidos suspendidos totales	mg/L	238	140	41
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	18	13	26
Sólidos Disueltos	mg/L	6683	3867	42

PARÁMETRO	UNIDADES	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1406	985	30
Dureza Cálrica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1091	789	28

Tabla 5. Resultados promedio de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado en verano

PARÁMETRO	UNIDADES	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN
Potencial de Hidrógeno	pH	8.63	8.13	-
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	7221	4280	41
DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	2513	1283	49
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	4500	3389	25
Sólidos totales	mg/L	8854	5619	37
Sólidos totales volátiles	mg/L	3388	1976	42
Sólidos suspendidos totales	mg/L	302	147	51
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	188	106	44
Sólidos Disueltos	mg/L	8552	5471	36
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	5581	4483	20
Dureza cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1240	699	44

## 6.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se discute el comportamiento de cada uno de los parámetros en la laguna de lixiviados y su influencia positiva o negativa en el proceso de disminuir el aporte contaminante del lixiviado antes de ser vertido en la quebrada “El Ojito”. Para efectuar el análisis de los resultados, se tuvo en cuenta la prueba T presentada en el Apéndice 2, esto se hizo con el fin de determinar la influencia de la

época de verano e invierno en el comportamiento de cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados.

### **6.1.1 Potencial de Hidrógeno (pH)**

En el período de invierno, el pH de la entrada y de la salida fue de 8.10 y 8.08, respectivamente, mientras que para el período de verano fue de 8.63 y 8.10.

Los datos de invierno son inferiores a los registrados en el informe de monitoreo del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Ojito” en el 2006 donde el valor a la entrada fue de 8.67 y el de salida de 8.7 [3].

Los valores, están dentro del rango de los valores encontrados para las características de los lixiviados de rellenos sanitarios de Estados Unidos donde el valor mínimo es de 3.5 y el valor máximo es de 8.5.

Los datos de pH de la entrada con respecto a los de la salida de la laguna de lixiviados cambia muy poco, así mismo la comparación entre los datos de invierno y verano indica que no hay una diferencia significativa entre ellos de acuerdo a las observaciones presentadas en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** De las variaciones de pH de entrada de la laguna (8.08 - 8.63), se puede inferir que los lixiviados fueron caracterizados por condiciones metanogénicas. 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 ( $\text{NH}_3^+$ ), el amoníaco soluble se combina con el ión  $\text{H}^+$  para formar ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) [7].

Puede concluirse entonces que el pH no sufre una alteración significativa por parte de los procesos que ocurren en la laguna de lixiviados así como tampoco este parámetro es mayormente afectado entre una época y otra. Esta no es una variable sensible a los procesos que ocurren en la laguna, lo cual significa que el sistema posee una alta capacidad buffer.

### **6.1.2 Alcalinidad**

En el período de invierno, la alcalinidad promedio a la entrada fue de 1889mg/L y 945 mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 4500mg/L a la entrada y 3389 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron del 50% en invierno y 25% en verano. Estos datos son muy superiores a los valores registrados en estudios anteriores donde se presentan datos en la entrada de 52 mg/L y 100mg/L a la salida. Los valores obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del rango para los lixiviados de rellenos sanitarios en Estados Unidos los cuales presentan valores entre los 500mg/L y los 10000 mg/L [3].

El análisis comparativo simple muestra una diferencia significativa entre los datos de una época y otra. La concentración aumenta en verano. Según la serie de datos de las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas al lixiviado obtenidas de los informes de monitoreo efectuados por el grupo de aseo de la alcaldía municipal, se reportan elevados valores de Nitrógeno amoniacal del orden de 1246mg/L, [34], lo cual puede estar incrementando los valores de la alcalinidad en esta época. Además los tiempos de retención teórico son mayores en verano haciendo que los procesos metabólicos que realizan las bacterias anaerobias sean más eficientes. En aguas anaeróbicas o contaminadas se pueden producir sales de ácidos débiles como el ácido acético, propiónico y sulfuros de hidrógeno que pueden incidir en la concentración de este parámetro fisicoquímico [10]. Dentro de la laguna se presentan bacterias que para realizar su metabolismo toman parte de los carbonatos, haciendo que en la salida se presente valores inferiores a los de la entrada.

### **6.1.3 Sólidos Totales (ST)**

En el período de invierno, los ST promedio a la entrada fueron de 7435mg/L y 5296 mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 8854mg/L a la entrada y 5619 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 29% en invierno y 37% en verano.

Analizando toda la serie de datos presentados en el Apéndice 1 se puede inferir que el comportamiento de los sólidos es muy variable. Se comienzan con unos valores de 13238 mg/L durante el primer muestreo, bajan en los dos muestreos siguientes, se vuelven a incrementar los valores en el muestreo 4, luego bajan en el muestreo 5 y 6 y vuelven a subir en el muestreo 7 por lo que se puede inferir que el lixiviado presenta unos sólidos de composición heterogénea, muy probablemente por que los lixiviados jóvenes se mezclan con los lixiviados antiguos dentro de una misma celda.

En verano el caudal disminuye por lo tanto el efecto de dilución es menor aumentando la concentración de Sólidos a la entrada de la laguna. Un aumento en la temperatura puede originar procesos de evaporación ocasionando una acumulación de lodos en el sistema de tratamiento.

El promedio de la concentración de ST que está llegando a la laguna es menor que los valores reportados en los informes de monitoreo del 2007 los cuales presentan valores de Sólidos Totales entre 10877,27 mg/L y 29480,64mg/L [3].

Los problemas de sólidos en la laguna se deben principalmente al inadecuado mantenimiento y operación en la disposición de los residuos sólidos dentro del relleno sanitario. Esto se ve reflejado en la ineficiente compactación del material de

cobertura que recubre los residuos sólidos urbanos así como en los escombros que se encuentran en los canales perimetrales que conducen el lixiviado hacia la laguna; lo cual puede observarse en la Figura 5, haciendo que gran cantidad de sólidos estén llegando al sistema de tratamiento de los lixiviados.



Figura 5. Canal perimetral que recoge el lixiviado del relleno sanitario “El Ojito “

### 6.3.2 Sólidos Totales Volátiles (STV)

En el período de invierno, los STV promedio a la entrada fueron de 722mg/L y 628mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 3388 mg/L a la entrada y 1972 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 13% en invierno y 42% en verano.

El comportamiento de estos sólidos es similar al presentado por los ST. El valor mínimo de STV para la entrada en época de invierno es de 296mg/L durante el muestreo 4 y el valor máximo es de 1997 mg/L en el muestreo 7. Para la salida el valor mínimo es de 144 mg/L en el muestreo 4 y el valor máximo es de 1994 mg/L durante el primer muestreo. Se presenta una desviación estándar de los datos de salida, superior al valor promedio debido a las características propias de los lixiviados los cuales presentan una alta variabilidad de concentración a través del tiempo. De igual manera que para el caso de los ST también influye el mezclado del lixiviado antiguo con el lixiviado joven donde los valores más altos en la serie de datos puede ser ocasionada por un aporte mayor de lixiviado joven mientras que los valores más bajos pueden ser debidos al aporte de lixiviado viejo o maduro.

A través de la laguna lo que se espera es que los STV disminuyan en la entrada, pues estos son usados para sustentar los procesos microbianos propios de la digestión anaeróbica, caso que si ocurre pero con eficiencias de remoción muy bajas para época de invierno comparadas con las eficiencias encontradas en el informe de monitoreo del 2006 donde se presentan remociones del 88% [3].

La temperatura así como el régimen de lluvias influyen de manera significativa en el comportamiento de este tipo de sólidos. La eficiencia de remoción es menor para el invierno indicando que al interior de la laguna no se alcanza el desarrollo total de los procesos biológicos que permitan la estabilización de los parámetros. Debido a que los sólidos volátiles son menores que los totales tanto para los lixiviados de entrada así como para los lixivados de la salida, se puede inferir que los sólidos biodegradables son pocos.

Cuando los STV disminuyen, la actividad biológica también disminuye pues ésta depende directamente de la temperatura; un incremento de este parámetro puede acelerar los procesos de digestión.

#### **6.1.4 Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)**

En el período de invierno, los SST promedio a la entrada fueron de 238mg/L y 140 mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 302mg/L a la entrada y 147 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 41% en invierno y 51% en verano.

Según el estudio realizado por PINTO, se registraron valores para invierno de 292 mg/L a la entrada y 190 mg/L a la salida; para época de verano se obtuvieron concentraciones de 1752mg/L en la entrada y 1459mg/L en la salida [7].

Los SSV promedio a la entrada fueron de 18mg/L y 13 mg/L para la salida para época de invierno. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 188mg/L a la entrada y 106 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 26% en invierno y 44% en verano. Estos porcentajes de remoción indican que la mayoría de los sólidos pasan directamente al canal de salida de la laguna dificultándose los procesos de digestión anaerobia. Esto también se pudo haber presentado debido a la colmatación de sólidos en la laguna por su inadecuado diseño, mantenimiento y operación.

Los valores alcanzados por el sistema son bajos comparados con otros estudios como el de Mara, quien estima, que en un sistema anaerobio bien diseñado, la remoción de sólidos suspendidos está en el orden del 90% [11].

Las concentraciones de estos parámetros se ven afectadas por el cambio entre una época y otra. Los valores mas altos tanto para SST como para SSV se registran en la entrada durante el verano mientras que los valores mas bajos se presentan a la salida en época de invierno. Las fuertes lluvias presentadas en este período ocasionaron que por efecto de dilución los procesos biológicos dentro de la laguna fueran afectados.

Los SSV son mínimos comparados con los SST, esto indica que el material orgánico biodegradable que está llegando a la laguna es menor que el material no biodegradable. La descomposición del material orgánico, produce un efluente con altos contenidos de materia orgánica. Las aguas lluvias que percolan a través del depósito de basuras, arrastran y/o disuelven esta materia orgánica. La materia orgánica en los líquidos lixiviados, como en cualquier agua contaminada con estos compuestos, está normalmente en estado soluble y particulada. Los SSV corresponden en general a la parte de la materia orgánica particulada. Los valores de este parámetro no son muy altos en los lixiviados, ya que la mayor parte de la materia orgánica se encuentra en estado soluble.

#### **6.1.5 Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

En el período de invierno, los SDT promedio a la entrada fueron de 6683 mg/L y 3867mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 8552 mg/L a la entrada y 5471 mg/L a la salida. Estos valores son menores a los presentados en los informes de monitoreo del año 2006, donde se presentan valores de 23750 mg/L a la entrada y 15492,5 a la salida para época de invierno [3]. En el 2007 se registraron concentraciones promedio de 8934,3mg/L a la entrada y 8164 mg/L a la salida; para época de verano [34]. En estudios de caracterización efectuados al lixiviado de rellenos sanitarios de Estados Unidos se registran valores de SDT que están en un rango de los 4000 a los 40000 mg/L [3]. Los porcentajes de remoción obtenidos fueron de 42% en invierno y 36% en verano.

Un factor que puede estar afectando el comportamiento de estos sólidos es la presencia de metales pesados que aunque no se efectuó la caracterización de ellos en este trabajo, si se evidencia en los informes de monitoreo realizados antes a los lixiviados, la presencia de ellos en forma de trazas, excepto para el Hierro.

En el 2006, las concentraciones de metales pesados fueron de 68,41 mg/L, 0.002 mg/L, 0.3 mg/L para Hierro, Cadmio y Níquel respectivamente [3]. En el 2005 se registraron valores de Mercurio de 1,4µg/L entrada y 1,2µg/L salida [7]. Estos metales dificultan los procesos metabólicos de las bacterias haciendo que gran parte

de la población bacteriana muera o se afecten negativamente los procesos biológicos dentro de la laguna quedando retenidos compuestos inorgánicos presentes en los lixiviados.

#### **6.1.6 Demanda química de oxígeno (DQO)**

En el período de invierno, la DQO promedio a la entrada fué de 20334 mg/L y 5961 mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 7221mg/L a la entrada y 4280 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 71% en invierno y 41% en verano.

La carga contaminante en periodo de invierno a la entrada y a la salida, corresponden a 2828.52 Kg/día y 766.49 kg/día respectivamente; para el periodo de verano esta carga está alrededor de los 555.27 kg/día a la entrada y 179.10 kg/día a la salida.

De acuerdo a los datos obtenidos en este estudio, la DQO presentó valores muy altos durante el periodo de invierno respecto a otros estudios donde se presentan valores de 998,87mg/L y 1062mg/L a la entrada; 273,96mg/L y 650 mg/L a la salida [3]. También se registran valores de 7925,40 mg/L y 5457,03 para entrada y salida respectivamente.

Las concentraciones en el verano son parecidas a las que se presentan en el informe de monitoreo del 2007, con valores de 3475mg/L a la entrada y 2785 a la salida [34]. En el estudio de PINTO, se reportan valores de 4294 mg/L hasta 15371 mg/L a la entrada y 3191 mg/L hasta 9945mg/L en la salida [7].

Según las caracterizaciones del lixiviado de rellenos sanitarios en Estados Unidos las concentraciones de este parámetro están en el rango de 30000 a 50000 mg/L [9].

En el comportamiento de la DQO se espera que la concentración aumente durante la época de verano, con motivo de que en esta época hay una mayor concentración de sólidos Totales. En nuestro estudio ocurrió el fenómeno contrario debido a que los residuos sólidos no cuentan con un material de cobertura por lo tanto quedan expuestos a las precipitaciones.

Las cantidades de lixiviado generado dependen de la cantidad de líquido que contiene originalmente el desecho, de la cantidad de precipitación que entra al relleno a través de la cobertura o que cae directamente en los residuos sólidos y de la composición de los mismos [25].

### 6.1.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

En la época de invierno, la DBO<sub>5</sub> promedio a la entrada fué de 1768mg/L y 641 mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 2513mg/L a la entrada y 1283 mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 64% en invierno y 49% en verano. La DBO<sub>5</sub> presenta un comportamiento similar al de los Sólidos Totales como se muestra en el Apéndice 1, excepto para el muestreo 6 donde la DBO<sub>5</sub> baja mientras que los ST se incrementan.

La carga contaminante en periodo de invierno en la entrada y en la salida, corresponde a 192,89Kg/día y 82,47 kg/día respectivamente; para el periodo de verano esta carga está alrededor de los 193,27 kg/día a la entrada y 39,26 kg/día a la salida. Lo anterior indica que en verano la laguna funciona mejor que para época de invierno

En el informe de monitoreo de 2006 se registran valores de 510 y 260 mg/L para entrada y salida durante el invierno con porcentajes de remoción del 49% [3]. En el 2007, se reportan valores de 1810 a la entrada y 683 mg/L a la salida en el verano [34], cercanos a los encontrados en esta caracterización. Se registran de igual manera para otros estudios valores para el invierno de 3024 y 1842 mg/L a la entrada y a la salida respectivamente [7].

En verano la DBO<sub>5</sub> es mayor que en época de invierno, debido a que al aumentar la temperatura la concentración aumenta, se incrementan las velocidades de reacción y por ende se aceleran los procesos metabólicos dentro de la laguna, ayudando así a que la materia orgánica se degrade más fácilmente que en época de invierno.

La eficiencia de remoción en invierno fue mayor, ya que se puede estar presentando arrastre de materia orgánica biodegradable sedimentable, producto del lavado de los residuos depositados en el relleno sanitario. Se considera que remociones de la DBO del 85% son buenas a lo largo de sistemas lagunares y que remociones del 95% pueden darse cuando los sistemas son muy eficientes [20].

La remoción de DBO se ve afectada por la toxicidad que generan los metales que contienen los lixiviados, pero a su vez, la remoción de metales, incluyendo aquellos incrustantes como el Hierro, se ve interferida por la presencia de la DBO que sirve como agente acomplejante que mantiene los metales en solución dificultando y limitando severamente su remoción [37]

Según el informe de monitoreo del lixiviado del relleno sanitario “El Ojito” realizado en Junio de 2007 por parte de la CRC se presentan concentraciones mínimas de metales pesados como el Níquel con unos valores de 2 mg/L y concentraciones de Plomo menores a 0.5 mg/L así como trazas de Zinc, Hierro, Cobre, Manganeso, Cadmio y Cromo [34]. También se reportan valores de grasas y aceites del orden de 18 y 4 mg/L para la entrada y la salida respectivamente.

Dentro de las características típicas del lixiviado presentadas en la Tabla 2, se evidencia la presencia de sulfatos; los cuales pueden producir inhibición del proceso metanogénico si se digiere un material con alto contenido en nitrógeno amoniacal, como es el caso de los lixiviados [35].

Con la concentración de Nitrógeno amoniacal del lixiviado a valores de pH tan elevados se alcanzan concentraciones de Amoníaco libre inhibitorias para los microorganismos. Aunque dentro de este estudio no se hizo una prueba fisicoquímica de Nitrógeno Amoniacal, si se encuentran concentraciones reportadas del orden de 782 afluyente mg/L y 708 mg/L efluente [35]. Los altos contenidos de Nitrógeno, presentes en los lixiviados jóvenes pueden llegar a generar problemas de toxicidad por amoníaco en los sistemas biológicos anaerobios para la remoción de DBO [32].

El factor de biodegradabilidad  $f_b$  se calculó de acuerdo con la Ec.12

$$\frac{DBO_5}{0,65 \times DQO} \quad [38] \quad \text{Ec.12}$$

Tabla 6. Factor de biodegradabilidad ( $f_d$ )

Factor de Biodegradabilidad ( $f_d$ )	Biodegradabilidad
0.80 – 0.90	Muy buena
0.70-0.80	Buena
0.60- 0.70	Media
0.40- 0.50	Media / baja
0.20-0.40	Muy baja
< 0.20	No Biodegradable

El factor de biodegradabilidad para la época de invierno fue de 1.05 y para verano fue de 0.54. Según la Tabla 6, el lixiviado en invierno presenta muy buena biodegradabilidad, este factor se pudo haber afectado por el efecto de dilución o porque el aporte de lixiviado joven fue mayor que el del lixiviado viejo o antiguo.

En verano se puede considerar al lixiviado con una biodegradabilidad media/ baja; por lo tanto si se utilizan tratamientos biológicos como lagunas de estabilización, filtros percoladores, biodigestores, lodos activados, filtros anaerobios entre otros, se tendrían eficiencias de tipo media/baja [39]. Lo expuesto anteriormente llevaría a pensar que se necesita de un tratamiento complementario debido a que existen dentro del lixiviado, sustancias inhibitorias como los metales pesados.

#### **6.1.8 Dureza Total y Dureza Cálcica**

En la época de invierno, la Dureza Total promedio a la entrada fué de 1406mg/L y 985mg/L para la salida. Para el verano se obtuvieron concentraciones de 5581mg/L a la entrada y 4483mg/L a la salida. Los porcentajes de remoción fueron de 30% en invierno y 20% en verano.

Los valores encontrados experimentalmente para invierno tanto para la entrada como para la salida son mayores que los de la base de datos de los monitoreos al lixiviado suministrada por parte de la CRC [34], con concentraciones de 1030 mg/L  $\text{CaCO}_3$  en la entrada y 873,6 mg/L  $\text{CaCO}_3$  a la salida para época de invierno. Caso contrario ocurre para época de verano donde las concentraciones son mayores que las registradas en dicho informe el cual muestra unos valores de 2319 mg/L  $\text{CaCO}_3$  a la entrada y 1857 mg/L a la salida para Junio de 2003. Se presentan en otros monitoreos valores muy inferiores respecto a los presentados en este estudio; de 15,9mg/L a la entrada y 9,72 mg/L a la salida con un porcentaje de remoción del 39% [3].

La dureza Cálcica presenta el mismo comportamiento de la Dureza Total con valores para la época de invierno de 1091 mg/L a la entrada y 789 mg/L a la salida y un porcentaje de remoción del 28%. En el informe del 2006, se presentan valores muy inferiores respecto a los presentados en este estudio con concentraciones de 12,34 mg/L a la entrada y 7,85 mg/L a la salida [3]. En verano se obtuvo valores de 1240 mg/L a la entrada y 699 mg/L a la salida con un porcentaje de remoción de 36% igual al reportado en dicho informe de monitoreo.

La Dureza total puede ser causada por las altas concentraciones de Hierro característica de los lixiviados así como el  $\text{Sr}^{2+}$  y el  $\text{Mn}^{2+}$  que generan aumentos en la

concentración de este parámetro físicoquímico [6]. El contenido de Hierro presente en la salida de la laguna se debe principalmente a la disolución de este elemento a raíz de la descomposición de los residuos sólidos metálicos o de la tinta de los empaques 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 [7]. Debido a lo anterior en verano aumenta la concentración de la Dureza por que existe una mayor degradación de la materia orgánica especialmente de los residuos que contienen Hierro.

En verano los valores a la entrada se incrementan con respecto a los de invierno; lo anterior se pudo haber presentado ya que el agua lluvia al caer sobre la tierra no es suficiente para disolver la cantidad de sólidos mientras que a una mayor temperatura, las velocidades de reacción se incrementan. Bajo condiciones de pH básicos como los que se presentaron en el análisis, hace que los carbonatos se precipiten con mayor facilidad dentro de la laguna.

## 7 ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO" EL OJITO"

En esta sección se presenta un análisis del comportamiento hidráulico de la laguna, para lo cual se tuvo en cuenta su diseño, funcionamiento y operación.

### 7.1 CAUDAL

En la Tabla 7, se muestran los datos obtenidos de caudal en L/s tanto para la entrada como para la salida de la laguna de estabilización de lixiviados en las dos épocas en que se efectuó la medición de dicho parámetro.

Tabla 7. Caudales de Lixiviados Medidos en Época de Invierno y Verano

Muestreo	Caudal L/s			
	invierno		verano	
	entrada	salida	entrada	salida
1	1,75	1.91	0.68	0,64
2	1,54	1.23	0.7	0,35
3	1,51	1.41	0.6	0,42
4	1,49	1.48	1.25	0,96
5	1,63	1.45	1.18	0,98
6	1,71	1.62	0.94	0,88
7	1,63	1.42		
<b>Promedio</b>	<b>1.61</b>	<b>1.52</b>	<b>0.89</b>	<b>0.71</b>
Desviación estándar	0.10	0.21	0.28	0.28

De acuerdo a la información obtenida del documento "Linea base ambiental del relleno sanitario El Ojito ", el sistema de tratamiento de los lixiviados se diseñó

para tratar un caudal máximo de 3L/s [4], sin embargo durante la realización del presente estudio se encontraba operando con un caudal para época de invierno de 1.61L/s en la entrada y 1.52L/s a la salida. En verano el caudal promedio de entrada fue de 0.89L/s y el de salida 0.71L/s.

El sistema de tratamiento de los lixiviados se diseñó bajo condiciones de estado estacionario, lo cual de acuerdo a este estudio no se cumple ya que los caudales a la salida no son los mismos que los de la entrada.

Los problemas de distribución de flujo y variación de caudal se pueden presentar en parte porque la distribución de la entrada no es tan eficiente [18].

Los datos cambian significativamente entre una época y otra lo cual era de esperarse ya que los aportes al caudal en época de invierno se deben principalmente a las fuertes lluvias que se presentaron durante los aforos.

Analizando los datos obtenidos se puede observar que dentro de la laguna se presentó una pérdida de caudal representado en el 5.6% y 20 % de los caudales de entrada, durante el período de invierno y verano respectivamente. Pérdidas que pueden ser debidas a la infiltración por el mal estado de la geomembrana que recubre la laguna donde se almacena el lixiviado. Esto ocurre como consecuencia de los métodos inadecuados para efectuar la limpieza a la laguna; pues no se cuenta con un sistema de extracción haciendo que los procesos de operación se interrumpían, afectando su hidráulica. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 6, donde se muestra claramente la limpieza por medio de herramientas rudimentarias.



Figura 6. Limpieza realizada a la laguna de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” en 2006.

También se pueden estar presentando pérdidas debidas a la evaporación. En invierno se presentó un rebosamiento a lo largo de la laguna; lo cual se muestra en

la Figura 7. Esto explica en parte el por qué los caudales en la salida son menores que los de la entrada.



Figura 7. Pérdidas de caudal en la laguna por rebosamiento en época de invierno

## 7.2 CLASIFICACIÓN DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS

Las lagunas de estabilización son estanques conformados perimetralmente por diques de tierra, con períodos de retención hidráulica de 1 – 40 días. La función básica de la laguna de estabilización es la de retener las aguas por un periodo de tiempo suficiente que permita la sedimentación de los sólidos, homogeneizar los efluentes antes de su disposición en un cuerpo de agua y oxidar la materia orgánica presente en los residuos [24]. Las lagunas anaerobias, por lo general tienen una profundidad de 2-5 m y reciben cargas orgánicas volumétricas mayores a 100 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> d [5].

Con el fin de establecer las condiciones por las cuales está funcionando la laguna y poderla clasificar según los procesos que se dan en su interior, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros hidráulicos presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Determinación del tiempo de retención hidráulico teórico (TRH) y carga orgánica volumétrica (COV) en la laguna

Época	DBO <sub>5</sub> mg/L O <sub>2</sub>	Caudal (Q) L/S	Volúmen (m <sup>3</sup> )	TRH (días)	COV (g DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> *día )
Invierno	1768	1.61	1715.6	12	143.35
Verano	2513	0.89	1715.6	22	112.63

El TRH, se expresa en unidades de tiempo, y es el caudal de la entrada por unidad de volumen efectivo del reactor, este tiene gran importancia ya que afecta la producción de lodos dentro del reactor [25].

El tiempo de retención de la laguna se calculó de acuerdo a la Ec.13

$$TRH = V / Q \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

TRH: tiempo de retención hidráulica (días)

V: volumen de la laguna ( m<sup>3</sup>)

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/día)

La carga orgánica volumétrica se calculó de acuerdo a la Ec.14

$$COV = \frac{DBO_5}{TRH} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

COV: carga orgánica volumétrica (g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>3</sup>\*día)

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)

TRH: tiempo de retención hidráulica (días)

La laguna de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” se clasifica como una laguna de estabilización tipo anaerobia debido a que las cargas orgánicas volumétricas en

las dos épocas estudiadas: invierno y verano, son mayores a 100g DBO<sub>5</sub> con periodos de retención de 12 a 24 días respectivamente.

Otro parámetro indicador de las condiciones anóxicas dentro del reactor es el potencial Redox que aunque no se midió en este estudio, si se reportan valores en otras investigaciones como es el caso del lixiviado generado en el basurero de Yucateco, México; donde se presenta conductividad eléctrica por encima de 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y pH básico (7 – 8.5). El lixiviado presenta un estado muy reducido, puesto de manifiesto por las medidas de potencial redox (–300 mV) [41]. El potencial redox indica las relaciones de oxígeno de los microorganismos vivos y puede ser utilizado para especificar el ambiente en que un microorganismo es capaz de generar energía y sintetizar nuevas células sin recurrir al oxígeno molecular. Los microorganismos aerobios necesitan valores redox positivos para crecer mientras que los anaerobios frecuentemente requieren valores redox negativos.

### 7.3 ASPECTOS HIDRODINÁMICOS

En el relleno sanitario “El Ojito” de la ciudad de Popayán, el sistema básico de recolección de Lixiviados funciona por gravedad de la siguiente manera:

La primera terraza de basura (cota 1770) tiene una capa permeable que recoge los lixiviados y los conduce hasta unos filtros para luego ser transportados a laguna de estabilización, esta capa permeable capta los lixiviados de las terrazas construidas hasta el nivel 1785 metros. Estos lixiviados almacenados en la laguna son recirculados por un sistema de bombeo y son esparcidos por aspersion en el relleno sanitario [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.].

Durante la visitas de inspección que se realizaron a la laguna con el objetivo de mirar su funcionamiento y operación, se observó que los lixiviados no estaban siendo recirculados de la manera como se especifica en el documento citado anteriormente, debido a que estos líquidos contaminantes estaban siendo recogidos desde la laguna por medio de una tubería de 4” hacia una cota mas alta donde eran descargados nuevamente al canal principal, afectando los procesos que se llevan a cabo por los microorganismos anaerobios dentro de la laguna.

Según el diseño que propuso inicialmente Collazos, la laguna debe tener una profundidad mínima de 2 metros, lo cual no se presentó en la realidad, ya que la profundidad promedio de la laguna es de 1,5m. Según Garcés [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.] la laguna de

estabilización para el tratamiento de los lixiviados es de forma irregular a nivel de la profundidad como se ilustra a continuación en la Figura 8.

**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

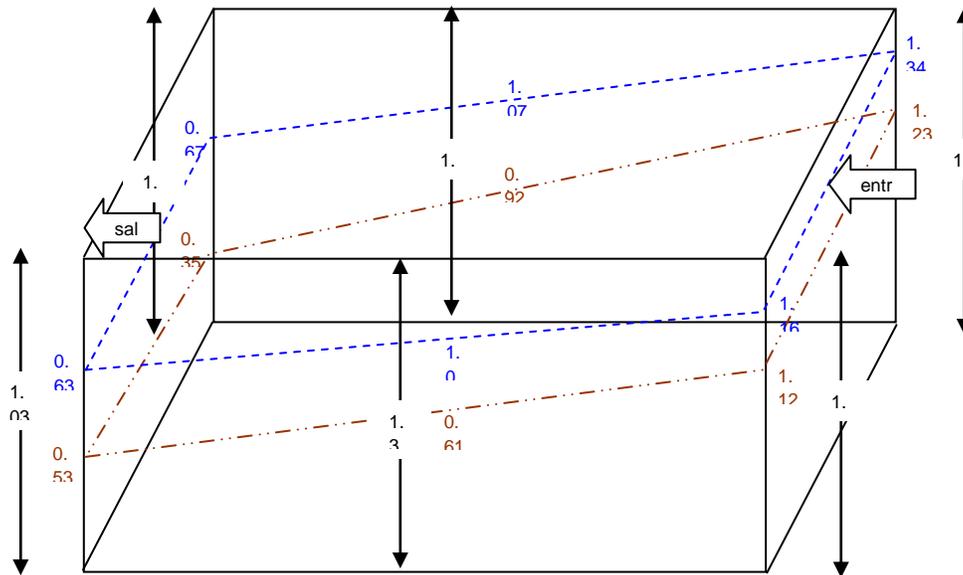


Figura 8. Dimensiones de la laguna de lixiviados relleno sanitario “El Ojito”

Una acumulación muy significativa de material inorgánico precipitado dentro de la laguna y en los lodos mismos del sistema anaerobio es un problema práctico para la operatividad de los sistemas. La acumulación de material precipitado termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, afectando negativamente los procesos de digestión de los lodos anaerobios [9].

De acuerdo a los parámetros de diseño, se puede concluir que los problemas hidráulicos están involucrados con aspectos como la mala distribución del caudal a la entrada debida al exceso de lodo y a las variaciones en el sistema de alimentación así como por la geometría de la laguna y la ubicación de la entrada con respecto a la de la salida, las cuales están en línea recta, pudiendo generar problemas de corto circuito.

El efecto del diseño sobre el funcionamiento del reactor es proporcional al exceso de lodo. Es decir, los problemas hidráulicos se disminuirían considerablemente si se optimizara la cantidad de lodo [32].

Aparte de las características geométricas de las lagunas y de las cargas orgánicas que se suministren, también influyen en la optimización de los procesos factores

ambientales tales como la variación de la temperatura, la evaporación, las precipitaciones, la velocidad y la dirección del viento; todo lo anterior afecta la hidrodinámica de estas unidades [9].

En la Figura 9, presentada a continuación se observa la formación de flujo preferencial



Figura 9. Formación de líneas preferenciales

#### 7.4 PRUEBA DE TRAZADORES

El estudio hidráulico de la laguna es una descripción casi exacta de lo que sucede a nivel de distribución de flujo en su interior, es necesario que a la hora de realizarlo exista continuidad en el proceso para garantizar que los resultados de la evaluación hidráulica, sean confiables y permitan conocer a ciencia cierta los factores hidrodinámicos que lo afectan [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]. Para efectuar el análisis hidráulico del sistema de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario “el Ojito” del municipio de Popayán se hizo una prueba en el laboratorio con el fin de determinar si el Cloruro de Sodio sirve como sustancia trazadora para los lixiviados de este relleno, dado que es una sustancia de fácil adquisición y de bajo costo.

La sustancia trazadora no debe reaccionar con el lixiviado. La selección de esta sustancia puede estar condicionada por la disponibilidad de equipo, personal capacitado y por su efecto adverso en la calidad del agua [12].

La prueba de trazadores realizada a escala de laboratorio, tuvo como objetivo primero buscar una unidad de medida que permitiera con facilidad medir la concentración de trazador a la salida, para lo cual se utilizó la conductividad con el fin de obtener las curvas de calibración presentadas en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Con esto se buscaba encontrar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  y el NaCl de una manera más sencilla en campo. Segundo determinar si se lograba una perturbación agregando Cloruro de Sodio dentro del reactor (recipiente plástico de 1400mL). Posteriormente se halló la concentración de sal (NaCl) y la del ion  $\text{Cl}^-$ . Esto se hizo midiendo la conductividad para lo cual se tomaron muestras a la entrada y salida del reactor cada minuto. Los datos experimentales se pueden apreciar en los Apéndices 9 y 10.

La cantidad de trazador a utilizar fue de 1.16 g diluidos en 10 mL de agua destilada mediante dosificación instantánea. La ecuación utilizada para determinar este valor se encuentra consignada en la metodología.

La Figura, muestra cómo el trazador logra perturbar el lixiviado, y luego va saliendo lentamente. Cuando la curva de entrada se intersecta con la de salida y tienden a traslaparse se da por terminada la prueba.

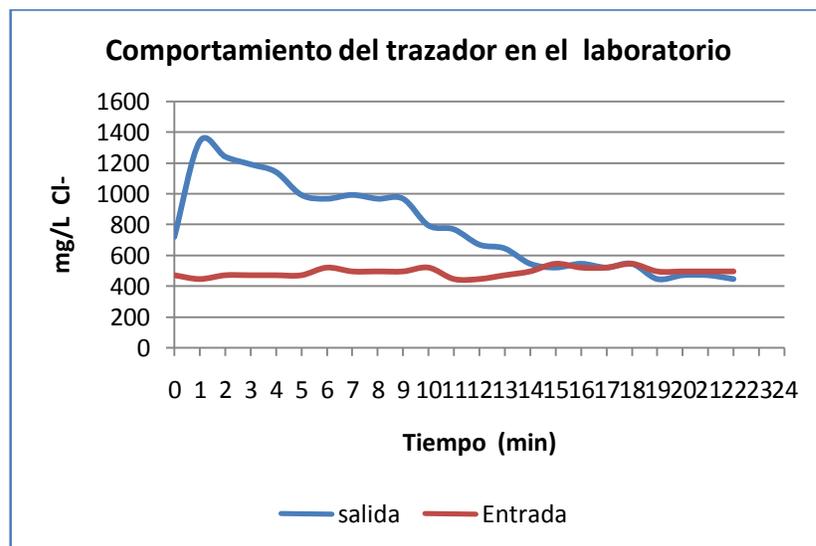


Figura 10. Curva de recuperación del trazador (NaCl)

El tiempo de retención teórico fue de 9 minutos para un volumen utilizado de 1400 mL y un caudal medido de  $2.52 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Se esperó que el tiempo de retención experimental fuera 3 veces el teórico es decir de 27 minutos, situación que no

ocurrió en nuestro caso según lo presentado en la Figura, en la cual se observa que éste sale a los 14.5 minutos.

Entre 27 y 14.5 el porcentaje de error fue de 54 %, valor que no es aceptable para el uso del NaCl como sustancia trazadora.

Se exploró la conductividad como una forma de medir los Cloruros mas rápidamente mediante la curva de calibración Conductividad vs concentración de Cloruros cuyos resultados son presentados en el Apéndice 12. Esta curva no se utilizó ya que la medida de la conductividad tendría que ser medida de una forma muy exacta; por que cualquier mínimo error en la medición puede aumentar considerablemente la concentración de Cloruros. Esto llevó a concluir que aunque el Cloruro de Sodio logra la perturbación haciéndose un control en la entrada y en la salida y tomando como unidad de medida los cloruros; no sirve como sustancia trazadora porque el error presentado en los tiempos de retención experimental no es aceptable.

#### **7.4.1 Consideraciones técnicas de la prueba de trazadores en campo**

Según Galvis citado en [12], el flujo debe ser constante durante la realización del ensayo. Esto no se puede garantizar en la laguna ya que los caudales cambian durante las épocas de invierno y verano. Además las cajas donde encuentran los vertederos utilizados en la laguna para controlar el caudal, presentan colmatación por sólidos.

Si la laguna contiene lodos depositados, puede producir interferencias, especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masas, por lo cual deberá ser previamente limpiado [9]. Otra de las consideraciones que hay que tener en cuenta es la concentración de sólidos dentro de la laguna. En Septiembre de 2006 se presentó una acumulación de sólidos de un 80% como se observa en la

Figura 8; motivo por el cual tuvo que efectuarse su limpieza. Aproximadamente un año después en Noviembre de 2007 la laguna presenta un 50% de colmatación lo que limita que se realice la prueba en campo.



Figura 8. Laguna de estabilización de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” 2006.

## **8 ALTERNATIVA PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO ACTUAL DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO”**

En todos los monitoreos así como en los registros fotográficos se evidenció que el aporte de sólidos que llega a la laguna es muy alto, lo que causa que ésta se colmate rápidamente. Las eficiencias de remoción para DBO y DQO no son las óptimas, fundamentalmente por problemas hidráulicos y las características del vertimiento cambiantes frecuentemente. Lo expuesto anteriormente hace que sea necesario construir un sedimentador convencional antes de la laguna. Esto ayudaría a disminuir la contaminación por posibles infiltraciones del lixiviado hacia la quebrada “El Ojito”.

### **8.1 SEDIMENTADOR CONVENCIONAL: MODELO HAZEN Y CAM**

El sedimentador remueve los sólidos en suspensión del efluente, por acción de la gravedad, los sedimentos se depositan en el fondo para su posterior remoción y las aguas tratadas, se conducen a la laguna de estabilización. Los lodos del sedimentador deben ser evacuados, secados y dispuestos en forma adecuada para evitar contaminación posterior del suelo y agua [37].

Para el diseño de este sedimentador, tiene una significación esencial el área superficial horizontal, mientras que el volumen en lo que concierne al fondo o

profundidad de los tanques solo tiene importancia en dos situaciones: En el diseño de la región de espesamiento y en el diseño de sedimentadores flexibles en sedimentación no estacionaria [39].

## 8.2 DIMENSIONAMIENTO

### 8.2.1 Velocidad de Sedimentación

La velocidad de sedimentación promedio a nivel experimental fue de 0,717 cm/s (25m/h), lo cual hace que el tipo de lodo que está llegando a la laguna se clasifique como granular. Dentro de los reactores anaerobios, existen gránulos de lodo, con ciertas propiedades de sedimentación que permiten una mezcla mecánica por las mismas fuerzas de flujo; los procesos de mezcla inducen a la formación de lodo granular, que presenta velocidades altas de sedimentación (2–90 m/h), fácil

asociación de microorganismos para obtener niveles apropiados de sustrato, capacidad de separar la fase líquida y gaseosa por tener altas velocidades [25].

A una  $V_s$  de 0.717 cm/s, se sedimentan las partículas que se requiere remover del lixiviado.

### 8.2.2 Caudal

De acuerdo a los aforos de caudal realizados en este estudio, se tomó como caudal de diseño 1.61 L/s, que corresponde al valor promedio encontrado para época de invierno, con un límite inferior de 0.41L/s y un límite superior de 1.70 L/s, según lo presentado en el Apéndice 1. Datos de invierno y verano analizados estadísticamente.

### 8.2.3 Área superficial

De acuerdo a la

$$A_{sup} = \frac{Q}{v_s} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$$A_{sup} = \text{área superficial (m}^2\text{)}$$
$$Q = \text{Caudal (m}^3\text{/s)}$$

$V_s$  = velocidad de sedimentación (0.00717 m/s)

Se hace el cálculo del área superficial de acuerdo a la  $A_{sup} = \frac{Q}{V_s}$  Ec. 12, para un Q medio de  $0.00161\text{m}^3$  y un Q máximo de  $0.00170\text{m}^3/\text{s}$ .

Para Q med se tiene que:

$$A_{sup} = 0.22\text{m}^2$$

Para Qmax:

$$A_{sup} = 0.24\text{m}^2$$

Se toma el área mayor, es decir que para una  $V_s = 0,717 \text{ cm/s}$  se requiere un área mínima de  $0,24\text{m}^2$

#### 8.2.4 Geometría de la estructura

Asumimos una relación Largo: Ancho de 3:1 debido a la disponibilidad del terreno

$$\text{Ancho} = \sqrt{0.24/3} = 0.28 \text{ m} \approx 0.3 \text{ m}$$

$$\text{Largo} = 3 \times 0.3 = 0.9 \text{ m}$$

#### 8.2.5 Volúmen requerido

Para efectos de diseño se asume un tiempo de retención (TRH) de 1 hora

$$Vol = Q_{max} \times TRH \quad \text{Ec. 16}$$

Remplazando en la Ec.16 se tiene un volumen requerido de  $6.12 \text{ m}^3$

#### 8.2.6 Altura de sedimentador (H)

$$H = \frac{VOL}{A_{sup}} \quad \text{Ec. 17}$$

De la Ec.17. se tiene que la altura es de 25.5 m

Para efectos de construcción, operación y mantenimiento el largo, ancho y la profundidad no son viables, por lo que se debe dimensionar un sedimentador que garantice que todas las partículas que tengan una  $V_s = 0.717$  cm/s o mayor, se sedimenten en un 100%. Por lo tanto como no hay una metodología específica para el diseño de sedimentadores convencionales para lixiviados utilizaremos la metodología del RAS [17], ya que estos afluentes tienen un compartamiento similar al del agua residual.

Los sólidos sedimentables se han clasificado de acuerdo a su velocidad de sedimentación como de tipo granular en los que se encuentran los limos y las arcillas, presentes también en aguas residuales.

### 8.3 METODOLOGÍA PROPUESTA POR EL RAS

Cargas de desbordamiento superficial ( $C_s$ ) mínimas recomendadas

$Q_{\text{medio}}$ :  $33 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$ .

$Q_{\text{pico}}$ :  $57 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$ .

#### 8.3.1 Área Superficial (A)

$$A_{\text{media}} = \frac{Q_{\text{med}}}{C_s} \quad \text{Ec. 13}$$

Para caudal medio utilizando la Ec. 13 se tiene un área superficial de  $4.21 \text{ m}^2$

Para caudal pico usando la ecuación Ec. 13 el área superficial es de  $2.57 \text{ m}^2$

Se decide adoptar el área mayor de  $4.21 \text{ m}^2$ .

#### 8.3.2 Geometría de la estructura

Se calcula el largo y el ancho que debe tener el sedimentador

Relación Largo: Ancho de 3:1

Ancho \* 3 Ancho =  $4.21 \text{ m}^2$ .

$$\text{Ancho} = \sqrt{\frac{4.21}{3}} = 1.18\text{m} \cong 1.2\text{m}$$

Largo = 1.2 m \* 3 = 3.6 m

Se adoptó un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 1 h

### 8.3.3 Volúmen requerido.

$$\text{Vol} = Q_{\text{pico}} \times \text{TRH} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

Vol: volumen requerido (m<sup>3</sup>)

Q<sub>pico</sub>: caudal pico (m<sup>3</sup>/s)

TRH: tiempo de retención hidráulico (s)

Usando la Ec. 14 se tiene un volumen de 6.12 m<sup>3</sup>

### 8.3.4 Profundidad

$$H = \frac{\text{Vol}}{A_{\text{sup}}} \quad \text{Ec. 20}$$

Utilizando la Ec. la profundidad requerida es de 1.5 m

Finalmente chequeamos TRH para caudal medio

De la ecuación 20 se reemplaza el Q<sub>pico</sub> por Q<sub>medio</sub> con TRH = 1.1h para obtener la ecuación de Velocidad transversal (V<sub>T</sub>).

$$V_T = \frac{Q_{\text{max}}}{\text{Largo} \times \text{Ancho}} \quad \text{Ec. 21}$$

De acuerdo a la Ec. se presenta una V<sub>T</sub> = 0.0394 cm/s.

Como el lixiviado se asemeja a el agua residual utilizamos la  $V_H = \frac{8 \times K \times (S-1) \times g \times d}{f}$

Ec. Ec. 22 para encontrar la velocidad de arrastre (V<sub>H</sub>)

$$V_H = \frac{8 \times K \times (S-1) \times g \times d}{f} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

K: coeficiente de cohesión material arrastrado (0.06)

S: gravedad especifica de la partícula (1.4)

g: constante de aceleración ( $980 \text{ cm/s}^2$ )  
d: diámetro de partícula ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ )  
f: coeficiente de fricción hidráulica (Darcy-waisbach) (0.03)

Reemplazando en la Ec. 22. se tiene una  $V_H$  de  $1.7 \text{ cm/s}$

$V_H > V_{\text{transversal}}$  , no hay riesgo que las partículas se suspendan por la velocidad transversal.

Con este dimensionamiento se está garantizando que la gran mayoría de los sólidos responsables de la colmatación de la laguna queden en el sedimentador, mejorando los procesos hidráulicos y fisicoquímicos dentro de la misma.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a la distribución de la contaminación, el pH no sufre una alteración significativa por parte de los procesos que se llevan a cabo dentro de la laguna concediendo una alta capacidad buffer. Caso contrario ocurre para la Alcalinidad donde el cambio entre una época y otra si afecta la concentración de este parámetro. Bajo condiciones de pH básicos como los que se presentaron en el análisis fisicoquímico hace que los carbonatos se precipiten más fácilmente dentro de esta unidad de tratamiento de los lixiviados.

En verano aumenta la concentración de la Dureza porque existe una mayor degradación de la materia orgánica especialmente de los residuos que contienen Hierro.

El comportamiento de los sólidos es muy variable debido a que el lixiviado presenta una composición heterogénea, además que estos líquidos contaminantes de tipo joven se mezclan con los de tipo antiguo dentro de una misma celda.

La DQO fue mayor en época de invierno debido a la inexistencia de material de cobertura quedando los residuos sólidos expuestos a las precipitaciones.

La DBO fue mayor en verano. Los porcentajes de remoción fueron afectados por la presencia de Nitrógeno Amoniacal y metales pesados principalmente el Hierro que aunque no se hizo su caracterización en este estudio si se encontraron datos en el informe de monitoreo del lixiviado de 2006.

Con respecto a la hidráulica, la laguna no está siendo bien operada de acuerdo a lo propuesto por Collazos que recomienda una profundidad de 2.5m, lo cual no se cumple porque la laguna presentó en promedio una profundidad de 1.6 m. Se presentan inconvenientes con el mantenimiento y operación de la laguna, pues no se garantizan períodos específicos de limpieza para la extracción de los lodos, pudiéndose interrumpir los procesos dentro de ella en cualquier momento. Además no se está efectuando la recirculación por bombeo como se planteó en la elaboración de la línea base ambiental para el relleno sanitario “El Ojito” por parte de la alcaldía del municipio de Popayán.

El caudal aumentó en invierno debido a las precipitaciones. Las pérdidas de caudal en la entrada fueron principalmente debidas a la infiltración por el mal estado de la geomembrana que recubre la laguna.

La ubicación de la entrada con respecto a la salida se encuentran en línea recta, pudiendo generar problemas de cortos circuitos.

De acuerdo a los Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) y la Carga Orgánica Volumétrica (COV), la laguna se clasificó como una laguna de estabilización de tipo anaerobia.

La prueba de trazadores en el laboratorio se hizo mediante NaCl donde se concluyó que esta sustancia trazadora alcanza la perturbación pero no sirve como sustancia trazadora ya que el tiempo de retención experiemetal no cumple con lo esperado. Esta prueba no se pudo realizar en campo debido a que se necesita continuidad en el proceso para garantizar que los resultados de la evaluación hidráulica sean confiables.

Según el ensayo de sedimentabilidad realizado mediante el cono imhoff se obtuvieron velocidades de sedimentación de 0.717 cm/s , lo que permitió clasificar al lodo que ingresa a la laguna como de tipo granular y poder dimensionar el sedimentador convencional de acuerdo a la metodología propuesta por el RAS ya que este lodo está constituido principalmente por arcillas y limos presentes también en las aguas residuales.

## **9.2 RECOMENDACIONES**

Debido a las altas concentraciones de sólidos Totales que están llegando a la laguna se sugiere construir un sedimentador convencional antes de ésta, con el objetivo de incrementar la vida útil de la laguna y hacer que haya menor acumulación de sólidos en algunas zonas lo que beneficiaría la hidráulica de la misma, minimizando las zonas muertas.

Se recomienda aumentar la profundidad de la laguna a 2.5 m, así como cambiar la ubicación de la entrada con respecto a la salida para mejorar los procesos hidrodinámicos dentro de la misma.

Es recomendable hacer limpiezas a la laguna por medio de bombeo antes de que ésta llegue a su estado de colmatación. Además, se necesita efectuar una limpieza de los canales perimetrales que recogen el lixiviado, evitando obstrucciones en ellos.

Se sugiere que se separen los lixiviados viejos de los jóvenes en celdas diferentes con el objetivo de optimizar su tratamiento.

Es importante hacer aforos diarios de caudal puesto que no se encontraron registros por parte de la administración del relleno.

Se recomienda seguir con los monitoreos de los lixiviados con el fin de analizar su comportamiento a través del tiempo, además de su influencia e impacto en la quebrada "El Ojito", aledaña al relleno sanitario.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COLLAZOS, C y VEGA. Tratabilidad de los lixiviados en el relleno Doña Juana en un reactor UASB. Universidad de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá. [www.ing.unal.edu.co/pdiguales/libro/tratabilidad.pdf](http://www.ing.unal.edu.co/pdiguales/libro/tratabilidad.pdf). Visitado el 14 de Marzo de 2007.
2. Tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. [www.revistaing.uniandes.edu.co](http://www.revistaing.uniandes.edu.co). Visitado el 15 de Marzo de 2007.
3. GARCÉS, Leticia. Monitoreo de Agua y Aire del relleno sanitario “El Ojito”. Popayán, 2006. 15, 36 p.
4. SEPÚLVEDA, Margarita. Elaboración de la línea ambiental del relleno sanitario “El Ojito”, 2003. 4,7 p.
5. ROMERO, Jairo. Acuitratamiento por lagunas de estabilización. 3 ed. Bogotá. Editorial: Escuela colombiana de Ingeniería, 1998. 55-70 p.
6. COLLAZOS, Héctor. Manual de monitoreo del relleno sanitario “El Ojito”. Popayán. 2000. 34 p.
7. PINTO, Nury. Estudio preliminar de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito”. Popayán. 2006, 56 p. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Programa de Química.
8. MALDONADO, Juan. Guía Ambiental para rellenos sanitarios. Fotolito América LTDA. Bogotá, 2002. 55p.
9. PEÑA, Miguel. Advanced Primary treatment of domestic wastewater in tropical countries: Development of high- rate anaerobic ponds. Cali, 2000. 300-306 p. Trabajo de grado (Doctorado en Ingeniería Química). Universidad del Valle. Departamento de Química.
10. SAWYER, Clair. Química para Ingeniería Ambiental. Mc Graw Hill. Cuarta Edición. Bogotá, 2000. 508 p.

11. Mara D. Tratamiento de agua residual doméstica en países en vías de Desarrollo. En: Water Research. Vol. 21, No. 9. Londres, Reino Unido. 2002, 106-107 p.
12. GALVIS, Gerardo y PEREZ José. Manual de Instrucción "Curso evaluación de plantas de tratamiento de aguas ". Popayán, Septiembre 1987. 72-90.
13. ROMERO, Jairo. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño.3 ed. Bogotá. Editorial: Escuela Colombiana de ingeniería, 2004. 54, 69 p.
14. COLLAZOS, Héctor. Saneamiento del botadero de basura "El Ojito". Secretaría de Infraestructura y mantenimiento vial.2000, 4p.
15. CAMAYO, Reynel. Presentación del Plan de manejo del relleno sanitario "El Ojito".2005.[www.uniatonoma.edu.co/\\_oldweb/docentes/reinelc/relleno%2520sanitarioppt](http://www.uniatonoma.edu.co/_oldweb/docentes/reinelc/relleno%2520sanitarioppt). Visitado el 10 de Agosto de 2007.
16. <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/mexico/01147e20.pdf>. Visitado el 11 de Agosto de 2008.
17. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS. Bogotá, 2000.
18. [www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/inhibidores.pdf+sustancias+inhibitorias+en+le+proceso+anaerobio&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=co](http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/inhibidores.pdf+sustancias+inhibitorias+en+le+proceso+anaerobio&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=co). Visitado el 2 de Septiembre de 2008.
19. <http://expoandes.uniandes.edu.co/php/paginaHistorica.php?accion=verGrupo&idGrupoHistorico=540&letra=>. Visitado el 4 de Septiembre de 2008.
20. PINEDA, S. Manejo y disposición de residuos sólidos. Bogotá: EditorialPanamericana, 1998. 153 p.
21. <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1879>. Mezcla con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. Visitado el 20 de Agosto de 2008.

22. CHAVARRIA, Cristian; CISTERNA, Pedro y SUAZO, Álvaro. Estudio de tratabilidad de lixiviados de rellenos sanitarios, aplicando un tratamiento biológico. XV congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Chile, 2003. [www.bvsade.paho.org/bvsaidis/estudio20.pdf](http://www.bvsade.paho.org/bvsaidis/estudio20.pdf). Visitado el 11 de Agosto de 2008.
23. [http://www.ciudadblanca.com/gama/actualidad/formato.php?id\\_=56&&id\\_categoria=4&&id\\_tipo=1&&act=4](http://www.ciudadblanca.com/gama/actualidad/formato.php?id_=56&&id_categoria=4&&id_tipo=1&&act=4). Visitado el 15 de Agosto de 2008.
24. [http://www1.minambiente.gov.co/prensa/publicaciones/guias\\_ambientales/2\\_sector\\_en\\_energetico/Guia%20ambiental%20para%20proyectos%20carboel%E9ctricos/contenid/medidas2.htm](http://www1.minambiente.gov.co/prensa/publicaciones/guias_ambientales/2_sector_en_energetico/Guia%20ambiental%20para%20proyectos%20carboel%E9ctricos/contenid/medidas2.htm) Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas aceitosas a continuación de los separadores. Visitado el 15 de Agosto de 2008.
25. Manejo de Lixiviados por tratamiento biológico anaerobio en el relleno sanitario La Esmeralda. <http://www.digital.unal.edu.co/dspace/handle/123456789/427>. Visitado el 16 de Agosto de 2008.
26. TORRES, Patricia; RODRIGUEZ, Yenny; BARBA, Luz Edith; MORÁN, Adriana y NARVÁEZ, Jorge. Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. [http://ciruelo.Uninorte.edu.co/pdf/ingenieria\\_desarrollo/18/4\\_Tratamiento%20Anaerobio.pdf](http://ciruelo.Uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/18/4_Tratamiento%20Anaerobio.pdf). Visitado el 17 de Agosto de 2008.
27. <http://www.agroindustrialamc.com/files/Proyecto%20para%20el%20Tratamiento%20de%20Lixiviados%20en%20Rellenos%20Sanitarios.htm>. Visitado el 17 de Agosto de 2008.
28. GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de Lixiviados de rellenos sanitarios. 2001. <http://revistaing.uniandes.edu.co/index.php?idr=20&ids=1&ida=219&ri=07426da1c75fb01cd51e7489b4f23742>. 47-51 p. Visitado el 16 de Agosto de 2008.
29. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Waste water. American public health association. 20 ed. USA: APHA, 1998.
30. GRUPO DE ASEO MUNICIPAL. Estudios geofísicos y Complementarios para el saneamiento y conversión a relleno sanitario del vertedero de residuos sólidos "El Ojito". SAYA Ingeniería y Geoambiente Ltda. Informe EG 678. Cali, 2003. 6 p.
31. TCHOBANOUGLOUS, George; THEISEN, Hilary y VIGIL, Samuel. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Vol 1: Editorial: Mc Graw Hill, 1998. 500 p.

32. HULSHOFF L, LETTINGA G. Process design for various type of waste water. Department of Environmental Technology. Wageningen Agricultural University. 1988. 347 p.
33. GARCÉS, Leticia. Informe de Monitoreo del relleno sanitario El Ojito. Popayán, 2007. 18 p.
34. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Informe de monitoreo del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Ojito". Popayán: CRC, 2007. 3p.
35. GALLERT, C; BAUER, S y WINTER, J. Effect of ammonia on the anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population. Applied Microbiology and Biotechnology. Vol 50, 1998. 495-501 p.
36. <http://209.85.165.104/search?q=www.Cepis.org.pe/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0080.pdf+carga+org%c3%A1nica>. Visitado el 10 de Agosto de 2008.
37. BUENO, J; SASTRE, H y LAVIN, G. Contaminación e Ingeniería Ambiental. Editorial: FICYT. 3 ed. 1999, 331, 351 p.
38. SALAZAR, Viviana y SÁNCHEZ, Adriana. Evaluación de inóculos para tratamiento anaeróbico del efluente de un sedimentador de almidón de yuca. Popayán, 2007, 18p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Programa de ingeniería Ambiental.
39. CHAUX, Cesar y VERGARA, Uriel. Optimización de la sedimentación del subproducto "mancha" en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca. Popayán, 2005. 50, 57, 150 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad del Cauca. Facultad de ingeniería Civil. Programa de ingeniería Ambiental.
40. LIMA, Julio. Ecología microbiana de los alimentos. Potencial de óxido reducción. <http://geocities.com/ohcop/poteoxre.html>. Visitado el 3 de Septiembre de 2008.
41. GONZÁLEZ, Roger; RODRIGUEZ, Ramiro y CORONADO, Victor. Atenuación Natural del acuífero Yucateco. En Revista internacional de contaminación ambiental. ISSN 0188-4999. Marzo de 2008.

## APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de invierno y verano analizados estadísticamente

MUESTREO EN EL PERIODO DE INVIERNO EN EL RELLENO SANITARIO "EL OJITO" DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN														
Propiedad		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M	S	CV	L.C. (95%), 6 GL		Qc = 0,59
Potencial de Hidrógeno (pH)	E	8,74	8,35	7,76	7,82	8,07	8,1	7,83	8,10	0.35	4,34	7,77	8,42	
	S	8,86	8,27	8,05	7,86	7,68	8	7,85	8.08	0.39	4,83	7,72	8,44	
DQO (mg/L)	E	24655	25075	31796	8271	33057	13732	5751	20334	11077	54	10077	30591	0,09
	S	9531	9952		2390	8271	1130	4490	5961	3802	69	1972	9949	0,14
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	E	936	832	624	2184	2392	1352	4056	1768	1214	54	644	2892	0,12
	S	520	208	312	936	1040	832		641	344	41	280	1003	0,13
Alcalinidad (mg/L)	E	2333	2667	2667	1667	1000	1000		1889	779	27	1071	2707	
	S	1000	1000	1000	667	1333	667		945	251	39	681	1208	
Sólidos Totales (mg/L)	E	13238	6106	5410	7245	5117	5861	9070	7435	2890	27	4760	10111	
	S	6824	6525	3193	4501	4167	5148	6714	5296	1426	86	3975	6617	
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	E	1072	456	257	296	488	491	1994	722	621	126	147	1298	
	S	1994		166	148	33,33	243	1184	628	790	68	-201	1360	
Sólidos Suspendedos	E		143	142	325	166	116	532	238	163	48	67	408	

**MUESTREO EN EL PERIODO DE INVIERNO EN EL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M	S	CV	L.C. (95%), 6 GL		Qc = 0,59
Totales (mg/L)	S		158	81	117	113	102	266	140	67	91	70	210	
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	E		26,66	6,66	42,66	12	2,66		18	16	91	-2	39	
	S		31.66	4	26,66	2,66	1,33	32	13	14	107	0	27	
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	1493	1493	746	1493	1493	1120	2000	1406	387	28	1047	1764	
	S	1120	1120	373	1120	746	746	1667	985	410	42	605	1364	
Dureza Cálcica(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	1120	1120	1120	746	1120	746	1667	1091	309	28	806	1377	
	S	746	746	746	746	746		1000	789	103	13	673	897	
Sólidos Disueltos (mg/L)	E	9396	5962	5267	6919	4950	5745	8538	6683	1696	25	5112	8253	
	S	1694	6367	3111	4384	21	5045	6448	3867	2403	62	1642	6093	
Caudal (L/s)	E	1,75	1,54	1,51	1,49	1,63	1,71	1,63	1,61	0.10	6,20	1.52	1.70	
	S	1,91	1,23	1,41	1,48	1,45	1,62	1,42	1,50	0.21	14,19	1.31	1.70	

**MUESTREO EN EL PERIODO DE VERANO EN EL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M	S	CV	LC (95%) %GL	Qc = 0,64
-----------	--	----	----	----	----	----	----	---	---	----	--------------	-----------

**MUESTREO EN EL PERIODO DE VERANO EN EL RELLENO SANITARIO "EL OJITO" DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

<b>Propiedad</b>		<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M</b>	<b>S</b>	<b>CV</b>	<b>LC (95%) %GL</b>		<b>Qc = 0,64</b>
Potencial de Hidrógeno (pH)	E	8,24	8,18	7,83	8,92	9,92	8,7	8,63	0,74	8,59	7,85	9,41	
	S	8,15	8,14	6,28	8,74	8,74	8,72	8,13	0,95	11,69	7,13	9,13	
DQO mg/L	E	8691	9952	11632	2810	2390	7851	7221	3802	53	3232	11210	0,18
	S	7431	6591	4910	1130	289	5331	4280	2920	68	1217	7344	0,11
DBO <sub>5</sub> mg/L	E	1456	2808	4056	1248	1352	4160	2513	1360	54	1087	3940	0,44
	S	104	1352	1144	1976	1560	1560	1283	640	50	611	1954	0,56
Alcalinidad(mg/L)	E	7333	7667	7667	1333	1333	1667	4500	3352	74	983	8017	
	S	5333	6333	5667	667	1000	1333	3389	2645	78	614	6164	
Sólidos Totales(mg/L)	E	8251	11662	12066	5884	7008	8254	8854	2496	28	6235	11473	
	S	6401	6410	6650	4412	4542	5296	5619	1002	18	4567	6670	
Sólidos Totales Volátiles(mg/L)	E	793	5944	5400	2210	2582	3400	3388	1967	58	1324	5452	
	S	346	2824	2718	1758	1802	2406	1976	915	46	1016	2936	
Sólidos Suspendidos Totales(mg/L)	E	391	390	374	164	194	300	302	102	34	196	409	
	S	136	168	152	70	130	228	147	52	35	93	202	
Sólidos suspendidos Volátiles (mg/L)	E	198	224	244	122	138	202	188	48	26	138	239	

**MUESTREO EN EL PERIODO DE VERANO EN EL RELLENO SANITARIO "EL OJITO" DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M	S	CV	LC (95%) %GL		Qc = 0,64
	S	98	114	116	56	94	156	106	33	31	71	140	
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E		5599	5973	5000	5333	6000	5581	427	8	5051	6112	
	S		5226	4853	4000	4333	4000	4483	543	12	3808	5158	
Dureza Cálcida (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	1493	746	1866	1333	1000	1000	1240	406	33	814	1666	
	S	746		746	667	667	666	699	44	6	644	753	
Sólidos Disueltos (mg/L)	E	7860	11272	11692	5720	6814	7954	8552	2414	28	6019	11085	
	S	6265	6242	6498	4342	4412	5068	5471	984	18	4439	6503	
Caudal (L/s)	E	0,68	0,7	0,6	1,25	1,18	0,94	0,89	0,28	30	0,60	1,18	
	S	0,64	0,35	0,42	0,96	0,98	0,88	0,71	0,28	39	0,41	1,00	

Apéndice 2. Análisis Comparativo de entradas y salidas en los periodos de Verano- Invierno

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LOS PERIODOS DE VERANO – INVIERNO DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

**DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	$S_p^2$	$S_p$	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	$t_0$	Grados de libertad para $t_{\infty/2}$	$t_{\infty/2}$	Observación
Potencial de Hidrógeno (pH)	E Invierno	6	7	8,10	0,35	4,50	2,12	0,31	0,56	-0,45	11	2,20	
	E Verano	5	6	8.63	0,74								
	S Invierno	6	7	8,08	0,39	4,78	2,19	0,31	0,56	-0,04	11	2,20	
	S Verano	5	6	8,13	0,95								
DQO (mg/L)	E Invierno	6	7	20334	11077	5,99	2,45	0,31	0,56	-0,26	11	2,20	
	E Verano	5	6	7221	3802								
	S Invierno	6	7	5961	3802	6,94	2,64	0,31	0,56	-0,46	11	2,20	
	S Verano	5	6	4280	2920								
DBO <sub>5</sub> ( mg/L)	E Invierno	6	7	1768	1214	115490735	10746	0,31	0,56	2,19	11	2,20	
	E Verano	5	6	2513	1360								
	S Invierno	5	6	1283	640								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LOS PERIODOS DE VERANO – INVIERNO DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

**DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	t <sub>o</sub>	Grados de libertad para t <sub>∞/2</sub>	t <sub>∞/2</sub>	Observación
	S Verano	5	6	641	344	19147525	4375	0,33	0,58	0,67	10	2,228	
Alcalinidad(mg/L)	E Invierno	6	7	1889	779	2584770	1607	0,31	0,56	-0,83	11	2,201	
	E Verano	5	6	4500	3352	440155	663	0,33	0,58	-1,67	10	2,228	
	S Invierno	5	6	945	251								
	S Verano	5	6	3389	2645								
Sólidos Totales(mg/L)	E Invierno	5	6	7435	2890	9868164	3141	0,33	0,58	-1,44	10	2,228	
	E Verano	5	6	8854	2496								
	S Invierno	5	6	5296	1426	5882251	2425	0,33	0,58	-1,75	10	2,228	
	S Verano	5	6	5619	1002								
Sólidos Totales (mg/L) Volátiles	E Invierno	6	7	722	621	11607369	3406	0,31	0,56	-0,75	11	2,201	
	E Verano	5	6	3388	1967								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LOS PERIODOS DE VERANO – INVIERNO DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

**DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	to	Grados de libertad para $t_{\infty/2}$	$t_{\infty/2}$	Observación
	S Invierno	6	7	628	790	2461307	1568	0,31	0,56	-0,37	11	2,20	
	S Verano	5	6	1976	915								
Sólidos Suspendidos Totales(mg/L)	En Invierno	6	7	238	163	3095365	1759	0,31	0,56	-2,72	11	2,20	se rechaza la hipótesis
	E Verano	5	6	302	102								
	S Invierno	5	6	140	67	1217845	1103	0,33	0,58	-2,12	10	2,22	se rechaza la hipótesis
	S Verano	5	6	147	52								
Sólidos Suspendidos Volátiles(mg/L)	E Invierno	5	6	18	16	30631	175	0,33	0,58	-0,64	10	2,22	8
	E Verano	5	6	188	48								
	S Invierno	5	6	13	14	5941	77,08	0,33	0,58	-0,17	10	2,22	8
	S Verano	5	6	106	33								
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E Invierno	4	5	1406	387	2538	50,39	0,37	0,61	-5,57	9	2,26	se rechaza la hipótesis
	E Verano	5	6	1240	406								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LOS PERIODOS DE VERANO – INVIERNO DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

**DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	to	Grados de libertad para t <sub>∞/2</sub>	t <sub>∞/2</sub>	Observación	
	S Invierno	5	6	985	410	1068	32,68	0,33	0,58	-4,90	10	2,228	se rechaza la hipótesis	
	S Verano	4	5	4483	543									
Dureza Cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E Invierno	6	7	1091	309	232685	482	0,34	0,59	-	14,78	10	2,228	se rechaza la hipótesis
	E Verano	5	6	1240	406									
	S Invierno	6	7	789	103	312337	558	0,34	0,59	-	10,69	10	2,228	se rechaza la hipótesis
	S Verano	4	5	699	44									
Sólidos Disueltos (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E Invierno	6	7	6683	1696	199440	446	0,31	0,56	-0,60	11	2,201		
	E Verano	5	6	8552	2414									
	S Invierno	5	6	3867	2403	10196	100	0,37	0,61	1,48	9	2,262		
	S Verano	5	6	5471	984									
Caudal (L/s)	En Invierno	6	7	1,61	010	6627928	2574	0,31	0,56	-1,30	11	2,201		
	Entrada	5	6	0,89	0,28									

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LOS PERIODOS DE VERANO – INVIERNO DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

**DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	$S_p^2$	$S_p$	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	$t_0$	Grados de libertad para $t_{\infty/2}$	$t_{\infty/2}$	Observación
	Verano												
	S Invierno	6	7	1,50	0,21	5641064	2375	0,31	0,56	-1,21	11	2,20	
	S Verano	5	6	0,71	0,28								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN VERANO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Número de muestras	Promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n_1 + 1/n_2)$	$(1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}$	t <sub>o</sub>	grados de libertad para t <sub>∞/2</sub>	t <sub>∞/2</sub>	observación
Potencial de Hidrógeno (pH)	E	5	6	8,63	0,74	5,21	2,28	0,33	0,58	0,38	10	2,218	
	S	5	6	8,13	0,95								
DQO (mg/L)	E	5	6	7221	0,58	4,82	2,20	0,33	0,58	-0,07	10	2,218	
	S	5	6	4280	0,80								
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	E	5	6	2513	3802	19148365	4376	0,33	0,58	1,16	10	2,218	
	S	5	6	1283	2920								
Alcalinidad (mg/L)	E	5	6	4500	1360	1882288	1372	0,33	0,58	1,55	10	2,218	
	S	5	6	3389	640								
Sólidos Totales (mg/L)	E	5	6	8854	3352	15191776	3898	0,33	0,58	0,49	10	2,218	
	S	5	6	5619	2645								
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	E	5	6	3388	2496	6029261	2455	0,33	0,58	2,28	10	2,218	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	1976	1002								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN VERANO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Número de muestras	Promedio	Desviación Estándar	$S_p^2$	$S_p$	$(1/n1 + 1/n2)$	$(1/n1 + 1/n2) / 2$	$t_0$	grados de libertad para $t_{\infty/2}$	$t_{\infty/2}$	observación
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	E	5	6	302	1967	3923033	1981	0,33	0,58	1,24	10	2,218	
	S	5	6	147	915								
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	E	5	6	188	102	10842	104	0,33	0,58	2,58	10	2,218	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	106	52								
Dureza Total ( mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	5	6	5581	48	2830	53	0,33	0,58	2,68	10	2,218	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	4483	33								
Dureza Cálrica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	4	5	1240	427	381635	618	0,40	0,63	2,81	8	2,306	se rechaza la hipótesis
	S	4	5	699	543								
Sólidos Disueltos(mg/L)	E	5	6	8552	406	138645	372	0,37	0,61	2,40	9	2,262	se rechaza la hipótesis
	S	4	5	5471	44								
Caudal (L/s)	E	5	6	0,89	2.414	5662249	2380	0,33	0,58	2,24	10	2,228	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	0,71	984								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN INVIERNO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Número de muestras	Promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n1 + 1/n2)$	$(1/n1 + 1/n2)$ ½	to	grados de libertad para t <sub>∞</sub> /2	t <sub>∞</sub> /2	observación
Potencial de Hidrógeno (pH)	E	6	7	8,10	0,35	5,24	2,29	0,29	0,53	0,01	12	2,179	
	S	6	7	8,08	0,39								
DQO (mg/L)	E	6	7	20	1	9,23	3,04	0,29	0,53	0,15	12	2,179	
	S	6	7	20	2								
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	E	6	7	20334	11077	115490015	10747	0,31	0,56	2,40	11	2,201	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	5961	3802								
Alcalinidad (mg/L)	E	6	7	1.768	1.214	1348656	1.161	0,31	0,56	1,74	11	2,201	
	S	5	6	641	344								
Sólidos Totales (mg/L)	E	5	6	1.889	779	558640	747	0,33	0,58	2,19	10	2,228	
	S	5	6	945	251								
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	E	6	7	7.435	2.890	8.900.740	2.983	0,29	0,53	1,34	12	2,179	
	S	6	7	5.296	1.426								

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN VERANO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Número de muestras	Promedio	Desviación Estándar	Sp <sup>2</sup>	Sp	$(1/n1 + 1/n2)$	$(1/n1 + 1/n2)$ ½	to	grados de libertad para t <sub>∞</sub> /2	t <sub>∞</sub> /2	observación
Sólidos Suspendido Totales (mg/L)	E	6	7	722	621	776.633	881	0,31	0,56	0,19	11	2,201	
	S	5	6	628	790								
Sólidos Suspendido Volátiles (mg/L)	E	5	6	238	163	25.731	160	0,33	0,58	1,06	10	2,228	
	S	5	6	140	67								
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	4	5	18	16	424	21	0,37	0,61	0,38	9	2,262	
	S	5	6	13	14								
Dureza Cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	6	7	1.406	387	272.427	522	0,29	0,53	1,51	12	2,179	
	S	6	7	985	410								
Sólidos Disueltos (mg/L)	E	6	7	1.091	309	89.342	299	0,31	0,56	1,82	11	2,201	
	S	5	6	789	103								
Caudal (L/s)	E	6	7	6683	1696	7.415.637	2.723	0,29	0,53	1,93	12	2,179	

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN VERANO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

Propiedad		Grados de libertad	Número de muestras	Promedio	Desviación Estándar	$Sp^2$	Sp	$(1/n1 + 1/n2)$	$(1/n1 + 1/n2) / 2$	to	grados de libertad para $t_{\infty/2}$	$t_{\infty/2}$	observación
	S	6	7	3867	2403								

Apéndice 3. Cálculo de la Velocidad de Sedimentación

Muestra	Volumen (V)cm <sup>3</sup>	Tiempo (s)	Altura Real (cm)	Desplazamiento Total (cm)	velocidad sedimentación Vs (cm/s)	Vs*V/VT	Promedio compuesto
Muestra 1	0,4	408	0,496	37,215	<b>0,091</b>	0,02	
	0,6	77	0,695	37,016	<b>0,481</b>	0,18	
	0,75	115	0,893	36,818	<b>0,320</b>	0,15	
	0,9	300	1,092	36,619	<b>0,122</b>	0,07	
	1	165	1,191	36,520	<b>0,221</b>	0,14	
	1,1	455	1,290	36,421	<b>0,080</b>	0,06	
	1,3	1.180	1,489	36,222	<b>0,031</b>	0,02	
	1,4	295	1,687	36,024	<b>0,122</b>	0,11	
	VT = 1,6	520	1,786	35,925	<b>0,069</b>	0,07	
Muestra 2	0,3	181	0,3	37,411	<b>0,207</b>	0,05	
	0,5	107	0,5	37,211	<b>0,348</b>	0,14	
	0,6	142	0,6	37,111	<b>0,261</b>	0,13	
	0,7	158	0,7	37,011	<b>0,234</b>	0,14	
	0,8	122	0,8	36,911	<b>0,303</b>	0,20	
	0,9	219	0,9	36,811	<b>0,168</b>	0,13	

Muestra	Volumen (V)cm <sup>3</sup>	Tiempo (s)	Altura Real (cm)	Desplazamiento Total (cm)	velocidad sedimentación Vs (cm/s)	Vs*V/VT	Promedio compuesto
	1	919	1	36,711	<b>0,040</b>	0,03	
	1,1	432	1,1	36,611	<b>0,085</b>	0,08	
	1,15	420	1,15	36,561	<b>0,087</b>	0,08	
	VT = 1,2	900	1,2	36,511	<b>0,041</b>	0,04	
Muestra 3							<b>1,03</b>
	0,1	241	0,1	37,611	<b>0,156</b>	0,03	
	0,2	732	0,2	37,511	<b>0,051</b>	0,02	
	0,3	1.167	0,3	37,411	<b>0,032</b>	0,02	
	0,4	319	0,4	37,311	<b>0,117</b>	0,09	
	0,42	254	0,42	37,291	<b>0,147</b>	0,12	
	VT = 0,5	887	0,5	37,211	<b>0,042</b>	0,04	
							<b>0,33</b>
Muestra 4	0,1	1.561	0,1	37,611	<b>0,024</b>	0,01	
	0,15	1.155	0,15	37,561	<b>0,033</b>	0,04	
	0,2	909	0,2	37,511	<b>0,041</b>	0,04	
							<b>0,10</b>
Muestra 5	0,1	537	0,1	37,611	<b>0,070</b>	0,02	
	0,2	1.684	0,2	37,511	<b>0,022</b>	0,01	

Muestra	Volumen (V)cm <sup>3</sup>	Tiempo (s)	Altura Real (cm)	Desplazamiento Total (cm)	velocidad sedimentación Vs (cm/s)	Vs*V/VT	Promedio compuesto
	0,25	441	0,25	37,461	<b>0,085</b>	0,07	
	VT = 0,3	938	0,3	37,411	<b>0,040</b>	0,04	
							<b>0,15</b>
Muestra 6	0,1	133	0,1	37,611	<b>0,283</b>	0,06	
	0,2	37	0,2	37,511	<b>1,014</b>	0,41	
	0,3	50	0,3	37,411	<b>0,748</b>	0,45	
	0,4	66	0,4	37,311	<b>0,565</b>	0,45	
	VT = 0,5	74	0,5	37,211	<b>0,503</b>	0,50	
<b>PROMEDIO SIMPLE</b>							<b>0,717</b>

Apéndice 4. Metodología empleada para la realización de los análisis fisicoquímicos de acuerdo al Estándar Métodos [29].

PARÁMETRO	MÉTODO	PRUEBA
Potencial de Hidrógeno	Electrodo	4500-H <sup>+</sup> b
DQO	Reflujo cerrado , método colorímetro	5220 d
DBO <sub>5</sub>	Volumétrico	5210 b
Alcalinidad	Volumétrico	2320 b
Sólidos totales	Gravimétrico	2540 B
Sólidos totales volátiles	Gravimétrico	2540 E
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico	2540 D
Sólidos suspendidos volátiles	Gravimétrico	2540 E
Dureza total	Volumétrico	2340 C
Dureza cálcica	Volumétrico	2340 D
Sólidos disueltos	Gravimétrico	ST -SST
Cloruros	Volumétrico -Argentométrico	4500



Apéndice 5. Capacidad de Evaporación en algunas ciudades colombianas

<b>Ciudad</b>	<b>EVP<sup>2</sup> mm/año</b>	<b>Precipitación Media<sup>3</sup></b>	<b>Relación EVP/precipitación</b>	<b>EVP/Hectárea L/S</b>
Riohacha	2.293	524	4,3	0,73
San Andrés	1.745	1.944	0,9	0,55
Valledupar	1.730	1.082	1,6	0,55
Cartagena	1.728	1.040	1,7	0,55
Neiva	1.697	1.320	1,3	0,54
Barranquilla	1.645	809	2,1	0,52
Cali	1.522	1.497	1,0	0,48
Cereté	1.505	1.212	1,2	0,48
Buenaventura	1.472	6.238	0,2	0,47

<sup>2</sup> Evapotranspiración potencial, según el Calendario Meteorológico 1992 del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (Himat).

<sup>3</sup> Precipitación media, según el Calendario Meteorológico 1992 del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (Himat)

<b>Ciudad</b>	<b>EVP<sup>2</sup> mm/año</b>	<b>Precipitación Media<sup>3</sup></b>	<b>Relación EVP/precipitación</b>	<b>EVP/Hectárea L/S</b>
Cúcuta	1.448	801	1,8	0,46
Villavicencio	1.378	4.065	0,3	0,44
Pereira	1.364	2.172	0,6	0,43
Medellín	1.324	1.645	0,8	0,42
Bucaramanga	1.296	1.229	1,1	0,41
Florencia	1.237	3.759	0,3	0,39
Popayán	1.228	2.145	0,6	0,39
Quibdo	1.224	7.941	0,2	0,39
Tumaco	1.178	2.259	0,5	0,37
Ibagué	1.100	1.999	0,6	0,35
Bogotá	1.052	952	1,1	0,33
Tunja	1.052	632	1,7	0,33
Manizales	1.031	1.954	0,5	0,33
Pasto	950	824	1,2	0,30

Ciudad	EVP <sup>2</sup> mm/año	Precipitación Media <sup>3</sup>	Relación EVP/precipitación	EVP/Hectárea L/S
Armenia	918	2.106	0,4	0,29

Apéndice 6. Análisis comparativo simple entre la época de Invierno - Verano

Parámetro		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	Sp	to	grados de libertad	t ∞/2	Observaciones
Potencial de Hidrógeno(pH)	E	6	7	8,14	0,35	2,20	-0,40	11	2,201	No se rechaza la hipótesis
	S	6	7	8,12	0,39	2,24	-0,01	11	2,201	No se rechaza la hipótesis
DQO (mg/L)	E	6	7	20.334	11.077	110,52	213,27	11	2,201	Se rechaza la hipótesis
	S	5	6	5.961	3.802	74,87	38,87	10	2,228	Se rechaza la hipótesis
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	E	6	7	1.387	1.214	44,90	-45,10	11	2,201	Se rechaza la hipótesis
	S	5	6	641	344	28,71	-38,69	10	2,228	Se rechaza la hipótesis
Alcalinidad(mg/L)	E	5	6	1.889	779	58,71	-77,03	10	2,228	Se rechaza la hipótesis
	S	5	6	945	251	49,16	-86,12	10	2,228	se rechaza la hipótesis
Sólidos Totales(mg/L)	E	6	7	7.163	2.890	65,30	-46,56	11	2,201	Se rechaza la hipótesis
	S	6	7	5.060	1.426	44,07	-22,79	11	2,201	se rechaza la hipótesis
Sólidos Totales Volátiles(mg/L)	E	6	7	510	621	44,07	-117,40	11	2,201	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	517	790	37,75	-66,93	10	2,228	Se rechaza la hipótesis
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	E	5	6	179	163	14,97	-14,29	10	2,228	Se rechaza la hipótesis

Parámetro		Grados de libertad	Numero de muestras	promedio	Desviación Estándar	Sp	to	grados de libertad	t ∞/2	Observaciones
	S	5	6	115	67	10,13	-5,61	10	2,228	se rechaza la hipótesis
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	E	4	5	18	16	8,08	-34,72	9	2,262	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	9	14	6,57	-25,58	10	2,228	se rechaza la hipótesis
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	6	7	1.307	387	24,06	-303,42	10	2,228	se rechaza la hipótesis
	S	6	7	871	410	25,78	-239,28	10	2,228	se rechaza la hipótesis
Dureza Cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	6	7	996	309	23,64	-18,59	11	2,201	se rechaza la hipótesis
	S	5	6	747	103	10,88	7,29	9	2,262	se rechaza la hipótesis
Sólidos Disueltos (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	E	6	7	6374	1696	56,41	-69,41	11	2,201	se rechaza la hipótesis
	S	6	7	3437	2403	52,60	-69,50	11	2,201	se rechaza la hipótesis

Apéndice 7. Desviación Estándar de ST; SD Y SST para los meses comprendidos entre Abril y Agosto de 2007.

Mes	ST (mg / L)		SD (mg / L)		SST (mg / L)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Abril	10672	9400	9400	8325,3	1272	1074,7
Mayo	9869,33	7916,7	8673,3	6915,3	1196	1001,3
Junio	14582	10520	12918	9056	1664	1464
Julio	16592	13051	14227	11994	2364,7	1056,7
Agosto	11941,33	10433	11056	9926,7	885,33	506
Desviación Estandar ( Sx)	2801,15	1878,56	2331,63	1892,79	568,77	341,33
Numero de Muestras = n	6	4	5	4	1	1

Apéndice 8. Velocidades de sedimentación para época de invierno y verano

Época	fecha de muestreo	Volúmen (ml)	Tiempo Experimental (s)	Tiempo Real (s)	Hi (cm)	Desplazamiento real X (cm)	Vs (cm/s)	Vs promedio compuesto (cm/s)		Vs promedio simple (cm/s)
invierno	03/12/2008	0,40	408	408	0.4	37,21	0,091	0,023	0,816	0,724
		0,60	485	77	0.6	37,02	0,481	0,180		
		0,75	600	115	0.75	36,82	0,320	0,150		
		0,90	900	300	0.9	36,62	0,122	0,069		
		1,00	1065	165	1.2	36,52	0,221	0,138		
		1,10	1520	455	1.3	36,42	0,080	0,055		
		1,30	2700	1180	1.5	36,22	0,031	0,025		
		1,40	2995	295	1.7	36,02	0,122	0,107		
		1,60	3515	520	1.8	35,92	0,069	0,069		
	10/12/2008	0,30	181	181	0.3	37,41	0,207	0,052	1,027	
		0,50	288	107	0.5	37,21	0,348	0,145		
		0,60	430	142	0.6	37,11	0,261	0,131		
		0,70	588	158	0.7	37,01	0,234	0,137		
		0,80	710	122	0.8	36,91	0,303	0,202		
		0,90	929	219	0.9	36,81	0,168	0,126		
		1,00	1848	919	1	36,71	0,040	0,033		
1,10		2280	432	1.1	36,61	0,085	0,078			

Verano		1,15	2700	420	1.15	36,56	0,087	0,083		0,704
		1,20	3600	900	1.2	36,51	0,041	0,041		
	14/12/2008	0,10	241	241	0.1	37,61	0,156	0,031	0,330	
		0,20	973	732	0.2	37,51	0,051	0,020		
		0,30	2140	1167	0.3	37,41	0,032	0,019		
		0,40	2459	319	0.4	37,31	0,117	0,094		
		0,42	2713	254	0.42	37,29	0,147	0,123		
		0,50	3600	887	0.5	37,21	0,042	0,042		
	01/14/08	0,10	1561	1561	0.1	37,61	0,024	0,012	0,097	
		0,15	2716	1155	0.15	37,56	0,033	0,043		
		0,20	3625	909	0.2	37,51	0,041	0,041		
	01/15/08	0,10	537	537	0.1	37,61	0,070	0,023	0,149	
		0,20	2221	1684	0.2	37,51	0,022	0,015		
		0,25	2662	441	0.25	37,46	0,085	0,071		
0,30		3600	938	0.3	37,41	0,040	0,040			
21/01/2008	0,10	133	133	0.1	37,61	0,283	0,057	1,866		
	0,20	170	37	0.2	37,51	1,014	0,406			
	0,30	220	50	0.3	37,41	0,748	0,449			
	0,40	286	66	0.4	37,31	0,565	0,452			
	0,50	360	74	0.5	37,21	0,503				



Apéndice 9. Determinación de Cloruros en la entrada

[ ] de sal (g/L)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad (mS)	mL AgNO <sub>3</sub> Gastados	Cloruros mg/L NaCl	Cloruros mg Cl - /L
0,0	7,96	6,6	1,3	819	496
0,1	8,0	6,67	2,4	1146	2.316
0,3	8,06	6,81	2,7	1392	2.812
0,5	8,06	7,19	2,8	1474	2.978
1,0	8,04	7,85	3,5	2047	4.136
1,5	8,09	8,51	4,1	2539	5.128
2,0	8,06	9,33	4,5	2866	5.790
2,5	8,04	9,76	5,2	3439	6.948
3,0	8,07	10,59	5,8	3931	7.941
4,0	8,05	11,92	6,7	4668	9.430

Apéndice 10. Determinación de Cloruros en la salida

] de sal (g/L)	Potencial de Hidrógeno	Conductividad (mS)	mL AgNO <sub>3</sub> Gastados	Cloruros (mg/L )	Cloruros mg Cl - /L
0,0	7,89	6,59	1,8	655	1323
0,1	7,92	6,63	1,9	737	1489
0,3	7,98	6,98	2,2	983	1985
0,5	8,00	7,01	2,3	1065	2151
1,0	7,96	8,18	3,1	1720	3474
1,5	7,97	8,81	3,8	2293	4632
2,0	7,95	9,78	4,1	2539	5128
2,5	7,91	10,57	4,9	3194	6452
3,0	7,89	11,6	5,6	3767	7.610
4,0	7,85	13,3	6,5	4504	9.099
6,0	7,95	15,69	9,2	6715	13.566

Apéndice 11. Cantidad de trazador necesario

Volúmen del Blanco (ml)	Volumen de AgNO <sub>3</sub> en la titulación (ml)	Concentración de cloruros (mg/L Cl <sup>-</sup> )	Trazador necesario(kg)
1.0	1.3	496	1416.5

Apéndice 12. Curvas de calibración para la prueba de trazadores

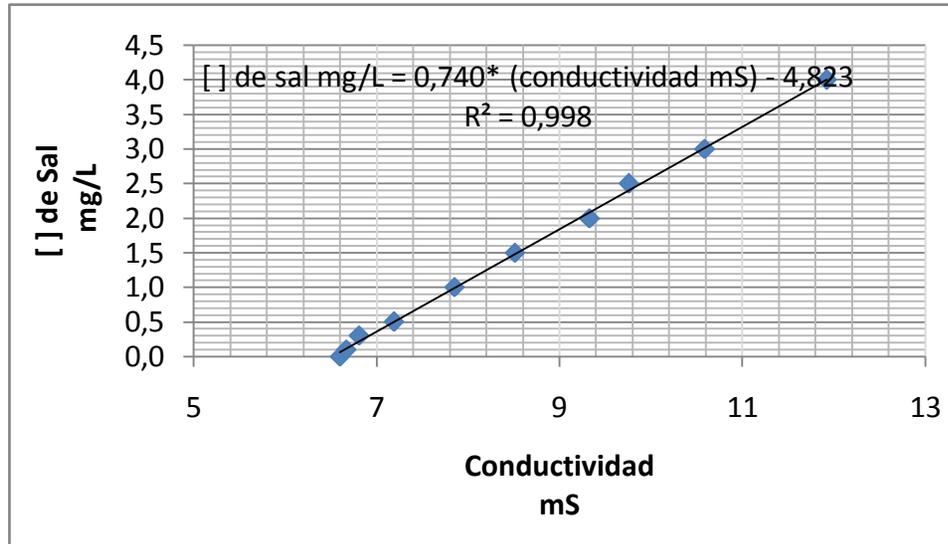


Figura 9. Curva de calibración para la entrada de la laguna de estabilización de lixiviados “El Ojito”

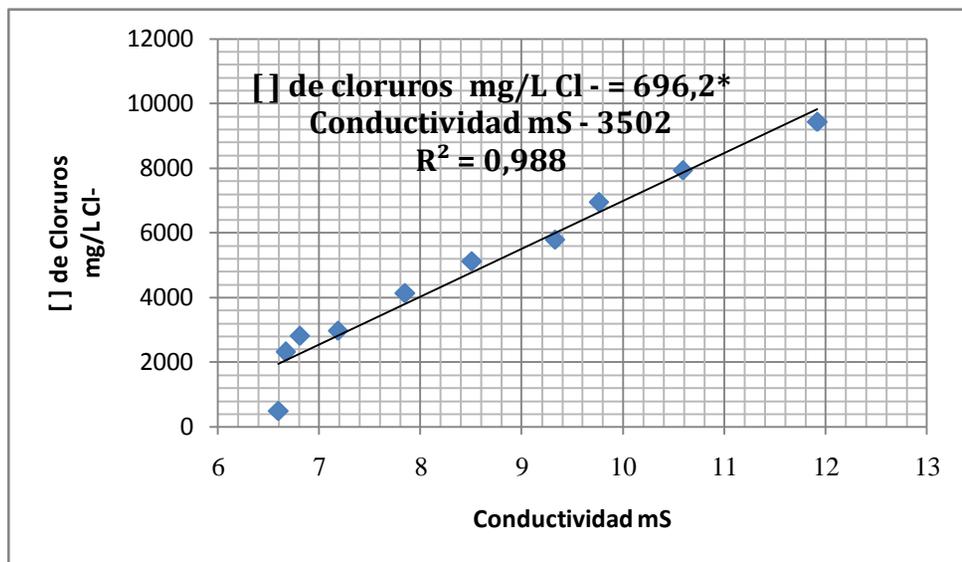


Figura 13. Curva de calibración para la determinación de Cloruros

Apéndice 13. Datos registrados a la entrada y salida del reactor en la prueba de trazadores.

ENTRADA LIXIVIADO			
Tiempo (min.)	Conductividad (ms)	Concentración de NaCl (mg/L)	Cloruros mg/L NaCl
0	7,06	0,40	471
1	6,83	0,23	447
2	6,91	0,29	471
3	6,96	0,33	471
4	6,79	0,20	471
5	6,9	0,28	471
6	6,94	0,31	521
7	6,79	0,20	496
8	6,74	0,16	496
9	6,78	0,19	496
10	6,86	0,25	521
11	6,89	0,28	447
12	6,64	0,09	447

**ENTRADA LIXIVIADO**

13	5,67	-0,63	471
14	6,79	0,20	496
15	6,27	-0,18	546
16	6,72	0,15	521
17	6,61	0,07	521
18	6,83	0,23	546
19	6,84	0,24	496
20	6,43	-0,06	496
21	6,08	-0,32	496
22	5,8	-0,53	496

**SALIDA DEL TRAZADOR**

Tiempo (min.)	Conductividad (ms)	Concentración De NaCl (mg/L)	Cloruros mg/L NaCl
0	8,01	1,10	720
1	9,51	2,21	1340
2	9,16	1,96	1241
3	8,87	1,74	1191

---

**ENTRADA LIXIVIADO**

4	8,79	1,68	1141
5	8,37	1,37	993
6	7,97	1,07	968
7	8,22	1,26	993
8	8,08	1,16	968
9	7,88	1,01	968
10	7,9	1,02	794
11	7,46	0,70	769
12	7,29	0,57	670
13	7,26	0,55	645
14	7,14	0,46	546
15	7,09	0,42	521
16	6,96	0,33	546
17	7,05	0,39	521
18	6,54	0,02	546
19	6,98	0,34	447

**ENTRADA LIXIVIADO**

20	6,78	0,19	471
21	6	-0,38	471
22	6,91	0,29	447