



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

### **ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

#### **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS RECOLECTADOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LAGO AGRIO, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

#### **TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Presentado para optar al grado académico de:

#### **INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA: KERLY MARILYN CUENCA ULLOA**

**TUTOR: ING. SEGUNDO HUGO CALDERÓN**

Riobamba - Ecuador

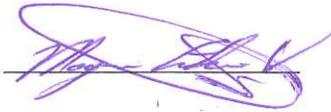
2019

**©2019, Kerly Marilyn Cuenca Ulloa**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El proyecto técnico: “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS RECOLECTADOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LAGO AGRIO, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS**”, de responsabilidad de la señorita Kerly Marilyn Cuenca Ulloa, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Segundo Hugo Calderón <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		19/02/2019
Ing. Mayra Paola Zambrano Vinueza <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		19/02/2019

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Kerly Marilyn Cuenca Ulloa, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 10 de Abril del 2019



---

Kerly Marilyn Cuenca Ulloa

C.I: 210112983-7

Yo, KERLY MARILYN CUENCA ULLOA soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Kerly Marilyn Cuenca Ulloa.

## **DEDICATORIA**

### ***A Dios.***

*Por darme la oportunidad de culminar uno de mis sueños más anhelados en mi vida.*

### ***A mis padres.***

*Cecilia y Franklin, porque ellos siempre estuvieron a mi lado, brindándome su apoyo, amor y consejos para hacer de mí una mejor persona.*

### ***A mi esposo.***

*Ney, por sus palabras de aliento cuando sentí perder las fuerzas, por su confianza y por brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente.*

### ***A mis hijos.***

*Thiago e Isabella, quienes han sido mi razón y pilar fundamental a lo largo de este recorrido.*

*Kerly*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios por concederme la fuerza y el valor de no desfallecer antes los obstáculos que se me han presentado en la vida y por todas sus bendiciones.*

*A mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí, sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible.*

*Al Ing. Hugo Calderón e Ing. Mayra Zambrano por su apoyo y tiempo brindado para la culminación de mi trabajo de titulación. A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Química por sus conocimientos impartidos a lo largo de mi formación.*

*A mi esposo, a quien amo tanto y le agradezco por su infinita paciencia, por su amor y por haber sido mi fuente de apoyo en cada momento.*

*A todas las personas que, de una manera u otra, han sido clave en mi vida profesional, sobre todo, aquellos amigos que han llegado a convertirse en una segunda familia.*

*Les agradezco de corazón.*

*Kerly*

## TABLA DE CONTENIDO

**RESUMEN ..... xviii**

**ABSTRACT.....xix**

### **CAPÍTULO I**

**1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....1**

1.1. Identificación del problema ..... 1

1.2. Justificación del proyecto .....2

1.3. Línea base del proyecto .....3

*1.3.1. Antecedentes del Cantón Lago Agrio .....3*

*1.3.2. Marco conceptual.....4*

*1.3.2.1.1. Tipos de rellenos sanitarios.....4*

1.4. Beneficiarios directos e indirectos .....20

*1.4.1. Beneficiarios directos.....20*

*1.4.2. Beneficiarios indirectos.....20*

### **CAPÍTULO II**

**2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....21**

2.1. Objetivo general .....21

2.2. Objetivos específicos.....21

### **CAPÍTULO III**

**3. ESTUDIO TÉCNICO .....22**

3.1. Localización del proyecto.....22

3.2. Ingeniería del proyecto .....24

*3.2.1. Tipo de estudio .....24*

*3.2.2. Metodología .....24*

*3.2.3. Métodos y técnicas .....25*

3.2.4.	<i>Procedimiento a nivel de laboratorio</i> .....	27
3.2.5.	<i>Selección del coagulante</i> .....	31
3.2.6.	<i>Caracterización final de los lixiviados</i> .....	34
3.2.7.	<i>Porcentaje de remoción del tratamiento de los lixiviados</i> .....	35
3.2.8.	<i>Situación actual del tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario</i> .....	37
3.2.9.	<i>Selección del Caudal de Diseño</i> .....	38
3.3.	<b>Dimensionamiento de un Sistema de Tratamiento de Lixiviados</b> .....	42
3.3.1.	<i>Determinación del Caudal de Diseño</i> .....	42
3.3.2.	<i>Dimensionamiento del Vertedero Rectangular</i> .....	43
3.3.3.	<i>Dimensionamiento del Sistema de Cribado</i> .....	49
3.3.4.	<i>Dimensionamiento del Tanque de Aireación</i> .....	53
3.3.5.	<i>Dimensionamiento del Tanque de Coagulación y Sedimentación</i> .....	59
3.3.6.	<i>Dimensionamiento del Biorreactor</i> .....	75
3.3.7.	<i>Dimensionamiento del Tanque Espesador de Lodos</i> .....	94
3.3.8.	<i>Resultados</i> .....	101
3.4.	<b>Análisis Económico de la Planta de Tratamiento</b> .....	115
3.4.1.	<i>Inversión de la instalación de la planta de tratamiento</i> .....	115
3.5.	<b>Cronograma</b> .....	122
	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>123</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>126</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>128</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Tipos de rellenos sanitarios y cantidad de residuos sólidos urbanos generados. ....	4
<b>Tabla 2-1:</b> Composición típica de los lixiviados. ....	10
<b>Tabla 3-1:</b> Tipos de vertederos de acuerdo al caudal.....	14
<b>Tabla 1-3:</b> Condiciones Meteorológicas del Cantón Lago Agrio. ....	22
<b>Tabla 2-3:</b> Condiciones Meteorológicas del Cantón Riobamba. ....	22
<b>Tabla 3-3:</b> Técnica de muestreo de lixiviados de acuerdo a la Norma de Calidad Ambiental para el manejo y disposición final de desechos no peligrosos.....	26
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados de la caracterización inicial física, química y microbiológica del lixiviado. ....	28
<b>Tabla 5-3:</b> Parámetros que no cumplen con la normativa vigente. ....	29
<b>Tabla 6-3:</b> Índice de Biodegradabilidad. ....	29
<b>Tabla 7-3:</b> Promedio del índice de biodegradabilidad de las muestras recolectadas en el mes de junio y julio. ....	30
<b>Tabla 8-3:</b> Análisis del tipo de coagulante según el porcentaje de remoción del color y la turbidez en el tratamiento de lixiviados.....	32
<b>Tabla 9-3:</b> Valores de turbiedad de los lixiviados a diferentes valores de pH. ....	32
<b>Tabla 10-3:</b> Valores de turbiedad de los lixiviados luego de la aplicación de diferentes dosis de policloruro de aluminio. ....	33
<b>Tabla 11-3:</b> Resultados de la caracterización final de los lixiviados del relleno sanitario. ....	35
<b>Tabla 12-3:</b> Resultados del porcentaje promedio de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del lixiviado tratado.....	36
<b>Tabla 13-3:</b> Resumen de la intensidad de lluvia en el Cantón Lago Agrio durante los años 2008 - 2018.....	39
<b>Tabla 14-3:</b> Mes de mayor pluviosidad en la Ciudad de Nueva Loja, Cantón Lago Agrio (2008 - 2017).....	40
<b>Tabla 15-3:</b> Volumen de lixiviados recolectados en el relleno sanitario durante los meses de diciembre del 2016 hasta el mes enero del 2018. ....	41
<b>Tabla 16-3:</b> Caudal mensual de lixiviado. ....	41
<b>Tabla 17-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño de un vertedero tipo rectangular. ....	43
<b>Tabla 18-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño de un sistema de cribado con rejillas. ....	49
<b>Tabla 19-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño de un tanque de aireación. ....	54
<b>Tabla 20-3:</b> Caracterización de los lixiviados antes y después del tratamiento combinado. ....	54
<b>Tabla 21-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño de un tanque de coagulación y sedimentación. ....	60

<b>Tabla 22-3:</b> Constantes para el cálculo de la potencia del motor en un mezclador de acuerdo al tipo de impulsor. ....	61
<b>Tabla 23-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño de un reactor biológico. ....	76
<b>Tabla 24-3:</b> Tamaño de burbuja y eficiencia para cálculo en difusores de acuerdo al régimen de flujo.....	76
<b>Tabla 25-3:</b> Dimensiones típicas para el diseño del tanque de espesamiento de lodos. ....	95
<b>Tabla 26-3:</b> Resultados del pretratamiento de los lixiviados (Proceso de aireación). ....	101
<b>Tabla 27-3:</b> Resultados del tratamiento físico – químico (Proceso de coagulación).....	102
<b>Tabla 28-3:</b> Resultados de la aplicación de microorganismos (Tratamiento biológico). ....	103
<b>Tabla 29-3:</b> Propuesta tecnológica para el vertedero rectangular por donde ingresan los lixiviados a la planta de tratamiento de los mismos. ....	104
<b>Tabla 30-3:</b> Propuesta tecnológica para el sistema de cribado para el pretratamiento de los lixiviados.....	104
<b>Tabla 31-3:</b> Propuesta tecnológica para el tanque de aireación de lixiviados. ....	105
<b>Tabla 32-3:</b> Propuesta tecnológica para el tanque de coagulación - sedimentación para el tratamiento primario de los lixiviados. ....	106
<b>Tabla 33-3:</b> Propuesta tecnológica para el biorreactor en el tratamiento biológico de los lixiviados.....	107
<b>Tabla 34-3:</b> Propuesta tecnológica para el espesamiento de lodos producidos en el tratamiento biológico de los lixiviados.....	108
<b>Tabla 35-3:</b> Materiales, equipos y reactivos utilizados en la caracterización física, química y microbiológica de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario. ....	113
<b>Tabla 36-3:</b> Reactivos utilizados en el tratamiento de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario.....	114
<b>Tabla 37-3:</b> Adecuación de la zona para la planta. ....	115
<b>Tabla 38-3:</b> Instalación del vertedero y sistema de cribas. ....	115
<b>Tabla 39-3:</b> Instalación del sistema de aireación. ....	116
<b>Tabla 40-3:</b> Instalación del tanque de coagulación – sedimentación. ....	117
<b>Tabla 41-3:</b> Instalación del biorreactor.....	118
<b>Tabla 42-3:</b> Instalación del tanque espesador de lodos.....	119
<b>Tabla 43-3:</b> Costo de la mano de obra para la construcción e instalación de la planta de lixiviados.....	120
<b>Tabla 44-3:</b> Costo total del sistema de tratamiento de lixiviados. ....	120
<b>Tabla 45-3:</b> Costos operativos de la obra (Policloruro de aluminio). ....	121
<b>Tabla 46-3:</b> Costos operativos de la obra (Activación de microorganismos). ....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Vertedero rectangular con contracción final completa. ....	15
<b>Figura 2-1:</b> Rejas y rejillas de limpieza manual y su operación, .....	15
<b>Figura 1-3:</b> Georreferenciación espacial del relleno sanitario ubicado en el Cantón Lago Agrio. .....	23
<b>Figura 2-3:</b> Georreferenciación espacial del Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. ....	23
<b>Figura 3-3:</b> Dimensionamiento del vertedero rectangular. ....	49
<b>Figura 4-3:</b> Dimensionamiento del sistema de cribado. ....	53
<b>Figura 5-3:</b> Dimensionamiento del tanque de aireación. ....	59
<b>Figura 6-3:</b> Dimensionamiento del tanque rectangular de coagulación-sedimentación. ....	75
<b>Figura 7-3:</b> Dimensionamiento del biorreactor. ....	94
<b>Figura 8-3:</b> Dimensionamiento del tanque espesador de lodos. ....	100

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b> Curva de valores de turbiedad de los lixiviados a diferentes valores de pH. ....	33
<b>Gráfico 2-3:</b> Curva de comparación entre la dosis y la turbiedad de los lixiviados luego de la aplicación de diferentes dosis de policloruro de aluminio. ....	34
<b>Gráfico 3-3:</b> Diagrama de Flujo del Sistema Actual de Tratamiento de Lixiviados. ....	37
<b>Gráfico 4-3:</b> Diagrama de Flujo del Sistema Propuesto para el Tratamiento de Lixiviados recolectados en el relleno sanitario. ....	109

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$V_{Gn}$	Volumen de lixiviados generados
$V_{Tn}$	Volumen tratado
$V_{An+1}$	Volumen almacenado para el siguiente mes
$V_{An}$	Volumen almacenado en el mes anterior
<b>Q</b>	Caudal de diseño
<b>V</b>	Volumen
<b>t</b>	Tiempo
<b>C<sub>d</sub></b>	Coefficiente de descarga
$h_1$	Altura mínima sobre el vertedero
<b>H</b>	Carga hidráulica
<b>b</b>	Ancho de la cresta
<b>B</b>	Ancho del vertedero
<b>l</b>	Longitud del vertedero
<b>z</b>	Distancia entre el fondo del canal hasta la cresta
$H_{m\acute{a}x}$	Altura del vertedero
<b>A<sub>b</sub></b>	Área para el gasto del vertedero
<b>A<sub>1</sub></b>	Área libre del paso
$h_n$	Tirante del agua
<b>L</b>	Longitud de las rejas
$\theta$	Ángulo de inclinación de las barras
$e_b$	Espesor de las barras
<b>n</b>	Número de barras
$A_{re}$	Área de las rejas
$v_r$	Velocidad de flujo entre las rejas
$v_{ac}$	Velocidad de acercamiento
$h_l$	Pérdidas hidráulicas
$l_{tanque}$	Longitud del tanque del aireación
$V_{tanque}$	Volumen del tanque de aireación
<b>DBO<sub>diario</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno diario
$V_{diario}$	Volumen diario de lixiviados
$C_{aire}$	Cantidad de aire necesaria para la aireación
$C_r$	Cantidad de aire necesaria para remover 1 kg de DBO
$P_h$	Presión hidrostática
$P_{atm}$	Presión atmosférica
$P_a$	Presión absoluta
$P_t$	Presión de trabajo
<b>P</b>	Potencia del motor
$\eta$	Eficiencia del compresor
$v_s$	Velocidad de sedimentación
$\mu$	Viscosidad dinámica
<b>A<sub>s</sub></b>	Área Superficial
$L_p$	Ubicación de la pared difusora
$v_h$	Velocidad horizontal de sedimentación

$V_s$	Volumen del sedimentador
$t_r$	Tiempo de retención
$d$	Diámetro de la partícula
$A_o$	Área total de los orificios
$v_o$	Velocidad de flujo en los orificios
$a_o$	Área de cada orificio
$n_o$	Número de orificios
$r_o$	Radio de cada orificio
$h$	Porción de la pantalla difusora con orificios
$s$	Separación entre los orificios
$l_v$	Longitud del vertedero
$C_s$	Carga Superficial
$y$	Alto del vertedero
<b><math>D_i</math></b>	Diámetro del impulsor
<b><math>E</math></b>	Distancia entre el impulsor y el fondo del tanque
<b><math>h_p</math></b>	Altura del impulsor
$g$	Altura de la paleta
$w$	Ancho de la paleta
$N_{Re}$	Número de Reynolds
<b><math>N</math></b>	Velocidad de giros
<b><math>KT</math></b>	Constante de acuerdo al número de Reynolds
$E_r$	Eficiencia de remoción
$STT_o$	Contenido de sólidos totales antes del tratamiento
$DBO_o$	Demanda bioquímica de oxígeno antes del tratamiento
<b><math>DBO</math></b>	Demanda bioquímica de oxígeno al final del tratamiento
$DBO_{soluble}$	Demanda bioquímica de oxígeno soluble
$C_m$	Coefficiente másico
$k_d$	Constante de declinación de los microorganismos
$DBO_{ss}$	Demanda bioquímica de oxígeno en relación a los sólidos suspendidos
$\theta$	Edad de los lodos
$V_r$	Volumen del reactor
$S_o$	Sólidos solubles en el influente
<b><math>S</math></b>	Sólidos solubles en el efluente
<b><math>Y</math></b>	Rendimiento
$X_v$	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor
<b><math>F/M</math></b>	Relación alimentación - microorganismo
<b><math>p</math></b>	Purga de fango
$X_r$	Retorno de sólidos solubles
<b><math>R</math></b>	Relación de recirculación
$Q_r$	Caudal de recirculación
<b><math>P_e</math></b>	Producción de lodos esperada
<b><math>P_r</math></b>	Producción real de lodos
<b><math>S</math></b>	Porcentaje de evacuación
$a$	Factor de conversión de demanda bioquímica de oxígeno
$C_e$	Cantidad de aire producida por la respiración
$C_{an}$	Cantidad total de aire necesaria para los microorganismos
$\Delta T$	Aumento de temperatura del aire

$T_a$	Temperatura ambiental del Cantón Lago Agrio
$T_c$	Temperatura de compresión
$\rho_a$	Densidad del aire
$\rho$	Densidad del lixiviado
<b>R</b>	Constante ideal de los gases
$d_o$	Diámetro del orificio
$d_b$	Diámetro de la burbuja
$C_l$	Carga de lodos al espesador
$C_{lt}$	Carga de lodos totales al espesador
$C_{l1}$	Carga de lodos al espesador por efecto de los sólidos solubles
<b>F</b>	Flujo de lodos al espesador
$X_l$	Concentración de lodos de acuerdo al tipo de lodos
$V_f$	Volumen de fangos a procesar
$A_e$	Área del espesador
$C_{se}$	Carga de sólidos al espesador mecánico
$V_e$	Volumen del espesador de lodos
$D_e$	Diámetro del espesador de lodos

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A** TULSMA Libro VI, Anexo 1, Tabla 9. Límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.
- Anexo B** Caracterización inicial física, química y microbiológica de los lixiviados.
- Anexo C** Técnicas utilizadas para el análisis físico – químico y microbiológico del lixiviado.
- Anexo D** Tratamiento de Aireación.
- Anexo E** Tratamiento Físico – Químico.
- Anexo F** Tratamiento Biológico.
- Anexo G** Recopilación fotográfica del procedimiento experimental para el tratamiento de lixiviados.
- Anexo H** Planos del Diseño del Sistema de Tratamiento para Lixiviados recolectados en el Relleno Sanitario.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema de tratamiento para lixiviados recolectados en el relleno sanitario del Cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbíos, para lo cual la investigación se realizó en dos etapas; la primera, la toma de muestras y la segunda, las pruebas experimentales que se efectuaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. En la caracterización inicial de los lixiviados se obtuvieron los siguientes parámetros fuera de norma: DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, cobre, fósforo total, cloruros, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y coliformes fecales. Se calculó el índice de biodegradabilidad obteniendo un valor de 0,4; lo que indica que el lixiviado a tratar es de naturaleza biodegradable, por tal razón se aplica un sistema de tratamiento combinado, cuya propuesta es: vertedero rectangular, cribado, aireación, coagulación y sedimentación, degradación biológica y espesamiento de lodos. Se realizaron pruebas de tratabilidad y el test de jarras, para determinar la dosis óptima de coagulante y el pH óptimo de coagulación, siendo: 0,1 ppm de PAC y 6 de pH. Para la degradación biológica, se aplicaron microorganismos eficientes en una concentración de 5 % de melaza, 5% de EM•1 en estado latente y 90 % de agua, para su activación. De esta solución, se utilizó una relación de 1:1000, es decir, que por cada 1000 mL de lixiviado a tratar se agregó 1 mL de EM•1 activado, en el biorreactor aerobio. Para el dimensionamiento de los equipos, fue necesario establecer el pico de producción de lixiviados, cuyo valor fue de 2,22 L/s de caudal de diseño. Con el diseño del sistema de tratamiento propuesto se obtuvo una eficiencia de porcentaje de remoción del 87 %, lo que indica que el tratamiento es fiable para su construcción.

**Palabras Claves:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <RELLENO SANITARIO>, <LIXIVIADOS>, <PORCENTAJE DE REMOCIÓN>, <MICROORGANISMOS EFICIENTES>, <CÁLCULOS DE INGENIERÍA>, <DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO>, <SUCUMBÍOS (PROVINCIA)>.



## Abstract

The objective of the following investigation was to design a treatment system for the landfill leachate of Lago Agrio canton, Sucumbíos province. Aiming to this, the investigation was carried out in two stages: first, sample collection, second, the experimental tests carried out in Laboratorio de Calidad del Agua (water quality laboratory) of the Science Faculty in ESPOCH. In the initial characterization of leachates, the following parameters out of the normal range were found: BOD<sub>5</sub> (Biological Oxygen Demand-five days), COD (Chemical Oxygen Demand), total solids, total suspended solids, copper, total phosphorous, chlorides, ammoniacal nitrogen, total nitrogen and fecal coliforms. The result obtained after calculating the biodegradability index was 0,4; which means that the leachate to be treated has a biodegradable nature. For this reason, a combined treatment system is applied, which consists of: rectangular landfill, sieving, aeration, coagulation and sedimentation, biological degradation and sludge thickening. Several treatability tests and a jar test were carried out to determine the optimum coagulant dosage and the optimal coagulant pH, obtaining the following results: 0,1 ppm OCD and 6 of pH. For biological degradation, efficient microorganisms with a 5 % molasses concentration were used, as well as, 5 % of EM.1 in dormant state and 90% of water of its activation. A relation of 1 to 1000 of this combination was used, so for each 1000 ml of leachate to be treated, 1 ml of EM.1 activated was added to the aerobic bioreactor. In order to get the right equipment's dimensions, it was necessary to stablish the leachate production peak, which was 2,22 L/s of flowrate design. By using this proposed treatment system design, an efficiency removal percentage of 87% was obtained, which means that the treatment is reliable for its construction.

**KEY WORDS:** <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY >, <LANDFILL>, <LEACHATE>, < REMOVAL PERCENTAGE >, <EFFICIENT MICROORGANISMS>, <ENGINEERING CALCULATIONS>, <TREATMENT PLANT DESIGN >, <SUCUMBÍOS (PROVINCE)>.



# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del problema

Los datos reportados por la (INEC, 2017, pp. 9-10), en el estudio realizado para la investigación de la contaminación del Ecuador, indicó que en el país en los diferentes cantones se produce en promedio 0,57 kg por día de residuos sólidos, entre los residuos mayormente producidos provienen de actividades domésticas, en los que destacan los envases plásticos, cartón, papel y vidrio.

De acuerdo al mismo estudio (INEC, 2017, pp. 9-10), en el país, el 39 % de los cantones dan la disposición final de los residuos en rellenos sanitarios, el 26 % en botaderos controlados, el 23 % en botaderos a cielo abierto y el 12 % en celdas emergentes, además que indican que únicamente en Quito y en Guayaquil se tiene sistemas de tratamiento de lixiviados generados en los botaderos; mientras que los de más cantones no realizan ninguna actividad de sostenibilidad de los rellenos sanitarios.

Los lixiviados producidos en un relleno sanitario constituyen aguas residuales que surgen como resultado de la descomposición bioquímica que sufren las basuras después de ser dispuestas y de la infiltración de aguas lluvias cuando tienen contacto directo con las basuras, este fenómeno es natural en rellenos ubicados en ciudades que tengan altas precipitaciones (Mendoza, 2009, pp. 10-12).

El estudio realizado sobre la generación de lixiviados en el relleno sanitario de Cúcuta – Colombia, indicó que el lixiviado de un relleno sanitario puede generarse por diversos factores, por ejemplo, la descomposición de basura, la edad del relleno, el diseño y la operación del relleno sanitario, los procesos de conversión microbiológica y las reacciones paralelas del ambiente con los lixiviados; además, de factores de un lixiviado tales como el caudal que varía con el estado de avance y el tipo de operación del relleno (Álvarez & Suárez, 2006, pp. 95-105).

(FOE, 2014, pp. 15-18), al estudiar los problemas ambientales en los rellenos sanitarios de Estados Unidos, explica que los dos problemas ambientales fundamentales ocasionados por la

infiltración del agua y generación de lixiviados son la disolución química de los componentes de los residuos sólidos, que se transforman en sustancias tóxicas que afectan a la salud de las personas y animales que entran en contacto con los efluentes del relleno.

Por lo tanto, el problema de la contaminación generada por los lixiviados es recurrente en el Ecuador; con el desarrollo de la investigación se permite estudiar parte de este problema en un punto específico, que es el Cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbíos.

## **1.2. Justificación del proyecto**

En la actualidad, el Cantón Lago Agrio realiza la deposición final de los residuos sólidos urbanos generados en un relleno sanitario, ubicado en la zona periférica del mismo; el relleno sanitario no cuenta con un sistema de recuperación y tratamiento de los lixiviados, que opere de una manera efectiva, lo cual representa un problema de salubridad, un problema para la población, ya que si estos no son correctamente recogidos y tratados pueden afectar cuerpos de agua y la tierra con consecuencias negativas para la vida ubicada a sus alrededores.

El lixiviado producido por la descomposición bioquímica de la basura, causa graves problemas y un notable peligro para la salud o la seguridad pública, por lo cual se ha visto en la necesidad de efectuar un tratamiento acorde al problema provocado por la descomposición de los mismos, que garantice la mitigación de los impactos ambientales negativos al medio; el tratamiento de los lixiviados impedirá que se depositen sustancias tóxicas en los suelos, lo cual genera la devastación de la flora y fauna del cantón.

La implementación de un sistema de tratamiento para lixiviados recolectados en el relleno sanitario del Cantón Lago Agrio, permitirá reducir la contaminación provocada por el mal manejo y la falta de tratamiento de los mismos, evidenciándose problemas como: la producción de malos olores y enfermedades que aquejan a las comunidades aledañas por su alto contenido de agentes patógenos y de metales pesados.

Un sistema para el tratamiento de los lixiviados en el Cantón Lago Agrio garantizará que el efluente cumpla con los parámetros establecidos en la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce; evitando así la contaminación ambiental.

Por lo expuesto, se justifica el estudio para un sistema de tratamiento de lixiviados, a través del diagnóstico del estado actual del agua de desecho, para implementar entonces procesos que

solucionen los problemas más predominantes que desestabilizan el ecosistema, contribuyendo además a la salud y bienestar del Cantón Lago Agrio y sus pobladores.

### **1.3. Línea base del proyecto**

#### ***1.3.1. Antecedentes del Cantón Lago Agrio***

El Cantón Lago Agrio fue creado en el año 1979; mediante vía registro oficial, su nombre proviene de ser el primer cantón donde se exploró pozos petroleros en el país, climáticamente en el cantón se registran temperaturas promedio de 37 a 39 °C durante todo el año ofreciendo un clima tropical; mientras que reporta el pico de precipitación en los meses de Julio hasta Agosto, el cantón tiene una extensión territorial de 3128 km<sup>2</sup>, a una altura de 300 msnm.

Su población es de 101744 habitantes; la mayoría de su población se dedica a la actividad económica del comercio, siendo otras actividades económicas representativas, el turismo, la actividad petrolera, la agricultura y la ganadería, las vías de acceso al cantón son de segundo orden; el cantón cuenta con todos los servicios básicos entre los que se incluyen sistema de alcantarillado, internet satelital, telefonía móvil y sistema de recolección de basura por medio de carros equipados.

La mayor parte de los recursos agrícolas y ganaderos generados en el cantón y sus alrededores son comercializados en mercados; mientras que la mayor parte de alimentos industrializados provienen de las ciudades de Quito y Guayaquil; en el cantón no existe industrias que generen contaminación y la mayoría de los pozos petroleros del cantón ya no producen; con lo que la mayor parte de residuos sólidos son de origen urbano.

### **1.3.2. Marco conceptual**

#### **1.3.2.1. Relleno sanitario**

Es una técnica de disposición de residuos sólidos, la cual consiste en la distribución de capas de basura compactadas sobre un suelo impermeabilizado para evitar la contaminación del acuífero y recubiertas por capas de suelo. A comparación de otros métodos de tratamiento un relleno sanitario tiene como ventaja la posibilidad de recuperación de áreas ambientalmente degradadas por la minería o explotación de canteras, así como de terrenos considerados improductivos o marginales (García, 2010, p. 42).

Otros de los beneficios de los rellenos sanitarios son los siguientes: una baja inversión de capital comparada con otros métodos de tratamiento; generación de empleo de mano de obra poco calificada, flexibilidad, en cuanto a la capacidad; para recibir cantidades adicionales de desechos y la posibilidad de utilizar el gas metano producido como fuente alternativa de energía (García, 2010, p. 42).

La eficiencia de un relleno sanitario depende de la selección del sitio, su diseño, su operación y control. Los rellenos sanitarios mal construidos pueden producir contaminación ambiental y afectar a la salud pública y ocupacional (García, 2010, p. 42).

##### **1.3.2.1.1. Tipos de rellenos sanitarios**

(Aleman, 2003, p. 24), estudia que dependiendo de la cantidad de residuos sólidos urbanos que se generen, es el tipo de relleno sanitario que se utilizará (Tabla 1-1).

**Tabla 1-1:** Tipos de rellenos sanitarios y cantidad de residuos sólidos urbanos generados.

<b>Tipo de Relleno Sanitario</b>	<b>Residuos Sólidos urbanos Ingresados (T/d)</b>	<b>Tipo de Municipio</b>
Mecanizado	> 40	Urbano
Semimecanizado	16 a 40	Urbano y semirural
Manual	15 o menor	Rural

Fuente: Meléndez, 2004.

### *1.3.2.1.2. Método de construcción de un Relleno Sanitario*

#### ➤ **Método de Área**

Se utiliza en áreas planas donde no es posible generar fosas o trincheras para enterrar la basura, por tanto, los desechos son depositados sobre el suelo, el mismo que debe elevarse algunos metros, en un terreno impermeabilizado con anterioridad. El material de cobertura proviene de las laderas del terreno o a su vez de un lugar cercano para eludir costos. Las fosas se construyen con una leve pendiente para evitar deslizamientos (García, 2010, p. 46).

#### ➤ **Método de Zanja o Trinchera**

Este método consiste en excavar zanjas de dos o tres metros de profundidad, en donde los residuos se depositan y acomodan para posteriormente compactarlos y cubrirlos con tierra. Es imprescindible construir canales perimétricos para captar y desviar el agua en periodos de lluvia. Para la generación de las zanjas es necesario tomar en cuenta las características del terreno, las mismas que deben favorecer la excavación (García, 2010, p. 45).

#### ➤ **Método Combinado o Rampa**

Tomando en cuenta que los dos métodos de construcción de rellenos sanitarios tienen técnicas similares de operación, es factible unirlos para aprovechar mejor el terreno y el material de cobertura, de igual manera para obtener mejores resultados (García, 2010, p. 48).

### *1.3.2.2. Lixiviado*

Un lixiviado se genera cuando cualquier líquido, generalmente agua proveniente de las precipitaciones, se pone en contacto con los residuos depositados, lo que aumenta la concentración de los contaminantes, ya que contienen materiales biológicos y constituyentes químicos. El lixiviado es controlado para que no se desplace a las aguas subterráneas, aguas superficiales y al suelo circundante (Cabildo, 2008, p. 211).

La composición de un lixiviado depende de la naturaleza del residuo y de la edad del vertedero. Además, también tiene influencia el grado de compactación de los residuos, el tratamiento previo del residuo, la cobertura, el clima de la zona, entre otros. De acuerdo al tipo de residuo, es necesario tomar en cuenta si el lixiviado proviene de residuos orgánicos o inorgánicos, debido a la actividad microbiológica que se produce en los residuos orgánicos (Cabildo, 2008, p. 212).

Las características de los lixiviados producidos en rellenos sanitarios dependen de las características de los residuos depositados y de las condiciones del relleno, como temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad del agua que entra en contacto con la masa de residuos dispuestos. Las características fisicoquímicas de los lixiviados son inherentes tanto a la calidad de los residuos sólidos como a su grado de estabilización (López & Mendoza, 2004, p. 8).

La tratabilidad de un lixiviado está estrechamente relacionada con su composición química y esta a su vez depende de algunos factores como son: el tipo de desecho dispuesto, edad, condiciones ambientales y aspectos técnicos característicos del relleno sanitario (López & Mendoza, 2004, p. 8).

#### *1.3.2.3. Características de los lixiviados*

(Fadel; et al, 2002, pp. 789-791), en el estudio de la caracterización de las aguas residuales indica que los lixiviados, por efecto del arrastre del agua de escorrentía tienen un alto poder contaminante, por lo que contienen una serie de características principales como son: alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo; además de presencia de metales pesados y constituyentes orgánicos, lo que varía con la edad del vertedero, la meteorología del lugar y las características de los residuos depositados.

##### *1.3.2.3.1. Parámetros físicos*

###### **➤ pH**

Es un parámetro que determina la acidez o alcalinidad de una sustancia. Las aguas superficiales tienen un valor de pH en un intervalo de 6 – 8,5, las aguas subterráneas presentan valores de pH menores que las superficiales y para aguas residuales el valor de pH es menor que el valor de pH del agua potable (Sancha, 2013, p. 18).

###### **➤ Conductividad eléctrica**

Es la capacidad que tiene una solución para conducir una corriente eléctrica. Expresa la concentración total de sales solubles presentes en el agua. Se la determina mediante un aparato llamado conductímetro que genera una diferencia de voltaje entre dos electrodos sumergidos en agua (Goyenola. 2007, p. 2).

### ➤ *Turbidez*

Es un parámetro físico que determina el grado de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. La turbidez se expresa en unidades de nefelométricas de turbidez (NTU). El instrumento utilizado para su medición es el turbidímetro que mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (Chapman & Kimstach, 1992, p. 126).

### ➤ *Color*

No existe una relación directa entre color y grado de contaminación, pues se trata de un parámetro físico influido por interferencias con otras sustancias coloreadas. Las aguas superficiales pueden estar altamente coloreadas debido a la presencia de materia pigmentada en suspensión, cuando en realidad el agua no tiene color. La determinación del color se realiza mediante el espectrofotómetro visible (Aznar, 2000, p. 12).

### ➤ *Sólidos*

Estos afectan negativamente a la calidad de un cuerpo de agua o su suministro de diferentes maneras y hacen referencia a la materia suspendida o disuelta en un medio acuoso. Gran parte de los contaminantes de aguas son sólidos, disueltos o suspendidos (León, 2013, p. 65).

Los análisis de sólidos son muy útiles en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento (Carpio, 2007, p. 2).

Los sólidos totales es la cantidad de materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro) (Carpio, 2007, p. 2).

Los sólidos en suspensión son aquellos que se encuentran en el agua sin estar disueltos en ellas, pueden ser sedimentables o no y, para determinar su cantidad en forma directa es complicado, para ello se calcula matemáticamente conociendo la cantidad de sólidos no sedimentables y de sólidos en suspensión y realizando una diferencia de estas dos medidas (León, 2013, p. 65).

#### 1.3.2.3.2. *Parámetros químicos*

##### ➤ *Aceites y grasas*

Los aceites y grasas que son arrojadas a las aguas residuales o los efluentes tratados pueden crear películas en la superficie que llevan a la degradación del ambiente (León, 2013, p. 107).

Es importante conocer la concentración de aceites y grasas en las aguas contaminadas, para decidir el tipo de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que, si son concentraciones muy altas, pueden interferir con los procesos biológicos aerobios y anaerobios reduciendo la eficiencia del tratamiento (León, 2013, p. 107).

##### ➤ *Demanda Bioquímica de Oxígeno*

Es la cantidad de oxígeno consumido en la descomposición bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios, principalmente por bacterias y protozoarios. En cuanto mayor sea la cantidad de materia orgánica, los microorganismos requerirán más oxígeno para degradarla. Este proceso se realiza con una duración de 5 días y permite determinar la calidad del agua (APHA, 1992, p. 23).

##### ➤ *Demanda Química de Oxígeno*

Es la cantidad de oxígeno necesario para degradar químicamente la materia orgánica e inorgánica. Permite determinar la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales (CNA, 2005, p. 7).

En la determinación de la DQO, el material orgánico biodegradable y no biodegradable es químicamente oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido y en la presencia de un catalizador (Metcalf & Eddy, 2005, p. 46).

##### ➤ *Nitrógeno Amoniacal*

Es una medida de todas las formas de nitrógeno que pueden estar en una muestra de agua. La descarga de aguas residuales y domésticas incrementan las concentraciones de nitrógeno amoniacal en las aguas superficiales y subterráneas, afectando la calidad de la misma (González, 2013, p. 12).

➤ ***Nitrógeno Total***

Es una medida de todas las diversas formas de nitrógeno que se encuentran en una muestra de agua. Todas las formas de nitrógeno son inofensivas a los organismos acuáticos, excepto el amoníaco no ionizado y el nitrito, que pueden ser tóxicos para los peces. El nitrito no es un problema en los cuerpos de agua, sin embargo, si hay bastante oxígeno disponible en el agua para que se oxide, el nitrito puede ser convertido fácilmente a nitrato (UNIVERSIDAD DE FLORIDA, 2005, pp. 31-45).

➤ ***Fósforo Total***

El fósforo junto con el nitrógeno son dos nutrientes muy importantes en los seres vivos, de modo que contenidos altos de estos en las aguas pueden producir un crecimiento incontrolado de la biomasa acuática. La presencia de fósforo en las aguas se debe en gran parte al uso de abonos fosfatados y detergentes (Aznar, 2000, p. 19).

➤ ***Cloruros***

El cloro elemental es una gas amarillo – verdoso muy soluble en agua. Cuando se disocia en ausencia de sustancias nitrogenadas u otros productos, el cloro es rápidamente hidrolizado a ácido hipocloroso (HOCL) y ácido clorhídrico (HCL). A su vez el ácido clorhídrico se disocia en iones hidrógeno y cloruro, mientras que el ácido hipoclorito se disocia parcialmente en iones hidrógeno e iones hipoclorito (OCL<sup>-</sup>). El cloro que se encuentra en el agua después de un tratamiento se denomina cloro residual, el conjunto de cloro libre y cloro combinado se llama cloro residual total. Son susceptibles a ocasionar una corrosión en las canalizaciones y en los depósitos, en especial para los elementos de acero inoxidable (APHA, 1992, p. 24).

1.3.2.3.3. *Parámetros microbiológicos*

➤ ***Coliformes fecales***

Son un subgrupo de las coliformes totales que permiten la fermentación de la lactosa a 44,5 °C. Aproximadamente el 95 % del grupo de los coliformes presentes en heces fecales, están formados por *Escherichia coli* y ciertas especies de *Klebsiella*. Se considera que los coliformes fecales reflejan mejor la presencia de contaminación fecal, ya que se encuentran exclusivamente en las heces de los animales de sangre caliente. Algunos coliformes tienen la capacidad de multiplicarse en el agua (Madigan; et al, 1997, p. 986).

➤ *Coliformes totales*

Su presencia en cantidades determinadas indica un mal tratamiento o una manipulación inadecuada. El grupo de los coliformes totales incluye microorganismos que pueden sobrevivir y proliferar en el agua. No pueden ser usados como índice de agentes patógenos fecales, pero pueden ser utilizados como indicadores de la eficacia de tratamientos y para evaluar la limpieza e integridad de sistemas de distribución y la posible presencia de biopelículas (WOK, 1996, p. 193).

1.3.2.4. *Composición típica de los lixiviados*

Los lixiviados se clasifican en dos grupos, de acuerdo con el tiempo de operación del relleno sanitario, y particularmente, de la celda del relleno, de la cual, provengan (jóvenes < 5 años y maduros > 10 años de operación) (Renou; et al, 2008, p. 468).

**Tabla 2-1:** Composición típica de los lixiviados.

COMPONENTES	UNIDADES	LIXIVIADO JOVEN (< 5 AÑOS)		LIXIVIADO MADURO (> 10 AÑOS)
		INTERVALO	TÍPICO	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2000-3000	10000	100-200
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	3000-60000	18000	100-500
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	200-2000	500	100-400
Nitrógeno Orgánico	mg/L	10-800	200	80-120
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	10-800	200	20-40
Nitrato	mg/L	5-40	25	5-10
Fósforo Total	mg/L	5-100	30	5-10
Fósforo en Ortofosfatos	mg/L	4-80	20	4-8
Alcalinidad	mg/L	1000-10000	3000	200-1000
Potencial de Hidrógeno	mg/L	4,5-7,5	6	6,5-7,5
Dureza Total	mg/L	300-10000	3500	200-500
Calcio	mg/L	200-3000	1000	100-400
Manganeso Total	mg/L	50-1500	250	50-200
Potasio	mg/L	200-1000	300	50-400
Cloruros	mg/L	200-3000	500	100-400
Sulfatos	mg/L	50-1000	300	20-50
Hierro Total	mg/L	50-1200	60	20-200

Fuente: Renou; et al, 2008.

### *1.3.2.5. Alternativas de tratamiento de lixiviados*

El tipo de instalaciones de tratamiento utilizadas dependerá principalmente de las características del lixiviado, motivo por lo cual se debe realizar una caracterización física, química y biológica del líquido contaminante para determinar los parámetros que deben ser tomados más en cuenta para el tratamiento, otro factor importante es el área disponible y la localización geográfica del relleno sanitario. Las características más preocupantes del lixiviado incluyen la DQO, DBO<sub>5</sub>, metales pesados, entre otros, por lo que el tratamiento a ser utilizado debe ser el adecuado para su descontaminación (Átlas, 2007, pp. 449-450).

(Átlas, 2007, pp. 449-450), explica que debido a la complejidad de la matriz del lixiviado es muy difícil que un solo tipo de tratamiento obtenga un efluente apto para ser vertido al medio natural, por lo que muchos tratamientos completos consisten en la suma de distintos procesos en serie, lo que le otorga una complejidad importante al tratamiento.

A continuación, se indica algunas de las principales tecnologías que se tiene actualmente.

#### *1.3.2.5.1. Procesos Anaerobios*

Las tecnologías tradicionales para la remoción de materia orgánica son los procesos biológicos de tratamiento. La aplicación de los procesos anaerobios es apropiada para el caso de un lixiviado joven, en especial lixiviados de rellenos con altos contenidos de materia orgánica (Ramalho, 1990, p. 45).

Las principales ventajas que presentan los procesos anaerobios son la mayor simplicidad en el sistema de tratamiento y la menor producción de lodos. A pesar de ello, hay que tener en cuenta varias preocupaciones que existen al utilizar este tipo de procesos (Ramalho, 1990, p. 45).

La presencia de amoníaco y de minerales disueltos, en concentraciones altas, puede generar problemas de toxicidad para los microorganismos. Esto involucraría una remoción previa del amoníaco en caso de que este fuera el problema, o el uso de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por causa de la toxicidad. Por otro lado, los investigadores que han trabajado con los sistemas de tratamiento anaerobio para lixiviados en rellenos sanitarios coinciden en señalar una acumulación muy significativa de material inorgánico precipitado dentro del reactor y en los lodos mismos del sistema anaerobio (Ramalho, 1990, p. 45).

#### *1.3.2.5.2. Procesos Aerobios*

(Romero, 1999, p. 79), indica que los procesos aerobios al igual que los anaerobios han sido ampliamente estudiados para el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios. Existe experiencia con una gran variedad de tipos de sistemas, desde las tradicionales lagunas aireadas, hasta sofisticados sistemas que acoplan reactores biológicos con procesos de ultrafiltración con membranas.

Estos procesos son muy utilizados cuando se desea obtener una baja concentración de DBO en los efluentes y, como prácticamente las concentraciones de DBO en los lixiviados son muy altas es relativamente fácil poseer remociones porcentuales superiores al 90 % en este parámetro. Sin embargo, la DBO remanente puede ser todavía alta (Romero, 1999, p. 79).

Los costos de inversión y de operación y mantenimiento de los procesos aerobios son más altos a los de los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, por lo que se logran mejores relaciones beneficio / costo cuando se emplean para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de DBO. Por esta razón, y dependiendo de las exigencias del vertimiento, se utilizan preferencialmente a los sistemas anaerobios como postratamiento, o para lixiviados viejos con bajos niveles de DBO (Romero, 1999, p. 79).

En la operación de estos procesos, se mencionan problemas con la generación de espumas, con la precipitación de hierro, y problemas para aceptar altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas que caracterizan a los lixiviados, en el caso de los lodos activados (Tchobanoglous; et al, 1998, p. 479).

#### *1.3.2.5.3. Sistemas Naturales*

Las principales ventajas de estos sistemas son la simplicidad en su operación, y la posibilidad de conseguir distintos niveles de tratamiento, desde un pretratamiento hasta un tratamiento terciario en caso de ser necesario. La combinación de las lagunas y los humedales puede manejar muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como por ejemplo la acumulación de precipitado y la formación de espumas. Esto se consigue con tiempos de retención hidráulica y volúmenes de procesos muy altos, que permite ajustar acumulaciones de precipitados y con una baja generación de espumas (Giraldo, 1997, p. 48).

#### *1.3.2.5.4. Evaporación*

(Átlas, 2007, pp. 449-450), estudia que la evaporación es un sistema de tratamiento de lixiviados moderno. En ella se utiliza la energía que se posee en el biogás del relleno sanitario en evaporar el lixiviado por calentamiento. Existen diversos tipos de tecnologías ya desarrolladas para alcanzar el objetivo. Las tecnologías existentes permiten conseguir el control del total de emisiones de lixiviados del relleno sanitario, quedando un lodo que se sitúa nuevamente en el relleno.

(Ramalho, 1990, p. 45), explica que dependiendo del tipo de lixiviado en algunos casos existe la necesidad de hacer un postquemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para obtener la eliminación de emisiones de COVs que se arrastran durante el proceso de evaporación, de tal forma que la cantidad requerida de biogás se aumenta con respecto a los cálculos termodinámicos normales. Aunque, una vez quemados los COVs las emisiones del proceso se limitan a vapor de agua y a un lodo espesado.

#### *1.3.2.5.5. Recirculación de los lixiviados*

Al recircular los lixiviados, se consigue un incremento en la humedad de los residuos dispuestos, que a su vez provoca un aumento de la tasa de producción de gas metano en el relleno. Una vez que los ácidos han sido metanizados, el pH del lixiviado aumenta y al aumentar el pH la solubilidad de los metales disminuye de tal manera que se consigue una reducción de los metales en solución que son transportados por el lixiviado. Por lo tanto, se alcanza una reducción significativa tanto de DBO como de los metales que arrastra el lixiviado. Prácticamente, se considera que el nivel de tratamiento alcanzado es el de pretratamiento, siendo necesaria la aplicación de un tratamiento posterior. Además, se tiene otros beneficios a su efecto en el pretratamiento de los lixiviados como son: incremento en las tasas de generación de biogás en el relleno sanitario, maximización de la generación de gas por tonelada de residuo dispuesta, incremento de las tasas de estabilización y asentamientos en el relleno (Giraldo, 1997, p. 50).

#### *1.3.2.5.6. Sistemas de Membranas*

Existen aplicaciones como la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa, la ósmosis directa e incluso la pervaporación al tratamiento de los lixiviados, bien sea de forma directa, o acoplada a otro tipo de tratamiento. Por ejemplo, se aprecia que tanto la microfiltración como la ultrafiltración se han ajustado a procesos biológicos de tratamiento

aerobio, en reemplazo de los sedimentadores, tanto para la remoción de DBO, como para la nitrificación del amoníaco (Giraldo, 1997, pp. 50-51).

### 1.3.2.6. Sistemas de Tratamiento de Lixiviados

#### 1.3.2.6.1. Vertedero Rectangular

##### ➤ *Vertedero*

Es una pared que tiene una escotadura de forma regular, por medio de la cual fluye una corriente líquida. El vertedero obstaculiza la corriente, provocando una elevación del nivel aguas arriba. Se utiliza para controlar niveles y mediar caudales (Marbello, 2017, p.5).

Tomando en consideración los caudales se recomienda los siguientes tipos de vertederos:

**Tabla 3-1:** Tipos de vertederos de acuerdo al caudal.

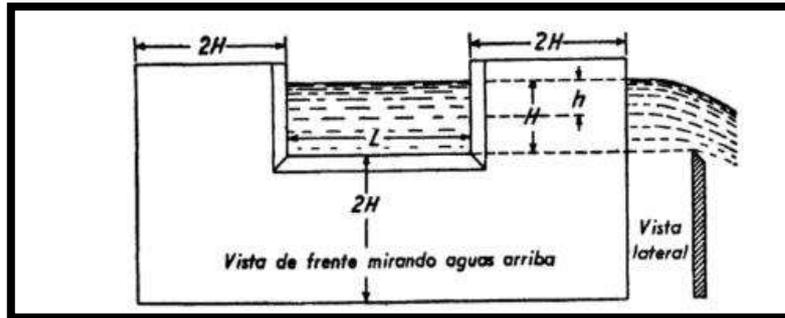
<b>Si el caudal (L/s) es a partir de:</b>	<b>Tipo de Vertedero:</b>
0,1	Triangular de 60°
0,15	Triangular de 90°
1,9	Rectangular

Fuente: Lux, 2010.

##### ➤ *Vertedero Rectangular*

Es una abertura con una sección de caudal en forma de rectángulo con paredes delgadas, de metal, madera o algún polímero resistente, con una cresta biselada o cortada en declive, a fin de obtener una arista delgada. La precisión de la lectura que ofrece está determinada por su nivel de error que oscila entre un 3 y 5 % (Lux, 2010, p. 13).

En el vertedero rectangular de paredes delgadas, el corte es rectangular con un ancho igual al del curso del agua (sin contracción), o con ancho menor que el mismo (con contracción) (Lux, 2010, p. 13).



**Figura 1-1:** Vertedero rectangular con contracción final completa.

Fuente: Lux, 2010.

### 1.3.2.6.2. Cribado

El desbaste o cribado consiste en realizar el paso del agua por un sistema de rejjas o rejillas metálicas que retienen los sólidos en la parte superior de las rejillas y que solo deja pasar el agua; estas rejillas pueden ser rectas, inclinadas u horizontales, pero se prefieren sistemas inclinados ya que evitan el taponamiento de los espacios por donde fluye el agua. (Fandiño, 2017, pp. 15-16).

El cribado puede ser grueso si se utilizan rejjas, medio con rejillas o finos si se utilizan rejillas finas. Los criterios utilizados en su diseño incluyen: el tamaño de la barra, el espaciado y el ángulo desde la vertical, así como la anchura del cauce y la velocidad de aproximación de las aguas residuales (Ruiz, 2016, p. 21).



**Figura 2-1:** Rejjas y rejillas de limpieza manual y su operación, respectivamente.

Fuente: Ruiz, 2016.

#### *1.3.2.6.3. Aireación*

Es el proceso de oxidación de microorganismos de las aguas residuales a través de organismos naturales microscópicos, con la presencia de sopladores de aire que proporcionan oxígeno. El objetivo de este proceso es reducir la demanda bioquímica de oxígeno. Los microorganismos que son mezclados con las aguas residuales absorben el oxígeno del aire y toman los nutrientes de estas aguas, si la concentración de los lodos se mantiene en un nivel controlado, se descomponen los residuos orgánicos del influente. Este proceso lleva el nombre de fase de reacción. El lodo activado se refiere a la producción de una masa activa de microorganismos capaz de estabilizar aeróbicamente los residuos (Meseth, 2013, p. 141).

##### *✓ Tanque de aireación*

Está equipado de aireadores para proporcionar el oxígeno a las bacterias que colonizan la biomasa. Los dos procesos más extendidos para suministrar el aire son por un lado los aireadores de superficie y por otro lado los difusores de aire dispuestos sobre el fondo del tanque. La aireación de las aguas residuales que habitan en el tanque de aireación produce la formación de flóculos a causa de las propiedades de las bacterias. Para aumentar la velocidad de formación de estos flóculos, que constituyen la biomasa, la puesta en marcha de una estación de depuración puede ser acelerada por el aporte de lodos de otra instalación (Charpentier, 2014, p. 12).

##### *✓ Sistema de aire difuso*

Este tipo de sistema tiene como funcionamiento que el aire sea distribuido desde el fondo del tanque en forma de burbujas de aire. El sistema más común de formación es el de burbuja fina, que consiste en la formación de pequeñas burbujas de aire que ascienden y entran en contacto con el agua residual y rempazan a los gases disueltos en el agua (FOE, 2014, p. 20).

#### *1.3.2.6.4. Coagulación*

Es la desestabilización de la suspensión coloidal, por medio de la aplicación de coagulantes químicos y de la energía de mezclado para favorecer su aglomeración y, no solamente elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos (Andía, 2000, p. 9).

### *1.3.2.6.5. Sedimentación*

Este proceso consiste en la eliminación de los flóculos formados en la coagulación por efecto de la gravedad y de la densidad de los mismo, básicamente es una separación sólido - líquido en donde el sólido que tienen un peso específico mayor se deposita en el fondo del tanque; con lo que se eliminan algunos contaminantes presentes en el agua; esta sedimentación también puede ser forzada por efecto de bombas, pero hace difícil su operación y generan más costos en la instalación (Lyonnaise, 1985, pp. 487-491).

#### ✓ *Tanques de sedimentación*

Son construcciones hidráulicas donde se realiza el proceso de sedimentación, por lo general son tanques muy largos y de gran tamaño que permiten almacenar el líquido durante largos periodos de tiempo con el fin de que el tiempo de residencia en el sedimentador sea mayor al tiempo de precipitación con lo que se asegura que todas los flóculos formados sedimenten en la cámara (Lyonnaise, 1985, pp. 487-491).

- **Tanques Circulares:** Su configuración geométrica es circular, en este el agua después de la coagulación ingresa por la parte superior y el agua sedimentada sale por la periferia del tanque, mientras que los lodos precipitados son recogidos en la parte inferior del sedimentador.
  
- **Tanque Rectangular:** Su configuración es de tipo rectangular y consta de las siguientes zonas:
  - a) **Zona de Entrada:** Distribuye el fluido proveniente de la coagulación, de forma que la velocidad sea constante en todo el trayecto del sedimentador.
  - b) **Zona de Sedimentación:** Es el lugar donde se realiza la sedimentación de los flóculos, con la disminución de la velocidad se realiza el proceso de sedimentación.
  - c) **Zona de Lodos:** Se ubica en la parte inferior del tanque, esta zona es inclinada con lo que permite que los sedimentos se aglomeren en un sólo punto para dar su recolección.
  - d) **Zona de Salida:** En esta zona el agua abandona el tanque de sedimentación, la velocidad se aumenta con el fin de lograr vencer las pérdidas generadas en el tanque.

#### *1.3.2.6.6. Biorreactor*

Es un sistema que conserva un ambiente biológicamente activo, en el que se lleva a cabo un proceso químico que incluye organismos o sustancias bioquímicamente activas. Su interior está compuesto por microorganismos y sustratos que serán convertidos por estos a través de un proceso biocelular que conlleva una transformación de los sustratos en metabolitos y biomasa (Atkinson, 2008, pp. 26-30).

Un proceso de biorreacción consiste en definir y asegurar unas condiciones óptimas de reacción donde se asegura la obtención del producto o productos deseados con el mayor rendimiento posible y donde los distintos parámetros de diseño (temperatura, aireación, pH, etc.) son definidos bibliográficamente (Menzolla, 2015, p. 27).

#### *1.3.2.6.7. Espesamiento de lodos*

Las partículas que se acumulan en el fondo del tanque se comprimen mediante un proceso llamado espesamiento, el cual consiste en la remoción del agua de lodo para alcanzar una reducción en el volumen; es decir, separa las dos fases líquida y sólida, con el objetivo de aumentar las concentraciones de sólidos, de manera que los volúmenes sean mínimos y la manipulación y disposición final sean más fáciles (Caldiño & Tzatchkov, 2007, p. 75).

Los lodos son espesados con la finalidad de reducir los costos de capital y operación de los procesos subsecuentes, mediante la reducción de volumen. Dependiendo del proceso seleccionado, el espesamiento tiene otros beneficios como: el mezclado de lodo, almacenamiento, igualación del gasto, remoción de arena, lavado de gases y clarificación (Caldiño & Tzatchkov, 2007, p. 75).

El espesado puede llevarse a cabo mediante los siguientes procedimientos físicos:

##### ➤ ***Espesado por gravedad***

Se realiza en un tanque de diseño similar al de un tanque de sedimentación convencional. Normalmente se emplea un tanque circular. El fango diluido es conducido hacia una cámara de alimentación central y comienza a sedimentar y a compactarse en la parte inferior. El fango espesado se extrae del fondo del tanque y el líquido clarificado, que se extrae por la parte superficial, normalmente por vertederos perimetrales, se envía a cabecera de planta o al primario (Jácome & Suárez, 2017, p. 14).

➤ ***Espesado por flotación***

La flotación en aguas residuales sirve para la eliminación de materias sólidas y/o líquidas de densidad inferior a la del agua. El desarrollo de este tratamiento ha conducido al proceso de flotación por aire disuelto que además es capaz de eliminar, por flotación, sólidos de densidad superior a la del agua. Los espesadores por flotación, al estar el agua saturada en aire, tienen menos probabilidades a sufrir descomposiciones anaerobias y, en consecuencia, a generar malos olores (Jácome & Suárez, 2017, p. 17).

El proceso de flotación por aire disuelto, consiste en la creación de microburbujas de aire en el seno del agua residual, las cuales se unen a las partículas a eliminar formando agregados capaces de flotar (Jácome & Suárez, 2017, p. 21).

➤ ***Espesado por centrifugación***

Sirven tanto para espesar los lodos como para deshidratarlos. Su aplicación se limita al espesado de los lodos biológicos. Este proceso consiste en la sedimentación de las partículas de lodo bajo la influencia de las fuerzas centrifugas. Existen dos principales tipos de espesado por centrifugación: la de camisa maciza y la de cesta (Jácome & Suárez, 2017, p. 22).

➤ ***Tanque de espesamiento de lodos***

En el diseño de estos tanques es muy importante dejar suficiente espacio para el almacenamiento de los lodos, que reducen, en efecto, la profundidad del tanque que esté disponible para sedimentación adicional. También influye en el diseño de las operaciones, el mantenimiento y el cronograma de la extracción de lodos (Bassan & Dodane, 2011, p. 124).

## **1.4. Beneficiarios directos e indirectos**

### ***1.4.1. Beneficiarios directos***

Los beneficiarios directos del diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados serán:

- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Lago Agrio – GADMLA, que impulsa proyectos de sostenibilidad y cuidado del ambiente de zonas protegidas.
- Los trabajadores del sistema de recolección de basura; dado que se verá reducido los riesgos a la salud que sufren por el contacto con los lixiviados al momento de la manipulación y deposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario.
- Los pobladores de las zonas cercanas al relleno sanitario, ya que ellos se ven afectados por la infiltración de los lixiviados; mismos que están afectando a su salud y a la salud de los animales.

### ***1.4.2. Beneficiarios indirectos***

El diseño del sistema de tratamiento de lixiviados beneficiará directamente a:

- Los pobladores del Cantón Lago Agrio, ya que reducirá el impacto ambiental generado por el mal manejo de los residuos sólidos; además, con la implementación y el funcionamiento de la planta se tendrá que contratar mano de obra calificada, con la generación de empleo en el cantón.
- Los pobladores de otras provincias de la zona oriental del Ecuador, ya que podrán tomar como ejemplo, el diseño del sistema de tratamiento de los lixiviados y adaptarlas a las condiciones de sus cantones, con lo que se mejorará la calidad de vida y se reducirá la contaminación.

## **CAPÍTULO II**

### **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **2.1. Objetivo general**

Diseñar un Sistema de Tratamiento para Lixiviados recolectados en el Relleno Sanitario del Cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbíos.

#### **2.2. Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización física, química y microbiológica de los Lixiviados recolectados en el Relleno Sanitario en base al TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9 establecidos en la Norma de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.
- Realizar pruebas de tratabilidad para obtener los parámetros del diseño.
- Efectuar los cálculos de ingeniería para el dimensionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados estableciendo su factibilidad técnica y económica.
- Validar el Diseño con la caracterización final física, química y microbiológica de los Lixiviados en base al TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9 establecidos en la Norma de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

## CAPÍTULO III

### 3. ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1. Localización del proyecto

El presente trabajo investigativo se realizó en dos locaciones distintas, en el Cantón Lago Agrio ubicado en la provincia de Sucumbíos, se realizó la toma de muestras; mientras que las pruebas experimentales, se realizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en el Cantón Riobamba panamericana sur km 1½, provincia de Chimborazo; las condiciones experimentales se resumen en la tabla 1-3 y 2-3, respectivamente y la georreferenciación geográfica se detallan en la figura 1-3 y 2-3, respectivamente.

**Tabla 1-3:** Condiciones Meteorológicas del Cantón Lago Agrio.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores Promedios</b>
Altitud, msnm	300
Temperatura, °C	37,5
Precipitación, mm/mes	580,5
Humedad relativa, %	90

Fuente: Ortiz, 2017.

**Tabla 2-3:** Condiciones Meteorológicas del Cantón Riobamba.

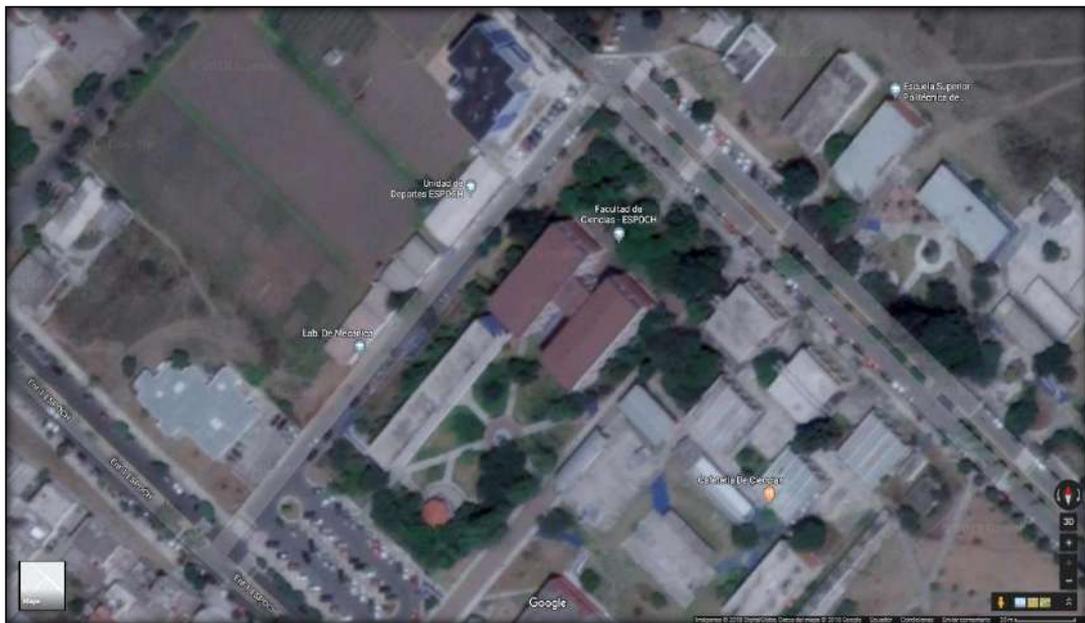
<b>Parámetros</b>	<b>Valores Promedios</b>
Altitud, msnm	2750
Temperatura, °C	13,5
Precipitación, mm/mes	820
Humedad relativa, %	75

Fuente: ESPOCH, 2017.



**Figura 1-3:** Georreferenciación espacial del relleno sanitario ubicado en el Cantón Lago Agrio.

Fuente: Maps, 2018.



**Figura 2-3:** Georreferenciación espacial del Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Fuente: Maps, 2018.

## **3.2. Ingeniería del proyecto**

### **3.2.1. Tipo de estudio**

Para desarrollar el diseño de un sistema de tratamiento para lixiviados recolectados en el relleno sanitario del Cantón Lago Agrio, fue elemental establecer las técnicas y los procedimientos que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos planteados; por tal razón, el tipo de estudio fue experimental y analítico, pues se realizaron diferentes técnicas durante cada etapa de la investigación, para conocer los distintos contaminantes presentes en los lixiviados, que son descargados a un cuerpo receptor de agua dulce; todos los resultados fueron reportados de manera analítica, por lo que es necesario expresar los resultados cuantitativamente.

### **3.2.2. Metodología**

Para alcanzar los objetivos propuestos en la presente investigación, como primer paso se realizó la búsqueda y la recopilación de información bibliográfica, que incluyó técnicas de muestreo en rellenos sanitarios, métodos de tratamiento de lixiviados y sistemas de aprovechamiento de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, con esto se sentó las bases para el desarrollo experimental de la investigación.

Con la base de los conocimientos generados, se llevó a cabo el muestreo de los lixiviados directamente en el relleno sanitario, localizado en el Cantón Lago Agrio y, se transportó las muestras a la ciudad de Riobamba, donde se efectuó los análisis de calidad del agua, tomando en consideración los principales parámetros recopilados en la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9.

El siguiente paso, una vez realizada la caracterización física, química y microbiológica de los lixiviados, fue la selección de los métodos de pretratamiento, tratamiento físico, tratamiento químico, que incluyó la selección y la dosificación óptima del coagulante y, tratamiento biológico, que incluyó la aplicación de microorganismos, mediante varias simulaciones de los mismos a nivel de laboratorio.

La validación del sistema de tratamiento de lixiviados, se realizó mediante la caracterización final del lixiviado tratado; comparando los resultados obtenidos con la Tabla 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, del ANEXO 1, LIBRO VI del TULSMA; al

evaluar que todos los parámetros del agua cumplan con la norma ambiental vigente, se acepta el sistema de tratamiento y se procede a la propuesta tecnológica de los equipos e instalaciones a implementar.

### **3.2.3. Métodos y técnicas**

#### **3.2.3.1. Métodos**

Para facilitar el estudio y desarrollo del sistema de tratamiento de lixiviados adecuado para el cantón, se utilizaron tres métodos de referencia: el inductivo, deductivo y experimental.

- **Método Inductivo**

Este método se aplicó como primer punto en la investigación, ya que fue necesario partir de un problema central, que para el presente trabajo fue la generación de lixiviados en el relleno sanitario y sus características; a partir de este método también se apuntó cada una de las variables que se observaban a lo largo del proceso investigativo; con esto se obtuvo la conclusión del método óptimo de tratamiento de los lixiviados.

- **Método Deductivo**

El método deductivo incluye la inferencia de los datos en base a las conclusiones ya existentes, en la presente investigación el método deductivo se utilizó para determinar el tipo de coagulante y la concentración del mismo, ya que según los resultados reportados en la bibliografía, se escogió las condiciones necesarias para el tratamiento del agua, además en otras pruebas de calidad del agua, se esperaban los resultados reportados en diferentes investigaciones de acuerdo al tipo de agua residual.

- **Método Experimental**

El método experimental fue necesario para toda la etapa investigativa, ya que recogió el total de las técnicas y métodos empleados, desde el muestreo de los lixiviados hasta la validación de las técnicas de tratamiento del agua residual; por lo que este método es fundamental para poder demostrar las teorías y conclusiones inferidas del proceso experimental que recoge el método inductivo y deductivo a fin de reportar los resultados requeridos.

### 3.2.3.2. Técnicas

#### 3.2.3.2.1. Técnica empleada para el muestreo de los lixiviados

El procedimiento utilizado para la recolección de muestras de lixiviados presentes en el relleno sanitario, se basó en la Norma de Calidad Ambiental para el manejo y disposición final de desechos no peligrosos que rige en el ANEXO VI del TULSMA; en la tabla 3-3, se reportan los materiales, equipos y el procedimiento necesario para un muestreo homogéneo, para que los resultados sean confiables.

**Tabla 3-3:** Técnica de muestreo de lixiviados de acuerdo a la Norma de Calidad Ambiental para el manejo y disposición final de desechos no peligrosos.

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Guantes.</li><li>• Botas.</li><li>• Lentes de protección.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Probetas.</li><li>• Baldes con medida.</li><li>• Tapas.</li><li>• Etiquetas.</li></ul>
<b>Procedimiento</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Verificar el punto donde se encuentran los lixiviados producidos en el relleno sanitario (piscinas).</li><li>• Realizar un lavado de los recipientes con los lixiviados, procurando mezclar el líquido en el recipiente con constante agitación y desechar el agua después del proceso.</li><li>• Abrir las probetas y baldes con medida y colocar debajo del flujo generado hasta el volumen necesario de muestra.</li><li>• Tapar la muestra con la etiqueta respectiva, la etiqueta debe llevar el nombre de la persona que realiza el muestreo, la hora, el lugar exacto, la temperatura a la que se realizó el muestreo.</li><li>• Guardar en lugares con poca presencia de sol y de humedad hasta el transporte.</li></ul>	

Fuente: INEN, 2013.

#### 3.2.3.2.2. Técnicas empleadas para la caracterización de los lixiviados

Para la caracterización física, química y microbiológica de los lixiviados a tratar, se utilizaron los Métodos Normalizados APHA, AWWA, WPCF 17 ed. establecido en el manual del Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Para la selección de las pruebas se recogió los parámetros recopilados en la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, tales como: pH, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad, color, aceites y grasas, cloruros, cobre, manganeso, zinc, hierro, demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>), demanda

química de oxígeno (DQO), fósforo total, sulfatos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales, sólidos totales y coliformes fecales (Anexo C).

### **3.2.4. Procedimiento a nivel de laboratorio**

#### **3.2.4.1. Selección de la materia prima**

Para la selección de la muestra, se siguió la técnica y procedimiento, que se detallan en la sección 3.2.3.2.1.; para realizar el muestreo se estableció un cronograma de actividades de acuerdo a las condiciones de operación de la planta y a las condiciones de lluvia del Cantón Lago Agrio, debido a que, si se tomaba las muestras en días con altas precipitaciones, no se tendría un muestreo adecuado y no sería homogéneo.

Para la presente investigación, se monitoreo el relleno durante dos meses, en donde cada semana se realizó una toma de muestras; lo que dio un total de 8 muestras, tomando por día de muestreo 1 galón de muestra; muestras suficientes para realizar la caracterización, test de jarras y validación del tratamiento de lixiviados.

El muestreo se realizó en horas de la mañana, debido a que en el cantón la recolección y deposición de la basura se realiza en horas de la tarde, al muestrearse en la mañana se deja reposar los residuos con lo cual el lixiviado se infiltra y arrastra los componentes que tendrá en su composición.

#### **3.2.4.2. Caracterización inicial de los lixiviados**

Se realizó la caracterización física, química y microbiológica de las muestras recolectadas, en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencia de la ESPOCH.

Los resultados obtenidos fueron tabulados y comparados en base al TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, establecidos en la Norma de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, para determinar que parámetros se encuentran fuera del límite permisible y así aplicar su respectivo tratamiento. Los resultados de los análisis físicos, químicos y microbiológicos del lixiviado se encuentran en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Resultados de la caracterización inicial física, química y microbiológica del lixiviado.

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>Norma TULSMA Límite Máximo Permisible</b>	<b>Resultados de caracterización Promedios</b>
pH	Und.	6 - 9	8,32
Conductividad	mSiems/cm	-	6,2
Temperatura	°C	-	20,2
Turbiedad	NTU	-	75,8
Color	Und Co/Pt	Inapreciable en dilución: 1/20	2320
Aceites y Grasas	mg/L	30	29,5
Cinc	mg/L	5	1,8
Cloruros	mg/L	1000	1240,75
Cobre	mg/L	1	1,3
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	580
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200	1740
Fósforo Total	mg/L	10	58
Hierro Total	mg/L	10	7,4
Manganeso Total	mg/L	2	0,76
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	30	142
Nitrógeno Total	mg/L	50	540
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	130	710
Sólidos Totales	mg/L	1600	6204
Sulfatos	mg/L	1000	150
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	2000	3000

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.2.4.3. Parámetros fuera del límite permisible

En la tabla 5-3, se indican los parámetros que no cumplen con la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

**Tabla 5-3:** Parámetros que no cumplen con la normativa vigente.

Determinaciones	Unidades	Norma TULSMA Límite Máximo Permisible	Resultados de caracterización Promedios
Cloruros	mg/L	1000	1240,75
Cobre	mg/L	1	1,3
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	580
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200	1740
Fósforo Total	mg/L	10	58
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	30	142
Nitrógeno Total	mg/L	50	540
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	130	710
Sólidos Totales	mg/L	1600	6204
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	2000	3000

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.2.4.4. Índice de Biodegradabilidad

El índice de Biodegradabilidad es la relación entre la capacidad química y biológica de degradación del agua (Fajardo, 2005, p. 27). En la tabla 6-3, se indica la relación del índice de biodegradabilidad y su respectivo tratamiento.

**Tabla 6-3:** Índice de Biodegradabilidad.

$DBO_5/DQO$	Carácter del efluente	Tratamiento a aplicar
< 0,2	Poco biodegradable	Tratamiento físico – químico
0,2 – 0,4	Biodegradable	Tratamiento físico – químico o biológico
> 0,4	Muy biodegradable	Biológico

**Fuente:** Cisterna & Peña, 2005.

**Tabla 7-3:** Promedio del índice de biodegradabilidad de las muestras recolectadas en el mes de junio y julio.

<b>Muestra</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Relación <i>DBO<sub>5</sub>/DQO</i></b>
Junio	DBO <sub>5</sub>	580	mg/L	0,33
	DQO	1740	mg/L	
Julio	DBO <sub>5</sub>	690	mg/L	0,49
	DQO	1400	mg/L	
<b>Promedio</b>				<b>0,40</b>

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

En la tabla 7-3, se determinó el índice de biodegradabilidad de cada muestra compuesta, de los meses de junio y julio, entre las cuales se obtuvo un promedio del índice de biodegradabilidad de 0,40; cuyo valor indica que los componentes del efluente son de naturaleza biodegradable (Tabla 6-3), por tal razón se aplica un tratamiento combinado, es decir, físico - químico y biológico.

#### *3.2.4.5. Descripción del procedimiento experimental*

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización inicial de los lixiviados y al no cumplir con los valores establecidos por la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce; es necesario realizar la selección de los sistemas de tratamiento; para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Se determinó el tiempo óptimo del proceso de aireación, comparando tiempos de residencia entre 10, 15, 20, 25 y 30 minutos; se caracterizó el lixiviado y se efectuó el proceso a 30 minutos, evidenciándose el aumento de la calidad del agua.
- Se seleccionó el tipo del agente coagulante y su dosificación óptima, mediante el uso del test de jarras, a velocidades de 100 a 150 rpm, para el proceso de coagulación; se comparó entre: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico, en diferentes dosificaciones (10 g y 20 g en 100 mL de agua destilada) por muestra.
- Se determinó el pH, conductividad eléctrica, color, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, temperatura y turbiedad; y se seleccionó el mejor tratamiento que fue al agregar policloruro de aluminio al 10 % en 1000 mL de muestra a un pH 6.

- En el tratamiento biológico, para un determinado volumen de EM•1 activado, se realizó los siguientes pasos:
  - ✓ Colocar 1 parte de EM•1 y 1 parte de melaza de caña.
  - ✓ Agitar y añadir las otras 9 partes de agua.
  - ✓ Cerrar herméticamente el recipiente para evitar la entrada de aire.
  - ✓ Conservar en un sitio con una temperatura entre 25 a 40 °C, de 4 a 7 días para dar paso a la respectiva fermentación.
  - ✓ Eliminar el exceso de gas producido y revisar esporádicamente.
  - ✓ Revisar el pH de la solución que debe rodear un valor 4,0.
  - ✓ Emplear los microorganismos activados dentro de los subsiguientes 35 días.
  - ✓ Si el pH no está abajo de 4,0, hay contaminación y la solución con el producto debe ser desechado.
  - ✓ Evaluar los parámetros para conocer las eficiencias (Higa, 2014, p. 10).
  
- A nivel de laboratorio, se trataron 20 L de lixiviados, utilizando una relación de 1:1000, es decir, que por cada 1000 mL de lixiviado a tratar se agregó 1 mL de EM•1 activado, colocando en total 20 mL de EM•1 activados y se dejó reposar al cabo de un mes.
  
- Se realizó el proceso de cloración, para lo cual se dosificó 2,5 mL de cloro por litro de lixiviado tratado para cumplir con la Norma INEN 1108:2014.
  
- Se evaluó el pH, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad, color, cloruros, cobre, DBO<sub>5</sub>, DQO, fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y se comparó con la TABLA 9 del TULSMA para valorar la eficiencia de remoción de los contaminantes.

### **3.2.5. Selección del coagulante**

#### **3.2.5.1. Selección del tipo de coagulante**

Se seleccionó entre tres tipos de coagulantes, los cuales fueron: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio (PAC); se evaluó el porcentaje de remoción del color y la turbidez a una dosificación de 10 g por 100 mL de agua destilada de cada coagulante estudiado.

**Tabla 8-3:** Análisis del tipo de coagulante según el porcentaje de remoción del color y la turbidez en el tratamiento de lixiviados.

<b>Coagulante, 10 g/ 100 mL</b>	<b>Color</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Porcentaje de remoción del color, %</b>	<b>Porcentaje de remoción de la turbiedad, %</b>
Muestra original	2360	81	0	0
Sulfato de aluminio	741	36	68,60	55,56
Cloruro Férrico	300	46	87,29	43,21
<b>Policloruro de Aluminio</b>	<b>626</b>	<b>27</b>	<b>73,47</b>	<b>66,67</b>

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

En la tabla 8-3, se muestra que el sulfato de aluminio reportó valores iguales a 68,60 % y 55,56 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente, el cloruro férrico reportó valores iguales a 87,29 % y 43,21 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente y el policloruro de aluminio reportó valores iguales a 73,47 % y 66,67 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente.

### 3.2.5.2. Selección de la dosis óptima de coagulante

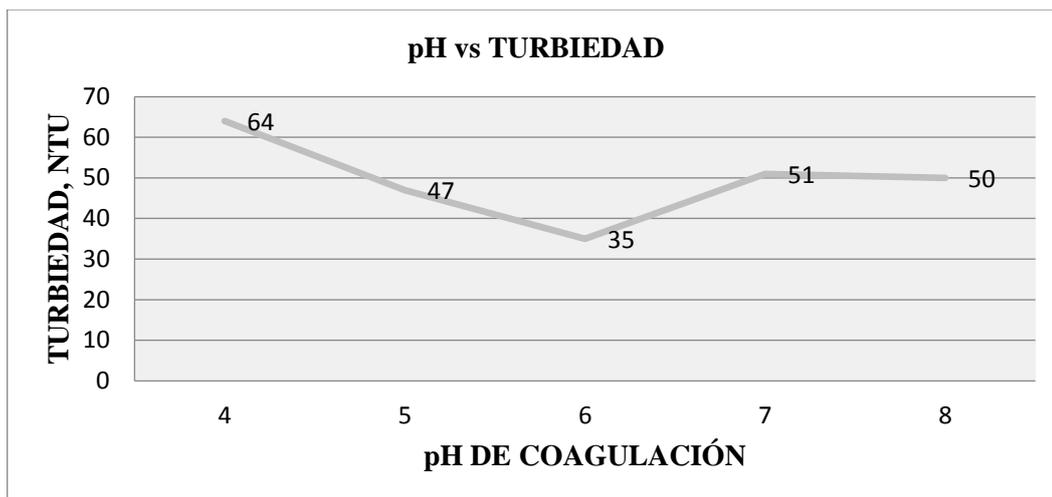
#### 3.2.5.2.1. pH óptimo de coagulación

Se estableció el pH óptimo de coagulación, utilizando los siguientes datos de turbiedad reportados en la tabla 9-3.

**Tabla 9-3:** Valores de turbiedad de los lixiviados a diferentes valores de pH.

<b>pH</b>	<b>Turbiedad, NTU</b>
4	64
5	47
6	35
7	51
8	50

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.



**Gráfico 1-3:** Curva de valores de turbiedad de los lixiviados a diferentes valores de pH.

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

En el análisis de los datos reportados en la tabla 9-3 y en el gráfico 1-3, se observa que a un pH 6 se obtuvo una turbiedad menor igual a 35 NTU; mientras que a un pH 5 se obtuvo valores iguales a 47 NTU, a un pH 7 se obtuvo resultados iguales a 51 NTU y a un pH 8 la turbiedad tuvo valores iguales a 50 NTU.

La coagulación se debe realizar a un pH óptimo de 6, ya que alcanza la máxima remoción de los contaminantes de los lixiviados; para controlar el pH es necesario ajustar la cantidad de coagulante adicionado, el tiempo de precipitación y la cantidad de aire que se inyecta en el proceso, al controlar estas variables se mejora el proceso de tratamiento de los lixiviados.

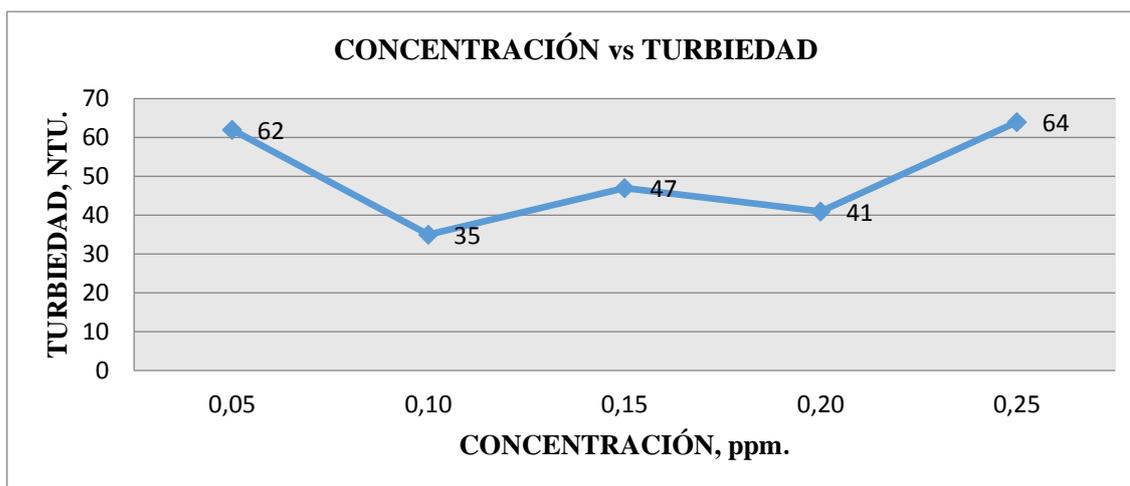
#### 3.2.5.2.2. Dosis óptima de coagulante

Se estableció la dosis óptima de coagulante, comparando entre cinco dosificaciones diferentes de policloruro de aluminio, como se muestra en la tabla 10-3.

**Tabla 10-3:** Valores de turbiedad de los lixiviados luego de la aplicación de diferentes dosis de policloruro de aluminio.

Concentración, ppm	Turbiedad, NTU
0,05	62
0,10	35
0,15	47
0,20	41
0,25	64

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.



**Gráfico 2-3:** Curva de comparación entre la dosis y la turbiedad de los lixiviados luego de la aplicación de diferentes dosis de policloruro de aluminio.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

En la tabla 10-3 y en el gráfico 2-3, se aprecia que la concentración óptima de policloruro de aluminio es de 0,10 ppm con un tiempo de agitación de 5 minutos a 150 rpm. También, se observa que a una dosis de 0,25 ppm de PAC la turbiedad alcanza un valor muy alto por lo que probar con una dosis mayor de PAC no traerá buenos resultados.

### 3.2.6. Caracterización final de los lixiviados

Se realizó la caracterización final de los lixiviados en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH; con estos resultados reportados en la tabla 11-3, se determina que los parámetros cumplen con la Norma Ecuatoriana reportada en el TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce; estableciendo así, que el sistema propuesto es fiable para su ejecución.

**Tabla 11-3:** Resultados de la caracterización final de los lixiviados del relleno sanitario.

Determinaciones	Unidades	Norma TULSMA Límite Máximo Permisible	Resultados
pH	Und.	6 – 9	8,68
Conductividad	mSiems/cm	-	2,75
Temperatura	°C	-	21,3
Turbiedad	NTU	-	5,6
Color	Und Co/Pt	Inapreciable en dilución: 1/20	232
Cloruros	mg/L	1000	80,8
Cobre	mg/L	1	0,23
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	97
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200	198
Fósforo Total	mg/L	10	0,07
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	30	28
Nitrógeno Total	mg/L	50	35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	130	8
Sólidos Totales	mg/L	1600	1196
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	2000	1000

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.2.7. Porcentaje de remoción del tratamiento de los lixiviados

Para determinar el porcentaje de remoción de la carga contaminante después del tratamiento aplicado al efluente contaminado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_r = \frac{S_o - S}{S_o}$$

**Ecuación 1-3.**

Dónde:

$E_r$ : Porcentaje de remoción, %

$S_o$ : Parámetro de entrada,  $\frac{mg}{L}$

$S$ : Parámetro de salida,  $\frac{mg}{L}$

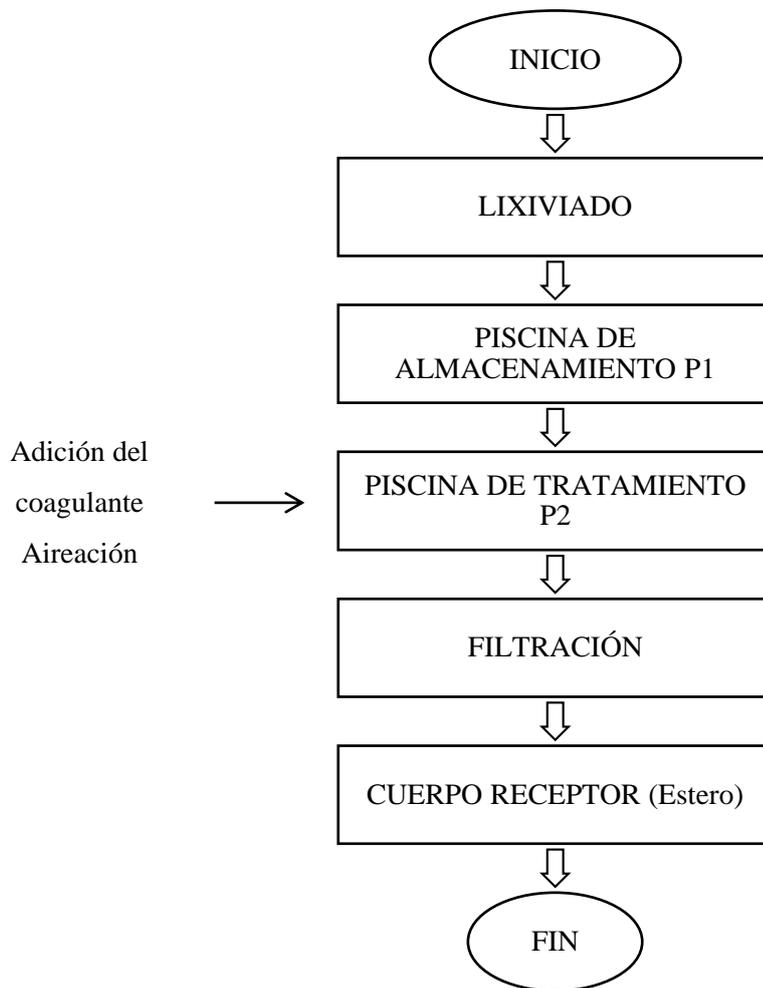
**Tabla 12-3:** Resultados del porcentaje promedio de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del lixiviado tratado.

Parámetro	Unidades	Inicial	Final	Norma TULSMA Límite Máximo Permisible	Porcentaje de Remoción, %
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	710	8	130	98,873
Sólidos Totales	mg/L	6204	1196	1600	80,722
DQO	mg/L	1740	198	200	88,621
DBO	mg/L	580	97	100	83,276
Cloruros	mg/L	1240,75	80,8	1000	93,488
Fósforo	mg/L	58	0,07	10	99,879
Cobre	mg/L	1,3	0,23	1	82,308
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	142	28	30	80,282
Nitrógeno Total	mg/L	540	35	50	93,519
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	3000	1000	2000	66,667
<b>PROMEDIO</b>					<b>87</b>

Elaborador por: CUENCA, Kerly, 2018.

En la tabla 12-3, se indica los porcentajes de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos más relevantes de los lixiviados, siendo la efectividad global del tratamiento combinado de 87 %.

### 3.2.8. Situación actual del tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario



**Gráfico 3-3:** Diagrama de Flujo del Sistema Actual de Tratamiento de Lixiviados.

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

Al momento, el sistema de tratamiento de lixiviados recolectados en el relleno sanitario, no cumple con los parámetros establecidos en la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9; por efecto del poco control y monitoreo de la calidad de los lixiviados y debido a que los equipos no están correctamente diseñados para que el tratamiento sea eficiente, es necesario instalar los equipos que se proponen a continuación, ya que se logró cumplir con la norma ambiental vigente; por lo que se afirma que el tratamiento propuesto es óptimo para mejorar la calidad del agua.

### **3.2.9. Selección del Caudal de Diseño**

#### **➤ Intensidad de lluvia en el Cantón Lago Agrio**

En la tabla 13-3, se muestra el resumen de la intensidad de lluvia en los últimos 10 años que ha existido en el Cantón Lago Agrio, este dato es fundamental para el cálculo de la cantidad de lixiviados que se producen mensualmente en el relleno sanitario; en la tabla 14-3, se resume los meses de mayor pluviosidad en el tiempo de análisis.

Al conocer el mes de mayor pluviosidad en el lapso de 10 años, se proyecta que la pluviosidad no va a subir de los valores reportados; con esto la estimación es válida para el cálculo del caudal de diseño para la planta de tratamiento de los lixiviados.

**Tabla 13-3:** Resumen de la intensidad de lluvia en el Cantón Lago Agrio durante los años 2008 - 2018.

Mes	Intensidad de lluvia (I)									
	Año									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 - 2018
Enero	394,3	431,6	92,8	247,9	312,7	111,5	169,6	341,4	30,9	251,5
Febrero	347,7	319,8	293,9	322,7	271,9	309	289,9	287,3	304,4	240,1
Marzo	352,1	395,9	163,5	429,9	485,6	420,3	369,2	379,6	371,1	400,7
Abril	254,9	429,3	373	673,3	300,8	273,2	340,1	327,7	218,9	361
Mayo	366,2	311,3	236,4	337	275,4	635,8	382,2	450,8	270,9	275,8
Junio	585,5	256,7	295,1	332,5	235	383,1	387,3	371,7	383	400,7
Julio	217,3	244,3	279,5	335,3	273,5	446,7	198,5	362,9	271,3	391,2
Agosto	320	177,2	230	303,5	233,6	286,5	159,8	166,3	139,3	195,3
Septiembre	330	137,8	128,1	225	162,5	306,9	208,2	116,6	171,5	255,1
Octubre	255,7	303,3	176,7	346,6	220,9	307,4	270,4	232,6	249,6	167,2
Noviembre	270,9	365,7	267,8	464,5	185,9	393,2	381,2	599,1	359,3	306,4
Diciembre	217,9	201,3	377,8	556,3	333,8	219,6	288,5	156,3	249	144,6

Fuente: GADMLA, 2018.

**Tabla 14-3:** Mes de mayor pluviosidad en la Ciudad de Nueva Loja, Cantón Lago Agrio (2008 - 2017).

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Conteo</b>
2008	Junio	
2009	Enero	Enero:1
2010	Diciembre	Marzo:2
2011	Abril	Abril:1
2012	Marzo	Mayo:1
2013	Mayo	<u>Junio:4</u>
2014	Junio	Noviembre:1
2015	Noviembre	Diciembre:1
2016	Junio	
2017	Junio, Marzo	

Fuente: GADMLA, 2018.

➤ **Cálculo del volumen de lixiviados producidos en el año 2017**

$$V_{Gn} = V_{Tn} + V_{An+1} - V_{An}$$

**Ecuación 2-3.**

Dónde:

$V_{Gn}$ : Volumen de lixiviados generados,  $m^3$

$V_{Tn}$ : Volumen tratado,  $m^3$

$V_{An+1}$ : Volumen almacenado para el siguiente mes,  $m^3$

$V_{An}$ : Volumen almacenado en el mes anterior,  $m^3$

Para el mes de enero del 2017, tomando en cuenta el mes de diciembre del 2016, el volumen de lixiviados fue igual a:

$$V_{Gn} = (1500 + 100 - 10) m^3$$

$$V_{Gn} = 1590 m^3$$

En la tabla 15-3, se reporta el resumen de la cantidad de lixiviados recolectados en el relleno sanitario desde el mes de diciembre del 2016 hasta el mes de enero del 2018.

**Tabla 15-3:** Volumen de lixiviados recolectados en el relleno sanitario durante los meses de diciembre del 2016 hasta el mes enero del 2018.

Mes	Volumen Almacenado (m <sup>3</sup> )	Volumen Generado (m <sup>3</sup> )	Volumen Tratado (m <sup>3</sup> )
Dic-16	<i>Final</i> 100		
Ene-17	<i>Inicios</i> 100	<b>1590</b>	1500
Feb-17	190	<b>1610</b>	1500
Mar-17	300	<b>4800</b>	4500
Abr-17	600	<b>4250</b>	4500
May-17	350	<b>1550</b>	1500
Jun-17	400	<b>5750</b>	6000
Jul-17	150	<b>1850</b>	1500
Ago-17	500	<b>1100</b>	1500
Sep-17	100	<b>1650</b>	1500
Oct-17	250	<b>1620</b>	1500
Nov-17	370	<b>1380</b>	1500
Dic-17	250	<b>1650</b>	1500
Ene-18	400		

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 16-3:** Caudal mensual de lixiviado.

Mes	Caudal mensual (m <sup>3</sup> /mes)
Enero	1590
Febrero	1610
Marzo	4800
Abril	4250
Mayo	1550
Junio	5750
Julio	1850
Agosto	1100
Septiembre	1650
Octubre	1620
Noviembre	1380
Diciembre	1650
<b>Promedio</b>	<b>2400</b>
<b>Volumen Promedio Diario de Lixiviados</b>	<b>80*</b>

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

\* El volumen diario de lixiviados es el cociente entre el promedio mensual de lixiviados generados y los días de operación del relleno sanitario al mes; que para el caso del relleno sanitario del Cantón Lago Agrio son 30 días.

### 3.3. Dimensionamiento de un Sistema de Tratamiento de Lixiviados

El tratamiento de los lixiviados tiene como objetivo reducir y/o evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica, microbiológica y radioactiva de los cuerpos de agua receptores. Consta de varias operaciones unitarias que son métodos en los cuales predominan fenómenos físicos y procesos unitarios, que promueven la eliminación de los contaminantes en base a procesos químicos o biológicos (Hammeken & Romero, 2005, pp. 34-37).

#### 3.3.1. Determinación del Caudal de Diseño

➤ *Caudal*

Es el volumen de un líquido que pasa a través de una sección del canal por unidad de tiempo. Para la determinación del caudal se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

**Ecuación 3-3.**

Dónde:

$Q$ : Caudal de diseño,  $\frac{L}{s}$

$V$ : Volumen,  $L$

$t$ : Tiempo,  $s$

➤ *Caudal de Diseño*

Los caudales máximos y medio de diseño son aquellos que permitirán dimensionar los diferentes equipos que conformen el sistema de tratamiento de lixiviados, obteniendo longitudes reales.

$$Q = \frac{5750 \text{ m}^3}{30 \text{ d}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q = 2,22 \frac{L}{s}$$

### 3.3.2. Dimensionamiento del Vertedero Rectangular

Para la entrada de los lixiviados, se tendrá que utilizar un vertedero, el cual permitirá el paso de los mismos hacia la planta de tratamiento y controlará el flujo del agua para evitar el mal funcionamiento de la planta; se escoge un vertedero rectangular, ya que es fácil su operación y su construcción es sencilla, que generará menos gastos en la instalación, con lo que es óptimo para que la inversión de la planta sea menor.

De acuerdo a la tabla 3-1, se escoge para el sistema de tratamiento de lixiviados recolectados en el relleno sanitario del Cantón Lago Agrio un vertedero tipo rectangular, ya que el caudal a procesar es de 2,22 L/s.

#### ➤ Criterios para el diseño del vertedero rectangular

En la tabla 17-3, se establecen los parámetros de diseño complementarios para el dimensionamiento del vertedero rectangular.

**Tabla 17-3:** Dimensiones típicas para el diseño de un vertedero tipo rectangular.

Parámetros	Dimensión
Material de construcción	Concreto
Altura mínima sobre el vertedero	$\geq 0,06 \text{ m}$

Fuente: Skertchly, 1988.

#### ➤ Coeficiente de descarga

Se calcula para minimizar los errores por la asunción de la velocidad constante en el canal y la altura normal en el agua, el coeficiente de descarga se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$C_d = 0,56 + \frac{0,0087}{h_1^{0,5}}$$

**Ecuación 4-3.**

Dónde:

$C_d$ : Coeficiente de descarga, adimensional.

$h_1$ : Altura mínima sobre el vertedero; 0,06 m (Tabla 17-3).

$$C_d = 0,56 + \frac{0,0087}{(0,06)^{0,5}}$$

$$C_d = 0,60$$

➤ **Carga hidráulica**

Es la altura que el agua alcanza sobre el vertedero y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = \sqrt[3]{\frac{2}{3} C_d * h_1}$$

**Ecuación 5-3.**

Dónde:

H: Carga hidráulica, *m*

C<sub>d</sub>: Coeficiente de descarga; 0,60 adimensional.

h<sub>1</sub>: Altura mínima sobre el vertedero; 0,06 *m* (Tabla 17-3).

$$H = \sqrt[3]{\frac{2}{3} * 0,60 * 0,06 \text{ m}}$$

$$H = 0,03 \text{ m}$$

➤ **Ancho de la cresta**

Es la distancia entre los agujeros del canal por donde circula el agua, el cálculo del ancho de la cresta en los vertederos rectangulares se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} C_d * \sqrt{2g} * b * H^{\frac{3}{2}}$$

**Ecuación 6-3.**

Dónde:

Q: Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

C<sub>d</sub>: Coeficiente de descarga; 0,60 adimensional.

g: Fuerza de la gravedad;  $9,8 \frac{m}{s^2}$

b: Ancho de la cresta,  $m$

H: Carga hidráulica del vertedero;  $0,03 m$

$$b = \frac{3 * Q}{2 * C_d * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}}$$

$$b = \frac{3 * 0,0022 \frac{m^3}{s}}{2 * 0,6 * \sqrt{2(9,8 \frac{m}{s^2})} * (0,03 m)^{\frac{3}{2}}}$$

$$b = 0,24 m$$

➤ *Longitud del vertedero*

Mide la distancia que atraviesa el fluido en el canal hacia el vertedero y se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$l = 5 * b$$

**Ecuación 7-3.**

Dónde:

l: Longitud del vertedero,  $m$

b: Ancho de la cresta;  $0,24 m$

$$l = 5 * 0,24 m$$

$$l = 1,20 m$$

➤ *Ancho del vertedero*

Es la distancia que existe entre las dos paredes que forman el canal y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$B = 1,5 * b$$

**Ecuación 8-3.**

Dónde:

$B$ : Ancho del canal,  $m$

$b$ : Ancho de la cresta;  $0,24 m$

$$B = 1,5 * 0,24 m$$

$$B = 0,36 m$$

➤ ***Distancia del fondo del canal hasta la cresta del vertedero***

Mide la distancia que existe entre el fondo del vertedero y la cresta del mismo, se calcula como se muestra a continuación:

$$z = \frac{0,008 * b}{0,605 - C_d - \frac{1}{1050 * b - 3}}$$

**Ecuación 9-3.**

Dónde:

$z$ : Distancia entre el fondo del canal hasta la cresta,  $m$

$C_d$ : Coeficiente de descarga;  $0,60$  adimensional.

$b$ : Ancho de la cresta;  $0,24 m$

$$z = \frac{0,008 (0,24 m)}{0,605 - 0,6 - \frac{1}{1050(0,24 m) - 3}}$$

$$z = 1,95 m$$

➤ ***Altura del vertedero***

Es la distancia que existe entre en el fondo del tanque y la capa superior del paso del agua y se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_{m\acute{a}x} = 1,75 * b + z$$

**Ecuación 10-3.**

Dónde:

$H_{m\acute{a}x}$ : Altura del vertedero, *m*

*b*: Ancho de la cresta; 0,24 *m*

*z*: Distancia entre el fondo del canal hasta la cresta; 1,95 *m*

$$H_{m\acute{a}x} = (1,75 * 0,24 \text{ m}) + 1,95 \text{ m}$$

$$H_{m\acute{a}x} = 2,37 \text{ m}$$

➤ **Área para el gasto del vertedero**

Mide el espacio superficial que ocupa el vertedero y hace relación a la longitud y ancho del vertedero como se muestra a continuación:

$$A_b = l * B$$

**Ecuación 11-3.**

Dónde:

$A_b$ : Área para el gasto del vertedero, *m*<sup>2</sup>

*l*: Longitud del vertedero; 1,20 *m*

*B*: Ancho del verterdero; 0,36 *m*

$$A_b = 1,20 \text{ m} * 0,36 \text{ m}$$

$$A_b = 0,43 \text{ m}^2$$

➤ **Área libre de paso**

Mide la distancia que existe entre las rejas y el canal por donde se alimenta el agua y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_l = l * b$$

**Ecuación 12-3.**

Dónde:

$A_l$ : Área libre del paso,  $m^2$

$l$ : Longitud del canal; 1,20  $m$

$b$ : Ancho de la cresta; 0,24  $m$

$$A_l = 1,20 \text{ m} * 0,24 \text{ m}$$

$$A_l = 0,29 \text{ m}^2$$

➤ **Tirante del canal de agua**

Mide la altura que existe entre las rejillas y la alimentación del fluido, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_n = \frac{A_l}{b}$$

**Ecuación 13-3.**

Dónde:

$h_n$ : Tirante del agua,  $m$

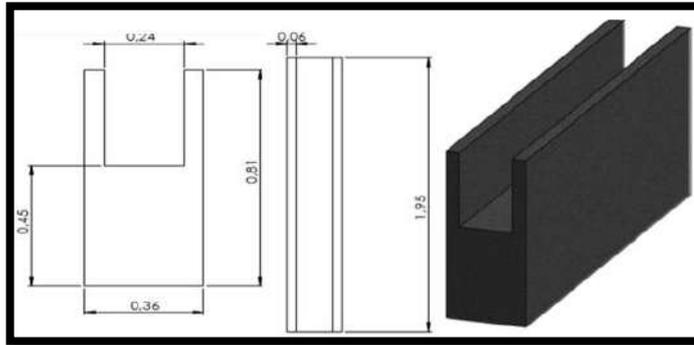
$A_l$ : Área libre de paso; 0,29  $m^2$

$h$ : Ancho del canal; 0,36  $m$

$$h_n = \frac{0,29 \text{ m}^2}{0,36 \text{ m}}$$

$$h_n = 0,81 \text{ m}$$

En la figura 3-3, se muestra el dimensionamiento del vertedero tipo rectangular que se propone para el tratamiento de los lixiviados.



**Figura 3-3:** Dimensionamiento del vertedero rectangular.

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

### 3.3.3. Dimensionamiento del Sistema de Cribado

#### ➤ Cribado

Es el principal proceso que encontramos en una planta de tratamiento de aguas residuales, ya que es un sistema con aberturas, generalmente de tamaño uniforme, cuyo objetivo es retener sólidos grandes que estén presentes en el agua residual.

#### ➤ Criterios para el diseño de un sistema de cribado

En la tabla 18-3, se describe las principales variables que se deben cumplir al momento de dimensionar el sistema de cribado y son características de las barras que existen en el mercado y que son comercializadas en el Ecuador. Este sistema será de limpieza manual e inclinada para permitir el flujo normal del lixiviado.

**Tabla 18-3:** Dimensiones típicas para el diseño de un sistema de cribado con rejillas.

Parámetros	Dimensión
Material de las barras	Acero Inoxidable
Apertura de la rejillas	18 mm
Velocidad de aproximación	$3,37 \frac{m}{s}$
Inclinación	45°
Dimensión del paso	25 mm
Espesor de las barras	20 mm

Fuente: Metcalf & Eddy, 2005.

➤ **Longitud de las rejas**

Se calcula esta variable para establecer las dimensiones que tendrán las barras que formen las rejas, para facilitar la limpieza manual esta magnitud no debe superar los 3 m según los estudios realizados por (Metcalf & Eddy, 2005, p. 33) y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L = \frac{h + h_n}{\text{sen } \theta}$$

**Ecuación 14-3.**

Dónde:

$L$ : Longitud de las rejas,  $m$

$h$ : Ancho del canal; 0,36  $m$

$h_n$ : Tirante del agua; 0,81  $m$

$\theta$ : Angulo de inclinación de las barras; 45° (Tabla 18-3).

$$L = \frac{0,36 \text{ m} + 0,81 \text{ m}}{\text{sen } (45)}$$

$$L = 1,65 \text{ m}$$

➤ **Número de barras**

Para el máximo atrapamiento de los residuos sólidos de gran tamaño es necesario instalar barras cuyo número será en función del área de las rejas y el tirante del agua.

$$n = \frac{h - A_b}{A_b + e_b}$$

**Ecuación 15-3.**

Dónde:

$n$ : Número de barras, unidades.

$h$ : Ancho del canal; 0,36  $m$

$A_b$ : Apertura de las rejillas; 0,018  $m$  (Tabla 18-3).

$e_b$ : Espesor de las barras; 0,020  $m$  (Tabla 18-3).

$$n = \frac{0,36 \text{ m} - 0,018 \text{ m}}{0,018 \text{ m} + 0,020 \text{ m}}$$

$$n = 9 \text{ barras}$$

➤ **Área de las rejas**

Mide el espacio en relación al ancho y largo que ocupará el sistema de cribado y se calcula como se muestra a continuación:

$$A_{re} = n * e_b$$

**Ecuación 16-3.**

Dónde:

$A_{re}$ : Área de las rejas,  $m^2$

$n$ : Número de barras; 9 unidades.

$e_b$ : Espesor de las barras; 0,020  $m$  (Tabla 18-3).

$$A_{re} = 9 \text{ m} * 0,020 \text{ m}$$

$$A_{re} = 0,18 \text{ m}^2$$

➤ **Velocidad de flujo entre las rejas**

Mide la velocidad con la que los lixiviados atravesarán el sistema de cribado, esto de acuerdo al gasto volumétrico y el área de paso.

$$v_r = \frac{Q}{A_l - A_{re}}$$

**Ecuación 17-3.**

Dónde:

$v_r$ : Velocidad de flujo entre las rejas,  $\frac{m}{s}$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$A_l$ : Área libre de paso; 0,29 m

$A_{re}$ : Área de las rejillas; 0,18 m

$$v_r = \frac{0,0022 \frac{m^3}{s}}{0,29 m^2 - 0,18 m^2}$$

$$v_r = 0,018 \frac{m}{s}$$

➤ **Velocidad de acercamiento**

Mide la velocidad con que los lixiviados recorren el vertedero y se acercan al sistema de cribado, hacen relación a la altura del tirante y el gasto volumétrico del lixiviado.

$$v_{ac} = \frac{Q}{(h - e_b) * h_n}$$

**Ecuación 18-3.**

Dónde:

$v_{ac}$ : Velocidad de acercamiento,  $\frac{m}{s}$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$h$ : Ancho del canal; 0,36 m

$e_b$ : Espesor de las barras; 0,02 m (Tabla 18-3).

$h_n$ : Tirante del agua; 0,81 m

$$v_{ac} = \frac{0,0022 \frac{m^3}{s}}{(0,36 m - 0,02 m) * 0,81 m}$$

$$v_{ac} = 0,0079 \frac{m}{s}$$

➤ **Pérdidas hidráulicas**

La fricción entre el agua y las barras generarán pérdidas en el sistema de cribado que serán calculadas en base a la velocidad del flujo como se muestra a continuación:

$$h_l = 0,07 \left( \frac{v_r^2 - v_{ac}^2}{2g} \right)$$

**Ecuación 19-3.**

Dónde:

$h_l$ : Pérdidas hidráulicas,  $m$

$v_r$ : Velocidad de flujo entre las rejjas;  $0,018 \frac{m}{s}$

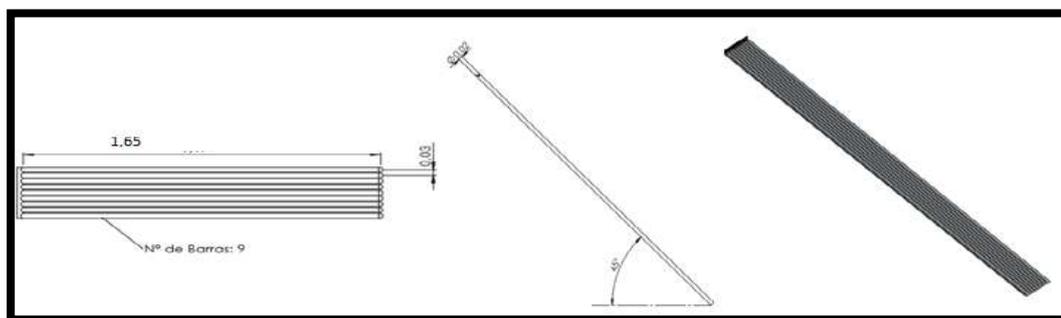
$v_{ac}$ : Velocidad de acercamiento;  $0,0079 \frac{m}{s}$

$g$ : Gravedad;  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$$h_l = 0,07 \left( \frac{(0,018 \frac{m}{s})^2 - (0,0079 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_l = 9,34 * 10^{-7} m$$

En la figura 4-3, se muestra el dimensionamiento del sistema de cribado que se propone para el tratamiento de los lixiviados.



**Figura 4-3:** Dimensionamiento del sistema de cribado.

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

### 3.3.4. Dimensionamiento del Tanque de Aireación

#### ➤ Aireación

El objetivo principal de la aireación en el tratamiento de las aguas residuales es brindarles a los microorganismos el oxígeno necesario para que lleven a cabo sus procesos de transformación y degradación de la materia orgánica contaminante.

➤ *Criterios para el diseño de un tanque de aireación*

Para mejorar la eficiencia del proceso de aireación, el tanque debe ser tipo panel, que consiste en un tanque cuadrado alimentado el aire con un sistema de difusores y un compresor.

**Tabla 19-3:** Dimensiones típicas para el diseño de un tanque de aireación.

<b>Parámetros</b>	<b>Dimensión</b>
Material de construcción	Adobe
Sistema de producción de aire	Difusores
Transferencia de aire	Burbuja simple
Geometría del tanque	Cuadrada
Diámetro del compresor	135 cm
Tiempo de aireación	80 min

Fuente: Cueto, 2016.

**Tabla 20-3:** Caracterización de los lixiviados antes y después del tratamiento combinado.

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Caracterización Inicial</b>	<b>Caracterización Final</b>	<b>Norma TULSMA Límite Máximo Permisible</b>
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	710	8	30
Sólidos Totales	mg/L	6204	1196	1600
DQO	mg/L	1740	198	200
DBO	mg/L	580	97	100
Cloruros	mg/L	1240,75	80,8	1000
Fósforo	mg/L	58	0,07	10
Cobre	mg/L	1,3	0,23	1
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	142	28	30
Nitrógeno Total	mg/L	540	35	50
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	3000	1000	2000

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

➤ **Longitud del tanque**

Al ser de geometría cuadrada, la altura y el largo del tanque van a ser iguales, para calcular las dimensiones del tanque se emplea la siguiente ecuación:

$$l_{tanque} = \sqrt[3]{V_{diario}}$$

**Ecuación 20-3.**

Dónde:

$l_{tanque}$ : Longitud del tanque de aireación,  $m$

$V_{diario}$ : Volumen diario de lixiviados;  $80 m^3$

$$l_{tanque} = \sqrt[3]{80 m^3}$$

$$l_{tanque} = 4,30 m$$

➤ **Volumen del tanque**

Mide el espacio que ocupará en el plano y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{tanque} = Q * t$$

**Ecuación 21-3.**

Dónde:

$V_{tanque}$ : Volumen del tanque de aireación,  $m^3$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,132 \frac{m^3}{min}$

$t$ : Tiempo de aireación;  $80 min$  (Tabla 19-3).

$$V_{tanque} = 0,132 \frac{m^3}{min} * 80 min$$

$$V_{tanque} = 10,56 m^3$$

➤ **Cantidad de Demanda Bioquímica de Oxígeno**

Es necesario calcular la cantidad de oxígeno que los lixiviados consumirán diariamente para producir la autodegradación de los contaminantes, este dato servirá para establecer cuánto de aire debe ingresar al sistema para reducir la carga contaminante del lixiviado.

$$DBO_{diario} = \frac{DBO * V_{diario} * 1000}{1 * 10^6}$$

**Ecuación 22-3.**

Dónde:

$DBO_{diario}$ : Demanda bioquímica de oxígeno diaria de los lixiviados,  $\frac{kg}{d}$

$DBO$ : Demanda Bioquímica de Oxígeno inicial;  $580 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$V_{diario}$ : Volumen diario de lixiviados;  $80 m^3$

$$DBO_{diario} = \frac{580 \frac{mg}{L} * 80 m^3 * 1000}{1 * 10^6}$$

$$DBO_{diario} = 46,4 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cantidad de aire requerida**

Al conocer la demanda bioquímica de oxígeno, se establece el caudal de aire necesario para el aporte de aire, con relación a las características del agua residual, además se conoce que experimentalmente (Cueto, 2016, p. 103), determinó que por cada kilogramo de demanda bioquímica de oxígeno del agua se debe inyectar  $15,4 m^3$  de aire.

$$C_{aire} = \frac{DBO_{diario} * C_r}{24 * 60}$$

**Ecuación 23-3.**

Dónde:

$C_{aire}$ : Cantidad de aire necesaria para la aireación,  $\frac{m^3}{min}$

$DBO_{diario}$ : Demanda de oxígeno diaria necesaria en la planta;  $46,4 \frac{kg}{d}$

$C_r$ : Cantidad de aire necesaria para remover 1 kg de DBO;  $15,4 m^3$  (Cueto, 2016, p. 103).

$$C_{aire} = \frac{46,4 \frac{kg}{d} * 15,4 \frac{m^3}{kg}}{24 * 60}$$

$$C_{aire} = 0,49 \frac{m^3}{min}$$

### ➤ Presión hidrostática

Se realiza el cálculo de la presión que ejercerá el agua por efecto de la altura de la columna y la fuerza de la gravedad, ya que para la aireación el aire deberá superar esta presión para lograr ascender hacia la superficie.

$$P_h = \rho * g * h$$

**Ecuación 24-3.**

Dónde:

$P_h$ : Presión hidrostática del agua,  $Pa$

$\rho$ : Densidad del lixiviado;  $1225 \frac{kg}{m^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$g$ : Fuerza de la gravedad;  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$h$ : Longitud del tanque;  $4,30 m$

$$P_h = 1225 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 4,30 m$$

$$P_h = 51621,5 Pa * \frac{14,7 psi}{101352,9 Pa}$$

$$P_h = 7,48 psi$$

➤ **Presión absoluta**

El sistema de difusión de aire debe ser capaz de superar la presión hidrostática del agua y la presión ambiental para poder desplazarse entre la columna de aire, esta presión se le conoce como presión de trabajo y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_a = P_h + P_{atm}$$

**Ecuación 25-3.**

Dónde:

$P_a$ : Presión absoluta, psi

$P_h$ : Presión hidrostática del agua; 7,48 psi

$P_{atm}$ : Presión atmosférica, para la presente investigación se toma la presión de 14,7 psi (1 atm) como la presión ambiental.

$$P_a = 7,48 \text{ psi} + 14,7 \text{ psi}$$

$$P_a = 22,18 \text{ psi}$$

➤ **Cálculo de la potencia del compresor**

Los compresores deben diseñarse con la potencia suficiente para generar el caudal requerido de aire, bajo las condiciones ambientales donde se instale, para que cumpla estas condiciones debe diseñarse de acuerdo a:

$$P = \frac{0,22 * Q}{\eta} * \left[ \left( \frac{P_t}{14,7} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

**Ecuación 26-3.**

Dónde:

$P$ : Potencia del motor, Hp

$P_t$ : Presión de trabajo; 22,18 psi

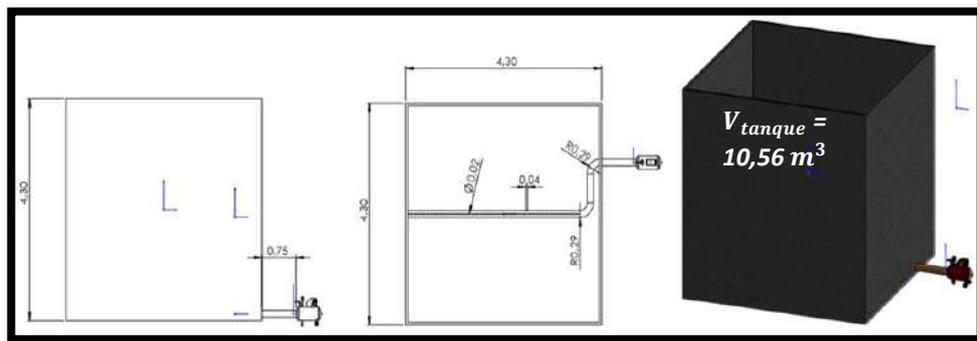
$Q$ : Caudal de aire;  $0,49 \frac{m^3}{min}$

$\eta$ : Eficiencia del compresor, para el caso de motores comerciales 75 % (McCabe; et al, 1991, p. 105).

$$P = \frac{0,22(0,49)}{0,75} * \left[ \left( \frac{22,18 \text{ psi}}{14,7 \text{ psi}} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

$$P = 0,02 \text{ Hp} \approx \frac{1}{4} \text{ Hp}$$

En la figura 5-3, se muestra el dimensionamiento del tanque de aireación que se propone para el pretratamiento de los lixiviados.



**Figura 5-3:** Dimensionamiento del tanque de aireación.

Realizado por: CUENCA. Kerly, 2018.

### 3.3.5. Dimensionamiento del Tanque de Coagulación y Sedimentación

#### 3.3.5.1. Coagulación

Su objetivo en el tratamiento de aguas residuales es incrementar la tendencia de las partículas de agregarse unas a otras, para formar partículas de mayor tamaño y así precipitar más rápidamente.

#### 3.3.5.2. Sedimentación

Es una de las operaciones unitarias más empleadas en el tratamiento de aguas residuales y su objetivo consiste en la separación por acción de la gravedad de las partículas suspendidas, cuyo peso específico es mayor que el del agua.

➤ *Criterios para el diseño de un tanque de coagulación y sedimentación*

Este tanque será rectangular, compuesto de 4 partes; la zona de entrada donde se añadirá el coagulante y se colocará una paleta para girar el fluido, a continuación, se ubicará la cámara de sedimentación en donde reposará el fluido y se formarán los flocs, en la parte inferior se recogerán los lodos generados por la sedimentación y finalmente se ubicará un vertedero para la salida del lixiviado tratado, en la tabla 21-3 se reportan las condiciones de diseño del tanque de coagulación y sedimentación.

**Tabla 21-3:** Dimensiones típicas para el diseño de un tanque de coagulación y sedimentación.

<b>Parámetro</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>
Periodo de diseño	8 a 16	años
Tiempo de retención	30 a 60	min
Carga superficial	0,165	$\frac{m^3}{(m^2 s)}$
Profundidad del sedimentador	1,5 – 2,5	m
Relación de las dimensiones de largo y ancho (L/B)	3 – 6	-
Relación de las dimensiones de largo y profundidad (L/H)	5 – 20	-
Fondo de la unidad	5 a 10	%
Velocidad en los orificios	0,01 – 0,15	$\frac{m}{s}$
Radio de cada orificio	$\geq 0,1$	m
Caudal en la zona de salida	$\leq 3$	$\frac{L}{s}$
Diámetro de las partículas	0,03	cm
Ancho de la garganta del canal de salida	20	cm
<b>Impulsor</b>		
Tipo de mezclador	2 palas planas	-
Relación de las dimensiones del ancho del tanque y diámetro del impulsor (B/Da)	$\frac{1}{4}$	-
Relación del fondo del tanque y diámetro del impulsor (E/A)	1	-
Relación de la altura del impulsor y el ancho del tanque (H/B)	1	-
Relación de la altura de la paleta y el diámetro del impulsor (W/Da)	$\frac{1}{8}$	-
Relación del ancho de la paleta y el diámetro del impulsor (b/Da)	$\frac{1}{12}$	-
Velocidad de giro	100	rpm

Fuente: Cánepa, 2005.

**Tabla 22-3:** Constantes para el cálculo de la potencia del motor en un mezclador de acuerdo al tipo de impulsor.

Tipo de impulsor	KT
Hélice paso cuadrado, tres palas	0,32
Hélice paso de 2, tres palas	1,00
Turbina, seis palas planas	6,30
Turbina de ventilador, seis palas	1,65
Turbina dos palas planas	1,70

Fuente: McCabe; et al, 1991.

➤ **Velocidad de sedimentación**

Es la magnitud que mide la distancia que recorre los flóculos en un tiempo determinado, esta debe ser lo suficientemente grande para que se dé el proceso de sedimentación y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$v_s = \frac{1}{18} g \left( \frac{\rho - 1}{\mu} \right) * d^2$$

**Ecuación 27-3.**

Dónde:

$v_s$ : Velocidad de sedimentación,  $\frac{cm}{s}$

$d$ : Diámetro de las partículas; 0,03  $cm$  (Tabla 21-3).

$g$ : Fuerza de la gravedad; 980  $\frac{cm}{s^2}$

$\rho$ : Densidad del lixiviado; 1,225  $\frac{g}{cm^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$\mu$ : Viscosidad dinámica;  $1,93 * 10^{-1} \frac{g}{(cm s)}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$$v_s = \frac{1}{18} * 980 \frac{cm}{s^2} \left( \frac{1,225 \frac{g}{cm^3} - 1}{1,93 * 10^{-1} \frac{g}{(cm s)}} \right) * (0,03 cm)^2$$

$$v_s = 0,057 \frac{cm}{s} * \frac{1 m}{100 cm}$$

$$v_s = 0,00057 \frac{m}{s}$$

➤ **Área superficial**

Es la magnitud que mide el espacio que ocupa el tanque de sedimentación, esto se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q}{v_s}$$

**Ecuación 28-3.**

Dónde:

$A_s$ : Área Superficial de la unidad,  $m^2$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$v_s$ : Velocidad de sedimentación;  $0,00057 \frac{m}{s}$

$$A_s = \frac{0,0022 \frac{m^3}{s}}{0,0005 \frac{m}{s}}$$

$$A_s = 4,40 m^2$$

➤ **Longitud del sedimentador**

Es la magnitud que mide la distancia entre la entrada del fluido y la salida del vertedero, esto se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L = \sqrt{7 * A_s}$$

**Ecuación 29-3.**

Dónde:

$L$ : Longitud del sedimentador,  $m$

$A_s$ : Área del sedimentador;  $4,40 m^2$

$$L = \sqrt{7 * 4,40 \text{ m}^2}$$

$$L = 5,55 \text{ m}$$

➤ **Ancho del sedimentador**

Es la magnitud que mide la distancia entre las paredes del sedimentador, esto se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$b = \frac{L}{3,5}$$

**Ecuación 30-3.**

Dónde:

*b*: Ancho del sedimentador, *m*

*L*: Longitud del sedimentador; 5,55 *m*

$$b = \frac{5,55 \text{ m}}{3,5}$$

$$b = 1,59 \text{ m}$$

➤ **Distancia de la pared difusora**

Se deberá colocar una pared para permitir que el flujo fluya de manera normal desde la entrada hacia la zona de sedimentación.

$$L_p = L - 0,9 L$$

**Ecuación 31-3.**

Dónde:

*L<sub>p</sub>*: Ubicación de la pared difusora, *m*

*L*: Longitud del sedimentador; 5,55 *m*

$$L_p = 5,55 \text{ m} - 0,9(5,55 \text{ m})$$

$$L_p = 0,56 \text{ m}$$

➤ **Altura del sedimentador**

Es la magnitud que mide la distancia vertical entre el fondo del tanque y la superficie del lixiviado, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{L}{5}$$

**Ecuación 32-3.**

Dónde:

*H*: Altura del sedimentador, *m*

*L*: Longitud del sedimentador; 5,55 *m*

$$H = \frac{5,55 \text{ m}}{5}$$

$$H = 1,11 \text{ m}$$

➤ **Volumen del sedimentador**

Es la magnitud que mide la distancia espacial que ocupa el tanque y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_s = L * b * H$$

**Ecuación 33-3.**

Dónde:

*V<sub>s</sub>*: Volumen del sedimentador, *m*<sup>3</sup>

*b*: Ancho del sedimentador; 1,59 *m*

$L$ : Longitud del sedimentador; 5,55 m

$H$ : Altura del sedimentador; 1,11 m

$$V_s = 5,55 \text{ m} * 1,59 \text{ m} * 1,11 \text{ m}$$

$$V_s = 9,79 \text{ m}^3$$

➤ **Velocidad horizontal de sedimentación**

Al momento de la sedimentación se tiene dos velocidades, la velocidad de sedimentación siendo la fuerza impulsora de la operación y la velocidad horizontal, la cual mide la velocidad con la que se recorre la longitud del sedimentador.

$$v_h = \frac{100 * Q}{B * H}$$

**Ecuación 34-3.**

Dónde:

$v_h$ : Velocidad horizontal de sedimentación,  $\frac{m}{s}$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$B$ : Ancho del sedimentador; 1,59 m

$H$ : Altura del sedimentador; 1,11 m

$$v_h = \frac{100 * 0,0022 \frac{m^3}{s}}{1,59 \text{ m} * 1,11 \text{ m}}$$

$$v_h = 0,12 \frac{m}{s}$$

➤ **Tiempo de retención**

Mide la cantidad de tiempo necesaria para que se produzca la formación de los flocs y estos precipiten por la acción de la gravedad, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t_r = \frac{H}{v_s}$$

**Ecuación 35-3.**

Dónde:

$t_r$ : Tiempo de retención, s

$H$ : Altura del sedimentador; 1,11 m

$v_s$ : Velocidad de sedimentación; 0,00057  $\frac{m}{s}$

$$t_r = \frac{1,11 \text{ m}}{0,00057 \frac{m}{s}}$$

$$t_r = 1947,37 \text{ s} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$t_r = 32,46 \text{ min} \approx 33 \text{ min}$$

➤ **Área de los agujeros en la pared difusora**

En la pared difusora es necesario colocar orificios para controlar el flujo hacia la zona de sedimentación, el área de cada orificio mide el espacio que ocuparán los orificios en la pared difusora.

$$A_o = \frac{Q}{v_o}$$

**Ecuación 36-3.**

Dónde:

$A_o$ : Área total de los orificios,  $m^2$

$Q$ : Caudal de diseño; 2,22  $\frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$v_o$ : Velocidad de flujo en los orificios; 0,01  $\frac{m}{s}$  (Tabla 21-3).

$$A_o = \frac{0,0022 \frac{m^3}{s}}{0,01 \frac{m}{s}}$$

$$A_o = 0,22 m^2$$

➤ **Cálculo del área de cada orificio**

Mide el área superficial que ocupa cada orificio ubicado en la pantalla difusora y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$a_o = \pi * r_o^2$$

**Ecuación 37-3.**

Dónde:

$a_o$ : Área de cada orificio,  $m^2$

$r_o$ : Radio de cada orificio; 0,10 m (Tabla 21-3).

$$a_o = \pi(0,10 m)^2$$

$$a_o = 0,031 m^2$$

➤ **Cálculo del número de orificios**

Es necesario conocer cuántos orificios se instalarán en la pantalla difusora, ya que esto permitirá controlar el caudal de flujo de los lixiviados.

$$n_o = \frac{A_o}{a_o}$$

**Ecuación 38-3.**

Dónde:

$n_o$ : Número de orificios, unidades.

$a_o$ : Área de cada orificio;  $0,031 \text{ m}^2$

$A_o$ : Área total de los orificios;  $0,22 \text{ m}^2$

$$n_o = \frac{0,22 \text{ m}^2}{0,031 \text{ m}^2}$$

$$n_o = 7$$

➤ **Cálculo de la porción de la pantalla difusora con orificios**

Es necesario determinar a qué altura con respecto del fondo del tanque serán instalados los orificios, para evitar que puedan pasar impurezas que precipitan en el fondo.

$$h = H - \frac{2}{5}H$$

**Ecuación 39-3.**

Dónde:

$h$ : Porción de la pantalla difusora con orificios,  $m$

$H$ : Altura del sedimentador;  $1,11 \text{ m}$

$$h = 1,11 - \frac{2}{5}(1,11 \text{ m})$$

$$h = 0,67 \text{ m}$$

➤ **Separación de los orificios**

Los orificios no pueden ir demasiado juntos, ya que eso causaría que se acumule el fluido y no fluya normalmente, por lo que es necesario colocar cada orificio a una distancia que se mide de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$s = \frac{h}{n_o}$$

**Ecuación 40-3.**

Dónde:

$s$ : Separación de los orificios,  $m$

$h$ : Altura de la pared con orificios;  $0,67 m$

$n_o$ : Número de orificios, 7 unidades.

$$s = \frac{0,67 m}{7}$$

$$s = 0,095 m * \frac{100 cm}{1 m}$$

$$s = 9,51 cm$$

➤ **Longitud del vertedero**

El agua abandonará el tanque sedimentador por un vertedero rectangular colocado al final del tanque, por lo que es necesario conocer la longitud del mismo.

$$l_v = \frac{Q}{C_s}$$

**Ecuación 41-3.**

Dónde:

$l_v$ : Longitud del vertedero,  $m$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$C_s$ : Carga Superficial;  $0,165 \frac{m^3}{(m^2 s)}$  (Tabla 21-3).

$$l_v = \frac{0,0022 \frac{m^3}{s}}{0,165 \frac{m^3}{(m s)}}$$

$$l_v = 0,012 m$$

➤ **Altura del vertedero**

Es necesario conocer cuánto de alto tendrá el vertedero por el que abandone el fluido después de la sedimentación, el cual debe ser lo suficientemente alto para que no haya reflujos hacia el tanque.

$$y = \left[ \frac{Q}{1,376 (w)} \right]^{\frac{2}{3}}$$

**Ecuación 42-3.**

Dónde:

y: Alto del vertedero, *m*

Q: Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

w: Ancho del vertedero; 0,20 *m* (Tabla 21-3).

$$y = \left[ \frac{0,0022}{1,376 (0,20)} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$y = 0,04 \text{ m} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$y = 4 \text{ cm}$$

➤ **Diámetro del impulsor**

El impulso generará el giro del coagulante adicionado a los lixiviados, es necesario conocer el diámetro que este tendrá para determinar que potencia debe ser adicionada.

$$\frac{D_i}{H} = 0,33$$

**Ecuación 43-3.**

Dónde:

*D<sub>i</sub>*: Diámetro del impulsor, *m*

*H*: Altura del tanque; 1,11 *m*

$$D_i = 0,33 * H$$

$$D_i = 0,33 * 1,11 \text{ m}$$

$$D_i = 0,37 \text{ m}$$

➤ **Distancia entre el impulsor y el fondo del tanque**

Mide la distancia máxima a la que el impulsor debe estar colocado para que no tope el fondo del tanque y permita el giro del mismo.

$$E = 0,33 * H$$

**Ecuación 44-3.**

Dónde:

*E*: Separación entre el fondo del tanque y el impulsor, *m*

*H*: Altura del tanque; 1,11 *m*

$$E = 0,33 * 1,11 \text{ m}$$

$$E = 0,37 \text{ m}$$

➤ **Altura del impulsor**

Mide la altura total del impulsor necesario para realizar el mezclado en la coagulación y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_p = H - E$$

**Ecuación 45-3.**

Dónde:

*h<sub>p</sub>*: Altura del impulsor, *m*

*H*: Altura del tanque; 1,11 *m*

*E*: Separación entre el fondo del tanque y la paleta; 0,37 m

$$h_p = 1,11 \text{ m} - 0,37 \text{ m}$$

$$h_p = 0,74 \text{ m}$$

➤ **Largo de la paleta**

La paleta es el accesorio colocado en el impulsor que ayuda a romper la tensión del agua y realizar la mezcla de la solución, el cálculo para determinar el largo de la paleta se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{g}{D_i} = 0,25$$

**Ecuación 46-3.**

Dónde:

*g*: Altura de la paleta, *m*

*D<sub>i</sub>*: Diámetro del impulsor; 0,37 m

$$g = 0,25 * D_i$$

$$g = 0,25 * 0,37 \text{ m}$$

$$g = 0,09 \text{ m}$$

➤ **Ancho de la paleta**

Mide la distancia desde cada una de las puntas del impulsor, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{w}{D_i} = 0,20$$

**Ecuación 47-3.**

Dónde:

$w$ : Ancho de la paleta,  $m$

$D_i$ : Diámetro del impulsor;  $0,37 m$

$$w = 0,20 * D_i$$

$$w = 0,20 * 0,37 m$$

$$w = 0,074 m$$

### ➤ Número de Reynolds

Es un factor adimensional que permite conocer en qué régimen está el fluido mezclado, se calcula mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$N_{Re} = \frac{N * H^2 * \rho}{\mu}$$

**Ecuación 48-3.**

Dónde:

$N_{Re}$ : Número de Reynolds, adimensional.

$N$ : Velocidad de giro;  $1,66 rps$  (Tabla 21-3).

$H$ : Altura del tanque;  $1,11 m$

$\rho$ : Densidad del lixiviado;  $1225 \frac{kg}{m^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido;  $1,93 * 10^{-2} Pa s$  (OPS/CEPIS, 2001).

$$N_{Re} = \frac{1,66 * (1,11 m)^2 * 1225 \frac{kg}{m^3}}{1,93 * 10^{-2} Pa s}$$

$$N_{Re} = 129817,38$$

Al ser el número de Reynolds mayor a 4000 el flujo es turbulento.

➤ **Potencia del motor**

Es necesario instalar un motor para que la solución lixiviado - coagulante pueda reaccionar, se debe conocer la principal característica del motor que es la potencia, la que dependerá de las condiciones del impulsor.

$$P = \frac{KT * N^3 * D_i^5 * \rho}{\eta}$$

**Ecuación 49-3.**

Dónde:

$P$ : Potencia del motor,  $Hp$

$N$ : Velocidad de giro; 1,66  $rps$  (Tabla 21-3).

$D_i$ : Diámetro del impulsor; 0,37  $m$

$\rho$ : Densidad del lixiviado; 1225  $\frac{kg}{m^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$KT$ : Constante de acuerdo al número de Reynolds; 1,70 (Tabla 22-3).

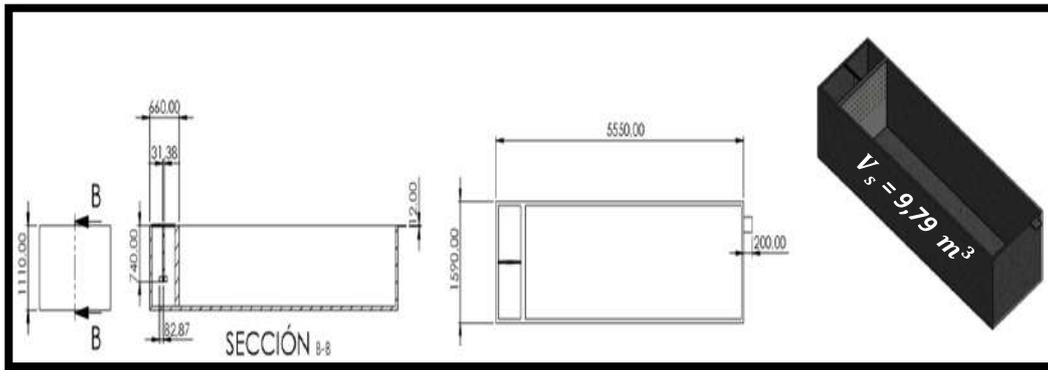
$\eta$ : Eficiencia, para el caso de motores comerciales 75 % (McCabe; et al, 1991, p. 105).

$$P = \frac{1,70 * (1,66 \text{ rev/s})^3 * (0,37 \text{ m})^5 * 1225 \frac{kg}{m^3}}{0,75}$$

$$P = 88,08 \frac{J}{s} * \frac{1 \text{ Hp}}{745,69 \frac{J}{s}}$$

$$P = 0,12 \text{ Hp} \approx \frac{1}{4} \text{ Hp}$$

En la figura 6-3, se muestra el dimensionamiento del tanque rectangular de coagulación-sedimentación que se propone para el tratamiento de los lixiviados.



**Figura 6-3:** Dimensionamiento del tanque rectangular de coagulación-sedimentación.

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

### 3.3.6. Dimensionamiento del Biorreactor

#### ➤ Biorreactor

Es de tipo aerobio, en donde funcionará con la inclusión de microorganismos eficientes y la inclusión de aire necesario para la degradación más rápida de los contaminantes y acelerar los procesos metabólicos de los microorganismos.

#### ➤ Criterios para el diseño del reactor biológico

El diseño de un biorreactor debe satisfacer una producción sin impurezas, un proceso de mezclado correcto y una buena transferencia de oxígeno a los microorganismos.

(Bialej; et al, 1986, p. 160), recomienda biorreactores de forma geométrica rectangulares para el aprovechamiento del espacio y el aire será alimentado por un sistema de difusores y compresor; las condiciones de operación se describen en la tabla 23-3.

**Tabla 23-3:** Dimensiones típicas para el diseño de un reactor biológico.

Parámetro	Dimensión	Unidad
Periodo de diseño	8 a 16	Años
Profundidad hidráulica	3	<i>m</i>
Relación de las dimensiones de longitud y ancho (L/B)	1,5	-
Carga Másica	0,6	-
Constante de declinación de los microorganismos	0,06	$d^{-1}$ a 39,5 °C

Fuente: Cánepa, 2005.

**Tabla 24-3:** Tamaño de burbuja y eficiencia para cálculo en difusores de acuerdo al régimen de flujo.

Burbujas	Régimen	Eficiencia	Tamaño de Burbuja
Burbuja simple o fina	$0 < N_{Re} < 200$	10 % - 30 %	2 - 5 mm
Burbuja intermedia semifina	$200 < N_{Re} < 2000$	6 % - 15 %	6 - 10 mm
Burbuja a chorro	$N_{Re} > 2000$	4 % - 8 %	10 mm

Fuente: Kister, 2007.

➤ **Cálculo de la eficiencia de remoción de los sólidos totales**

Expresa el uso eficiente del tratamiento aplicado, al remover la carga contaminante del lixiviado, a condiciones específicas.

$$E_r = \frac{DBO_o - DBO}{DBO_o} * 100$$

**Ecuación 50-3.**

Dónde:

$E_r$ : Eficiencia de remoción de sólidos totales, %

$DBO_o$ : Demanda bioquímica de oxígeno antes del tratamiento;  $580 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$DBO$ : Demanda bioquímica de oxígeno al final del tratamiento;  $97 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$$E_r = \frac{580 \frac{mg}{L} - 97 \frac{mg}{L}}{580 \frac{mg}{L}} * 100 \%$$

$$E_r = 83,27 \%$$

➤ **Demanda bioquímica de oxígeno en el afluente**

Mide la cantidad de oxígeno necesario para lograr la autodegradación de los contaminantes solubles en el agua que entra al proceso del tratamiento.

$$DBO_{soluble} = \frac{DBO_o}{1 + \left( \frac{DBO_o * k_d}{SST_o * C_m * 100} \right)}$$

**Ecuación 51-3.**

Dónde:

$DBO_{soluble}$ : Demanda bioquímica de oxígeno soluble,  $\frac{mg}{L}$

$DBO_o$ : Demanda bioquímica de oxígeno antes del tratamiento;  $580 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$SST_o$ : Contenido de sólidos totales antes del tratamiento;  $6204 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$C_m$ : Coeficiente másico, 0,60 adimensional (Tabla 23-3).

$k_d$ : Constante de declinación de los microorganismos;  $0,06 d^{-1}$  (Tabla 23-3).

$$DBO_{soluble} = \frac{580 \frac{mg}{L}}{1 + \left( \frac{580 \frac{mg}{L} * 0,06 d^{-1}}{6204 \frac{mg}{L} * 0,6 * 100} \right)}$$

$$DBO_{soluble} = 579,94 \frac{mg}{L}$$

➤ **Demanda bioquímica de oxígeno en relación a los sólidos suspendidos**

Mide la demanda bioquímica por efecto de la degradación de los sólidos suspendidos que contaminan los lixiviados.

$$DBO_{SS} = 0,8 * SS_{afluente} * C_m^{\frac{1}{2}}$$

**Ecuación 52-3.**

Dónde:

$DBO_{ss}$ : Demanda bioquímica de oxígeno en relación a los sólidos suspendidos,  $\frac{mg}{L}$

$SS_{afluente}$ : Sólidos Suspendidos del afluente;  $710 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$C_m$ : Coeficiente másico; 0,60 adimensional (Tabla 23-3).

$$DBO_{ss} = 0,8 * 710 \frac{mg}{L} * (0,6)^{\frac{1}{2}}$$

$$DBO_{ss} = 439,97 \frac{mg}{L}$$

### ➤ Rendimiento

Mide la cantidad de demanda bioquímica de oxígeno soluble que ha sido remplazada por la demanda bioquímica de oxígeno por efecto de los sólidos suspendidos, para determinar cuánto será el proceso de transformación de los microorganismos.

$$Y = \frac{DBO_{soluble} - DBO_{ss}}{DBO_{soluble}}$$

**Ecuación 53-3.**

Dónde:

Y: Rendimiento, %

$DBO_{ss}$ : Demanda bioquímica de oxígeno en relación a los sólidos suspendidos;  $439,97 \frac{mg}{L}$

$DBO_{soluble}$ : Demanda bioquímica de oxígeno soluble;  $579,94 \frac{mg}{L}$

$$Y = \left( \frac{579,94 \frac{mg}{L} - 439,97 \frac{mg}{L}}{579,94 \frac{mg}{L}} \right) * 100 \%$$

$$Y = 24,13 \%$$

➤ **Edad del fango**

Representa la relación entre la masa de fangos alimentada al reactor y la masa de fangos eliminada en el mismo diariamente.

$$\theta = \frac{1}{0,2 * C_m + C_m^{1,5}}$$

**Ecuación 54-3.**

Dónde:

$\theta$ : Edad de los lodos,  $d$

$C_m$ : Coeficiente másico; 0,60 adimensional (Tabla 23-3).

$$\theta = \frac{1}{0,2 * 0,6 + (0,6)^{1,5}}$$

$$\theta = 1,71 d$$

➤ **Volumen del reactor**

Consiste en el espacio geométrico necesario para que se den las reacciones metabólicas de los microorganismos adicionados con el fin de reducir la carga contaminante de los lixiviados.

$$V_r = \frac{\theta * V_{diario} * (S_o - S)}{X_v * (1 + k_d * \theta)}$$

**Ecuación 55-3.**

Dónde:

$V_r$ : Volumen del reactor,  $m^3$

$\theta$ : Edad de los lodos; 1,71  $d$

$V_{diario}$ : Volumen diario de lixiviados; 80  $m^3$

$Y$ : Rendimiento, 24 %

$S_o$ : Sólidos solubles en el influente; 0,71  $\frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$S$ : Sólidos solubles en el afluente; 0,008  $\frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$X_v$ : Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor;  $1,80 \frac{kg}{m^3}$  (CLB, 2013, p. 11).

$k_d$ : Constante de declinación de los microorganismos;  $0,06 d^{-1}$  (Tabla 23-3).

$$V_r = \frac{1,71 * 80 * 0,24 * (0,71 - 0,008)}{1,80 * (1 + 0,06 * 1,71)}$$

$$V_r = 11,64 m^3$$

### ➤ Tiempo de retención de los lixiviados

Es una magnitud que determina el tiempo que deben permanecer los lixiviados dentro del biorreactor para producir la disminución de los agentes contaminantes del mismo.

$$t_r = \frac{V_r}{Q}$$

**Ecuación 56-3.**

Dónde:

$t_r$ : Tiempo de retención,  $d$

$V_r$ : Volumen del reactor;  $11,64 m^3$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 191,67 \frac{m^3}{d}$

$$t_r = \frac{11,64 m^3}{191,67 \frac{m^3}{d}}$$

$$t_r = 0,06 d * \frac{24 h}{1 d}$$

$$t_r = 1,45 h * \frac{60 min}{h}$$

$$t_r = 87,45 min \approx 88 min$$

➤ **Relación alimentación – microorganismos**

Mide la relación que existe entre la carga de sustratos (microorganismos) que se alimenta al reactor en función de los contaminantes (sólidos sedimentables y sólidos totales).

$$\frac{F}{M} = \frac{C_o}{t_r * C_{SS}}$$

**Ecuación 57-3.**

Dónde:

$\frac{F}{M}$ : Relación alimentación - microorganismo,  $\frac{kg\ DBO_5}{kg\ Sólidos\ solubles}$

$C_o$ : Concentración inicial de la demanda bioquímica de oxígeno;  $0,58 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$t_r$ : Tiempo de retención;  $88\ min$

$C_{SS}$ : Concentración de sólidos solubles en el afluente;  $0,71 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$$\frac{F}{M} = \frac{0,58 \frac{kg}{m^3}}{88\ min * 0,71 \frac{kg}{m^3}}$$

$$\frac{F}{M} = 0,01 \frac{kg\ DBO_5}{kg\ sólidos\ solubles}$$

De acuerdo a los resultados, cuando el valor es menor a 0,05 se debe realizar una purga, ya que se encuentra en exceso, si es mayor a 0,15 se debe aumentar la concentración en el reactor por medio de una recirculación de lodo.

➤ **Purga del fango**

Es necesario retirar una cantidad determinada, dado que la competencia entre microorganismos aumentará por la mayor presencia de nutrientes, lo que puede ocasionar la muerte de los mismos.

$$P = \frac{V_r}{\theta}$$

**Ecuación 58-3.**

Dónde:

$P$ : Purga de fango,  $\frac{m^3}{d}$

$V_r$ : Volumen del reactor;  $11,64 m^3$

$\theta$ : Edad del fango;  $1,71 d$

$$P = \frac{11,64 m^3}{1,71 d}$$

$$P = 6,81 \frac{m^3}{d}$$

➤ **Retorno de sólidos solubles en el tratamiento**

Es necesario que el fango formado recircule para tener un máximo aprovechamiento de los nutrientes para el crecimiento de los microorganismos.

$$X_r = S_{sso} - S_{ssf}$$

**Ecuación 59-3.**

Dónde:

$X_r$ : Retorno de sólidos solubles,  $\frac{kg}{m^3}$

$S_{sso}$ : Sólidos solubles a la entrada;  $0,71 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$S_{ssf}$ : Sólidos solubles a la salida;  $0,008 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$$X_r = 0,71 \frac{kg}{m^3} - 0,008 \frac{kg}{m^3}$$

$$X_r = 0,702 \frac{kg}{m^3}$$

➤ **Relación de recirculación**

Mide la relación de recirculación entre los fangos producidos en el biorreactor que son eliminados y la relación de alimentación de sólidos sedimentables.

$$R = \frac{\left[1 - \left(\frac{t_r}{\theta}\right)\right]}{\frac{X}{X_r} - 1}$$

**Ecuación 60-3.**

Dónde:

$R$ : Relación de recirculación, %

$t_r$ : Tiempo de retención hidráulica; 0,06 d

$\theta$ : Edad de los lodos; 1,71 d

$X$ : Concentración de sólidos suspendidos en el influente;  $0,71 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$X_r$ : Retorno de sólidos solubles;  $0,702 \frac{kg}{m^3}$

$$R = \frac{\left[1 - \left(\frac{0,06 d}{1,71 d}\right)\right]}{\frac{0,71 \frac{kg}{m^3}}{0,702 \frac{kg}{m^3}} - 1}$$

$$R = 87,71 \%$$

➤ **Caudal de recirculación**

Mide la cantidad de volumen de lodos en un determinado tiempo que serán recirculados al biorreactor, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_r = R * Q$$

**Ecuación 61-3.**

Dónde:

$Q_r$ : Caudal de recirculación,  $\frac{m^3}{s}$

R: Recirculación; 7,64 adimensional.

Q: Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 0,0022 \frac{m^3}{s}$

$$Q_r = 0,877 * 0,0022 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_r = 0,0019 \frac{m^3}{s} * \frac{3600 s}{h}$$

$$Q_r = 6,94 \frac{m^3}{h}$$

### ➤ Producción esperada de lodos

Es una proyección que se hace para determinar cuánto de lodo se producirá diariamente de acuerdo al tiempo de retención y al crecimiento de los microorganismos.

$$P_e = \frac{C_m}{1 + k_d * \theta}$$

**Ecuación 62-3.**

Dónde:

$P_e$ : Producción esperada de lodos,  $\frac{kg}{d}$

$C_m$ : Carga másica, 0,6 adimensional.

$k_d$ : Constante de declinación de los microorganismos;  $0,06 d^{-1}$  (Tabla 23-3).

$\theta$ : Edad del fango, 1,71 d

$$P_e = \frac{0,6}{1 + (0,06 d^{-1} * 1,71 d)}$$

$$P_e = 0,54 \frac{kg}{d} * \frac{d}{24 h}$$

$$P_e = 0,022 \frac{kg}{h}$$

➤ **Producción real de lodos**

Es necesario calcular la producción real de fangos en donde se considera los contaminantes presentes en el afluente a tratar y el caudal del mismo.

$$P_r = P_e * Q * (S_s - S_{ss})$$

**Ecuación 63-3.**

Dónde:

$P_r$ : Producción real de lodos,  $\frac{kg}{d}$

$P_e$ : Producción esperada de lodos;  $0,54 \frac{kg}{d}$

$Q$ : Caudal de diseño;  $2,22 \frac{L}{s} = 191,67 \frac{m^3}{d}$

$S_s$ : Demanda bioquímica de oxígeno soluble en el afluente;  $0,57 \frac{kg}{m^3}$

$S_{ss}$ : Demanda bioquímica de oxígeno en relación a los sólidos suspendidos;  $0,44 \frac{kg}{m^3}$

$$P_r = 0,54 * 191,67(0,57 - 0,44)$$

$$P_r = 13,45 \frac{kg}{d}$$

➤ **Ancho del reactor**

Es necesario establecer las dimensiones del tanque, las cuales permitirán el almacenamiento de los microorganismos junto con el fango y los lixiviados.

$$b = \sqrt{\frac{1,5 * V_r}{H}}$$

**Ecuación 64-3.**

Dónde:

$b$ : Ancho del reactor,  $m$

$V_r$ : Volumen del reactor;  $11,64 m^3$

*H*: Altura del reactor, 3 *m* (Tabla 23-3).

$$b = \sqrt{\frac{1,5 * 11,64 \text{ m}^3}{3}}$$

$$b = 2,41 \text{ m}$$

➤ **Cálculo de la longitud del reactor**

Es necesario calcular la longitud del reactor que mide la magnitud horizontal del mismo, para establecer sus dimensiones completas.

$$L = 1,5 * b$$

**Ecuación 65-3.**

Dónde:

*L*: Longitud del reactor, *m*

*b*: Ancho del reactor; 2,41 *m*

$$L = 1,5 * 2,41 \text{ m}$$

$$L = 3,62 \text{ m}$$

➤ **Cálculo del ancho del vertedor de salida de los lixiviados tratados**

El tanque tendrá un canal de salida, que constituirá un vertedero rectangular por donde se elimina el lixiviado tratado.

$$b = \sqrt[3]{\frac{Q}{S^2}}$$

**Ecuación 66-3.**

Dónde:

*b*: Ancho del vertedor, *m*

*Q*: Caudal de diseño;  $2,22 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 0,0022 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

S: Porcentaje de evacuación, (Clarke, 1975, p. 115) indica un porcentaje de evacuación igual a 1 %.

$$b = \frac{\sqrt[0,0022]{\frac{8}{3}}}{\sqrt{(0,01)^{\frac{1}{2}}}}$$

$$b = 0,23 \text{ m} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$b = 23,06 \text{ cm}$$

➤ **Cálculo de la altura del vertedero**

Mide la distancia que existe entre el piso del tanque y la superficie que alcanzará el lixiviado para abandonar al reactor biológico.

$$y = 1,5 * b$$

**Ecuación 67-3.**

Dónde:

y: Altura del vertedero, *m*

b: Ancho del vertedero; 0,23 *m*

$$y = 1,5 * 0,23 \text{ m}$$

$$y = 0,35 \text{ m}$$

➤ **Cantidad de aire necesaria para la respiración de los microorganismos**

Mide la cantidad necesaria para que se dé el proceso de respiración celular de los microorganismos eficientes que se han alimentado al biorreactor.

$$C_{aire} = a * Y * P_r$$

**Ecuación 68-3.**

Dónde:

$C_{aire}$ : Cantidad de aire necesaria para la aireación,  $\frac{kg}{d}$

a: Factor de conversión de demanda bioquímica de los lixiviados en demanda bioquímica soluble, (Ategrus, 2010, p. 42), indica que debe tener un valor máximo de 0,56.

Y: Rendimiento, 24 %

$P_r$ : Producción real de fangos;  $13,45 \frac{kg}{d}$

$$C_{aire} = 0,56 * 0,24 * 13,45 \frac{kg}{d}$$

$$C_{aire} = 1,81 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cantidad de aire producida por la respiración exógena de los microorganismos**

Mide la cantidad de oxígeno liberado en forma de dióxido de carbono por efecto de la respiración celular de los microorganismos.

$$C_e = k_d * X * V_r$$

**Ecuación 69-3.**

Dónde:

$C_e$ : Cantidad de aire producida por la respiración,  $\frac{kg}{d}$

$k_d$ : Constante de declinación de los microorganismos;  $0,06 d^{-1}$  (Tabla 23-3).

$X$ : Concentración de sólidos suspendidos en el afluente;  $0,71 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$V_r$ : Volumen del reactor;  $11,64 m^3$

$$C_e = 0,06 d^{-1} * 0,71 \frac{kg}{m^3} * 11,64 m^3$$

$$C_e = 0,49 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cantidad total de aire necesario**

Mide la cantidad total de oxígeno necesaria para que los microorganismos puedan desdoblar los nutrientes obtenidos de los contaminantes de los lixiviados.

$$C_{an} = C_e + C_{aire}$$

**Ecuación 70-3.**

Dónde:

$C_{an}$ : Cantidad total de aire necesaria,  $\frac{kg}{d}$

$C_e$ : Cantidad de aire producida por la respiración;  $0,49 \frac{kg}{d}$

$C_{aire}$ : Cantidad de aire necesaria para la aireación;  $1,81 \frac{kg}{d}$

$$C_{an} = (0,49 + 1,81) \frac{kg}{d}$$

$$C_{an} = 2,30 \frac{kg}{d} * \frac{1 d}{24 h} * \frac{1 h}{3600 s}$$

$$C_{an} = 0,00003 \frac{kg}{s}$$

### ➤ Presión hidrostática

Se realiza el cálculo de la presión que ejercerá el agua por efecto de la altura de la columna y la fuerza de la gravedad, ya que para la aireación el aire deberá superar esta presión para lograr ascender hacia la superficie.

$$P_h = \rho * g * h$$

**Ecuación 71-3.**

Dónde:

$P_h$ : Presión hidrostática del agua,  $Pa$

$\rho$ : Densidad del lixiviado;  $1225 \frac{kg}{m^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$g$ : Fuerza de la gravedad;  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$h$ : Altura del agua,  $3 m$  (Tabla 23-3).

$$P_h = 1225 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 3 m$$

$$P_h = 36015 Pa * \frac{14,7 psi}{101352,9 Pa}$$

$$P_h = 5,22 psi$$

➤ **Presión absoluta**

El sistema de difusión de aire debe ser capaz de superar la presión hidrostática del agua y la presión ambiental para poder desplazarse entre la columna de aire, esta presión se le conoce como presión de trabajo y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_a = P_h + P_{atm}$$

**Ecuación 72-3.**

Dónde:

$P_a$ : Presión absoluta, psi

$P_h$ : Presión hidrostática del agua; 5,22 psi

$P_{atm}$ : Presión atmosférica, para la presente investigación se toma la presión de 14,7 psi como la presión ambiental.

$$P_a = 5,22 \text{ psi} + 14,7 \text{ psi}$$

$$P_a = 19,92 \text{ psi}$$

➤ **Cálculo del aumento de la temperatura del aire en la compresión**

Mide el efecto del calentamiento del aire por el normal funcionamiento del compresor como efecto del aumento de la presión en la sustancia.

$$\Delta T = \frac{T_a}{\eta} * \left[ \left( \frac{P_a}{P_{atm}} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

**Ecuación 73-3.**

Dónde:

$\Delta T$ : Aumento de temperatura del aire, °C

$T_a$ : Temperatura ambiental del Cantón Lago Agrio; 37,5 °C (Ortiz, 2017, p. 9).

$P_a$ : Presión absoluta; 19,92 psi

$P_{atm}$ : Presión atmosférica; 14,7 psi

$\eta$ : Eficiencia del compresor, para el caso de motores comerciales 75 % (McCabe; et al, 1991, p. 105).

$$\Delta T = \frac{37,5 \text{ }^\circ\text{C}}{0,75} * \left[ \left( \frac{19,92 \text{ psi}}{14,7 \text{ psi}} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

$$\Delta T = 4,49 \text{ }^\circ\text{C}$$

➤ **Cálculo de la temperatura del aire en la compresión**

Mide la temperatura que alcanza el aire para la difusión en el biorreactor, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_c = T_a + \Delta T$$

**Ecuación 74-3.**

Dónde:

$T_c$ : Temperatura de compresión, °C

$T_a$ : Temperatura ambiental del Cantón Lago Agrio; 37,5 °C (Ortiz, 2017, p. 9).

$\Delta T$ : Aumento de temperatura del aire; 4,49 °C

$$T_c = 37,5 \text{ °C} + 4,49 \text{ °C}$$

$$T_c = 41,99 \text{ °C} + 273 \text{ K}$$

$$T_c = 314,99 \text{ K}$$

➤ **Cálculo de la densidad del aire**

Indica la cantidad de masa de aire en un determinado volumen y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{1,293}{1 + 0,00367 * T_c} \left( \frac{H}{76} \right)$$

**Ecuación 75-3.**

Dónde:

$\rho_a$ : Densidad del aire,  $\frac{kg}{m^3}$

$T_c$ : Temperatura del aire comprimido; 41,99 °C

$H$ : Presión de operación; 103,02 cmHg

$$\rho_a = \frac{1,293}{1 + 0,00367 * (41,99)} \left( \frac{103,02}{76} \right)$$

$$\rho_a = 1,52 \frac{kg}{m^3}$$

➤ **Cálculo de la potencia del compresor**

Los compresores deben diseñarse con la potencia suficiente para generar el caudal requerido de aire, bajo las condiciones ambientales donde se instale, para que cumpla estas condiciones debe diseñarse de acuerdo a:

$$P = \frac{WRT_1}{8,41\eta} * \left[ \left( \frac{P_a}{P_1} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

**Ecuación 76-3.**

Dónde:

$P$ : Potencia del motor,  $Hp$

$T_1$ : Temperatura de compresión; 314,99 K

$P_a$ : Presión absoluta; 1,36 atm

$P_1$ : Presión atmosférica; 1 atm

$W$ : Cantidad de aire necesario;  $0,00003 \frac{kg}{s}$

$R$ : Constante ideal de los gases;  $8,321 \frac{kJ}{(kmol K)}$  (Levine, 1999, p. 25).

$M$ : Peso molecular del aire; 28,966  $kg$  (Carrier, 1980, p. 31).

$\eta$ : Eficiencia del compresor, para el caso de motores comerciales 75 % (McCabe; et al, 1991, p. 105).

$$P = \frac{0,00003 \frac{kg}{s} * \frac{kmol}{28,966 kg} * 8,321 \frac{kJ}{kmol K} * \frac{1000 \frac{J}{s}}{kJ} * 314,99 K}{8,41 * 0,75} * \left[ \left( \frac{1,36 atm}{1 atm} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

$$P = 0,04 Hp \approx \frac{1}{4} Hp$$

➤ **Cálculo del diámetro del orificio**

Para el paso del aire, es necesario instalar agujeros en la tubería permitiendo así que se alimente oxígeno al biorreactor.

$$d_o = \frac{d_{bu}^3 * g * (\rho_l - \rho_a)}{6 * \theta}$$

**Ecuación 77-3.**

Dónde:

$d_o$ : Diámetro del orificio,  $m$

$d_{bu}$ : Diámetro de la burbuja;  $0,005 m$  (Tabla 24-3).

$g$ : Fuerza de la gravedad;  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$\rho_l$ : Densidad del lixiviado;  $1225 \frac{kg}{m^3}$  (OPS/CEPIS, 2001).

$\rho_a$ : Densidad del aire;  $1,52 \frac{kg}{m^3}$

$\theta$ : Tensión superficial;  $0,073 \frac{N}{m}$  (Torres, 2007, p. 4).

$$d_o = \frac{(0,005 m)^3 * 9,8 \frac{m}{s^2} * (1225 - 1,52) \frac{kg}{m^3}}{6 * 0,073 \frac{N}{m}}$$

$$d_o = 0,003 m * \frac{1\ 000\ mm}{1\ m}$$

$$d_o = 3\ mm$$

➤ **Cálculo del número de orificios**

Es necesario calcular el número total de orificios que se harán en la tubería para alcanzar el caudal de oxígeno requerido por los microorganismos.

$$n_o = \frac{0,7 * D}{d_o}$$

**Ecuación 78-3.**

Dónde:

$n_o$ : Número de orificios, unidades.

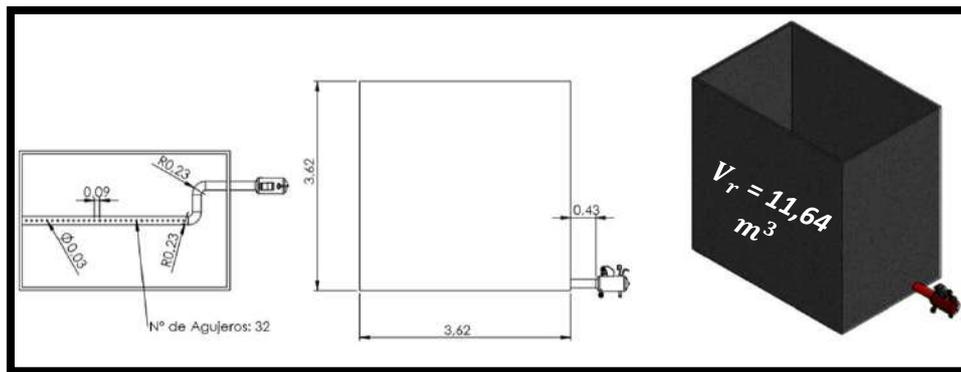
$D$ : Diámetro del tubo;  $0,135 m$  (Tabla 19-3).

$d_o$ : Diámetro del orificio; 0,003 m

$$n_o = \frac{0,7 * 0,135 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}$$

$$n_o = 31,5 \approx 32 \text{ agujeros}$$

En la figura 7-3, se muestra el dimensionamiento de biorreactor que se propone para el tratamiento de los lixiviados.



**Figura 7-3:** Dimensionamiento del biorreactor.

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

### 3.3.7. Dimensionamiento del Tanque Espesador de Lodos

#### ➤ *Espesamiento de lodos*

Mediante esta operación unitaria se consigue una reducción del volumen de aproximadamente 30 – 80 %. Es decir, el espesador de lodos es un equipo que permite la separación del lodo con el agua, por acción de la gravedad y gracias a su geometría.

#### ➤ *Criterios para el diseño de un tanque de espesamiento de lodos*

El tanque de espesamiento de lodos será un tanque de geometría cónica, en el cual se alimentará los fangos producidos en el biorreactor para eliminar el agua y que sea más fácil realizar su deposición final o su tratamiento, las condiciones de diseño se describen en la tabla 25-3.

**Tabla 25-3:** Dimensiones típicas para el diseño del tanque de espesamiento de lodos.

Parámetro	Dimensión	Unidad
Periodo de diseño	8 a 16	años
Relación altura / diámetro	1	-
Carga de sólidos	1,98	$\frac{kg}{(m^2 d)}$
Concentración de sólidos	4	%
Tiempo de retención	48	<i>h</i>

Fuente: Metcalf & Eddy, 2005.

➤ **Cálculo de la carga de lodos primarios al espesador por efecto de los sólidos totales**

Mide la cantidad de sólidos que son alimentados al espesador, mismos que vienen del biorreactor, estos se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_l = 0,0864 * X_{st} * E_r * V_{diario}$$

**Ecuación 79-3.**

Dónde:

$C_l$ : Carga de lodos al espesador,  $\frac{kg}{d}$

$X_{st}$ : Concentración de sólidos totales antes del tratamiento;  $6,204 \frac{kg}{m^3}$  (Tabla 20-3).

$E_r$ : Eficiencia de remoción, 83 %

$V_{diario}$ : Volumen diario de lixiviados;  $80 m^3$

$$C_l = 0,0864 * 6,204 * 0,83 * 80$$

$$C_l = 35,59 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cálculo de la carga de lodos primarios al espesador por efecto de los sólidos solubles**

Mide la cantidad de sólidos sedimentables que son eliminados en el biorreactor y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{l1} = \frac{C_l * X_{ss}}{X_{st}}$$

**Ecuación 80-3.**

Dónde:

$C_{l1}$ : Carga de lodos al espesador por efecto de los sólidos solubles,  $\frac{kg}{d}$

$C_l$ : Carga de lodos al espesador;  $35,59 \frac{kg}{d}$

$X_{st}$ : Concentración de sólidos totales antes del tratamiento;  $6204 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$X_{ss}$ : Concentración de sólidos suspendidos antes del tratamiento;  $710 \frac{mg}{L}$  (Tabla 20-3).

$$C_{l1} = 35,59 \frac{kg}{d} * \frac{710 \frac{mg}{L}}{6204 \frac{mg}{L}}$$

$$C_{l1} = 4,07 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cálculo de la carga de lodos totales al espesador**

Mide la cantidad real de lodos que se procesarán en el espesador, y es la suma de los lodos alimentados por efecto de los sólidos solubles y los lodos por efecto de los sólidos totales desechados en el biorreactor.

$$C_{lt} = C_l + C_{l1}$$

**Ecuación 81-3.**

Dónde:

$C_{lt}$ : Carga de lodos totales al espesador,  $\frac{kg}{d}$

$C_l$ : Carga de lodos al espesador;  $35,59 \frac{kg}{d}$

$C_{l1}$ : Carga de lodos al espesador por efecto de los sólidos solubles;  $4,07 \frac{kg}{d}$

$$C_{lt} = 35,59 \frac{kg}{d} + 4,07 \frac{kg}{d}$$

$$C_{lt} = 39,66 \frac{kg}{d}$$

➤ **Cálculo del flujo de lodos al espesador**

Mide la cantidad de fangos procesados por día en el tanque espesador y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F = \frac{C_{lt}}{1000 * X_l}$$

**Ecuación 82-3.**

Dónde:

F: Flujo de lodos al espesador,  $\frac{m^3}{d}$

$C_{lt}$ : Carga de lodos totales al espesador;  $39,66 \frac{kg}{d}$

$X_l$ : Concentración de lodos de acuerdo al tipo de lodos, 4 % (Tabla 25-3).

$$F = \frac{39,66}{1000 * 0,04}$$

$$F = 0,99 \frac{m^3}{d}$$

➤ **Cálculo del volumen de fangos a procesar**

Mide la cantidad volumétrica de fangos procesados por día en el tanque espesador y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{F}{t_r}$$

**Ecuación 83-3.**

Dónde:

$V_f$ : Volumen de fangos a procesar,  $m^3$

F: Flujo de lodos al espesador,  $0,99 \frac{m^3}{d}$

$t_r$ : Tiempo de retención, 2 d (Tabla 25-3).

$$V_f = \frac{0,99 \frac{m^3}{d}}{2 d}$$

$$V_f = 0,50 m^3$$

➤ **Área requerida para el espesador**

Mide el espacio superficial que ocupará el tanque para procesar el total de los fangos producidos en el tratamiento de los lixiviados.

$$A_e = \frac{C_{lt}}{C_{se}}$$

**Ecuación 84-3.**

Dónde:

$A_e$ : Área del espesador,  $m^2$

$C_{lt}$ : Carga de lodos totales;  $39,66 \frac{kg}{d}$

$C_{se}$ : Carga de sólidos al espesador mecánico;  $1,98 \frac{kg}{(m^2 d)}$  (Tabla 25-3).

$$A_e = \frac{39,66 \frac{kg}{d}}{1,98 \frac{kg}{m^2 d}}$$

$$A_e = 20 m^2$$

➤ **Cálculo del diámetro del tanque**

Mide la distancia que existirá entre los dos extremos del tanque que será circular, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D_e = \sqrt{\frac{A_e}{4 \pi}}$$

**Ecuación 85-3.**

Dónde:

$D_e$ : Diámetro del espesador,  $m$

$A_e$ : Área del espesador;  $20 \text{ m}^2$

$$D_e = \sqrt{\frac{20 \text{ m}^2}{4 \pi}}$$

$$D_e = 1,30 \text{ m}$$

➤ **Cálculo de la altura para el espesador**

Mide la distancia vertical que ocupará el tanque espesador y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h = D_e$$

**Ecuación 86-3.**

Dónde:

$h$ : Altura del espesador,  $m$

$D_e$ : Diámetro del espesador;  $1,30 \text{ m}$

$$h = 1,30$$

➤ **Cálculo del volumen del espesador**

Mide las dimensiones espaciales utilizadas por el equipo, y se calcula utilizando la ecuación que se detalla a continuación:

$$V_e = A_e * h$$

**Ecuación 87-3.**

Dónde:

$V_e$ : Volumen del tanque espesador,  $m^3$

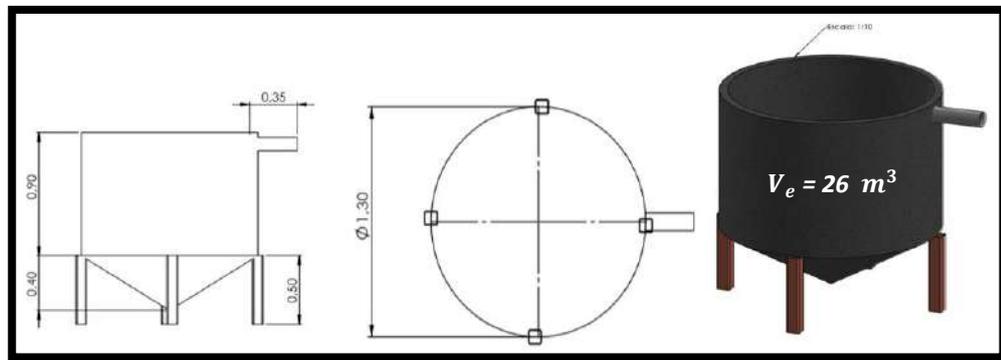
$A_e$ : Área del espesador;  $20 m^2$

$h$ : Altura del espesador;  $1,30 m$

$$V_e = 20 m^2 * 1,30 m$$

$$V_e = 26 m^3$$

En la figura 8-3, se muestra el dimensionamiento del tanque espesador de lodos que se propone para el tratamiento de los lixiviados.



**Figura 8-3:** Dimensionamiento del tanque espesador de lodos.

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

### 3.3.8. Resultados

#### 3.3.8.1. Resultados de la tratabilidad

**Tabla 26-3:** Resultados del pretratamiento de los lixiviados (Proceso de aireación).

Determinaciones	Unidades	Método	TULSMA Límite Máximo Permisible	Resultados
pH	Und.	4500-B	6 - 9	6,10
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	-	6,02
Temperatura	°C	2550-A	-	20,2
Turbiedad	NTU	2130-B	-	13
Color	Und Co/Pt	2120-C	Inapreciable en dilución: 1/20	354
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	30	31
Cloruros	mg/L	4500-Cl - D	1000	602,65
Cobre	mg/L	Hach-8506	1	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	100	400
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	200	1250
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	10	13,5
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	30	207
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	50	370
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	130	510
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	1600	3512
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	2000	3000

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 27-3:** Resultados del tratamiento físico – químico (Proceso de coagulación).

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método</b>	<b>TULSMA Límite Máximo Permisible</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und.	4500-B	6 - 9	6,56
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	-	5,5
Temperatura	°C	2550-A	-	20,3
Turbiedad	NTU	2130-B	-	14,4
Color	Und Co/Pt	2120-C	Inapreciable en dilución: 1/20	347
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	30	29
Cloruros	mg/L	4500-Cl - D	1000	439,58
Cobre	mg/L	Hach-8506	1	0,1
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	100	190
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	200	470
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	10	1
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	30	178
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	50	239
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	130	20
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	1600	2524
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	2000	2800

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 28-3:** Resultados de la aplicación de microorganismos (Tratamiento biológico).

Determinaciones	Unidades	Método	TULSMA Límite Máximo Permisible	Resultados
pH	Und.	4500-B	6 - 9	8,68
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	-	2,75
Temperatura	°C	2550-A	-	21,3
Turbiedad	NTU	2130-B	-	5,6
Color	Und Co/Pt	2120-C	Inapreciable en dilución: 1/20	232
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	30	26,5
Cloruros	mg/L	4500-Cl - D	1000	80,8
Cobre	mg/L	Hach-8506	1	0,23
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	100	97
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	200	198
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	10	0,07
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	30	28
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	50	35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	130	8
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	1600	1196
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	2000	1000

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.3.8.2. Propuesta del diseño de los equipos

Para realizar el tratamiento de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario es necesario ejecutar un pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento biológico, con el fin de reducir todos los contaminantes reportados en la caracterización de la muestra; se reporta el cálculo y la propuesta tecnológica de cada equipo para procesar los 80 m<sup>3</sup> diarios de lixiviados producidos.

**Tabla 29-3:** Propuesta tecnológica para el vertedero rectangular por donde ingresan los lixiviados a la planta de tratamiento de los mismos.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Vertedero rectangular</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de construcción	Concreto	
Caudal de diseño	2,22	$\frac{L}{s}$
Altura mínima sobre el vertedero	0,06	<i>m</i>
<b>Condiciones Calculadas</b>		
Ancho de la cresta	0,24	<i>m</i>
Longitud del vertedero	1,20	<i>m</i>
Ancho del vertedero	0,36	<i>m</i>
Distancia desde el canal hasta la cresta	1,95	<i>m</i>
Altura del vertedero	2,37	<i>m</i>
Área libre de paso	0,29	<i>m</i> <sup>2</sup>
Altura del tirante del canal	0,81	<i>m</i>
Área para el gasto	0,43	<i>m</i> <sup>2</sup>

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

Después de captar el lixiviado de las piscinas y transportarlos por un vertedero rectangular a la planta de tratamiento de lixiviados, es necesario retirar los sólidos gruesos para evitar que estos afecten el transporte del líquido hacia los demás equipos de la planta.

**Tabla 30-3:** Propuesta tecnológica para el sistema de cribado para el pretratamiento de los lixiviados.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Cribado</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de construcción	Acero Inoxidable	
Apertura de las rejillas	18	<i>mm</i>
Velocidad de aproximación	3,37	$\frac{m}{s}$
Inclinación	45	°
Dimensión del paso	25	<i>mm</i>
Espesor de las barras	20	<i>mm</i>
<b>Condiciones Calculadas</b>		
Longitud de las rejillas	1,65	<i>m</i>
Número de barras	9	unidades

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

Para que el sistema de tratamiento de lixiviados sea óptimo, será necesario realizar el proceso de aireación, en este proceso se inyectará aire a un tanque por medio de un compresor y un sistema de difusores, este entrará en contacto con el lixiviado y disminuirá la demanda bioquímica de oxígeno reduciendo así la carga contaminante del agua, el diseño propuesto se muestra a continuación.

**Tabla 31-3:** Propuesta tecnológica para el tanque de aireación de lixiviados.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Tanque de aireación</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de construcción	Adobe	
Caudal de diseño	2,22	$\frac{L}{s}$
Sistema de producción de aire	Difusores	
Transferencia de aire	Burbuja simple	
Geometría del tanque	Cuadrada	
Diámetro del compresor	135	cm
<b>Condiciones Calculadas</b>		
Longitud del tanque	4,30	m
Volumen del tanque	10,56	$m^3$
Caudal de aire	0,49	$\frac{m^3}{min}$
Potencia del motor	$\frac{1}{4}$	Hp

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

Después del proceso de aireación, es necesario realizar la coagulación y sedimentación, para lo cual se propone realizar en un sólo tanque que se dividirá en dos secciones, la primera sección será el tanque de coagulación, en el cual se introducirá el lixiviado por un canal Parshall para regular el caudal, a este proceso se añadirá policloruro de aluminio para producir la coagulación.

El lixiviado permanecerá 20 minutos en el tanque y pasará a la cámara de sedimentación por medio de agujeros instalados en la pared deflectora, en la cámara de sedimentación el líquido reposará y se formarán los flóculos que precipitarán por efecto de la gravedad; los flóculos serán retirados en el fondo del tanque y el agua saldrá por la pared deflectora hacia el canal que la transportará hacia el tratamiento biológico, la propuesta tecnológica se recoge en la tabla 32-3.

**Tabla 32-3:** Propuesta tecnológica para el tanque de coagulación - sedimentación para el tratamiento primario de los lixiviados.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Tanque de coagulación – sedimentación</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de construcción	Adobe	
Alimentación	Contralada con un canal de Parshall.	
Caudal de diseño	2,22	$\frac{L}{s}$
Número de cámaras	2	Cámaras
<b>Condiciones Calculadas</b>		
<b>Paleta Agitadora</b>		
Diámetro del impulsor	0,37	<i>m</i>
Distancia entre el fondo del tanque y el impulsor	0,37	<i>m</i>
Altura del impulsor	0,74	<i>m</i>
Largo de la paleta	0,09	<i>m</i>
Ancho de la paleta	0,074	<i>m</i>
Potencia del motor	$\frac{1}{4}$	Hp
<b>Cámara de Sedimentación</b>		
Velocidad de sedimentación	0,00057	$\frac{m}{s}$
Longitud del sedimentador	5,55	<i>m</i>
Ancho del sedimentador	1,59	<i>m</i>
Separación entre la entrada y la pared difusora	0,56	<i>m</i>
Altura del sedimentador	1,11	<i>m</i>
Volumen del sedimentador	9,79	$m^3$
Tiempo de retención	33	<i>min</i>
Número de orificios	7	orificios
Porción de la pantalla difusora con agujeros	0,67	<i>m</i>
Separación de orificios	9,51	<i>cm</i>
Longitud del vertedero	0,012	<i>m</i>
Ancho del vertedero	0,20	<i>m</i>
Altura del vertedero	4	<i>cm</i>

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

Una de las características principales de los lixiviados es el alto contenido de carga orgánica, la cual es degradada naturalmente por microorganismos, ese mismo fenómeno se aplicará en el biorreactor, en donde se introducirán microorganismos eficientes que reducirán la concentración de la materia orgánica. Además, es necesario alimentar aire para el máximo aprovechamiento de los microorganismos, la propuesta del biorreactor se reporta en la tabla 33-3.

El biorreactor tendrá sección rectangular para aprovechar la disposición espacial de la máquina y se debe controlar la temperatura que no se eleve más de 41,99 °C o sino los microorganismos se morirán, también es necesario controlar todas las condiciones diseñadas para aumentar la eficacia del tratamiento biológico, con lo cual se reduce la carga contaminante del lixiviado y se cumple con la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

**Tabla 33-3:** Propuesta tecnológica para el biorreactor en el tratamiento biológico de los lixiviados.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Biorreactor</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de las tuberías	Acero Inoxidable	
Constante de declinación de microorganismos	0,06	$d^{-1}$
Velocidad de salida del agua tratada	$> 0,1$	$\frac{m}{s}$
Profundidad Hidráulica	3	$m$
Carga Másica	0,6	-
Caudal de diseño	2,22	$\frac{L}{s}$
Volumen diario de lixiviados	80	$m^3$
<b>Condiciones Calculadas</b>		
Rendimiento	24	%
Edad del fango	1,71	d
Volumen del reactor	11,64	$m^3$
Tiempo de retención	88	$min$
Caudal de recirculación	6,94	$\frac{m^3}{h}$
Producción de lodos	13,45	$\frac{kg}{d}$
Ancho del reactor	2,41	$m$
Longitud del reactor	3,62	$m$
Ancho del vertedero de salida de lixiviados	23,06	$cm$
Altura del vertedero	0,35	$m$
Potencia del compresor	¼	Hp
Diámetro del orificio	3	$mm$
Número de agujeros	32	agujeros

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

Los lodos producidos por efecto de la degradación de los microorganismos en el tratamiento biológico, necesitan ser tratados para disminuir el impacto ambiental generado en la planta de tratamiento de lixiviados; el primer paso del tratamiento de los lodos será el de espesamiento por gravedad, en donde se eliminará el agua por efecto de la decantación de los sólidos, una vez espesado el lodo será más fácil realizar su deposición final o su tratamiento, el diseño del tanque de espesamiento se propone a continuación.

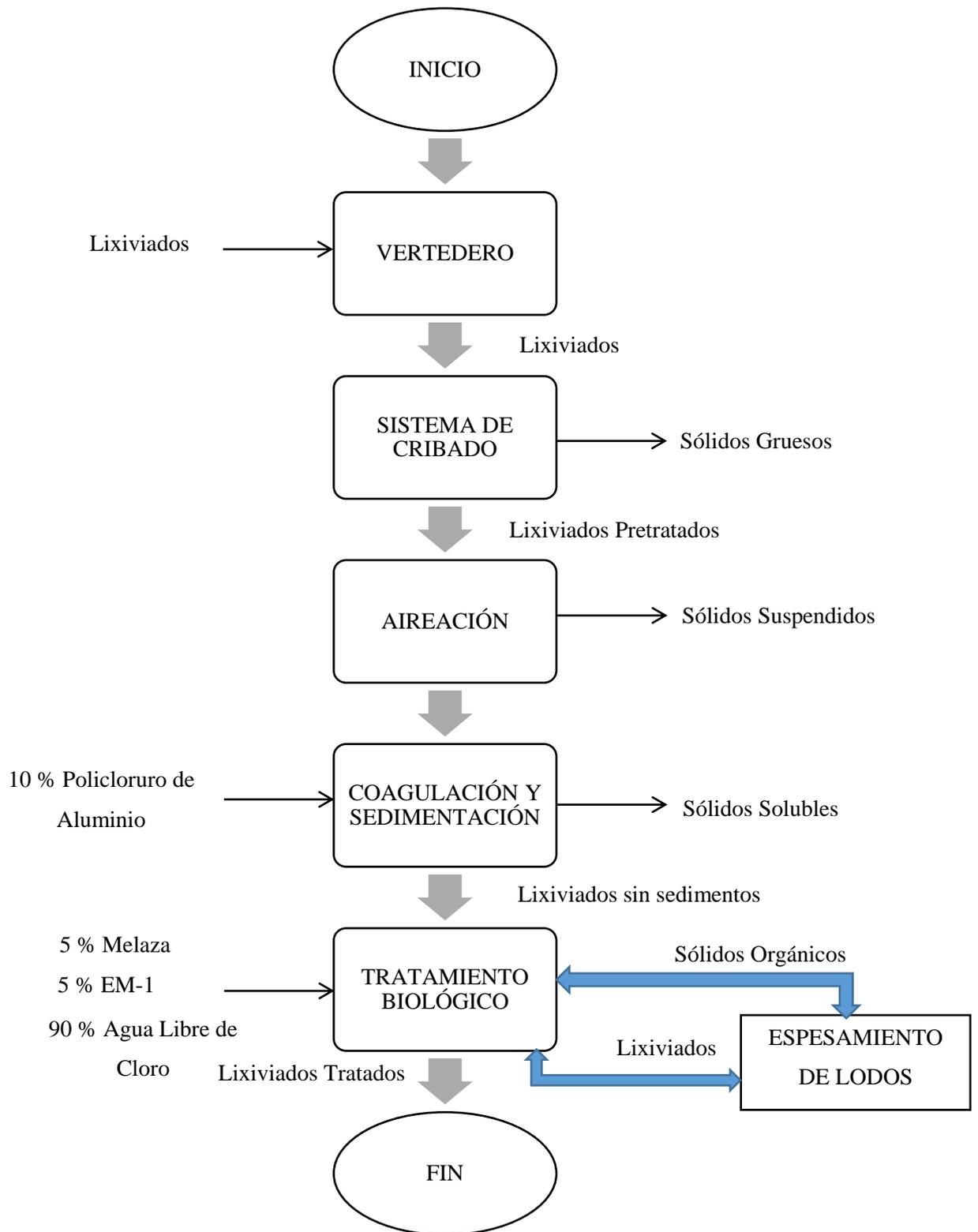
**Tabla 34-3:** Propuesta tecnológica para el espesamiento de lodos producidos en el tratamiento biológico de los lixiviados.

Parte del equipo	Dimensión	Unidad de medida
<b>Tanque espesador de lodos</b>		
<b>Condiciones de Diseño</b>		
Material de construcción		Asbesto
Concentración de fango	4	%
Carga de sólidos para espesador por gravedad	1,98	$\frac{kg}{(m^2 d)}$
Tiempo de retención	48	h
Caudal de diseño	2,22	$\frac{L}{s}$
<b>Condiciones Calculadas</b>		
Carga de lodos al sistema	39,66	$\frac{kg}{d}$
Flujo de lodos	0,99	$\frac{m^3}{d}$
Área del esperador	20	$m^2$
Volumen del espesador	26	$m^3$
Volumen de fangos	0,50	$m^3$
Diámetro del tanque	1,30	$m$
Altura del tanque	1,30	$m$

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.3.8.3. Diagrama de Flujo del Sistema Propuesto para el Tratamiento de Lixiviados

En el gráfico 4-3, se muestra el diagrama de flujo del sistema propuesto para el tratamiento de lixiviados, que ayudará a reducir la carga contaminante de los mismos.



**Gráfico 4-3:** Diagrama de Flujo del Sistema Propuesto para el Tratamiento de Lixiviados recolectados en el relleno sanitario.

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

#### *3.3.8.4. Operaciones Unitarias en el Tratamiento Propuesto de los Lixiviados*

Se establecen las operaciones unitarias necesarias para el tratamiento del líquido residual, siendo el tratamiento biológico, el proceso de mayor disminución de la carga contaminante del agua, por lo que es necesaria la instalación del biorreactor.

##### ➤ ***Recepción de los lixiviados***

Es necesario para controlar el flujo en la planta de tratamiento de lixiviados, que el líquido sea transportado por un vertedero, el cual será rectangular para disminuir los costos de operación y para facilitar su construcción; en el vertedero es necesario controlar el caudal de ingreso al canal, así como el ancho y la longitud del canal y, el ancho de la cresta.

##### ➤ ***Cribado***

Esta operación unitaria consiste en la separación de los sólidos gruesos de los lixiviados, la cual se realiza por la colocación de barras de acero que no permiten el paso de contaminantes de gran tamaño, estas barras serán limpiadas manualmente, ya que sistemas automáticos son muy costosos, las variables que controlarán el proceso son: el área de paso, la inclinación y el número de barras.

##### ➤ ***Aireación***

Tiene como fundamento el paso de burbujas de aire cargadas de oxígeno que entran en contacto con los lixiviados y eliminan la carga orgánica del mismo por medio de la oxidación, para que esta interacción se dé es necesario inyectar burbujas de aire al tanque con la ayuda de un compresor. El aire producido será transportado por medio de un sistema de difusores colocados en el fondo del tanque y con suficiente presión para pasar verticalmente a través del sistema, las variables a controlar en este proceso son: el volumen de aire inyectado, la presión y la temperatura de trabajo.

### ➤ *Coagulación y sedimentación*

Son operaciones unitarias que se realizan de manera conjunta, ya que es necesario adicionar un agente químico (coagulante), el cual reacciona con los contaminantes y produce su separación del agua. Los flóculos formados precipitarán por efecto de la gravedad; este proceso será realizado en un tanque en donde se controlará el tiempo de residencia de los flóculos, el caudal y la velocidad de flujo.

### ➤ *Degradación Biológica*

Se realiza con la inclusión de microorganismos eficientes, que aprovechan la carga contaminante del lixiviado para realizar sus procesos metabólicos y desprender oxígeno, pero es necesario inyectar aire ya que el oxígeno presente en el líquido no es suficiente para la reproducción de los microorganismos, este aire será inyectado por medio de difusores; las variables a controlar en el sistema son: la temperatura del biorreactor y el caudal de aire inyectado.

### ➤ *Espesamiento*

Consiste en la separación del agua presente en los lodos producidos en el tratamiento secundario de los lixiviados, este lodo se separará del agua por efecto de la densidad; en la parte superior quedará el agua y en la parte inferior quedará los lodos que pueden ser transformados o tratados, las variables a controlar en este proceso son: el tiempo de residencia y la carga superficial de lodos.

#### *3.3.8.5. Distribución y diseño de la planta de tratamiento*

Para lograr un máximo aprovechamiento de los recursos y del terreno en el que se instale la planta, se necesitará un espacio de 200 m<sup>2</sup>; este espacio deber ser cercano a los tanques donde se está almacenando los lixiviados para disminuir el uso de sistemas neumáticos para el transporte de los mismos, la planta deberá cumplir con los parámetros establecidos en la sección de propuesta tecnológica de los equipos; las áreas de la planta se describen a continuación y se muestran graficados en el anexo H.

#### *3.3.8.5.1. Descripción de las áreas*

- **Área de recepción y almacenamiento de los lixiviados:** Esta área estará ubicada continua a las piscinas de almacenamiento de lixiviados, incluirá un vertedero rectangular, el sistema de cribas y tuberías de PVC.
- **Área de producción:** En el área de producción se incluirá todos los equipos para el tratamiento primario y secundario, se ubicarán los tanques de aireación, coagulación – sedimentación y el reactor biológico; además, se situarán las tuberías necesarias para el transporte de los lixiviados hacia los distintos tratamientos y al espesamiento de lodos.
- **Cuarto de máquinas:** Se ubicará continua al área de producción y en esta se encontrarán las bombas necesarias para el transporte del fluido desde la recepción hasta el tanque de espesamiento de lodos.
- **Bodega:** Será ubicada en la parte posterior de la planta de tratamiento, en esta se almacenarán las sustancias químicas necesarias para el tratamiento de lixiviados, además de que se encontrarán herramientas y aditivos necesarios para el mantenimiento de las máquinas; las cuales deben estar colocadas en perchas y con la debida rotulación.
- **Área de oficinas:** Esta área se encontrará continua a la bodega y servirá para el control de entrada del personal administrativo y de los operarios de la planta, en esta se ubicarán sillas, mesas, computadoras y material de oficina; además de que contará con un bar para las personas que laboran en la planta.

### 3.3.8.6. Requerimiento de tecnología, equipos y maquinaria

**Tabla 35-3:** Materiales, equipos y reactivos utilizados en la caracterización física, química y microbiológica de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario.

PARÁMETROS	MATERIALES	EQUIPOS	REACTIVOS/SUSTANCIAS
pH	✓ Vaso de precipitación de 250 mL	✓ Potenciómetro	✓ Buffer pH 4,0 ✓ Buffer pH 7,0 ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Conductividad	✓ Vaso de precipitación de 250 mL	✓ Conductímetro	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Temperatura	✓ Vaso de precipitación de 250 mL	✓ Termómetro	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Turbiedad	✓ Celda	✓ Turbidímetro	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Color	✓ Cubetas de análisis 10 mL	✓ HACH DR 2800 (Espectrofotómetro)	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Aceites y Grasas	✓ Embudo de separación de 500 mL ✓ Soporte Universal	✓ Equipo de separación ✓ Balanza analítica	✓ Hexano recuperado ✓ Agua problema
Cloruros	✓ Erlenmeyer de 250 mL ✓ Bureta ✓ Soporte Universal	✓ Equipo de titulación	✓ Cromato de potasio ✓ Nitrato de plata de 0,1 N ✓ Agua problema
Cobre	✓ Cubetas cuadradas de 10 mL	✓ Espectrofotómetro DR 2800	✓ Sobres de reactivo Cobre Cuver1 en polvo ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Demanda Bioquímica de Oxígeno	✓ Botella ámbar ✓ Tampón ✓ Cápsula magnética	✓ Digestor de DBO	✓ Soluciones Tampón Fosfato ✓ Solución de sulfato magnesio ✓ Solución de cloruro férrico ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Demanda Química de Oxígeno	✓ Vaso de precipitación ✓ Tubos de digestión con su respectiva tapa ✓ Pipeta	✓ Digestor de DQO ✓ Espectrofotómetro DR 2800	✓ Dicromato potásico concentración 0,1 N ✓ Ácido sulfúrico ✓ Sulfato ferroso en solución ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Fósforo Total	✓ Cubetas cuadradas de	✓ Espectrofotómetro	✓ Sobres de reactivo fosfato PhosVer3

	10 mL	tro DR 2800	en polvo ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Nitrógeno Amoniacal	✓Cubetas cuadradas de 10 mL ✓Pipeta	✓Espectrofotómetro DR 2800	✓ Solución de reactivo Nessler ✓ Estabilizante mineral ✓ Agente dispersante alcohol polivinílico ✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Nitrógeno Total	✓Tubos de digestión ✓Pipeta	✓Digestor ✓Espectrofotómetro DR 2800	✓ Reactivo de persulfato de nitrógeno total ✓ Reactivo A ✓ Reactivo B ✓ Agua problema
Sólidos Suspendidos Totales	✓Cubetas cuadradas de 10 mL	✓Espectrofotómetro DR 2800	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Sólidos Totales	✓Caja Petri ✓Balanza analítica	✓Baño María	✓ Agua problema ✓ Agua destilada
Coliformes Fecales	✓Placa Petrifilm ✓Tubos ✓Pipeta	✓Cámara de flujo laminar ✓Mufla	✓ Reactivo para coliformes fecales ✓ Agua destilada ✓ Alcohol

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 36-3:** Reactivos utilizados en el tratamiento de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario.

<b>Reactivos</b>
Sulfato de Aluminio
Policloruro de Aluminio (PAC)
Cloruro Férrico
EM•1 (Microorganismos eficientes)
Melaza
Agua

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua Facultad de Ciencias, ESPOCH.

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.4. Análisis Económico de la Planta de Tratamiento

#### 3.4.1. Inversión de la instalación de la planta de tratamiento

**Tabla 37-3:** Adecuación de la zona para la planta.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
1001	Replanteo y nivelación de estructuras	m <sup>2</sup>	200,00	9,72	1944,00
1002	Excavación a mano en Suelo sin clasificar, Profundidad entre 0 y 2 m	m <sup>3</sup>	200,00	14,17	2834,00
1003	Replanteo de Piedra, e=20 cm	m <sup>2</sup>	200,00	6,01	1202,00
Subtotal					5980,00

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 38-3:** Instalación del vertedero y sistema de cribas.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
2001	Hormigón premezclado f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> mas aditivo	m <sup>3</sup>	1,05	166,90	175,25
2002	Sum.-Ins, Malla electrosoldada R257	m <sup>2</sup>	1,20	15,12	18,14
2003	Encofrado Recto, con retirado de cofres para hormigón visto	m <sup>2</sup>	2,84	17,62	50,04
2004	Preparado y pintado de superficie	m <sup>2</sup>	2,84	5,27	14,97
2005	Regleta con flotador	u	1,00	120,34	120,34
2006	Rejilla metálica	m <sup>2</sup>	1,89	177,12	334,76
2007	Sum, Válvula HF D=200 mm	u	2,00	682,84	1365,68
2008	Enlucido 1:2 + Impermeabilizante	m <sup>2</sup>	2,84	17,14	48,68
2009	Colocación Tubería PVC Alcant. D=640 mm	m	4,50	9,53	42,89
2010	Barras metálicas de acero inoxidable	u	9,00	17,12	154,08
Subtotal					2324,83

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 39-3:** Instalación del sistema de aireación.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
3001	Desbroce y limpieza	m <sup>2</sup>	19,00	0,17	3,23
3002	Replanteo mayor a 1 Ha	m <sup>2</sup>	19,00	9,60	182,40
3003	Excavación mecánica con Tractor	m <sup>3</sup>	4,30	1,51	6,49
3004	Relleno compactado para conformación de plataformas	m <sup>3</sup>	80,00	1,97	157,60
3005	Material de Reposición	m <sup>3</sup>	80,00	9,36	748,80
3006	Sum,-Ins, Geomembrana 1000 micras	m <sup>2</sup>	19,00	6,49	123,31
3007	Cargada de Material a máquina	m <sup>3</sup>	80,00	0,90	72,00
3008	Transporte de material hasta 5 km	m <sup>3</sup>	80,00	1,80	144,00
3009	Sum,-Ins, Tubería PVC Desagüe D=50 mm	m	4,00	17,05	68,20
3010	Sum,-Ins, Tubería PVC Desagüe D=110 mm	m	4,00	23,05	92,20
3011	Sum,-Ins, Tee PVC Desagüe D=50 mm	u	2,00	5,52	11,04
3012	Sum, Tapón PVC Desagüe D=110 mm	u	2,00	8,62	17,24
3013	Sum, Reductor PVC Desagüe D=110 x 50 mm	u	2,00	15,58	31,16
3014	Sum,-Ins, Codo PVC Desagüe D=110 mm 90 grad,	u	2,00	12,65	25,30
3015	Sum,-Ins, Codo PVC Desagüe D=50 mm 90 grad,	u	2,00	8,14	16,28
3016	Hormigón Simple 210 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	80,00	183,67	14693,60
3017	Sum,-Ins, Malla electrosoldada R 84	m <sup>2</sup>	4,30	8,21	35,30
3018	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V6)	m	18,00	16,38	294,84
3019	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V5)	m	18,00	16,79	302,22
3020	1 motor para compresión de 1/4 Hp	u	1,00	250,00	250,00
Subtotal					17275,21

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 40-3:** Instalación del tanque de coagulación – sedimentación.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
4001	Desbroce y limpieza	m <sup>2</sup>	6,00	0,17	1,02
4002	Replanteo mayor a 1 Ha	m <sup>2</sup>	6,00	9,60	57,6
4003	Excavación mecánica con Tractor	m <sup>3</sup>	6,16	1,51	9,3016
4004	Relleno compactado para conformación de plataformas	m <sup>3</sup>	6,16	1,97	12,1352
4005	Material de Reposición	m <sup>3</sup>	6,16	9,36	57,6576
4006	Sum,-Ins, Geomembrana 1000 micras	m <sup>2</sup>	6,60	6,49	42,834
4007	Cargada de Material a máquina	m <sup>3</sup>	6,16	0,90	5,544
4008	Transporte de material hasta 5 km	m <sup>3</sup>	6,16	1,80	11,088
4009	Sum,-Ins, Tee PVC Desagüe D=50 mm	u	2,00	5,52	11,04
4010	Sum,-Ins, Codo PVC Desagüe D=110 mm 90 grad,	u	2,00	12,65	25,3
4011	Sum,-Ins, Codo PVC Desagüe D=50 mm 90 grad,	u	2,00	8,14	16,28
4012	Hormigón Simple 210 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	6,16	183,67	1131,4072
4013	Sum,-Ins, Malla electrosoldada R 84	m <sup>2</sup>	6,00	8,21	49,26
4014	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V6)	m	6,00	16,38	98,28
4015	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V5)	m	6,00	16,79	100,74
4016	Colocación de una pantalla difusora de Hormigón Simple 210 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	5,00	183,67	918,35
4017	1 agitador de acero	u	1,00	400,00	400,00
4018	1 motor eléctrico a 220 V de ¼ Hp	u	1,00	150,00	150,00
Subtotal					3097,85

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 41-3:** Instalación del biorreactor.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
5001	Excavación a mano en Suelo sin clasificar, Profundidad entre 0 y 2 m	m <sup>3</sup>	4,83	14,17	68,44
5002	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA - 200 mm	m	4,00	26,44	105,76
5003	Colocación Tubería PVC U/E D=200 mm	m	4,00	9,55	38,20
5004	Sum, Codo PVC U/E R/L D=200 mm 90 grad,	u	5,00	138,50	692,50
5005	Sum, Codo PVC U/E R/L D=200 mm 22,5 grad,	u	6,00	84,50	507,00
5006	Sum, Reductor PVC U/E D=200 x 160 mm	u	1,00	72,84	72,84
5007	Sum, Reductor PVC U/E D=200 x 110 mm	u	1,00	71,64	71,64
5008	Colocación Acc PVC U/E sin anclajes, D=200 mm	u	4,00	17,66	70,64
5009	Sum, Tubería PVC U/E 0,80 MPA - 160 mm	m	4,00	19,24	76,96
5010	Sum, Codo PVC U/E R/L D=160 mm 90 grad,	u	4,00	62,46	249,84
5011	Sum, Codo PVC U/E R/L D=160 mm 22,5 grad,	u	2,00	50,46	100,92
5012	Sum, Reductor PVC U/E D=160 x 110 mm	u	4,00	34,99	139,96
5013	Sum. Tubería PVC E/C 0,80 MPA D=125 mm	m	4,00	10,66	42,64
5014	Colocación tubería PVC E/C D=125 mm	m	4,00	5,74	22,96
5015	Suministro codo PVC E/C R/L D=125 mm 22,5 grad.	u	3,00	37,99	113,97
5016	Suministro codo PVC E/C R/L D=125 mm 90 grad.	u	3,00	37,99	113,97
5017	Suministro reductor PVC E/C 125x90 mm	u	1,00	23,86	23,86
5018	Sum, Tubería PVC U/E 0,63 MPA - 110 mm	m	4,00	7,24	28,96
5019	Colocación Tubería PVC U/E D=110 mm	m	4,00	4,78	19,12
5020	Sum, Codo PVC U/E R/L D=110 mm 90 grad,	u	2,00	28,80	57,60
5021	Sum, Codo PVC U/E R/L D=110 mm 22,5 grad	u	4,00	26,40	105,60
5022	Sum, Reductor PVC U/E D=110 x 90 mm	u	1,00	25,06	25,06
5023	Colocación Acc PVC U/E sin anclajes, D=110 mm	u	7,00	9,55	66,85
5024	Sum, Tubería PVC U/E 0,50 MPA - 90 mm	m	1,20	7,24	8,69
5025	Colocación Tubería PVC U/E D= 90 mm	m	1,20	3,96	4,75
5025	Colocación Acc PVC U/E sin anclajes, D=160 mm	u	3,00	13,62	40,86
5026	Colocación Tubería PVC U/E D=160 mm	m	4,00	8,30	33,20
5027	Sum. y Tendido cama de arena e=10 cm	m <sup>3</sup>	10,00	16,94	169,40
5028	Enlucido 1:2 + Impermeabilizante	m <sup>2</sup>	5,20	17,14	89,19

5029	Encofrado Recto, con retirado de cofres para hormigón visto	$m^2$	5,20	17,62	91,62
5030	Hormigón Simple 180 kg/cm <sup>2</sup>	$m^3$	10,00	143,34	1433,40
5031	Hormigón premezclado f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> mas aditivo	$m^3$	10,00	166,90	1669,00
5032	Motor para compresor de ½ Hp	$u$	1,00	350,00	350,00
5033	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V6)	$m$	2,80	16,38	45,90
5034	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0,20 x 0,20) (V5)	$m$	2,80	16,79	47,50
5035	Sum,-Ins, Geomembrana 1000 micras	$m^2$	19,00	6,49	123,31
Subtotal					6922,11

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 42-3:** Instalación del tanque espesador de lodos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
6001	Desbroce y limpieza	$m^2$	20,00	0,17	3,4
6002	Replanteo mayor a 1 Ha	$m^2$	20,00	9,60	192
6003	Excavación mecánica con Tractor	$m^3$	1,26	1,51	1,9026
6004	Relleno compactado para conformación de plataformas	$m^3$	15,87	1,97	31,2639
6005	Material de Reposición	$m^3$	15,87	9,36	148,5432
6006	Sum,-Ins, Geomembrana 1000 micras	$m^2$	20,00	6,49	129,8
6007	Cargada de Material a máquina	$m^3$	15,87	0,90	14,283
6008	Transporte de material hasta 5km	$m^3$	15,87	1,80	28,566
6009	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0.20 x 0.20) (V6)	$m$	1,86	16,38	30,4668
6010	Cadenas y columnas de Hormigón armado (0.20 x 0.20) (V5)	$m$	1,86	16,79	31,2294
Subtotal					611,45

Realizado por: CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 43-3:** Costo de la mano de obra para la construcción e instalación de la planta de lixiviados.

DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO, \$	CANTIDAD	UNIDADES	COSTO TOTAL, \$
Operario de maquinaria pesada	500	1	-	500
Ayudante de maquinaria	500	2	-	1000
Albañil (jefe)	650	1	-	650
Albañil (ayudante)	450	3	-	1350
Soldador	300	1	-	300
Chofer	350	2	-	700
<b>Subtotal</b>				4500

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 44-3:** Costo total del sistema de tratamiento de lixiviados.

ÍTEM	VALOR, \$
Adecuación de la zona para la planta	5980,00
Vertedero y sistema de cribas	2324,83
Tanque de aireación	17275,21
Tanque de sedimentación – coagulación	3097,85
Biorreactor	6922,11
Tanque de espesamiento de lodos	611,45
Costo de la mano de obra	4500,00
Costo Total	40711,45
Impuesto al valor agregado (12 %)	4885,37
Gastos Imprevistos (15 %)	6106,71
Total de inversión	51703,53

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

La inversión total que el municipio del Cantón Lago Agrio debe realizar para la construcción e implementación de la planta de tratamiento de lixiviados asciende a \$ 51703,53; este rubro económico incluye, la preparación de las instalaciones para la planta, la construcción del vertedero rectangular y el sistema de cribado, la construcción de los tanques de aireación, coagulación - sedimentación, biorreactor y tanque de espesamiento de lodos, así como también la contratación de mano de obra.

➤ **Costos Operativos**

Estos gastos incluyen, los costos operativos de la dosificación del policloruro de aluminio en el proceso de la coagulación y de la activación de los microorganismos eficientes en el tratamiento biológico, el desglose de los gastos se detalla en las tablas 45-3 y 46-3, respectivamente.

**Tabla 45-3:** Costos operativos de la obra (Policloruro de aluminio).

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario, \$</b>	<b>Costo Diario, \$</b>	<b>Costo Mensual, \$</b>	<b>Costo Anual, \$</b>
Policloruro de aluminio	0,008	kg	3,05	0,024	0,72	262,8

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

**Tabla 46-3:** Costos operativos de la obra (Activación de microorganismos).

<b>Descripción</b>	<b>Costo Unitario, \$</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo Total, \$</b>
Microorganismos	24,00	10,78	L/mes	258,72
Melaza	0,35	10,78	L/mes	3,77
Agua	0,15	193,82	L/mes	29,07
<b>TOTAL</b>				291,56

**Realizado por:** CUENCA, Kerly. 2018.

### 3.5. Cronograma

ACTIVIDAD	TIEMPO																											
	1° mes				2° mes				3° mes				4° mes				5° mes				6° mes							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Caracterización física, química y bacteriológica		■	■	■		■	■	■		■	■	■		■	■	■												
Realización de pruebas de tratabilidad		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
Dimensionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados													■	■	■	■	■	■										
Factibilidad técnica y económica del diseño															■	■	■	■	■	■								
Validación del diseño (caracterización física, química y bacteriológica)																	■	■	■	■								
Elaboración y corrección de borradores																	■	■	■	■	■							
Redacción del trabajo final					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Empastado y presentación del trabajo final																					■	■						
Auditoría académica																						■	■					
Defensa del trabajo																												■

Realizado por: CUENCA, Kerly, 2018.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El diseño del sistema de tratamiento de lixiviados se inició con el muestreo del líquido residual en base a la Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental para el manejo y disposición final de desechos no peligrosos que rige en el ANEXO VI del TULSMA. Posterior a ello, se efectuó la caracterización inicial de los lixiviados; cuyos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Mediante los resultados obtenidos se determinó que los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que no cumplieron con la Norma TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, fueron: DBO<sub>5</sub>, DQO, cloruros, fósforo total, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, cobre y coliformes fecales; por lo que es necesario realizar un tratamiento de lixiviados.

Para conocer el tipo de tratamiento que se debe aplicar a los lixiviados, se calculó el índice de biodegradabilidad, mediante la relación que existe entre DBO<sub>5</sub>/DQO, cuyo valor fue 0,4; es decir, que la naturaleza del efluente a tratar es biodegradable y se adopta la idea de efectuar un sistema combinado, es decir, tratamiento físico – químico y biológico.

Para evaluar el tipo de coagulante que se utilizó en el proceso de coagulación, se seleccionó entre tres tipos de coagulantes, los cuales fueron: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio (PAC); se evaluó el porcentaje de remoción del color y la turbidez a una dosificación de 10 mL de cada coagulante estudiado; además se realizó la prueba de jarras preparando cada una de las disoluciones.

El sulfato de aluminio reportó valores iguales a 68,60 % y 55,56 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente, el cloruro férrico reportó valores iguales a 87,29 % y 43,21 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente, mientras que el policloruro de aluminio reportó valores iguales a 73,47 % y 66,67 % para el porcentaje de remoción del color y la turbidez respectivamente; entonces, el coagulante que mayor remoción reportó fue el policloruro de aluminio, por lo que se seleccionó este coagulante para el tratamiento. También, se determinó la dosis óptima de dicho coagulante; cuyo valor fue de 0,1 ppm, ya que es la concentración que mayor carga contaminante elimina del lixiviado, lo que disminuye la turbiedad.

En el análisis del pH óptimo, se reporta que el mejor tratamiento se obtuvo cuando la coagulación se realizó a un pH de 6 con resultados iguales a 35 NTU para la turbiedad; mientras que a un pH de 5 se obtuvo valores iguales a 47 NTU para la turbiedad; a un pH de 7 se obtuvo resultados iguales a 51 NTU para la turbiedad y a un pH de 8 la turbiedad tuvo valores iguales a 50 NTU.

Se debe controlar que el proceso de la coagulación se realice a un pH óptimo de 6, ya que a dicho valor se alcanza la máxima remoción de los contaminantes de los lixiviados; para controlar el pH es necesario ajustar la cantidad de coagulante adicionado, el tiempo de precipitación y la cantidad de aire que se inyecta en el proceso, al controlar estas variables se mejora el proceso de tratamiento de los lixiviados.

El éxito del tratamiento de lixiviados se obtuvo por la inclusión de microorganismos eficientes que logran consumir mayor cantidad de oxígeno en un menor tiempo, son termo resistentes lo que ocasiona que puedan vivir más tiempo en el reactor biológico; los procesos de aireación, coagulación y sedimentación permitieron reducir el contenido de sólidos que disminuyen el ritmo de consumo de oxígeno de los microorganismos; establecidas las variables y el volumen a tratar de lixiviados se realizó el diseño y dimensionamiento de los equipos.

Para el dimensionamiento de los equipos fue necesario establecer el caudal de diseño, para lo cual se estudió la producción de lixiviados en los últimos 10 años en el relleno sanitario actual. En base a datos históricos de la precipitación del Cantón Lago Agrio proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), se calculó que el caudal para tratar la cantidad de lixiviados fue de  $2,22 \frac{L}{s}$ . Con este dato se procedió a realizar el dimensionamiento de los equipos.

Se diseñó el vertedero rectangular, donde se recolectarán los lixiviados; cuyas medidas principales fueron: el ancho de la cresta igual a  $0,24 m$ , la longitud igual a  $1,20 m$  y una velocidad de fluido igual a  $3,39 \frac{m}{s}$ ; para el pretratamiento de los lixiviados se propone un sistema de cribas metálicas, cuyas dimensiones principales son:  $0,81 m$  de altura de tirante, longitud de las rejillas igual a  $1,65 m$ , número de barras igual a 9 y ángulo de inclinación igual a  $45^\circ$ .

Para el tratamiento primario se diseñó el tanque de aireación, el mismo que será construido en adobe, tendrá forma cuadrática; se realizará con un compresor de potencia igual a  $\frac{1}{4}$  Hp y las

dimensiones del tanque serán: 4,30 *m* de longitud y 10,56 *m*<sup>3</sup> de volumen; la coagulación y sedimentación se realizarán en un tanque de dos cámaras, con un ancho de 1,59 *m* y una altura de 1,11 *m*; el coagulante será mezclado mediante un impulsor de dos aspas cuya potencia será igual a ¼ Hp.

Para el tratamiento secundario se diseñó un biorreactor en donde se adicionará microorganismos eficientes (EM•1), los cuales se prepararán con la adición de 5 % de EM•1 en estado latente, 5 % de melaza y 90 % de agua libre de cloro, para su activación; además, será necesario la adición de aire, con un compresor de ¼ Hp; las dimensiones del biorreactor serán: longitud de 3,62 *m* y ancho de 2,41 *m*, y una altura de 3 *m* obteniendo un volumen de 11,64 *m*<sup>3</sup>; para el almacenamiento de los lodos se propone el diseño de un espesador de diámetro de 1,30 *m* y de altura igual al mismo valor del diámetro, con un volumen de 26 *m*<sup>3</sup>; con estas dimensiones la planta será capaz de tratar diariamente 80 *m*<sup>3</sup> de lixiviados.

La validación del sistema de tratamiento de lixiviados se realizó mediante la caracterización final física, química y microbiológica de los mismos, donde se evidenció la máxima disminución de los contaminantes, logrando que su vertido cumpla con los límites permisibles de la norma ambiental vigente.

En cuanto a los costos, la inversión inicial para la construcción e implementación de la planta de tratamiento de lixiviados es de \$ 51703,53; lo que incluye: adquisición de equipos neumáticos, construcción del vertedero rectangular, sistema de cribado, tanques de aireación, coagulación - sedimentación, reactor biológico y espesador de lodos; mientras que el costo operativo anual del producto químico para el proceso de la coagulación corresponde a \$ 262,8 y, el costo operativo mensual de la activación de los microorganismos eficientes para el tratamiento secundario corresponde a \$ 291,56.

## CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización inicial física, química y microbiológica de los lixiviados recolectados en el relleno sanitario del Cantón Lago Agrio en base al TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce; se obtuvieron los siguientes parámetros fuera de norma: cobre 1,3 mg/L, DBO<sub>5</sub> 580 mg/L, DQO 1740 mg/L, cloruros 1240,75 mg/L, fósforo total 58 mg/L, nitrógeno amoniacal 142 mg/L, nitrógeno total 540 mg/L, sólidos totales 6204 mg/L, sólidos suspendidos totales 710 mg/L y coliformes fecales 3000 UFC/100 mL.
- Se obtuvo un valor de índice de biodegradabilidad de 0,4; lo que indica que la naturaleza del lixiviado a tratar es biodegradable, por lo que se adopta la idea de aplicar un sistema combinado, es decir, tratamiento físico – químico y biológico.
- Mediante las pruebas de tratabilidad y el test de jarras, se comparó la adición de tres tipos de coagulantes: policloruro de aluminio (PAC), cloruro férrico y sulfato de aluminio, de los tres el mejor fue el PAC con una dosis óptima de 0,1 ppm, alcanzando un porcentaje de remoción de turbiedad igual a 66,67 % y de color igual a 73,47 %; con un pH óptimo de 6 de coagulación.
- Debido a que los resultados obtenidos con la dosificación del policloruro de aluminio en el proceso de coagulación no cumplieron con los valores establecidos dentro de los límites permisibles de la norma ambiental vigente, fue necesario la adición de microorganismos eficientes (EM•1) para la efectividad del sistema de tratamiento.
- Se identificaron las siguientes operaciones unitarias: cribado, coagulación, sedimentación, degradación biológica y espesamiento; además las variables del proceso que se evidenciaron fueron: disposición geométrica de los tanques, velocidad de flujo, caudal volumétrico, distribución geométrica de las tuberías, potencia de las bombas, compresores y tiempo de residencia de los lixiviados.
- Para el dimensionamiento de los equipos que conforman el sistema de tratamiento de lixiviados, se realizaron los cálculos de ingeniería tomando en cuenta los criterios de diseño de cada equipo; las operaciones realizadas permiten conocer que es necesario que en la planta se instalen: tuberías de PVC, vertedero, compresores, tanque de aireación, tanque de coagulación - sedimentación, reactor biológico y espesador de lodos.

- Para validar la eficacia del lixiviado tratado, se realizaron las pruebas de calidad de acuerdo al TULSMA LIBRO VI, ANEXO 1, TABLA 9, verificando que los principales contaminantes evidenciados en la caracterización inicial de los lixiviados, se encontraban dentro de los límites permisibles de la norma ambiental vigente. Se estableció también el costo de implantación de la planta de tratamiento con su respectivo diseño propuesto, cuyo valor fue de \$ 51703,53; lo que incluye, la preparación de las instalaciones para la planta, la construcción del vertedero rectangular y el sistema de cribado, la construcción de los tanques de aireación, coagulación - sedimentación, biorreactor y tanque de espesamiento de lodos, así como también la contratación de mano de obra.

## RECOMENDACIONES

- En caso de llevarse a cabo este proyecto, se recomienda tomar las debidas precauciones de construcción y de protección ambiental con el objetivo de no perjudicar a ningún medio físico y biótico del ecosistema.
- Efectuar semestralmente las respectivas caracterizaciones físicas, químicas y microbiológicas del lixiviado tratado en un laboratorio reconocido por el Organismo Ecuatoriano de Acreditación, OA, para comprobar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados.
- La limpieza manual de las rejillas debe ser de forma mensual para evitar la acumulación de sólidos en cantidades significativas.
- Fomentar la capacitación del personal operativo en temas como: salud ocupacional, seguridad industrial y mantenimiento de sistemas de tratamiento de lixiviados, para que la operación de dicho sistema sea efectiva.
- Es importante realizar campañas de reciclaje para la ciudadanía del Cantón Lago Agrio, por parte del GADMLA para reducir la contaminación provocada por la generación de lixiviados.
- Los lodos generados en la planta de tratamiento de lixiviados deben ser aprovechados mediante técnicas de estabilización para ser utilizados como abono para la agricultura.

## BIBLIOGRAFÍA

**Alemán, M.** *Manejo Integral de Residuos Sólidos para la Ciudad d San Miguel de los Bancos.* (Tesis). Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador, 2003, p. 24.

**Álvarez, A; & Suárez, J.** “Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario El Guayabal de la ciudad San José de Cúcuta”. *Redalyc.* [En línea], 2006, (Colombia), 20(2), pp. 95-105. [Consulta: 18 diciembre 2017]. ISSN: 0122-3461. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85202007>

**APHA, AWWA, WPCF.** *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.* Madrid-España: Díaz de Santos, S. A, 1992.

**ATEGRUS.** *Curso sobre Introducción a la Gestión de Vertederos. Unidad didáctica III: Lixiviados.* [En línea]. Fondo Social Europeo, 2010, p. 42. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en [http://www.ategrus.org/images/stories/residuos/vertederos/ategrus\\_lixivados\\_11\\_JUN\\_2010.pdf](http://www.ategrus.org/images/stories/residuos/vertederos/ategrus_lixivados_11_JUN_2010.pdf)

**Atkinson, B.** *Reactores Bioquímicos.* Barcelona-España: Reverté, 2008, pp. 26-30.

**Átlas, R.** *Fundamentals and Applications of Microbial Ecology.* Boston-EEUU: Addison-Wesley, 2007. ISBN: 0201000512, pp. 449-450.

**Aznar, A.** “Determinación de los parámetros físico - químicos de calidad de las aguas”. *Open Course Ware*, vol. 2, n° 23 (2000), (España), pp. 12-19.

**Biale, J; et al.** *Biochemical Engineering fundamentals.* 2ª ed. Nueva York-EEUU: McGraw Hill, 1986. ISBN: 0070032122.

**Caldiño, I; & Tzatchkov, V.** *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Redes de Distribución.* Comisión Nacional del Agua. Coyoacán-México, 2007. ISBN: 978-968-817-880-5.

**Comisión Nacional del Agua.** *Inventario de Cuerpos de Agua Epicontinentales Superficiales, Costeros y Humedales de la República Mexicana.* Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, México, 2005.

**Cánepa, L.** *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores.* Lima-Perú: CEPIS, 2005.

**Chapman, D; & Kimtsach, V.** *Selección de variables de calidad del agua. Evaluaciones de calidad del agua.* Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Organización Mundial de la Salud, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, E & FN Spon, Londres, 1992, p. 126.

**Charpentier, J.** *Tratamiento de aguas residuales con lodos activado.* [En línea]. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires-Argentina, 2014, p. 12. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en: <https://inti.gob.ar/ue/pdf/publicaciones/cuadernillo6.pdf>

**Clarke, L.** *Manual for Process Engineering Calculations.* 2ª ed. Nueva York-EEUU: Mc Graw Hill, 1975. ISBN: 0070112495, p. 115.

**Cueto Ferreira, D. C.** *Diseño de un Sistema de Aireación para una Planta de Lodos Activados.* (Tesis). Universidad de Cartagena, Colombia, 2016.

**Fadel, M; et al.** *Temporal variation of leachate quality from presorted and baled municipal solid waste with high organic.* Boston-EEUU: Waste management, 2002, pp. 789-791.

**Fandiño Piamonte, H. S.** *Diseño preliminar de la planta de tratamiento de aguas residuales.* (Tesis). Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental. Bogotá-Colombia, 2017, pp. 15-16.

**FOE.** *Citizen's Guide to Municipal Landfills.* Filipinas : Global Alliance for Incinerator Alternatives, 2014. ISBN: 957-30329-3-7, pp. 15-20.

**García, A.** *El Relleno Sanitario*. [En línea]. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y de Salud Ambiental. Washington-EEUU, 2010, pp. 42-48. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en: [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/unidades/unidad3.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidades/unidad3.pdf)

**Giraldo, E.** *Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos*. 1997, pp. 48-51.

**Hammeken Arana, A; & Romero García, E.** *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. (Tesis). Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería. México, 2005, pp. 34-37.

**INEC.** *Producción de residuos sólidos urbanos en el Ecuador*. Quito-Ecuador, 2017.

**Jácome, A; & Suárez, J.** *Espesamiento de Fangos de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*. (Maestría). Universidad de Coruña, España, 2007, pp. 14-22.

**Kister, H.** *Equipment for Distillation, Gas Absorption, Phase Dispersion*. 8ª ed. Boston-EEUU: The McGraw-Hill companies, 2007.

**León Rodríguez, F. M.** *Tratamiento de Aguas. Manual de Laboratorio*. Universidad Autónoma de México, Departamento de Ciencias Químicas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México, 2013, pp. 65-107. [Consulta: 20 diciembre 2018]. Disponible en: [http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo\\_editorial/comite\\_editorial/manuales/tratamientodeaguas\\_manualprac.pdf](http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo_editorial/comite_editorial/manuales/tratamientodeaguas_manualprac.pdf)

**López, V; & Mendoza, P.** *Estudio de la Calidad del Lixiviado del Relleno Sanitario La Esmeralda y su respuesta bajo Tratamiento en Filtro Anaerobio Piloto de Flujo Ascendente* [En línea] (Tesis). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura Carrera de Ingeniería Química. Manizales-Colombia, 2004, p. 8. [Consulta: 15 diciembre 2018]. Disponible en: [http://bdigital.unal.edu.co/1059/1/patriciamentozasalgado.2004\\_.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/1059/1/patriciamentozasalgado.2004_.pdf)

**Lux Monroy, M. A.** *Medidores de Flujo en Canales Abiertos*. (Tesis). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Guatemala-México, 2010, p. 13.

**Lyonnais Des Eaux – Dumez.** *Tratamiento de Agua*. 1985, pp. 487-491.

**Madigan, M; et al.** *Biología de los microorganismos*. 8ª ed. Madrid-España: Prentice Hall, 1997, p. 986.

**Marbello, R.** *Vertedero y calibración de vertederos de medidas*. [En línea]. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín-Colombia, 2017, p. 5. [Consulta: 18 diciembre 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/12697/31/3353962.2005.Parte%206.pdf>

**McCabe, W; et al.** *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. 4ª ed. Madrid-España: McGraw-Hill, 1991. ISBN: 0-07-044828-0.

**Meléndez, C.** *Guía Práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos*. 2004, p. 3.

**Mendoza, A.** *La gestión sostenible de los residuos: II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Colombia: Uninorte Barranquilla, 2009, pp. 8-56.

**Meseth, E.** “Estudio de una planta de tratamiento de aguas residuales de Irlanda y su impacto en el medio ambiente”. *Redalyc* [En línea]. 2013, (Perú), 31(2), p. 141. ISSN: 1025-9929. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337430545007.pdf>

**Metcalf; & Eddy.** *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. 3ª ed. Madrid-España: Mc Graw Hill, 2005, pp. 33-102.

**NTE INEN 1108:2014.** Agua potable requisito

**NTE INEN: 2169:2013.** Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras.

**Ramalho, R.** *Tratamiento de las Aguas Residuales*. Barcelona-España: Reverté, 1990, p. 45.

**Romero, J. A.** *Tratamiento de Aguas Residuales*. Bogotá-Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999, p. 79.

**Ruiz Cortines, B. A.** *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Comisión Nacional del Agua. Tlalpan-México, 2016. ISBN: 978-607-626-016-6.

**Sancha Antuña, M.** *Caracterización físico - química y microbiológica de un proceso de tratamiento de lixiviados de vertedero*. (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad de Oviedo, España, 2013, p. 18.

**Skertchly Molina, L.** *Manual de diseño de estructuras de aforo*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Cuernavaca-México: Amado Nervo, 1988. ISBN 968-800-284-4

---

**Tchobanoglous, G; et al.** *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. México: Mc Graw Hill, 1998, p. 479.

**TULSMA.** *Anexo I del Libro VI: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*. Quito-Ecuador: s.n., 2016, pp. 80-99.



## ANEXOS

**ANEXO A.** TULSMA Libro VI, Anexo ,1 Tabla 9. Límites de descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	30,0
Alkil mercurio	-	mg/L	NO DETECTABLE
Aluminio	Al	mg/L	5,0
Arsénico Total	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	2,0
Boro Total	B	mg/L	2,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,02
Cianuro Total	CN <sup>-</sup>	mg/L	0,1
Cinc	Zn	mg/L	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/L	0,1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1,0
Cobalto	Co	mg/L	0,5
Coliformes Fecales	NMP	<i>NMP</i> /100 mL	2000
Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/L	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>6+</sup>	mg/L	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	200
Estaño	Sn	mg/L	5,0
Fluoruros	F	mg/L	5,0
Fósforo Total	P	mg/L	10,0
Hierro Total	Fe	mg/L	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/L	20,0
Manganeso Total	Mn	mg/L	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio Total	Hg	mg/L	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2,0

Nitrógeno amoniacal	N	mg/L	10,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/L	15
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/L	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/L	0,1
Plata	Ag	mg/L	0,1
Plomo	Pb	mg/L	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/L	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	130
Sólidos Totales	ST	mg/L	1600
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	1000
Sulfuros	S <sup>2-</sup>	mg/L	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ±3
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/L	1,0

**Fuente:** TULSMA, 2016.

**Anexo B:** Caracterización inicial física, química y microbiológica de los lixiviados.

**ESPOCH**

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA  
FACULTAD DE CIENCIAS

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200

Riobamba - Ecuador

**INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS**

Análisis solicitado por: Kerly Marilyn Cuenca Ulloa

Fecha de Análisis: 20/06/18

Tipo de muestras: Lixiviado, Relleno Sanitario Lago Agrio.

Localidad: Parroquia Nueva Loja - Cantón Lago Agrio - Provincia de Sucumbios.

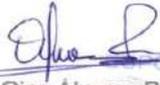
**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und.	4500-B	8.32
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	6.2
Temperatura	°C	2550-A	20.2
Turbiedad	NTU	2130-B	75.8
Color	Und Co/Pt	2120-C	2 320
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	29.5
Cinc	mg/L	3500-Zn-F	1.8
Cloruro	mg/L	4500-Cl - D	1 240.75
Cobre	mg/L	Hach-8506	1.3
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	580
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	1 740
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	58
Hierro Total	mg/L	3500-Fe-D	7.4
Manganeso Total	mg/L	Hach 8149	0.76
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	142
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	540
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	710
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	6 204
Sulfatos	mg/L	4500-SO <sub>4</sub> -E	150
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	3 000

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.

  
Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</p> <p>REALIZADO POR: CUENCA KERLY</p>	Resultados de la Caracterización física, química y microbiológica de los lixiviados.		
			ESCALA	FECHA	LÁMINA
	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> POR VERIFICAR		1:1	2019	2

**Anexo C:** Técnicas utilizadas para el análisis físico – químico y microbiológico del lixiviado.

PARÁMETROS	PROCEDIMIENTO
<p><i>Sólidos Suspendidos Totales</i></p>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test correspondiente a los sólidos suspendidos.</p> <p>Preparación de la muestra: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con muestra.</p> <p>Preparación del blanco: llenar otra cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con agua destilada.</p> <p>Limpiar el exterior de la cubeta (el blanco) y colocar el tubo en el soporte HACH DR 2800, cerrar la tapa protectora.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L TSS.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior del vial (la muestra) y colocar el tubo en el soporte HACH DR 2800, cerrar la tapa protectora.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L TSS.</p>
<p><i>Sólidos Totales</i></p>	<p>Pesar una caja Petri previamente tarada.</p> <p>Colocar 25 mL de muestra en la caja.</p> <p>Situar la caja en el equipo para secado a baño maría.</p> <p>Retirar del equipo una vez que se haya secado totalmente.</p> <p>Llevar a la estufa y dejar 1 hora.</p> <p>Colocar después en el desecador durante otra hora más.</p> <p>Finalizado el tiempo, pesar y registrar el peso.</p> <p>Realizar los cálculos correspondientes con ambos pesos y obtener el resultado.</p>
<p><i>Fósforo Total</i></p>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test 490 P react. PV.</p> <p>La muestra preparada: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con muestra. Añadir el contenido de un sobre de reactivo de PhosVer 3 en polvo y agitar con rotación.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con agua destilada.</p> <p>Limpiar el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L <math>PO_4^{3-}</math>.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L <math>PO_4^{3-}</math>.</p>

<p><i>Sulfatos</i></p>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test correspondiente a sulfatos</p> <p>La muestra preparada: Llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con muestra. Añadir el contenido de un sobre de reactivo SulfaVer en polvo y agitar con rotación.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con agua destilada.</p> <p>Limpiar el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L <math>SO_4^{2-}</math>.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L <math>SO_4^{2-}</math>.</p>
<p><i>Cloruros</i></p>	<p>Colocar 25 mL de muestra en un Erlenmeyer.</p> <p>Adicionar 4 gotas de Cromato de potasio <math>K_2CrO_4</math>.</p> <p>Titular con Nitrato de plata <math>AgNO_3</math> 0,1 N (Amarillo a Ladrillo).</p> <p>Realizar los cálculos correspondientes.</p>
<p><i>DQO</i></p>	<p>Añadir 2 mL de muestra en un vial con solución digestiva para DQO.</p> <p>Sujetar el vial por la tapa. Voltarlo varias veces para mezclar. El vial se calentará durante la mezcla.</p> <p>Calentar durante 2 h en el digestor y esperar que el vial se enfríe.</p> <p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test 435 DQO RA.</p> <p>Limpiar el exterior del vial y colocar el tubo en el soporte HACH DR 2800, cerrar la tapa protectora.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L DQO.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior del vial (la muestra) y colocar el tubo en el soporte HACH DR 2800, cerrar la tapa protectora.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> <li>• El resultado aparecerá en mg/L DQO.</li> </ul>
<p><i>DBO</i></p>	<p>Diluir 10 mL de la muestra con 100 mL de agua destilada en un balón aforado.</p> <p>Repetir este procedimiento una vez más para obtener 200 mL de muestra diluida.</p> <p>Colocar 150 mL de la dilución en la botella winkler y añadir una ampolla de nutrientes e introducir el agitador magnético.</p> <p>Colocar una escama de hidróxido de potasio en el tapón y sellar la botella con el mismo.</p> <p>Enroscar el cabezal de medición y encender.</p> <p>Colocar la botella en la incubadora de aire y esperar un periodo de 5 días.</p> <p>Transcurrido el tiempo indicado tomar la lectura de los datos obtenidos.</p>

<p><i>Cobre</i></p>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test correspondiente al cobre.</p> <p>La muestra preparada: llenar una celda de muestra de 10 mL con 10 mL de muestra. Añadir el contenido de un sobre de CuVer 1 en polvo, agitar la cubeta varias veces, con rotación, para mezclar.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción de 2 minutos.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con muestra.</p> <p>Limpiar el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L Cu.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> <li>• El resultado aparecerá en mg/L Cu.</li> </ul>
<p><i>Manganeso</i></p>	<p>Pulsar programas almacenados. Seleccionar el test.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con agua destilada.</p> <p>Añadir a cada cubeta el contenido de un sobre de ácido ascórbico en polvo. Tapar las cubetas e invertir con cuidado para disolver el polvo.</p> <p>Añadir 12 gotas de solución de reactivo de cianuro alcalino a cada cubeta. Agitar con cuidado para mezclar.</p> <p>Añadir 12 gotas de solución indicadora de PAN 0,1 % a cada cubeta, agitando para mezclar.</p> <p>Si hay manganeso presente, la muestra preparada producirá un color anaranjado.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción de 2 minutos.</p> <p>Limpiar el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L Mn.</li> </ul> <p>Limpiar el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L Mn.</p>

<i>Hierro</i>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test: 265 Hierro FerroVer</p> <p>La muestra preparada: Llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con muestra. Añadir el contenido de un sobre de reactivo de Hierro FerroVer en polvo y agitar con rotación.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con agua destilada.</p> <p>Limpia el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L Fe.</li> </ul> <p>Limpia el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L Fe.</p>
<i>Zinc</i>	<p>Pulsar programas almacenados. Seleccionar el test.</p> <p>Llenar un tubo mezclador graduado de 25 mL hasta la marca de 20 mL con muestra. Añadir el contenido de un sobre de ZincoVer 5 en polvo. Tapar el tubo. Invertir varias veces para disolver el polvo.</p> <p>Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con mezcla del tubo mezclador.</p> <p>La muestra preparada: con el cuentagotas calibrado añadir 0,5 mL de ciclohexanona a la mezcla que quede en el tubo mezclador.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción de 30 segundos. Durante el tiempo de reacción, tapar el tubo e invertir vigorosamente (muestra preparada). La muestra será de color rojo anaranjado, marrón o azul, dependiendo de la concentración de zinc.</p> <p>Seleccionar en la pantalla el símbolo del temporizador y pulsar ok. Comienza un periodo de reacción de 3 minutos</p> <p>Llenar otra cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca 10 mL con la muestra preparada del tubo mezclador.</p> <p>Limpia el exterior de la cubeta y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Cero.</li> <li>• La pantalla indicará 0 mg/L Zn.</li> </ul> <p>Limpia el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar la pantalla: Medición.</li> </ul> <p>El resultado aparecerá en mg/L Zn.</p>
<i>Nitrógeno Total</i>	<p>Encienda el digestor a temperatura entre 103 – 106 °C.</p> <p>Agregue el contenido del reactivo nitrógeno persulfato en cada uno de los 2 tubos de Nitrógeno total HR hidróxido para la digestión. Observe que reaccione y que el reactivo no quede en las</p>

	<p>paredes.</p> <p>Adicione 0,5 mL de la muestra a un vial y 0,5 mL de agua destilada en el otro vial (este será el blanco). Coloque los viales en el reactor, caliente por 30 minutos.</p> <p>Remueva inmediatamente los viales del calor y deje que estos se enfríen a temperatura ambiente.</p> <p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados y seleccione 395 N, total HR TNT.</p> <p>Destape los viales de la digestión y agregue el contenido del reactivo A de Nitrógeno total (TN) en cada vial.</p> <p>Cierre los tubos e inviértalos por 15 segundos.</p> <p>Programa el reloj para un periodo de reacción de 3 minutos.</p> <p>Quite las tapas y adicione el reactivo B de Nitrógeno total (TN). Cierre los tubos e inviértalos por 15 segundos. Programa el reloj para un período de reacción de 2 minutos.</p> <p>Quite las tapas y tome 2 viales de TN Reagent C y adicione 2 mL de la muestra digerida, a cada vial. Adicione 2 mL del digerido al reactivo tratado como blanco a un segundo vial TN Reagent C.</p> <p>Cierre los viales e invierta 10 veces y mezcle. Los tubos deben estar calientes al tacto.</p> <p>Programa el reloj para un período de reacción de 5 minutos un color amarillo puede interferir.</p> <p>Lleve el blanco al espectrofotómetro y presione cero (0 mg/L N).</p> <p>Limpie los viales y proceda a leer los resultados, estos aparecerán como mg/L N.</p>
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	<p>Seleccionar en la pantalla: Programas almacenados.</p> <p>Seleccionar el test correspondiente al nitrógeno amoniacal.</p> <p>Llenar una probeta para mezclar 25 mL (muestra preparada) hasta la marca de 25 mL con la muestra y llenar otra probeta para mezclar 25 mL (el blanco) con agua desionizada</p> <p>Agregar 3 gotas de estabilizador mineral a cada cilindro. Invertir varias veces para mezclar.</p> <p>Agregar 3 gotas del agente de dispersión de alcohol polivinílico a cada cilindro. Invertir varias veces para mezclar.</p> <p>Colocar con pipeta 1,0 mL del reactivo Nessler en cada cilindro. Tapar. Invertir varias veces para mezclar.</p> <p>Colocar el blanco en el soporte de la celda. Cerrar el escudo para la luz.</p> <p>Colocar la muestra preparada en el soporte de la muestra. Cerrar el escudo para la luz.</p> <p>Luego se verá el resultado en mg/L de amoníaco expresado como nitrógeno (NH<sub>3</sub>-N).</p> <p>El resultado aparecerá en mg/L (NH<sub>3</sub>-N).</p>
<i>Aceites y grasas</i>	<p>Pesar una caja petri previamente tarada.</p> <p>Añadir 100 mL de muestra en un embudo de separación de 500 mL y añadir 30 mL del disolvente de extracción (Hexano).</p> <p>Agitar 2 minutos. Dejar que las capas se separen y eliminar el disolvente de la parte inferior de la muestra.</p> <p>Repetir el procedimiento dos veces más, colando 30 mL de hexano en el disolvente extraído.</p> <p>Transferir al disolvente total obtenido a la caja Petri y situar la caja en el equipo para secado a baño maría.</p> <p>Retirar del equipo una vez que se haya secado totalmente.</p> <p>Llevar a la estufa y dejar 1 hora.</p> <p>Colocar después en el desecador durante otra hora más.</p> <p>Finalizado el tiempo, pesar y registrar el peso 2.</p> <p>Realizar los cálculos respectivos y registrar el resultado.</p>

<i>Coliformes fecales</i>	<p>Preparar 3 viales con 10 mL de agua destilada, tapar y llevar al equipo autoclave para esterilizar, durante 30 minutos.</p> <p>Limpia la superficie de trabajo con un algodón empapado de alcohol.</p> <p>Colocar la placa Petrifilm en la superficie limpia.</p> <p>Abrir el frasco de la muestra, y con una pipeta coger 1 mL para agregar al primer vial, homogenizar. Del primer vial coger con otra pipeta 1 mL de la dilución y colocar en un segundo vial y repetir el mismo procedimiento 2 veces más.</p> <p>Del último vial añadir 1 mL de dilución a la placa Petrifilm, distribuyendo cuidadosamente sobre el círculo.</p> <p>Rotular la placa y llevar a la incubadora a 35 °C.</p> <p>Dejar un tiempo de incubación de 48 horas.</p> <p>Contar el número de colonias y realizar los cálculos correspondientes.</p>
---------------------------	---

**Fuente:** APHA, 1992.

Anexo D: Tratamiento de Aireación.

**ESPOCH**

**LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200

Riobamba - Ecuador

**INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS**

Análisis solicitado por: Kerly Marilyn Cuenca Ulloa

Fecha de Análisis: 23/10/18

Tipo de muestras: Lixiviado. Relleno Sanitario Lago Agrio.

Localidad: Parroquia Nueva Loja - Cantón Lago Agrio - Provincia de Sucumbíos.

**Análisis Químico (Tratamiento con aireación)**

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und.	4500-B	6.10
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	6.02
Temperatura	°C	2550-A	20.2
Turbiedad	NTU	2130-B	13
Color	Und Co/Pt	2120-C	354
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	31
Cloruro	mg/L	4500-Cl - D	602.65
Cobre	mg/L	Hach-8506	0.2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	400
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	1 250
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	13.5
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	207
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	370
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	510
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	3 512
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	3 000

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	Resultados del Tratamiento de Aireación de los lixiviados.		
			ESCALA	FECHA	LÁMINA
	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> POR VERIFICAR	<b>REALIZADO POR:</b> CUENCA KERLY	1:1	2019	3

Anexo E: Tratamiento Físico – Químico.

**ESPOCH**

**LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200

Riobamba - Ecuador

**INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS**

Análisis solicitado por: Kerly Marilyn Cuenca Ulloa

Fecha de Análisis: 24/10/18

Tipo de muestras: Lixiviado. Relleno Sanitario Lago Agrío.

Localidad: Parroquia Nueva Loja - Cantón Lago Agrío - Provincia de Sucumbios.

**Análisis Químico (Tratamiento físico-químico)**

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und.	4500-B	6.56
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	5.5
Temperatura	°C	2550-A	20.3
Turbiedad	NTU	2130-B	14.4
Color	Und Co/Pt	2120-C	347
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	29
Cloruro	mg/L	4500-Cl - D	439.58
Cobre	mg/L	Hach-8506	0.1
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	190
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	470
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	1
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	178
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	239
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	20
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	2 524
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	2 800

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.

Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	<p><b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b></p> <p><b>REALIZADO POR: CUENCA KERLY</b></p>	Resultados del Tratamiento físico – químico de los lixiviados.		
	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> POR VERIFICAR		ESCALA	FECHA	LÁMINA
			1:1	2019	4

Anexo F: Tratamiento Biológico.

**ESPOCH**

**LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200

Riobamba - Ecuador

**INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS**

Análisis solicitado por: Kerly Marilyn Cuenca Ulloa

Fecha de Análisis: 05/12/18

Tipo de muestras: Lixiviado. Relleno Sanitario Lago Agrio.

Localidad: Parroquia Nueva Loja - Cantón Lago Agrio - Provincia de Sucumbios.

**Análisis Químico (Tratamiento con microorganismos)**

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und.	4500-B	8.68
Conductividad	mSiems/cm	2510-B	2.75
Temperatura	°C	2550-A	21.3
Turbiedad	NTU	2130-B	5.6
Color	Und Co/Pt	2120-C	232
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	26.5
Cloruro	mg/L	4500-Cl - D	80.8
Cobre	mg/L	Hach-8506	0.23
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	97
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	198
Fósforo Total	mg/L	4500-P-D	0.07
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4500-NH <sub>3</sub> -C	28
Nitrógeno Total	mg/L	4500-Norg-C	35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2540-D	8
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	1 196
Coliformes Fecales	UFC/100 mL	microfiltración	1 000

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

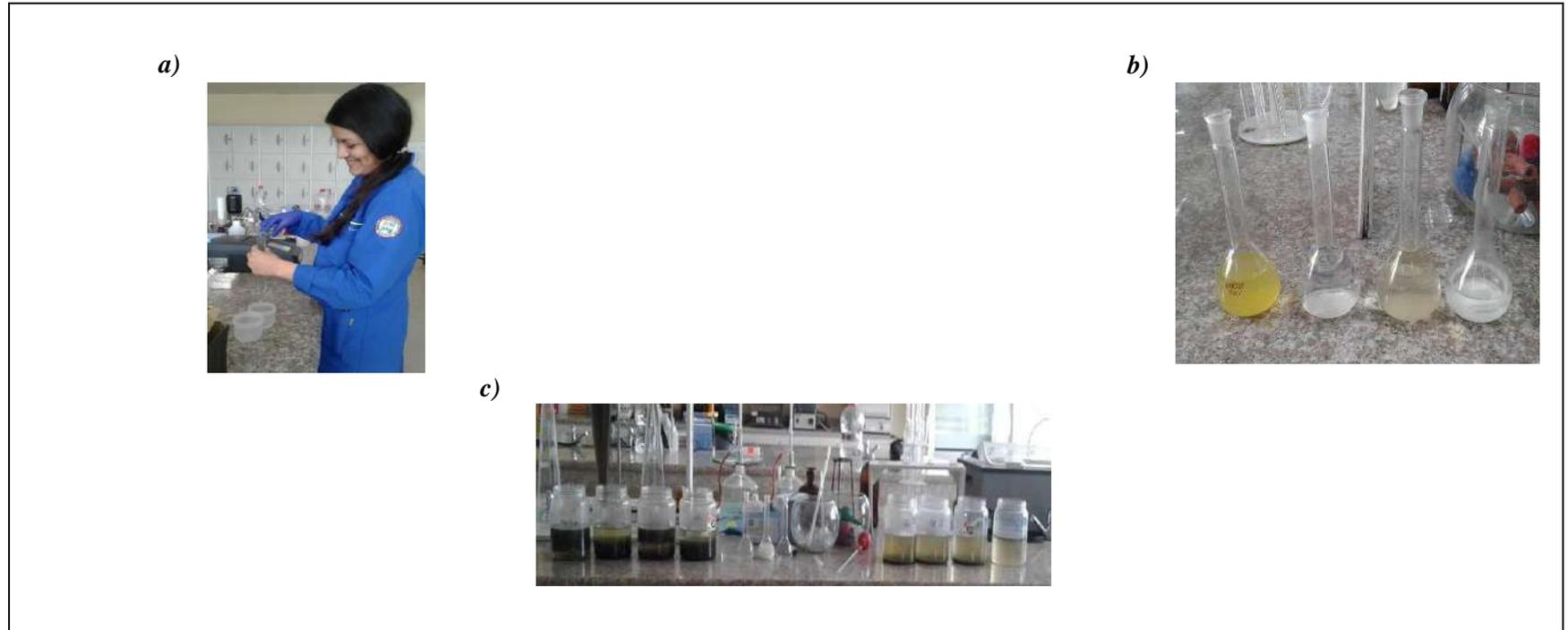
Observaciones:

Atentamente.

  
Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b>  <b>REALIZADO POR: CUENCA KERLY</b>	<i>Resultados del Tratamiento</i>		
	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> POR VERIFICAR		ESCALA	FECHA	LÁMINA
			1:1	2019	5

**Anexo G:** Recopilación fotográfica del procedimiento experimental para el tratamiento de lixiviados.



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b>	<i>“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS RECOLECTADOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LAGO AGRIO, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”</i>				
a) Caracterización inicial física, química y microbiológica.			<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por Eliminar	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>	<b>Lámina</b>
b) Preparación de las diferentes concentraciones de coagulante.			<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Por Aprobar	1:1	2019	6
c) Prueba de jarras para el tratamiento de los lixiviados.	<input type="checkbox"/> Por Calificar	<input type="checkbox"/> Para Información	<b>REALIZADO POR: CUENCA KERLY</b>				

d)



e)



f)

f)



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b>  <b>REALIZADO POR:</b> CUENCA KERLY	<i>“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS RECOLECTADOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LAGO AGRIO, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”</i>		
d) Adición de microorganismos eficientes.	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por Calificar <input type="checkbox"/> Para Información		<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>	<b>Lámina</b>
e) Caracterización final. f) Lixiviado tratado.			1:1	2019	7

**Anexo H:** Planos del Diseño del Sistema de Tratamiento para Lixiviados recolectados en el Relleno Sanitario.