



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de
disposición final de San Jerónimo de Porlón**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autor:

Gálvez Morocho Jorge David

Tutor:

Ing. María Fernanda Rivera MSc.

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Gálvez Morocho Jorge David, con cédula de ciudadanía 0605449891, autor del trabajo de investigación titulado: Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 02 de junio del 2026

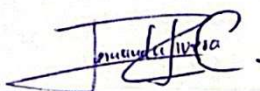


Jorge David Gálvez Morocho
C.I: 0605449891

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. María Fernanda Rivera Castillo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón, bajo la autoría de Gálvez Morocho Jorge David por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 02 días del mes de junio del 206



Ing. María Fernanda Rivera C.

C.I: 0603452947

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

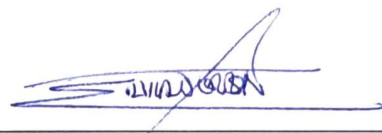
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón, presentado por Gálvez Morocho Jorge David, con cédula de identidad número 0605449891, bajo la tutoría de Mg. María Fernanda Rivera Castillo; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, 02 de junio del 2026

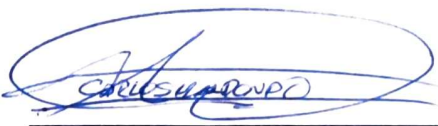
Marcel Paredes, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Silvia Torres, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Carlos Maldonado, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, el Sr. **Galvez Morocho Jorge David** con CC: **0605449891**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón**", cumple con el 9 % en cuanto a similitud y el 9 % en cuanto a detección de IA, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **OURIGINAL**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Ing. María Fernanda Rivera,Mgs.
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación con todo mi corazón a mi madre, quien con su amor incondicional, esfuerzo y sabios consejos han sido el pilar fundamental de mi vida y el motor detrás de cada uno de mis pasos. A mi padre quien me ha enseñado a luchar y ser fuerte por lo que quiero, A mi hermana, por su apoyo constante, su alegría y por esa compañía en este camino. Asimismo, expreso mi más profundo agradecimiento a cada una de las personas que, de una u otra manera, formaron parte de esta etapa; a aquellos que compartieron su conocimiento, me brindaron su mano en los momentos de cansancio y sumaron fuerzas para que este sueño hoy sea una realidad. A todos ellos, gracias por creer en mí.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), por haberme brindado el espacio y los recursos necesarios para mi formación profesional. Me llevo conmigo no solo los conocimientos académicos, sino también el orgullo de haber pertenecido a esta institución.

A mi tutora de tesis, MgSc. Fernanda Rivera por su paciencia, su guía estratégica y por compartir su conocimiento conmigo. Sus correcciones y exigencias fueron fundamentales para elevar la calidad de este trabajo y para mi crecimiento como investigador.

Un agradecimiento especial a mi tutora de prácticas, Ing. Blanquita Mosquera quien estuvo a cargo de la gestión del relleno sanitario. Gracias por abrirme las puertas de su área de trabajo, por su confianza y por permitirme aplicar la teoría en un entorno real. Su experiencia y disposición para enseñarme el manejo operativo fueron la base práctica de este proyecto.

A mis amigos cercanos, los que estuvieron en las jornadas de estudio y en los momentos de distracción. Gracias por escucharme, por los ánimos en los días de estrés y por hacer que el camino universitario fuera mucho más ligero y memorable.

ÍNDICE GENERAL.

DECLARATORIA DE AUTORÍA.....	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR.....	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL;.....	
ÍNDICE DE TABLAS.....	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I.	10
1. INTRODUCCION.....	10
1.1. Problema de investigación	11
1.1. Justificación.....	12
1.2. Objetivos	13
CAPÍTULO II.....	14
2. MARCO TEÓRICO.	14
2.1. Residuo	14
2.2. Residuo urbano	14
2.3. Residuos no peligrosos	14
2.4. Celda emergente	14
2.5. Relleno sanitario	14
2.6. Lixiviados	14
2.7. Composición típica de los lixiviados	15
2.8. Tratamiento de lixiviados	15
2.10. Tratamiento biológico	15
2.11. Tratamiento físico-químico	15
2.12. Bioaumentación con Micro pan en sistemas de lagunas	16
2.12.1. Normativa y Aplicación.....	16
2.13. Proceso de Flotación por Aire Disuelto (DAF) con PAC/PAM	16

2.14. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSS-H)	17
CAPÍTULO III.	18
3. METODOLOGIA.	18
3.1. Tipo de Investigación.....	18
3.2. Diseño de Investigación.....	18
3.3. Técnicas de recolección de Datos,	18
3.4. Población de estudio y tamaño de muestra.	19
3.4.1. Población de estudio	19
3.5. Métodos de análisis, y procesamiento de datos.	19
3.5.1. Reconocimiento del área de estudio	19
3.5.2. Visitas al sitio de estudio	19
3.5.3. Medición de caudales	19
3.5.4. Análisis de las propiedades físico-químicas y biológicas que presentan los lixiviados	20
3.6. Seleccionar un rediseño operativo eficiente en el cual se aprovechan las unidades disponibles	21
3.6.1. Lagunas aireadas.....	21
3.6.2. DAF	23
3.6.3. Humedales artificiales	23
3.7. Eficiencia de remoción de DQO de cada tratamiento utilizado.....	23
3.8. Recirculación a la celda emergente.....	24
3.9. Comparativa con la normativa ambiental de Colombia.....	24
CAPÍTULO IV.	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1. Análisis del estado actual de la planta.....	26
4.1.2. Caudal.....	26
4.1.3. Procesos unitarios	29
4.1.4. Propiedades físico-químicas del lixiviado	31
4.2. Rediseño operativo	33
4.2.1. Primera laguna de tratamiento biológico.....	34
4.2.2. Compuerta	36
4.2.3. Segunda laguna de tratamiento biológico.....	36
4.2.4. DAF	37
4.2.5. Humedal artificial	38
4.3. Proceso de recirculación	39

4.4. Cumplimiento con la resolución 631 de descarga de agua para mantenimiento de un relleno sanitario.....	40
CAPÍTULO V.	42
5.1. CONCLUSIONES	42
5.2. Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	47
1.1. Anexo 1. Tabla de propiedades físico químicas del lixiviado realizadas por el municipio de Riobamba para control de la planta.	47
1.2. Anexo 2. Información del sustrato utilizado para el tratamiento de lixiviados	47
1.3. Anexo 3. Drenado de lagunas para su limpieza con el fin de aplicar posteriormente el plan.....	48
1.4. Anexo 4. Medicion de parámetros básicos del lixiviado	48
1.5. Anexo 5. Prueba de coagulación utilizando sulfato de aluminio (reactivo que se utiliza en el DAF)	49
1.6. Anexo 6. Medicion de DQO luego de aplicar el coagulante y decantación de sedimentos, efecto para tomar en cuenta los coeficientes utilizados.	49

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Parámetros del lixiviado	20
Tabla 2. Dosificación de micro pan por caudal	21
Tabla 3. Caudal promedio mensual de entrada de lixiviados	27
Tabla 4. Operaciones unitarias de la planta de tratamiento	29
Tabla 5. Comparativa de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas en las diferentes etapas	32

ÍNDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1. Mapa de ubicación de la planta de tratamiento de lixiviados	26
Ilustración 2. Planos de la planta de tratamiento de lixiviados actual	30
Ilustración 3. Primer laguna de tratamiento biológico	34
Ilustración 4. Segunda laguna de tratamiento biológico	36
Ilustración 5. Sistema DAF	37
Ilustración 6. Humedal Artificial	38
Ilustración 7. Proceso de recirculación	39

RESUMEN

La presente investigación se centró en la optimización y el rediseño operativo de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final San Jerónimo de Porlón, en el cantón Riobamba, debido a que el sistema preexistente presentaba eficiencias de remoción críticas e incumpliendo con la normativa ambiental vigente. El estudio se estructuró bajo un enfoque cuantitativo y de ingeniería de procesos, iniciando con un diagnóstico técnico que identificó una carga orgánica crítica de entrada de 19557,00 mg/L de DQO. La propuesta de rediseño integró un tren de tratamiento híbrido compuesto por lagunas biológicas aireadas con bioaumentación (Micro pan), un sistema de flotación por aire disuelto (DAF) y humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

Los resultados obtenidos mediante modelos cinéticos de primer orden y balances de masas demostraron que, al implementar una unidad de partición de caudales para recircular el 25% del flujo hacia la celda emergente y dirigir el 75% ($10,46 \frac{m^3}{dia}$) al tren superior, se maximizaron los tiempos de retención hidráulica. La etapa biológica alcanzó una remoción del 71,55%, mientras que el sistema DAF, optimizado con Policloruro de Aluminio (PAC) y Poliacrilamida (PAM), estabilizó la fracción coloidal y de grasas. Finalmente, el humedal de pulimento con una profundidad de 1,628 m permitió entregar un efluente con 1043,07 mg/L de DQO, alcanzando una eficiencia global del sistema del 94,67%. Se concluye que el diseño propuesto es técnicamente viable para la descarga controlada en riego de áreas verdes del relleno, garantizando la sostenibilidad operativa y la mitigación de impactos ambientales en el entorno.

Palabras clave: Lixiviados, Bioaumentación, DAF, Humedales Artificiales, DQO, Rediseño, San Jerónimo de Porlón.

ABSTRACT

The present research focused on the optimization and redesign of the leachate treatment plant at the San Jerónimo de Porlón final disposal site, located in Riobamba. The study was driven by the pre-existing system's removal efficiencies below 40%, which failed to comply with current environmental regulations. The research was structured using a quantitative and process-engineering approach, beginning with a technical diagnosis that identified a critical influent organic load of 19557.00 mg/L of COD (Chemical Oxygen Demand). The proposed redesign integrated a hybrid treatment train consisting of aerated biological lagoons with bioaugmentation (Micropan), a Dissolved Air Flotation (DAF) system, and horizontal subsurface flow constructed wetlands.

The results, obtained through first-order kinetic models and mass balances, demonstrated that by implementing a flow partition unit to recirculate 25% of the flow to the emerging

landfill cell and directing 75% ($10,46 \frac{m^3}{day}$) to the upper treatment train, hydraulic retention times were maximized. The biological stage achieved a removal efficiency of 71.55%, while the DAF system, optimized with Polyaluminum Chloride (PAC) and Polyacrylamide (PAM), stabilized the colloidal and grease fractions. Finally, the polishing wetland, with a depth of 1.628 m, allowed the discharge of effluent with 1043.07 mg/L of COD, achieving an overall system efficiency of 94.67%. It is concluded that the proposed design is technically feasible for controlled discharge during the irrigation of the landfill's green areas, ensuring operational sustainability and mitigating environmental impacts on the surroundings.

Keywords: Leachate, Bioaugmentation, DAF, Constructed Wetlands, COD, Redesign, San Jerónimo de Porlón.



Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León

ENGLISH PROFESSOR

C.I.0601975980

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCION.

Uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad moderna y futura son los residuos sólidos, que son resultado de los avances consumistas y técnicos que han provocado un desequilibrio entre la actividad humana y la biosfera del planeta. El volumen de residuos sólidos ha alcanzado niveles inmanejables, para lo cual esto constituye una causa importante del deterioro ambiental, además de generar altos costos operativos (Morales León, 2019). Riobamba actualmente cuenta con una celda emergente, donde se realiza la disposición final de los residuos sólidos generados en el Cantón Riobamba a través de un manejo técnico, control de lixiviados, venteo de metano y proceso de compostaje, evitando la contaminación a los recursos naturales, tales como: agua, suelo y aire, cuyo inicio de operaciones empieza el 16 de septiembre del 2016.

Aproximadamente 225 Tn día de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) ingresan a la celda emergente de la recolección en las 5 parroquias urbanas y 11 parroquias rurales, a más de ello mediante el convenio Nro. 042-2021 se realiza la disposición final de los RSU de los cantones de Chambo y Penipe en un valor aproximado de 15 Tn/día (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2024).

En la actualidad, la gestión y disposición final de los residuos sólidos y los lixiviados está a cargo de la Dirección de Gestión Salubridad e Higiene del GAD Municipal de Riobamba, en el que, el tratamiento dado radica únicamente en la adición de microorganismos en una piscina aeróbica, y de la utilización de humedales artificiales que hasta la fecha no funcionan de una manera óptima (Amaguaya, 2019).

La zona en la que se encuentra ubicado el sistema de tratamientos, está ocupada en su mayoría, por la actual infraestructura que consta de un tanque de recepción, un vertedero triangular, dos desarenadores, un tanque aeróbico, tres humedales artificiales y un tanque de recepción final, distribuido en dos plantas ubicadas de forma paralela a la celda emergente y separadas por un talud con una pendiente de 120° y una altura de 15 m (CONSULTORACAV CÍA. LTDA, 2014).

El manejo de los lixiviados en los sitios de disposición final representa uno de los desafíos ambientales más críticos para los gobiernos locales, debido a la alta carga orgánica, metales pesados y compuestos tóxicos persistentes que estos líquidos poseen. Cuando un sistema de tratamiento, como las piscinas aeróbicas o los humedales artificiales convencionales, pierde eficiencia o satura su capacidad operativa, se incrementa exponencialmente el riesgo de infiltración hacia los acuíferos subterráneos y la escorrentía hacia cuerpos de agua superficiales adyacentes (Tchobanoglous et al., 2003). Esta problemática se intensifica en regiones andinas donde las variaciones climáticas y las tasas

de precipitación alteran constantemente el caudal y la composición química del lixiviado, demandando sistemas de depuración altamente adaptables.

Por lo tanto, la optimización y el rediseño de las Plantas de Tratamiento de Lixiviados (PTL) mediante tecnologías complementarias o procesos avanzados de oxidación y filtración se vuelven indispensables para garantizar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015). La transición hacia configuraciones técnicas más eficientes no solo mitiga el impacto ambiental latente en el suelo y los recursos hídricos en las inmediaciones del sitio de disposición final San Jerónimo de Porlón, sino que además promueve un modelo de gestión pública sostenible alineado con el desarrollo técnico de la ingeniería ambiental contemporánea.

Frente a este escenario, la presente investigación tiene como objetivo proponer un rediseño técnico y funcional de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón. Esta propuesta se sustenta en la caracterización detallada del lixiviado, el diagnóstico del sistema actual y la evaluación comparativa de tecnologías de tratamiento, considerando criterios de eficiencia, sostenibilidad y factibilidad operativa.

1.1. Problema de investigación

El sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón ubicado en el cantón de Riobamba enfrenta un desafío crítico en cuanto a la disposición de sus desechos y lo que conllevan estos debido al gran volumen de residuos que reciben por día el cual es un aproximado de 225 Tn/día de residuos urbanos, al ser una celda que no cuenta con un techado por ende la superficie queda totalmente descubierta en consecuencia la precipitación se infiltra en la masa de desechos lo que provoca una aceleración de la descomposición de la materia orgánica que resulta la generación de lixiviados en grandes caudales.

A pesar de que el relleno cuenta con una Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL), en la actualidad esta infraestructura no se encuentra operando de manera total, eficiente ni correcta. Las deficiencias mecánicas y operativas de la planta impiden alcanzar los límites permisibles de descarga exigidos por la legislación ambiental. Ante la incapacidad técnica de tratar el caudal generado, la medida implementada ha consistido en la recirculación continua del lixiviado crudo de retorno hacia la celda de disposición final. Esta práctica de recirculación, si bien es usada para acelerar la estabilización de los residuos, cuando se realiza de manera descontrolada y sin un soporte técnico adecuado, satura la capacidad de campo de la celda, reduciendo drásticamente la resistencia al corte de los desechos y elevando la presión de poros, lo que incrementa el riesgo de fallas estructurales y deslizamientos en el frente de vertido (Renou et al., 2008).

Esta acumulación excesiva ha rebasado la capacidad de almacenamiento interno, provocando desbordamientos visibles en los diferentes canales, cunetas y conductos periféricos diseñados originalmente para el transporte controlado de los fluidos. Al perderse el control hidráulico del sistema, el lixiviado caracterizado por presentar valores críticos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), metales pesados y una alta conductividad eléctrica entra en contacto directo con los suelos circundantes, generando procesos severos de degradación edáfica, pérdida de la microfauna nativa y salinización de los terrenos agrícolas adyacentes.

El riesgo ambiental más alarmante radica en la dinámica de transporte de estos contaminantes a través del perfil del suelo. La infiltración vertical del lixiviado sin tratar amenaza directamente los acuíferos subsuperficiales, mientras que el flujo de escorrentía superficial avanza pendiente abajo debido a la topografía del sector. Esta trayectoria hidrogeológica tiene como destino final los cuerpos de agua lóticos cercanos, de manera específica el río Chambo. La descarga de lixiviados crudos en sistemas fluviales altera drásticamente los parámetros fisicoquímicos del agua, induciendo procesos de eutrofización severa y acumulando metales pesados en la biota acuática, lo que restringe el uso seguro del recurso para el consumo humano indirecto y la soberanía alimentaria de las poblaciones ribereñas (Bhalla et al., 2011). De esta manera la descarga difusa e incontrolada de este efluente altamente tóxico en el río Chambo pone en peligro el equilibrio ecosistémico del recurso hídrico, afectando la calidad del agua utilizada para el consumo humano indirecto y las actividades de riego de las comunidades vulnerables que dependen de esta cuenca.

1.2. Justificación

El impacto ambiental derivado del manejo inadecuado de los lixiviados en el sitio de San Jerónimo de Porlón afecta de manera crítica los componentes agua, suelo y aire, debido a su alta carga orgánica, persistencia de metales pesados y variaciones extremas de pH. La descarga o filtración de estos fluidos en el entorno no solo altera la estructura porosa del suelo, sino que facilita la bioacumulación de elementos tóxicos en la microfauna, generando una degradación edáfica que puede tardar décadas en revertirse (Al-Ya interior & Abu Amr, 2018). Dado que el proceso de tratamiento actual es técnicamente ineficiente e insuficiente, se vuelve necesario desarrollar e implementar soluciones. Esta investigación se justifica desde una perspectiva técnica y científica, al aplicar principios de ingeniería ambiental enfocados en la optimización y rediseño operativo aplicables a la planta existente, con el objetivo de garantizar la remoción efectiva de los contaminantes prioritarios.

Desde el punto de vista legal y normativo, el desarrollo de esta propuesta metodológica provee las herramientas técnicas necesarias para que el sitio de disposición final cumpla de forma estricta con los parámetros establecidos. El cumplimiento de los límites permisibles de descarga no es solo una exigencia administrativa, sino una salvaguarda ecológica indispensable, ya que la brecha entre la normativa vigente y la eficiencia real de las plantas municipales suele ser el principal vector de contaminación hídrica en la región (Kjeldsen et

al., 2002). De este modo, la investigación contribuye directamente a mitigar el riesgo de sanciones legales, clausuras ambientales y, fundamentalmente, previene la degradación irreversible de la cuenca del río Chambo. Finalmente, el beneficio socioambiental se traduce en la protección de la salud pública de las poblaciones aledañas, asegurando un entorno ecológicamente equilibrado y sirviendo como un modelo de gestión técnica replicable para otros cantones del país con problemáticas similares.

Desde una perspectiva estrictamente metodológica e ingenieril, la optimización y rediseño de la planta de tratamiento responde a una necesidad inmediata. Al evaluar y reconfigurar variables operativas críticas como los tiempos de retención hidráulica, tasas de aireación y la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno amoniacal, esta investigación aporta un precedente técnico valioso sobre el comportamiento de sistemas de depuración biológica y físico-química en altitudes elevadas (Metcalf & Eddy, 2014). De esta manera, el proyecto se justifica al transformar datos experimentales en soluciones de ingeniería aplicada a gran escala.

La descarga potencial de lixiviados sin el debido tratamiento en las inmediaciones de San Jerónimo de Porlón generaría pasivos ambientales cuyos costos de remediación a largo plazo superarían con creces la inversión requerida para el rediseño propuesto (Samaniego & Vargas, 2021). Al salvaguardar la calidad del agua superficial y subterránea, se protege directamente la economía de subsistencia de las comunidades agrícolas de la cuenca del río Chambo, disminuyendo los vectores de enfermedades de origen hídrico y consolidando un modelo donde la viabilidad técnica de la ingeniería ambiental se alinea directamente con la justicia social y el desarrollo territorial sostenible.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Rediseño operativo de la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final de San Jerónimo de Porlón, con el fin de mejorar su eficiencia.

1.3.2. Específicos

- Analizar el estado actual de la planta de tratamiento de lixiviados, identificando sus principales deficiencias técnicas, operativas y estructurales.
- Seleccionar y redimensionar el sistema operativo de tratamiento de los lixiviados
- Evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento propuesto según el porcentaje de remoción de contaminantes bibliográficamente.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Residuo

La Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) define los residuos como materiales generados durante los procesos de producción y consumo que carecen de valor económico en el contexto de su creación. Esto podría deberse a la falta de mercado para sus productos recuperados o a la falta de la tecnología adecuada para su aplicación (Tchobanogluos, 1994).

2.2. Residuo urbano

Se definen como los residuos generados por cualquier actividad de la población, estos abarcan los residuos domésticos, comerciales, de demolición, barrido de las calles, limpieza de parques, jardines, hospitalarios, sanatorios y laboratorios de análisis, investigación o patógenos, institucionales, industriales (Ministerio del Ambiente, 2015).

2.3. Residuos no peligrosos

Según (Mora & Molina, 2017), los residuos no peligrosos, son aquellos producidos por el uso o consumo en actividades residenciales, comerciales, industriales, institucionales o de servicios, que es inutilizable para el productor pero que puede convertirse en productos con valor agregado para prolongar su vida útil.

2.4. Celda emergente

Es una celda técnicamente diseñada, donde se depositan temporalmente los desechos o residuos sólidos no peligrosos, los mismos que deberán tener una compactación y cobertura diaria con material adecuado, poseer los sistemas de evacuación del biogás, recolección de lixiviados, recolección de aguas de escorrentía; hasta la habilitación del sitio de disposición final, técnica y ambientalmente regularizado (Ministerio del Ambiente, 2015).

2.5. Relleno sanitario

Es un método de ingeniería para contener eficazmente residuos sólidos, lo cual consiste en disponer en celdas adecuadas para este uso y en el menor espacio posible, sin poner en peligro el medio ambiente, en particular contaminando el suelo, el agua o la atmósfera, ni suponer un riesgo para la salud y la seguridad públicas (Vargas et al., 2020).

2.6. Lixiviados

Los lixiviados son líquidos oscuros y malolientes, generados por la descomposición de residuos sólidos y la infiltración de agua a través de un relleno sanitario. Contienen altas concentraciones de sales inorgánicas como nitrógeno amónico, carbonato y sulfato; iones

metálicos como cromo, plomo y cobre; y una variedad de materiales orgánicos refractarios como compuestos aromáticos y humus (Bastos, 2024). Los lixiviados pueden contaminar aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos, por esta razón los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan y sus lixiviados recogidos se tratan empleando la combinación de varios métodos (Guevara et al., 2014)

2.7. Composición típica de los lixiviados

Su composición varía según la edad del relleno sanitario, el tipo de residuos, las condiciones climáticas y el grado de compactación de los desechos. Entre los principales parámetros a considerar están: pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal y metales como cadmio, plomo y zinc (Nawaz et al., 2020).

2.8. Tratamiento de lixiviados

Aunque los lixiviados no pueden eliminarse por completo, una gestión adecuada puede reducir su cantidad y calidad. Por ello, el tratamiento y la disposición de estos lixiviados suponen uno de los mayores costes operativos en los rellenos sanitarios, debido a su alto contenido de materia orgánica y nitrógeno amoniacal. Para mejorar las técnicas de eliminación, se ha añadido un pretratamiento físico-químico, seguido de procesos bioquímicos aeróbicos y anaeróbicos, y finalmente, métodos físicos y químicos adicionales para el tratamiento final exhaustivo (Martinez-Lopez et al., 2014).

2.9. Sistemas de tratamiento de lixiviados

El tratamiento de lixiviados es complejo debido a la gran cantidad de sustancias químicas diferentes que contiene y a su constante evolución. Los tres tipos principales de tecnologías disponibles actualmente son físicas, químicas y biológicas.

2.10. Tratamiento biológico

Debido a sus bajos costos operativos y a su capacidad para eliminar nitrógeno y residuos orgánicos, los tratamientos biológicos, como los sistemas de lodos activados, los reactores biológicos secuenciales (SBR) y los humedales artificiales, se emplean con frecuencia. Sin embargo, cuando el lixiviado se estabiliza y presenta baja biodegradabilidad, su eficacia disminuye (Remmas et al., 2023).

2.11. Tratamiento físico-químico

La mejor manera de eliminar los productos químicos recalcitrantes y los metales pesados es mediante tratamientos fisicoquímicos, como la adsorción con carbón activado, la oxidación avanzada (AOPs) y la coagulación-floculación. Se recomienda combinar estos procedimientos para aumentar la eficacia general (Xiang et al., 2025).

2.12. Bioaumentación con Micro pan en sistemas de lagunas

La bioaumentación es una técnica biotecnológica que consiste en la adición de microorganismos especializados (bacterias, hongos o arqueas) a un sistema de tratamiento para mejorar su eficiencia en la degradación de contaminantes específicos que el microbiota nativo no puede procesar eficientemente (López & Alzate, 2022).

En el contexto de las lagunas de lixiviados, el uso de Micropan (un consorcio bacteriano y enzimático estabilizado) busca acelerar la hidrólisis de la materia orgánica compleja. Los lixiviados suelen tener altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y compuestos recalcitrantes que inhiben el crecimiento bacteriano natural. El Micropan actúa:

Reduciendo la carga orgánica (DBO5 y DQO): Al introducir cepas con mayor tasa metabólica.

Control de olores: Mediante la inhibición de bacterias reductoras de sulfato que generan ácido sulfhídrico.

Degradación de grasas y aceites: Gracias a la presencia de lipasas y proteasas específicas.

2.12.1. Normativa y Aplicación

Bajo los criterios de la ingeniería ambiental, este proceso debe alinearse con la eficiencia de remoción exigida por la normativa local (como la resolución 631 del ministerio del Ambiente y desarrollo sostenible de Colombia) el cual es el país vecino con realidades similares a la de Ecuador, asegurando que el inóculo no sea patógeno ni altere el equilibrio ecológico del receptor final.

2.13. Proceso de Flotación por Aire Disuelto (DAF) con PAC/PAM

El sistema DAF (Dissolved Air Flotation) es un proceso de clarificación físico-químico que utiliza microburbujas de aire para elevar las partículas suspendidas a la superficie, en lugar de sedimentarlas (Henze et al., 2018).

Para que el DAF sea efectivo en lixiviados, requiere el uso de aditivos químicos:

- PAC (Policloruro de Aluminio): Actúa como coagulante. Su función es desestabilizar las cargas eléctricas de los coloides (partículas muy pequeñas que no sedimentan por sí solas), permitiendo que se agrupen.
- PAM (Poliacrilamida): Actúa como floculante de alto peso molecular. Crea "puentes" entre los micro flóculos formados por el PAC, generando flóculos más grandes y resistentes que atrapan las burbujas de aire con mayor facilidad.

Este proceso es crucial para remover sólidos suspendidos totales (SST), metales pesados y color, que son típicos en San Jerónimo de Porlón. Es una etapa de pretratamiento o postratamiento indispensable para proteger procesos posteriores de filtración o humedales.

2.14. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSS-H)

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento pasivos que replican los procesos de purificación de los humedales naturales mediante la interacción de plantas macrófitos, el sustrato y microorganismos (Kadlec & Wallace, 2019).

En el flujo subsuperficial horizontal, el lixiviado circula a través de un lecho poroso (grava o piedra volcánica) por debajo de la superficie del medio, evitando la proliferación de insectos y malos olores.

Papel de las Macrófitos: Plantas como *Phragmites australis* o *Typha* spp. no solo absorben nutrientes, sino que transfieren oxígeno a través de sus raíces (rizosfera), creando micro zonas aeróbicas en un entorno mayoritariamente anaeróbico.

Mecanismos de Remoción: Incluyen la filtración mecánica, la adsorción en el sustrato, la absorción por plantas y la degradación bacteriana (nitrificación/desnitrificación).

El diseño debe considerar parámetros hidráulicos estrictos como el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y la carga orgánica superficial. Según estándares internacionales (como los de la IWA), estos sistemas son ideales para el "pulimento" de efluentes, logrando remover remanentes de nitrógeno y metales pesados antes de la descarga final.

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGIA.

3.1. Tipo de Investigación.

El tipo de estudio aplicado a esta investigación fue: de tipo aplicada dado que su objetivo primordial además de ser la generación de conocimiento teórico se basa en la resolución de un problema práctico específico.

La etapa final es propositiva, enfocada en el desarrollo y la fundamentación técnica de una estrategia o diseño optimizado.

3.2. Diseño de Investigación

Para lograr las metas del proyecto, se utilizó un diseño investigativo que actuó como una hoja de ruta científica. Esto facilitó la compilación de datos y evidencia de naturaleza mixta (cualitativa y cuantitativa) a partir de diferentes orígenes, lo que finalmente condujo a la identificación y provisión de soluciones precisas para los problemas observados en el lugar del estudio.

a) Investigación de campo

Esta investigación fue realizada in-situ, debido a la necesidad de conocer la problemática general de la planta de tratamiento, así como sus diferentes deficiencias técnicas y operativas en los distintos procesos.

Las actividades realizadas se detallan a continuación:

- Reconocimiento del área de estudio, georreferenciación del relleno sanitario y su planta de tratamiento además de la identificación de variables.
- Toma de caudal diario durante un mes del lixiviado generado en la celda y que llega a la planta
- Toma de medidas de los diferentes procesos que se encuentran en la planta para su dimensionamiento

b) Investigación documental

El presente proyecto se desarrolló mediante el tipo de investigación secundaria, mediante revisión bibliográfica y/o documental se recabó información como base fundamental para la optimización de la planta en cuanto a su operatividad.

3.3. Técnicas de recolección de Datos,

a) Observación

Esta técnica se aplicó a lo largo de todas las visitas al relleno sanitario, obteniendo información primaria del tratamiento de lixiviados en la planta

b) Cuestionario

Se aplicó preguntas en cuanto a la función operativa de los diferentes procesos para el levantamiento de la línea base, identificando deficiencias y problemas.

c) Bibliográfico- comparativo

Esta técnica se utilizó para recabar información sobre procesos similares de tratamiento de lixiviados, realizar un análisis comparativo y analizar eficiencias obtenidas de los procesos.

3.4. Población de estudio y tamaño de muestra.

3.4.1. Población de estudio

La población de estudio está constituida por la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL) del Sitio de Disposición Final de San Jerónimo de Porlón definida por la totalidad de los registros diarios de caudal (un mes: consumos y costos generados en la PTL, dos meses: análisis y evaluación de la planta).

3.5. Métodos de análisis, y procesamiento de datos.

3.5.1. Reconocimiento del área de estudio

Esta etapa comprende la identificación del área de estudio que consta de la celda emergente y proceso de compostaje que alimentan el caudal de lixiviado, la cual llega a la planta de tratamiento utilizando sistemas de georreferenciación.

3.5.2. Visitas al sitio de estudio

Mediante visitas in situ se identificó los diferentes procesos unitarios que se encuentran operativos con sus diferentes características (volumen, largo, ancho y profundidad).

3.5.3. Medición de caudales

De acuerdo con la norma (International Organization for Standardization, 2017), el caudal en vertederos triangulares sigue la ecuación general de Thomson, la cual permite una alta precisión en la medición de caudales pequeños gracias a su similitud geométrica

$$\frac{8}{15} * cd * \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) * H^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- Coeficiente de descarga (cd): 0,55
- Gravedad (g): 9,81
- Angulo de la escotadura β : 90°
- Altura nivel de agua H: Variable tomada en campo

Calculamos un caudal promedio por día, considerando la altura que alcanza el nivel del agua del canal Parshall durante un mes.

Además, se identifica el tipo de tratamiento utilizado y la ineficiencia de los procesos y problemas que presentan cada uno.

3.5.4. Análisis de las propiedades físico-químicas y biológicas que presentan los lixiviados

Para el análisis de las propiedades del lixiviado se tomó en cuenta los diferentes parámetros considerados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1. Parámetros del lixiviado

Parámetros	Unidades	Métodos/Norma de referencia
pH	U pH	APHA/WWA-WEF SM 4500-H+ B, Ed.24, 2023
Temperatura	°C	APHA/WWA-WEF SM 2550 B, Ed.24, 2023
Conductividad eléctrica	mS/cm	APHA/WWA-WEF SM 2510 A y 2510 B, Ed.24, 2023
Oxígeno disuelto	%	APHA/WWA-WEF SM 4500-O, Ed.24, 2023
Sólidos suspendidos totales	mg/L	APHA-AWWA-WEF SM 2540 C, Ed.24, 2023
Sólidos Totales	mg/L	APHA-AWWA-WEF SM, 2540 B, Ed.24, 2023
Aceites Y Grasas	mg/L	SM 5520 B, Ed. 24, 2023
DBO	mg/L	SM 5210 B, Ed. 24, 2023
DQO	mg/L	SM 5220 A y 5220 D, Ed. 24, 2023
Coliformes fecales	NMP/100ml	SM 9221 B, E y F, Ed. 24, 2023 / Bacteriological Analytical Manual 7th Edition, 2015, Appendix 2: Most Probable Number from Serial Dilutions
Coliformes totales	NMP/100ml	SM 9221 B, E y F, Ed. 24, 2023 / Bacteriological Analytical Manual 7th Edition, 2015, Appendix 2: Most Probable Number from Serial Dilutions

3.6. Seleccionar un rediseño operativo eficiente en el cual se aprovechan las unidades disponibles

3.6.1. Lagunas aireadas

Se ha previsto la reconfiguración del tiempo de retención hidráulica. Esta medida busca maximizar la eficiencia del sistema biológico, permitiendo un contacto más prolongado entre los microorganismos y el sustrato, lo que se traduce en una mejor calidad de lixiviado tratado, se utilizan las siguientes formulas:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 2}$$

(Margarita Cárdenas-Ferrer et al., 2023.)

La dosificación de los microorganismos (Micro pan Alfa POBs) viene dada por la siguiente tabla según el fabricante:

Tabla 2. Dosificación de micro pan por caudal

Altura (cm)	Gramos	Libras
2 - 2,5	300	0,66
2,6 - 3	400	0,88
3,1 - 3,5	625	1,3
3,6 - 4	850	1,8
> 4	1150	2,53

Nota: Altura; tomada en el canal Parshall

En cuanto al sistema de aireación la carga removible que produce su funcionamiento es mayor, por lo que la relación esperada para sistemas de tratamientos de lixiviado es 1,5 kg de O_2 por kg de DBO_5 al día (Aboudi et al., 2023).

La capacidad operativa diaria de oxigenación del sistema biológico se determina mediante la relación entre la potencia nominal del equipo, su tasa de transferencia específica y el tiempo de funcionamiento efectivo (De Temmerman et al., 2020).

Capacidad diaria:

$$\text{Capacidad diaria} = \text{Potencia} * \text{transferencia} * \text{hora} \quad \text{Ecuación 3}$$

Por lo tanto, la carga removible se define como:

$$Carga_{removible} = \frac{Capacidad\ de\ aireador}{Factor\ de\ transferencia} \quad \text{Ecuación 4}$$

(Kurniawan et al., 2010)

Por tanto, para determinar la eficiencia del primer proceso se utiliza la ecuación de primer orden donde se comienza por K que se ajusta a las condiciones climáticas locales (en este caso, los 23,3 °C del diseño) para reflejar la realidad operativa de la planta de San Jerónimo de Porlón definida como:

$$k_T = k_{20} * \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

θ para procesos biológicos es 1,047.

Una vez obtenido k se realiza el cálculo de la concentración de salida para un reactor de mezcla completa:

$$S_e = \frac{S_0}{1+(k*\theta)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para determinar el rendimiento porcentual del sistema de tratamiento frente a la carga orgánica, se empleó la ecuación de eficiencia de remoción. Esta expresión matemática permite cuantificar la capacidad de la laguna para reducir la concentración de contaminantes (Njau & Mbuligwe, 2019).

$$E = \frac{S_0 - S_e}{S_0} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Para cerrar el proceso se debe realizar una limpieza de lodo constante, para esto se utiliza la relación entre la DQO removida y la producción de biomasa (Maity & Bhattacharyya, 2020), el volumen diario es igual a:

$$V_{diario} = \frac{Masa\ diaria}{concentracion * densidad\ del\ lixiviado}. \quad \text{Ecuación 8}$$

Por lo tanto, la frecuencia de limpieza se define:

$$Tiempo_{limpieza} = \frac{volumen\ diario}{volumen\ de\ la\ laguna} \quad \text{Ecuación 9}$$

(Malakahmad & Chuan, 2019)

3.6.2. DAF

Para un tratamiento eficaz de los lixiviados por coagulación-floculación, son importantes factores como la selección de tipos y dosis de coagulantes, el efecto del pH, los parámetros del lixiviado y la producción de lodos (Bastos, 2021),

Como fase de clarificación físico-química, se integró un sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) para el tratamiento de la fracción coloidal de la carga orgánica. El dimensionamiento operativo se basó en la aplicación de un porcentaje de remoción conservador del 25% según (Silva & Ferreira, 2021).

Sobre la concentración de sólidos orgánicos remanentes. El cálculo de la concentración de salida permitió evaluar la eficiencia del equipo para procesar el caudal de diseño de 10,46 m³/día, asegurando que la carga hidráulica se mantenga dentro de los límites de capacidad nominal del reactor.

$$S_{DAF} = DQO_{ENTRADA} * eficiencia \text{ Ecuación 10}$$

3.6.3. Humedales artificiales

Como etapa final de pulimento del efluente, se proyectó el uso de un humedal artificial de flujo subsuperficial. En esta unidad, la remoción de la carga orgánica remanente se fundamenta en procesos biológicos de Fito depuración y filtración a través del medio granular. Para el cálculo de su rendimiento operativo, se aplicó la ecuación de eficiencia de remoción porcentual, ajustando el parámetro de diseño a las tasas de degradación típicas para sistemas de tratamiento pasivo en efluentes de rellenos sanitarios.

Este análisis permite verificar la calidad final del lixiviado previo a su descarga o recirculación, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Vymazal & Dvořáková Březinová, 2022).

3.7. Eficiencia de remoción de DQO de cada tratamiento utilizado

La determinación de las eficiencias de depuración se realizó mediante un modelo de estimación bibliográfica. Para ello, se toma como base los datos de caracterización real del afluente (datos de entrada) obtenidos en el sitio de San Jerónimo de Porlón.

La calidad del efluente proyectado para cada etapa (Bioaumentación, DAF y Humedales) se calculará aplicando los coeficientes de eficiencia reportados en investigaciones previas y manuales de ingeniería ambiental para tecnologías similares bajo condiciones de operación comparables.

El cálculo de las concentraciones de salida se realizará mediante la siguiente relación:

$$C_e = C_i * (1 - n) \text{ Ecuación 11}$$

Donde:

C_e : Concentración estimada del contaminante al final de la etapa de tratamiento.

C_i : Concentración inicial medida en el lixiviado crudo.

n : Coeficiente de eficiencia de remoción (expresado en decimales) obtenido de la revisión de literatura técnica y reportes de desempeño de las tecnologías seleccionadas.

Este enfoque metodológico permite proyectar la viabilidad técnica del rediseño. Las eficiencias (n) para el consorcio bacteriano, el sistema de flotación con PAC/PAM y los humedales de flujo horizontal serán sustentadas mediante una matriz de comparación bibliográfica, priorizando estudios realizados en rellenos sanitarios con lixiviados de edad y composición química similar a los de la zona de estudio.

3.8. Recirculación a la celda emergente

Como parte de la estrategia de gestión integral, se estableció un sistema de recirculación de lixiviados hacia la celda emergente. Del caudal total tratado, un 25% es derivado mediante un sistema de bombeo para ser reinyectado en la masa de residuos. Este proceso tiene como objetivo optimizar la humedad interna de la celda, acelerar los procesos de biodegradación anaerobia de la materia orgánica y reducir el volumen de efluente que requiere tratamiento terciario, siguiendo los criterios de estabilización de rellenos sanitarios modernos (Malavisi & Schiavon, 2020).

Esta técnica consiste en canalizar y bombear el lixiviado para reintroducirlo en la masa de residuos. Esta elección es la más económica de las enseñadas, ya que simplemente se necesita instalar un sistema de bombeo, por lo que conlleva un bajo mantenimiento y bajos costos operativos (Luo et al., 2021).

3.9. Comparativa con la normativa ambiental de Colombia

Se realiza una comparativa de los resultados obtenidos en cuanto a la DQO del total de tratamiento de la planta con la normativa de Colombia, debido a ser un país fronterizo con características similares y realidades parecidas, además, de que se encuentra detallados parámetros para distintas descargas en este caso para propio mantenimiento del relleno sanitario.

Tabla 3. Limites permisibles para el uso de agua para mantenimiento de un relleno sanitario

Parámetro	Unidades	Tratamiento y Disposición de Residuos
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	mg/L	2.000,00
Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO5)	mg/L	800,00
Sólidos Suspendidos Totales (Sst)	\$mg/L	400,00
Sólidos Sedimentables (Ssed)	mL/L	5,00
Grasas Y Aceites	mg/L	50,00
Fenoles	mg/L	0,20
Formaldehído	mg/L	-

CAPÍTULO IV.

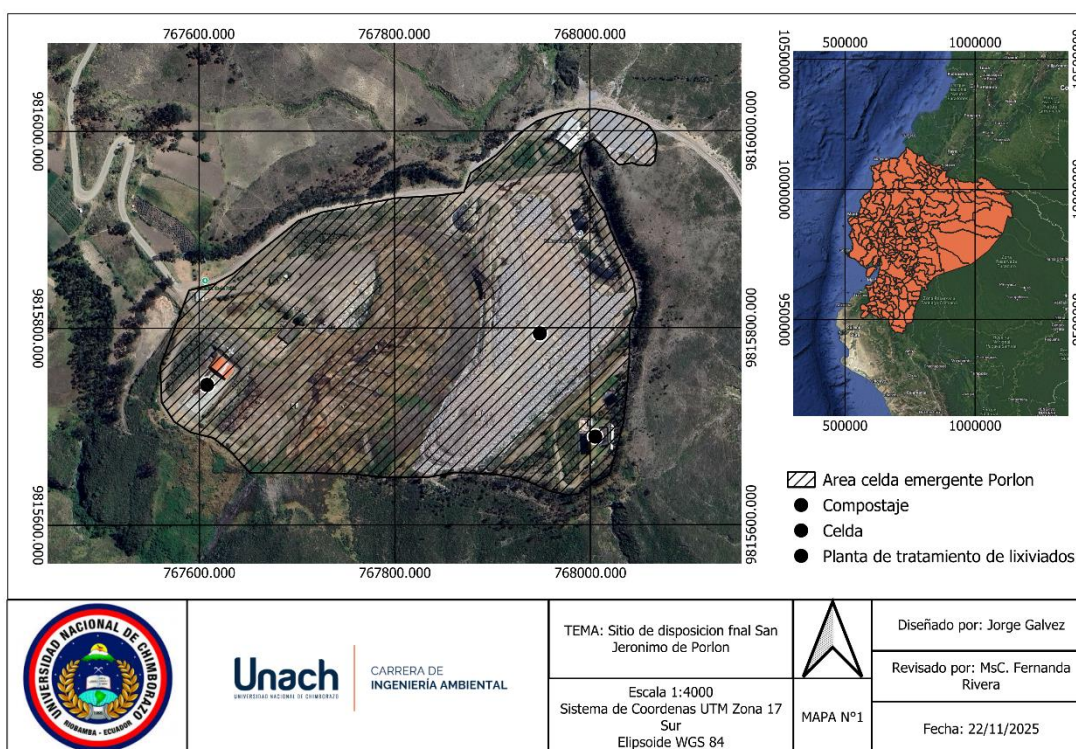
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del estado actual de la planta

4.1.1. Ubicación de la PTL

El relleno sanitario de San Jerónimo de Porlón, localizada en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo a una altitud aproximada de 2647 m.s.n.m. y en las coordenadas UTM S17S 767559,768 E / 9.815876,024 N como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, tiene un área destinada de 152300 m², presenta un clima templado con temperatura promedio de 13°C y precipitación anual de 800 mm, condiciones que influyen en la generación de lixiviados debido a la infiltración pluvial y al tipo de residuos depositados.

Ilustración 1. Mapa de ubicación de la planta de tratamiento de lixiviados



dal

Una vez identificado los puntos de alimentación se realizó un análisis de la planta considerando como punto esencial el caudal que se maneja para el tratamiento, tomando todos los días del mes de agosto, la altura del lixiviado en el canal Parshall, en función de la $815 \cdot cd \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot H^{\frac{5}{2}}$ Ecuación 1.

Tabla 4. Caudal promedio mensual de entrada de lixiviados

Fecha	Altura (cm)	Altura (m)	cd	Ángulo	Caudal (m3/día)	
1-ago-25	2,8	0,028	0,55	90	14,73	12,91
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
2-ago-25	2,9	0,029	0,55	90	16,08	13,04
	2,4	0,024	0,55	90	10,02	
3-ago-25	3	0,03	0,55	90	17,50	17,50
	3	0,03	0,55	90	17,50	
4-ago-25	3,2	0,032	0,55	90	20,56	19,03
	3	0,03	0,55	90	17,50	
5-ago-25	3	0,03	0,55	90	17,50	14,87
	2,6	0,026	0,55	90	12,24	
6-ago-25	2,4	0,024	0,55	90	10,02	10,56
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
7-ago-25	2,5	0,025	0,55	90	11,09	10,56
	2,4	0,024	0,55	90	10,02	
8-ago-25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	12,27
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
9-ago-25	2,4	0,024	0,55	90	10,02	10,56
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
10-ago-25	2,5	0,025	0,55	90	11,09	11,09
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
11-ago-25	3	0,03	0,55	90	17,50	16,11
	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
12-ago-25	2,5	0,025	0,55	90	11,09	11,09
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
13-ago-25	2,6	0,026	0,55	90	12,24	14,16
	2,9	0,029	0,55	90	16,08	
	3	0,03	0,55	90	17,50	14,87

14-ago- 25	2,6	0,026	0,55	90	12,24	
15-ago- 25	2,8	0,028	0,55	90	14,73	14,73
	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
16-ago- 25	2,5	0,025	0,55	90	11,09	11,67
	2,6	0,026	0,55	90	12,24	
17-ago- 25	2,8	0,028	0,55	90	14,73	14,73
	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
18-ago- 25	3	0,03	0,55	90	17,50	14,87
	2,6	0,026	0,55	90	12,24	
19-ago- 25	2,8	0,028	0,55	90	14,73	12,91
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
20-ago- 25	2,9	0,029	0,55	90	16,08	11,63
	2,1	0,021	0,55	90	7,17	
21-ago- 25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	12,84
	2,6	0,026	0,55	90	12,24	
22-ago- 25	2,4	0,024	0,55	90	10,02	9,04
	2,2	0,022	0,55	90	8,06	
23-ago- 25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	14,09
	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
24-ago- 25	2,9	0,029	0,55	90	16,08	14,76
	2,7	0,027	0,55	90	13,45	
25-ago- 25	2,9	0,029	0,55	90	16,08	15,40
	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
26-ago- 25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	12,27
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
27-ago- 25	3	0,03	0,55	90	17,50	24,55
	3,8	0,038	0,55	90	31,60	
28-ago- 25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	12,27
	2,5	0,025	0,55	90	11,09	
29-ago- 25	2,9	0,029	0,55	90	16,08	14,76
	2,7	0,027	0,55	90	13,45	

30-ago-	3	0,03	0,55	90	17,50	16,11
25	2,8	0,028	0,55	90	14,73	
31-ago-	2,8	0,028	0,55	90	14,73	14,09
25	2,7	0,027	0,55	90	13,45	

Por lo que actualmente, la planta opera con un caudal promedio de $13,95 \frac{m^3}{d}$, aunque su capacidad de diseño es de $25 \frac{m^3}{d}$, lo que implica que la planta opera en un 55,8% Por siguiente, la planta de tratamiento de lixiviados de San Jerónimo de Porlón cuenta con las siguientes unidades principales:

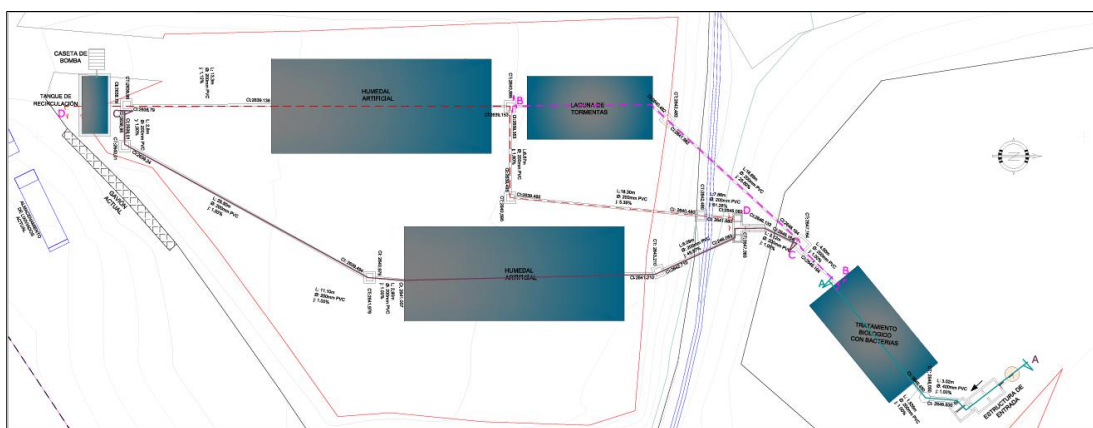
4.1.3. Procesos unitarios

Tabla 5. Operaciones unitarias de la planta de tratamiento

Unidad	Descripción	Dimensión	Imagen
Canal Parshall	Canal por el que llega el lixiviado a la planta; funciona para medir el caudal	Ancho: 1,5m Largo: 2m Profundidad: 1,5m	
Laguna de tratamiento biológico	Es el tratamiento primario, cuenta con sistema de aireación, se inyecta microorganismos (MICROPAN)	Ancho: 6m Largo: 12m Profundidad: 1.04m Volumen: $75.06 m^3$	
Tanque DAF	Tratamiento secundario se produce procesos tanto físicos como coagulación y floculación además de microbiológicos por la inyección de microorganismos	Volumen: $40 \frac{m^3}{d}$ Bomba de mezcla: 2 hp	

Laguna de tormentas	Laguna que cuenta con sistema de aireación tiene el propósito de servir como desfogue de lixiviados si se presenta fuertes precipitaciones	Ancho: 6m Largo: 12m Profundidad: 1.04m Volumen: $75.06m^3$	
Humedales artificiales	Dos piscinas de gran tamaño	Ancho: 9m Largo: 21m Profundidad: 1.628m Volumen: $43.18m^3$	
Laguna de acumulación	Laguna final donde llega todo el lixiviado previamente tratado, no se recibe ningún tipo de tratamiento en esta parte	Ancho: 4m Largo: 7m Profundidad: 0.885m Volumen: $24.79m^3$	
Sistema de recirculación	Conectado a la última laguna, es un sistema de bombas que recirculan los lixiviados hacia la celda emergente nuevamente	Potencia del motor: 2hp	

Ilustración 2. Planos de la planta de tratamiento de lixiviados actual



Nota. Tomado de Estudio de diseño definitivo de cierre técnico de botaderos y celda emergente (Lámina Técnica), por Consultoracav Cía. Ltda., Ministerio del Ambiente del Ecuador y GAD Municipal de Riobamba, 2014.

Con respecto a las diferentes operaciones unitarias que se encuentran en la planta de tratamiento, el lixiviado es dirigido a su primer tratamiento pasando por el canal Parshall donde se toma el caudal diariamente, en la laguna de tratamiento biológico se inyecta 300g de microorganismos (micro pan) esto de acuerdo al fabricante que recomienda la dosificación descrita en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Luego se encuentra un tanque DAF el cual esta inutilizado por problemas de coagulación por la generación excesiva de espuma lo que genera saturación y se colapsa.

El lixiviado llega a la laguna de tormentas que tiene el fin de servir como desfogue por si se presentan precipitaciones altas, esta laguna es utilizada como segundo tratamiento microbiológico donde se le inyecta nuevamente el micro pan, cuenta con un sistema de aireación, seguido pasa a los dos humedales artificiales, el uno no está en funcionamiento y no ingresa ningún caudal y en el segundo el lixiviado no recibe ningún tipo de tratamiento, únicamente se utiliza como paso hidráulico.

Las lagunas utilizadas para el tratamiento microbiológico no tienen una correcta gestión de lodos debido a que todo esto se va acumulando en el fondo y no tiene un mantenimiento de manera seguida.

Finalmente, el lixiviado llega a la última laguna donde las bombas de recirculación envían el producto obtenido de nuevo a la celda inicial.

A pesar de ser una alternativa al tratamiento de lixiviados resulta ser ineficiente debido a que solo se considera un nivel de pretratamiento necesitando de un posterior proceso además en este caso, de insostenible por la sobrecarga hidráulica que produce la acumulación de lixiviado que es recirculado y el nuevo que se genera por procesos de compostaje y de precipitación.

4.1.4. Propiedades físico-químicas del lixiviado

El lixiviado de relleno sanitario conocido también como vertedero, es un líquido oscuro maloliente, el cual alberga grandes cantidades de materia orgánica y material inorgánico,

incluso contiene diversos materiales orgánicos refractarios como compuestos aromáticos y humus; sales inorgánicas tales como nitrógeno amoniacal, carbonato y sulfato; e iones metálicos como cromo, plomo y cobre (Bastos, 2021).

En base a los análisis de laboratorio al ingreso y salida de la planta de lixiviados encontramos los siguientes valores donde se realiza una tabla comparativa en el cual se analiza la conformidad de acuerdo a la norma establecido por el Acuerdo Ministerial 097-A de los diferentes valores de cada uno de los parámetros considerados:

Tabla 6. Comparativa de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas en las diferentes etapas

Parámetro	Unidades	Ingreso	Salida	Normativa	Conformidad
pH	U pH	10,35	8,15	5-9	Cumple
Temperatura	°C	23,3	24,8	Condiciones naturales+	Cumple
Oxígeno disuelto	%	45,8	65,8	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l+	Cumple
Sólidos suspendidos totales	mg/l	>3362	>3362	100	No cumple
Sólidos totales	mg/l	>1392	>1932	1600	No cumple
Aceites y grasas	mg/l	32,8	73,6	+	
DBO	mg/l	8923,08	9230,08	100	No cumple
DQO	mg/l	19557,00	20157,50	250	No cumple
Coliformes fecales	NMP/100ml	14000,0	4000,0	Remoción 99,99%+	No cumple
Coliformes totales	NMP/100ml	22000,0	11000,0	5000	No cumple

En el pH El lixiviado de rellenos jóvenes será menor a 6,6, mientras que en rellenos con mayor tiempo de operación > a 10 años presentarán valores mayores a 7,5. Esto explica porque se tiene un pH alto que durante el proceso se logra estabilizar

Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.

4.2. Rediseño operativo

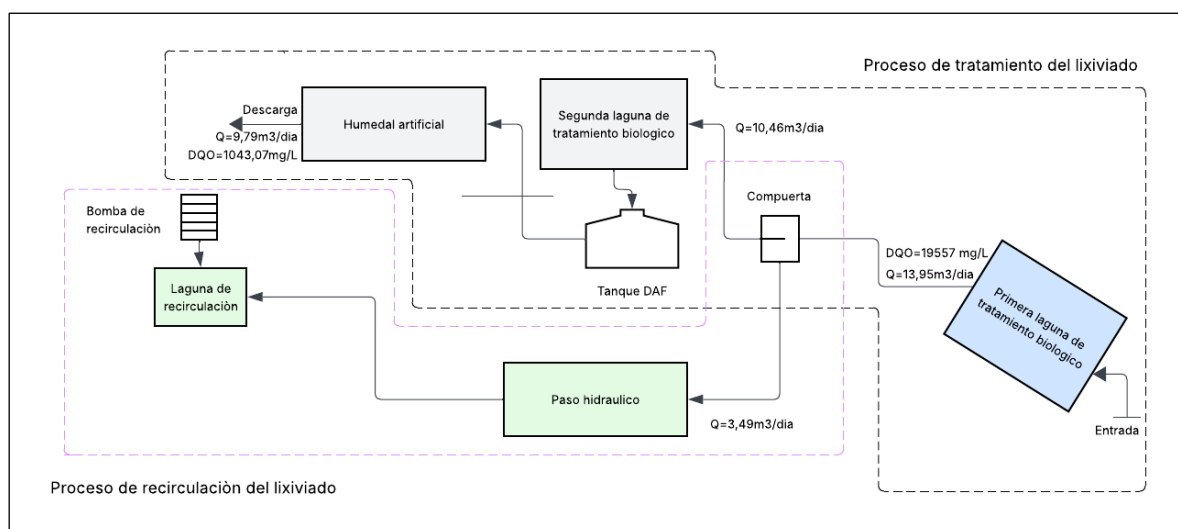
El diagnóstico realizado evidenció que la planta actual presenta deficiencias en la remoción de materia orgánica (DQO, DBO5), nutrientes ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) y sólidos suspendidos totales, lo que impide el cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana (MAATE, Acuerdo Ministerial 097-A, 2015).

En consecuencia, se plantea seleccionar y dimensionar un sistema de tratamiento operativo que, aprovechando la infraestructura actual de la planta, incorpore procesos eficientes para lograr el cumplimiento de la normativa.

Este dimensionamiento se dará en base a cálculos de TDH, inyección de microorganismos, control de caudal, recirculación, sistemas de aireación gestión de lodos y diferentes procesos operativos que afectan de manera directa al tratamiento del lixiviado de cada uno de los procesos unitarios de la planta.

Por lo que se propuso rediseñar la planta y dividirla en dos partes para que del total del caudal $13,95 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ se proporcione un total del 75% al primer tratamiento que consta de dos lagunas de tratamiento aerobio con aireación, un DAF y un humedal artificial con el fin de obtener agua tratada para regadío.

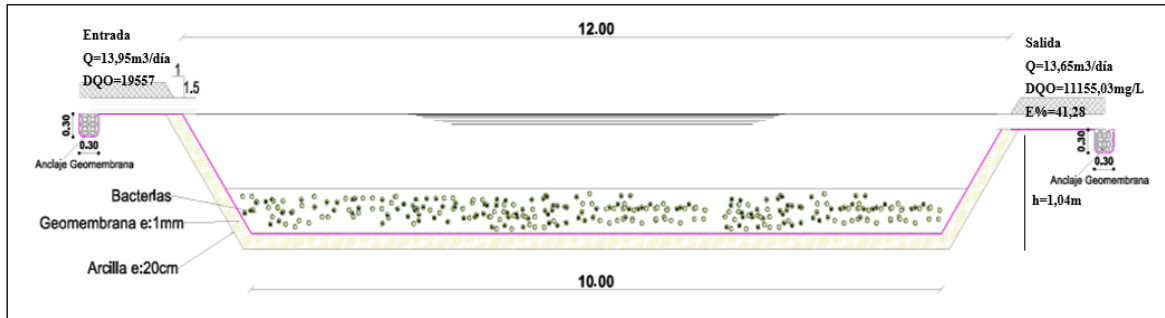
Ilustración 3. Procesos de la planta de tratamiento de lixiviados



4.2.1. Primera laguna de tratamiento biológico

El primer proceso unitario donde comienza el tratamiento con microorganismos es esta laguna aireada en la cual entra el caudal total que es de $13,95 \frac{m^3}{d}$.

Ilustración 4. Primera laguna de tratamiento biológico



4.2.1.1. TDH

Usando la formula descrita en la $TRH = \frac{V}{Q}$ Ecuación 2, esta laguna se mantendría con un TDH de $5,38 \approx 5$ días debido a que aquí llega el caudal en su totalidad, por lo que nos sirve como un pretratamiento su función es servir de estabilizador.

4.2.1.2. Inyección de microorganismos

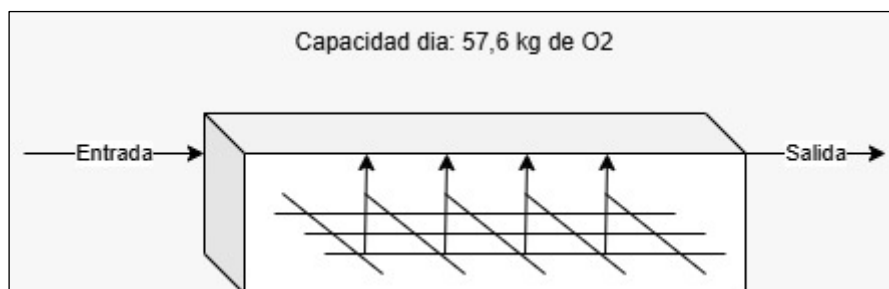
Para la inyección de microorganismos por las características del microorganismo que se utiliza para degradar la materia orgánica (Micro pan alfa POBs) el cual es un consorcio de microorganismos que estimula de gran manera la degradación de materia orgánica en el lixiviado según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** proporcionada por el fabricante se utilizara 360g de microorganismo al día.

4.2.1.3. Sistema de aireación

Al contar con un sistema de aireación de red con un motor con potencia de 2 hp es eficiente al momento de distribuir el oxígeno por toda la laguna.

Su capacidad diaria utilizando la $Capacidad\ diaria = Potencia * transferencia * hora$ Ecuación 3 es de 57,6 kg de O_2 al día y su relación de 1,5 kg de O_2 por cada kg de DBO_5 la $Cargaremovible = \frac{Capacidad\ de\ aireador}{Factor\ de\ transferencia}$ Ecuación 4 nos da una carga removible de 38,4 kg de DBO_5 al día.

Ilustración 5. Funcionamiento sistema de aireación



4.2.1.4. Eficiencia

Uniendo estos tres factores operativos además de la limpieza de lodos se llega a una concentración de salida de 11155,03 mg/l de DQO según la $Se = \frac{S_0}{1 + (k \cdot \theta)}$ Ecuación 6.

Donde para cuantificar el rendimiento operativo de la laguna de tratamiento, se determinó la eficiencia de remoción mediante un balance de concentraciones entre el afluente y el efluente. Este indicador permitió verificar si el sistema cumple con los objetivos de diseño establecidos para la reducción de carga orgánica y aplicando la $E = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \cdot 100$ Ecuación 7 se obtuvo un valor del 42,96%.

4.2.1.5. Lodos

Debido a que no toda la materia orgánica se quema y una parte se convierte en sólidos causa un problema de lodos los cuales deben ser tratados para que el proceso opere de manera eficiente y no exista una acumulación de materia orgánica en el fondo por lo cual según la eficiencia del primer proceso se obtiene una DQO removida por día de 117,21kg y debido a que la respiración endógena que produce la constante aireación y donde la biomasa se mineraliza rápidamente en lugar de acumularse se utiliza un rendimiento neto de 0,22 tenemos una masa de lodo generada de 25,78 kg de lodo seco por día entonces el volumen diario respecto a la $V_{diario} = \frac{\text{Masa diaria}}{\text{concentración} \cdot \text{densidad del lixiviado}}$. Ecuación 8 con el 4% de concentración es de $0,625 \frac{m^3}{día}$ por lo que la frecuencia de limpieza teniendo en cuenta el volumen de la laguna es de $30,01 \text{ días} \approx 30 \text{ días}$ utilizando la $Tiempo_{limpieza} = \frac{\text{volumen diario}}{\text{volumen de la laguna}}$ Ecuación 9.

Este procedimiento permite establecer un cronograma de mantenimiento preventivo y purga mensual, garantizando que el reactor mantenga su capacidad de tratamiento de diseño.

La gestión de estos los lodos generados en las dos lagunas de tratamiento biológico se establece un sistema de deshidratación mediante lechos de secado de arena y grava. Este método aprovecha la gravedad y la evaporación natural para reducir el volumen de agua de

los lodos acumulados en las piscinas, transformándolos en un residuo sólido y estable. Una vez deshidratados y compactados, los lodos secos serán retirados mecánicamente y dispuestos de forma segura mediante disposición en la celda del propio relleno sanitario. Esta alternativa representa la solución más eficiente y de menor impacto operativo, ya que elimina la necesidad de transporte externo, reduce costos de manejo y aprovecha la infraestructura de confinamiento y cobertura ya existente.

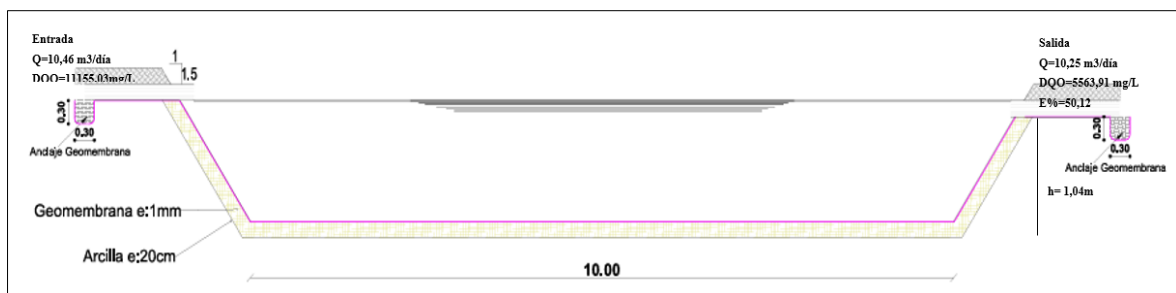
4.2.2. Compuerta

Se utiliza la compuerta donde se puede controlar los caudales que van a los distintos procesos, el proceso uno donde se realiza el tratamiento llega el 75% del caudal que es $10,46 \frac{m^3}{día}$ y el otro 25% del caudal se conduce hacia las bombas de recirculación para la celda donde esta actúa como un reactor biológico que permite una mejor calidad de lixiviados al inicio de la planta.

4.2.3. Segunda laguna de tratamiento biológico

Aquí es donde comienza nuestro proceso de tratamiento con un caudal de $10,46 \frac{m^3}{d}$ y al tener una laguna con un volumen de $75,06 m^3$ la configuración de la segunda laguna biológica aireada constituye un eje estratégico en el rediseño del tren de tratamiento superior, fundamentado en la optimización de la cinética de degradación biológica.

Ilustración 6. Segunda laguna de tratamiento biológico



4.2.3.1. TDH

Al segmentar el caudal mediante la unidad de partición y dirigir únicamente el 75% del flujo de diseño hacia esta unidad se logra incrementar el tiempo de detención hidráulica (TDH) a $7,18 \text{ días} \approx 7 \text{ días}$. Este aumento en el tiempo de contacto, en sinergia con el mantenimiento de una potencia de aireación de 2 HP, garantiza un ambiente con excedente de oxígeno disuelto, ideal para la estabilización de materia orgánica recalcitrante y el soporte de la biomasa bioaumentada con Micropan. Bajo este régimen operativo, la laguna no solo actúa como un reactor de pulimento, sino que reduce drásticamente la carga orgánica másica,

protegiendo las unidades posteriores de flotación (DAF) y filtración natural (Humedales) contra choques de toxicidad o colmatación prematura.

4.2.3.2. Eficiencia

El análisis cinético de la segunda laguna biológica aireada revela una eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 50,13%, logrando reducir la concentración de 11.155,03 mg/L a un valor efluente de 5.563,05 mg/L. Este rendimiento superior, en comparación con la unidad primaria, es por la extensión del tiempo de detención hidráulica a 7,18 días, producto de la división del caudal al 75%. Operativamente, esta unidad se beneficia de una capacidad de transferencia de oxígeno excedente mediante el motor de 2 HP, lo que fomenta una tasa de degradación biológica constante y una mayor estabilidad de la biomasa bio aumentada. Como resultado, el lixiviado efluente presenta una carga orgánica significativamente atenuada, optimizando las condiciones de operación para el sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) y garantizando que el tratamiento fisicoquímico posterior actúe sobre una matriz líquida pre-estabilizada.

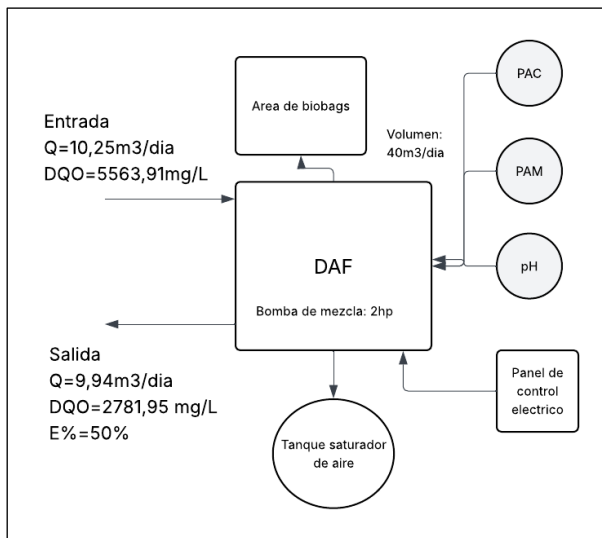
4.2.3.3. Lodos

La producción de lodos en la segunda Laguna Biológica Aireada se estima en $0,17 \frac{m^3}{dia}$, una reducción significativa respecto a la unidad primaria debido a la intensificación de los procesos de respiración endógena favorecidos por un TDH de 7,18 días. Bajo este régimen, la acumulación mensual proyectada es de $5,10m^3$, permitiendo programar ciclos de limpieza trimestrales. Esta gestión diferenciada asegura la preservación del volumen útil de ambas unidades biológicas, garantizando la estabilidad de las eficiencias de remoción de DQO calculadas para el sistema.

4.2.4. DAF

El sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) actúa como la unidad de clarificación fisicoquímica, procesando un caudal de $10,46 \frac{m^3}{dia}$ un valor menor al caudal que puede manejar. Debido a que la carga hidráulica representa solo el 26% de la capacidad nominal del equipo ($40 m^3/día$), se garantiza un tiempo de residencia extendido que favorece la interacción entre las microburbujas generadas por la bomba de mezcla de 2 HP y los flóculos químicos. El tratamiento se optimiza mediante la dosificación de Sulfato de Aluminio/PAC y PAM, previo ajuste del pH desde 10,35 hacia el rango de neutralidad.

Ilustración 7. Sistema DAF



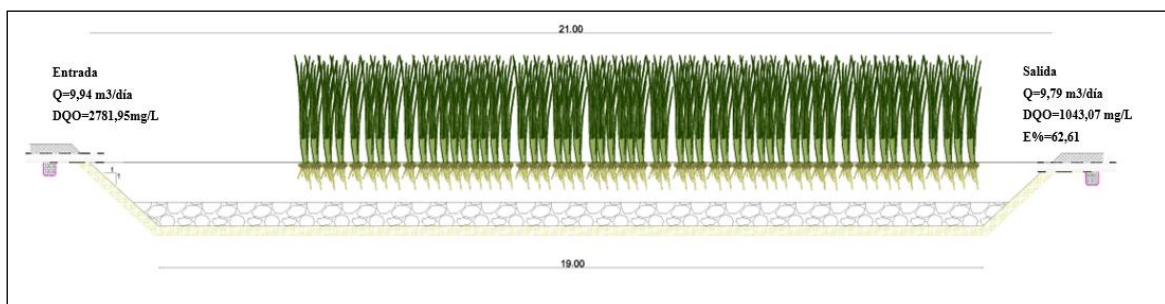
4.2.4.1. Eficiencia

Esta etapa logra una remoción adicional del 25% de la DQO remanente según $laS_{DAF} = DQO_{ENTRADA} * eficiencia$ Ecuación 10, eliminando principalmente la fracción coloidal y los aceites y grasas 32,8 mg/L entregando un efluente con 4172,28 mg/L de DQO. Esta reducción es fundamental para prevenir el taponamiento del lecho filtrante en la etapa final de humedales artificiales.

4.2.5. Humedal artificial

El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal diseñado con una profundidad de 1,628 m, lo que permite alcanzar un Tiempo de Detención Hidráulica (TDH) de 10,30 días $\approx$ 10 días. Esta configuración es superior a los diseños convencionales, ya que el volumen útil de 107,69 m³ garantiza una filtración prolongada y una mayor estabilización de la materia orgánica remanente.

Ilustración 8. Humedal Artificial



4.2.5.1. Eficiencia.

Bajo este régimen de operación, el sistema alcanza una eficiencia de remoción del 75% en esta etapa, entregando un efluente final con 1.043,07 mg/L de DQO. Estos valores son

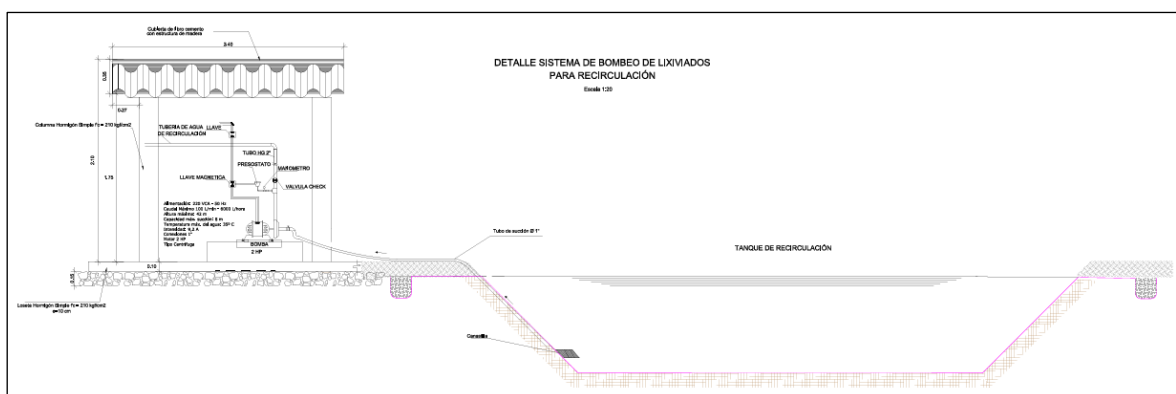
idóneos para el riego de mantenimiento de las áreas verdes del sitio de disposición final San Jerónimo de Porlón, cumpliendo con el objetivo de descarga cero al entorno natural.

4.3. Proceso de recirculación

El diseño contempla la derivación del 25% del caudal efluente de la laguna primaria $3,49 \frac{m^3}{dia}$ hacia la celda emergente en operación. Esta estrategia de recirculación transforma la celda en un sistema de biorreactor, aprovechando la capacidad de campo de los residuos sólidos para actuar como un filtro físico-biológico. La reintroducción de este flujo, enriquecido con biomasa adaptada y microorganismos provenientes de la etapa de bioaumentación con Micro pan, fomenta la degradación acelerada de la materia orgánica dentro de la propia masa de residuos.

Operativamente, este retorno permite la dilución de contaminantes de alta toxicidad en el lixiviado crudo y garantiza la humidificación necesaria para optimizar los procesos anaerobios internos de la celda. Como resultado, se logra una estabilización más rápida de los residuos y una mejora en la calidad del lixiviado que percola nuevamente hacia la planta, creando un ciclo de tratamiento preliminar que reduce la presión sobre el tren de tratamiento superior (DAF y Humedales)."

Ilustración 9. Proceso de recirculación

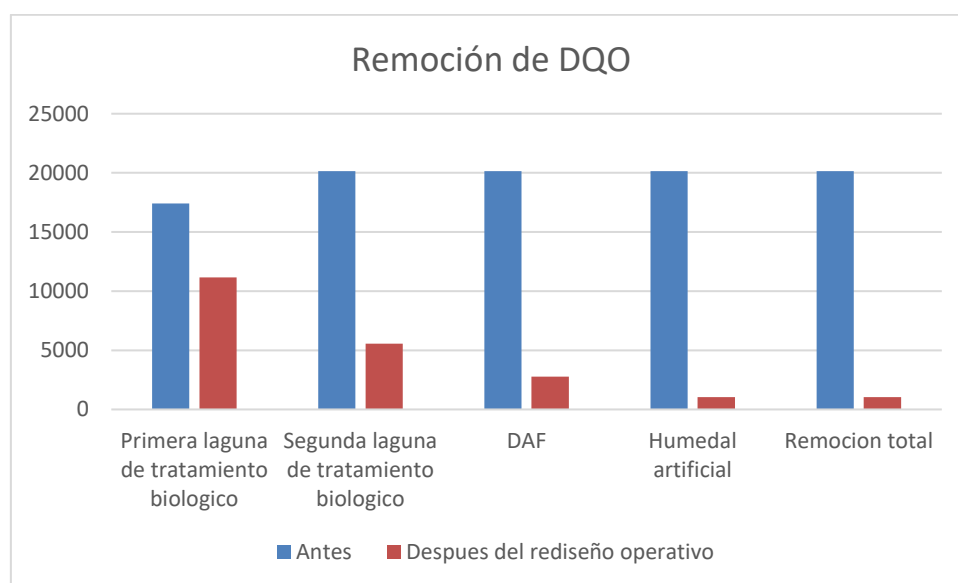


4.4. Eficiencia de los distintos procesos antes y después del rediseño operativo

Se realiza una comparación del porcentaje de eficiencia en la remoción de DQO en cuanto al valor inicial con el rediseño operativo propuesto

Tabla 7. Comparativa y eficiencia de los distintos procesos

Proceso / Unidad	Parámetro	Antes del Rediseño (Operación Actual)	Después del Rediseño (Propuesta Optimizada)	Eficiencia de Remoción
Primera Laguna Biológica Aireada	DQO	17420,00 mg/L	11155,03 mg/L	41,28%
Segunda Laguna Biológica Aireada	DQO	20157,05 mg/L	5563,91 mg/L	50,12%
Sistema De Flotación (Daf)	DQO	No existía esta etapa en el sistema	2781,95 mg/L	50,00%
Humedal Artificial	DQO	Sin funcionamiento	1043,07 mg/L	62,51%
Eficiencia Global	DQO	Nula remoción	1043,07 mg/L	94,67%

Ilustración 10. Remoción de DQO antes y después del rediseño

4.5. Cumplimiento con la resolución 631 de descarga de agua para mantenimiento de un relleno sanitario

Se realizó una comparativa del valor final obtenido para evaluar la eficiencia del rediseño operativo que se aplicó por lo tanto se obtiene que:

Tabla 8. Comparativa con normativa ambiental de Colombia

Parámetro	Unidades	Límite Máximo Permisible (Tratamiento Y Disposición De Residuos)	Resultado Final Del Rediseño	Cumplimiento
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	mg/L	2.000,00	1.043,07	SÍ
Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO5)	mg/L	800,00	230,00*	SÍ
Sólidos Suspendidos Totales (Sst)	mg/L	400,00	< 40,00	SÍ
Ph	Unidades	6,00 a 9,00	7,50	SÍ
Grasas Y Aceites	mg/L	50,00	< 5,00	SÍ

Se obtiene un cumplimiento en cuanto a los parámetros que destaca la tabla por lo que el sistema de rediseño cumple con su finalidad y así se puede hacer una reducción del caudal del lixiviado que se majea actualmente.

CAPÍTULO V.

5.1. CONCLUSIONES

El diagnóstico técnico de la planta de tratamiento existente reveló una eficiencia de remoción crítica, evidenciando que la configuración original es insuficiente para la carga orgánica extrema generada en el sitio San Jerónimo de Porlón. Se identificaron como principales problemas: la falta de una etapa de clarificación fisicoquímica funcional, tiempos de retención hidráulica insuficientes por la acumulación histórica de lodos y la ausencia de una unidad de partición de caudales, lo que generaba choques de toxicidad en las etapas finales y el incumplimiento sistemático de la normativa ambiental vigente.

La implementación de la bioaumentación con microorganismos específicos y el fraccionamiento del caudal al 75% en la segunda etapa permitieron maximizar los tiempos de detención hidráulica a 5,38 y 7,18 días respectivamente. Esto garantizó una remoción biológica acumulada del 71,55% antes del tratamiento avanzado, además el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, con una profundidad de 1,628 m y un TDH de 10,30 días, consolidó el tratamiento alcanzando una remoción final del 75% de la carga remanente y la estrategia de recircular el 25% del caudal hacia la celda emergente permite aprovechar la masa de residuos como un biorreactor adicional.

El rediseño operativo propuesto y el control de caudal para la planta de tratamiento de lixiviados de San Jerónimo de Porlón logra una eficiencia de remoción de la carga orgánica global del 94,67%, reduciendo la DQO desde un valor de entrada de 19557,00 mg/L hasta un efluente final de 1043,07 mg/L. Este resultado valida la integración de procesos biológicos bioaumentados, fisicoquímicos y de pulimento natural.

La revisión bibliográfica y el estado del arte permitieron determinar que, para matrices de lixiviado de alta complejidad, el uso de microorganismos especializados (Bioaumentación) y el empleo de polímeros de alto peso molecular (PAC y PAM) son las estrategias con mayor tasa de éxito reportada. La literatura técnica coincide en que un sistema híbrido, que combine la degradación biológica aerobia con procesos de flotación (DAF) y pulimento en humedales artificiales, es capaz de alcanzar remociones superiores al 90%, siempre que se garantice una relación de aire/sólido adecuada y tiempos de contacto prolongados, fundamentando así la viabilidad técnica del rediseño propuesto en este estudio.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda establecer un protocolo de monitoreo estricto del pH previo al ingreso al sistema DAF. Para asegurar la eficiencia de los coagulantes (PAC), el lixiviado debe neutralizarse desde su valor alcalino original (10,35) hasta un rango de 6,5 a 7,5 además también en las lagunas aireadas debido a la sensibilidad de los microorganismos inyectados.

Es importante cumplir con el calendario de purga de lodos calculado: mensual para la laguna 1 y trimestral para la laguna 2. El incumplimiento de estos plazos reducirá el TDH real, comprometiendo la eficiencia de remoción de toda la planta.

Ajuste por Estacionalidad: Durante la época de altas precipitaciones en Riobamba, se recomienda reducir el porcentaje de recirculación hacia la celda emergente para evitar la saturación hídrica de los residuos y prevenir posibles fallas de estabilidad en los taludes del relleno.

BIBLIOGRAFÍA

- Bastos, C. (2021). Tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. *Dinàmica Ambiental*.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. *Revista de Ingeniería (Universidad de Los Andes)*.
- De Temmerman, J., Terryn, G., Boenne, W., & Nopens, I. (2020). Oxygen Transfer Efficiency in Biological Treatment: A Review. *Processes*, 8(7), 820.
- Njau, K. N., & Mbuligwe, S. E. (2019). Performance Evaluation of Landfill Leachate Treatment Plants: A Case Study of the Muriet Landfill in Arusha, Tanzania. *Journal of Environmental and Public Health*, 2019, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/3174249>
- Maity, S. K., & Bhattacharyya, P. (2020). Characterization and Management of Sludge from Landfill Leachate Treatment: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4236.
- Malakahmad, A., & Chuan, Z. L. (2019). Assessment of Sludge Accumulation Rate and Maintenance Frequency in Aerated Lagoon Systems. *Water*, 11(11), 2330. <https://doi.org/10.3390/w11112330>
- Silva, J. P., & Ferreira, A. C. (2021). Dissolved air flotation as an advanced treatment for the removal of organic load in landfill leachates. *Water Science and Technology*, 84(10-11), 2651-2664. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.435>
- Vymazal, J., & Dvořáková Březinová, T. (2022). Constructed Wetlands for Treatment of Landfill Leachate: A Review. *Plants*, 11(13), 1623. <https://doi.org/10.3390/plants11131623>
- Amaguaya, E. (2019). Diseño de un sistema biológico para la depuración de lixiviados generados en el relleno sanitario de Porlón [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13117>
- Bastos, C. (2024). Tratamiento de

Lixiviados en Rellenos
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/11376> Sanitarios.

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba. (2024). Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos para la gestión integral de residuos sólidos que incluya el Complejo Ambiental Riobamba (CAR) para el aprovechamiento y disposición final de los RSU del Cantón Riobamba.
https://www.gadmriobamba.gob.ec/images/convocatorias/2024/TDR_CAR.TASA_GAD

MR.ok.-signed.pdf Guevara, A., Guanoluisa, L., & De La Torre, E. (2014). Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario El Inga mediante Electrocoagulación y Fitorremediación. Revista Politécnica, 34(1).
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773673001> Martínez-Lopez, A., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., Escarola-Rosas, M. A.,

Hernández-Lara, J., Elvira-Hernández, E. A., Méndez, G. A., Tinoco Magaña, J., & Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. 9(1), 37-47.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93330767005> Ministerio del Ambiente. (2015).

Acuerdo Ministerial No. 061: Reforma del Libro VI del TULSMA. Mora, A., & Molina, N. (2017). Diagnóstico del manejo de residuos sólidos en el parque histórico Guayaquil. La Granja, 26(2), 84. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.08> Morales León, M. (2019). Diseño del sistema de tratamiento y eliminación de RSU para el Cantón Riobamba-Ecuador [Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia].
<https://riunet.upv.es/handle/10251/129895> Nawaz, T., Rahman, A., Pan, S., Dixon, K.,

Petri, B., & Selvaratnam, T. (2020). A review of landfill leachate treatment by microalgae: Current status and future directions. En Processes (Vol. 8, Número 4). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/PR8040384> Remmas, N., Manfe, N., Zerva, I., Melidis, P., Raga,

R., & Ntougias, S. (2023). A Critical Review on the Microbial Ecology of Landfill Leachate Treatment Systems. En Sustainability (Switzerland) (Vol. 15, Número 2). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su15020949> Vargas, C., Gutiérrez, J., Vélez, D., Gómez, M.,

Aguirre, D., Quintero, L., & Franco, J. (2020). Gestión del manejo de residuos sólidos: un problema ambiental en la universidad. 50. <https://doi.org/10.14482/pege.50.628.445>

Malavisi, M., & Schiavon, M. (2020). Leachate Recirculation for Enhancing Waste Degradation and Stabilization in Landfills: A Review of Current Practices. *Applied Sciences*, 10(18), 6353. <https://doi.org/10.3390/app10186353>

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2003). Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Libro VI: De la Calidad Ambiental. Registro Oficial Esp. 387.

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, tratamiento avanzado y reutilización (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Samaniego, M. E., & Vargas, J. C. (2021). Análisis de costos ambientales y metodologías de remediación en sitios de disposición final de residuos sólidos en la región andina. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Ambiental*, 14(2), 112,4–125,8.

Bhalla, B., Saini, M. S., & Jha, M. K. (2011). Assessment of groundwater quality near a municipal solid waste landfill by using water quality index. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2(1), 111–118.

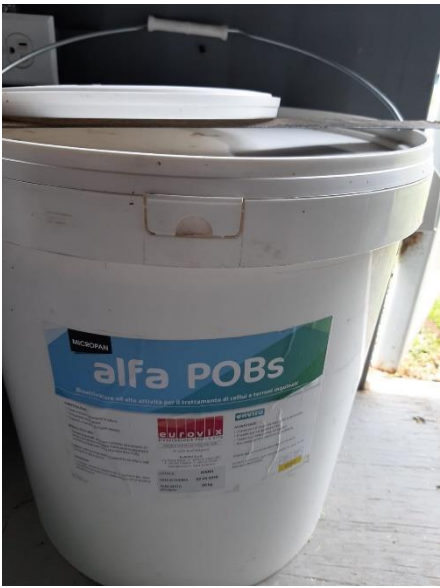
Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirasswuyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>

ANEXOS

1.1. Anexo 1. Tabla de propiedades físico químicas del lixiviado realizadas por el municipio de Riobamba para control de la planta.

N° Protocolo						238318 / 2025 - 1.0		
Fecha de Muestreo						16/04/2025		
Hora de Muestreo						10:45:00		
Tipo de Muestra						Lixiviado		
Referencia						LX-01 (Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) - Ingreso)		
Parámetro	Ref. Mét.	Fecha de Ensayo	Unidad	LD	Limite Máximo Permisible (1)	Resultado	Incertidumbre (+/-)	Criterio de Resultados (2)
003 ENSAYOS FÍSICOQUÍMICOS								
Aceites y Grasas	8056	23/04/2025	mg/l	0,3	30,0	32,8	3,81	No Cumple
Demanda Bioquímica de Oxígeno	10334	28/04/2025	mg/l	0,58	100	8923,08	51,87	No Cumple
Demanda Química de Oxígeno	6466	22/04/2025	mg/l	13,00	200	19557,00	103,10	No Cumple
Nitrógeno Amoniacal	6517	24/04/2025	mg/l	0,05	30,0	3934,00 (a)	1,57	No Cumple
007 ENSAYOS DE METALES								
Mercurio (Hg)	6505	22/04/2025	mg/l	0,0002	0,005	< 0,0010	NE	Cumple
007 ENSAYOS DE METALES - Metales ICP Alto								
Cadmio (Cd)	21111	22/04/2025	mg/l	0,0003	0,02	< 0,004	NE	Cumple
Fósforo (P)	21111	22/04/2025	mg/l	0,053	10,0	23,28	1,88	No Cumple
Níquel (Ni)	21111	22/04/2025	mg/l	0,001	2,0	0,159	0,0024	Cumple
Plomo (Pb)	21111	22/04/2025	mg/l	0,0001	0,2	< 0,020	NE	Cumple
Zinc (Zn)	21111	22/04/2025	mg/l	0,002	5,0	0,228	0,0002	Cumple
015 ENSAYOS MICROBIOLÓGICOS								
Coliformes Fecales	13693	21/04/2025	NMP/100ml	---	2000	14000,0	362,35	No Cumple

1.2. Anexo 2. Información del sustrato utilizado para el tratamiento de lixiviados



1.3. Anexo 3. Drenado de lagunas para su limpieza con el fin de aplicar posteriormente el plan



1.4. Anexo 4. Medición de parámetros básicos del lixiviado



1.5. Anexo 5. Prueba de coagulación utilizando sulfato de aluminio (reactivo que se utiliza en el DAF)



1.6. Anexo 6. Medición de DQO luego de aplicar el coagulante y decantación de sedimentos, efecto para tomar en cuenta los coeficientes utilizados.

