



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE UN REACTOR AEROBIO/ANÓXICO  
PARA LA ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO  
EN LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO PICHACAY  
TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTORA: JESSICA ELIZABETH VILLA CRIOLLO**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ**

**CUENCA - ECUADOR**

**2022**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE UN REACTOR AEROBIO/ANÓXICO  
PARA LA ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO  
EN LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO PICHACAY**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTORA: JESSICA ELIZABETH VILLA CRIOLLO**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ**

**CUENCA - ECUADOR**

**2022**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Jessica Elizabeth Villa Criollo portadora de la cédula de ciudadanía N° 0106830953. Declaro ser la autora de la obra: “EVALUACIÓN DE UN REACTOR AEROBIO/ANÓXICO PARA LA ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO EN LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO PICHACAY” sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

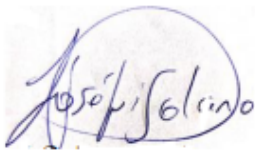
Cuenca, 01 de julio de 2022



F: .....  
Jessica Elizabeth Villa Criollo  
0106830953

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jessica Elizabeth Villa Criollo, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, reading "José Luis Solano Peláez", enclosed within a circular blue ink scribble.

---

**José Luis Solano Peláez**

**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi madre, una mujer luchadora quien me permitió y me ayudó a crecer profesionalmente, pues sin ella no lo hubiera logrado, a mi padre quien día a día me brinda su apoyo, a mis pequeños y amados sobrinos, que con sus ocurrencias iluminan mi vida, a mis hermanos y a mis tíos que siempre tienen una palabra de aliento.

También quiero dedicar este trabajo a una persona muy especial, a mi ángel que está en el cielo, mi querida abuelita que, aunque no esté aquí conmigo, yo sé que ella está feliz por mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero quiero agradecer a Dios por guiar mi camino y permitirme alcanzar uno de tantos objetivos propuestos en mi vida.

Quiero también agradecer a mis padres por todo el soporte brindado durante toda esta travesía, por ser ese pilar firme en el que me fortalezco cuando todo se torna difícil, gracias por apoyarme siempre en cada una de las decisiones que he tomado en mi vida, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

De manera muy especial quiero agradecer a mi tutor, el Ing. José Luis Solano, gracias por su apoyo, su guía y su paciencia, gracias por compartir sus conocimientos conmigo para la elaboración de este trabajo.

Agradezco a mis hermanos y a toda mi familia por nunca dejar que desista de mi meta cuando todo parecía ir mal.

También quiero agradecer a mis amigos de salón, gracias por los momentos compartidos, cada buena acción queda grabada en mi mente y en mi corazón, gracias por la valiosa amistad que hemos forjado en esta travesía.

Por último, agradezco a todos los docentes que formaron parte de mi vida como estudiante, pues cada uno aportó de diferente manera con conocimientos importantes para ayudarme a crecer profesionalmente, gracias.

## RESUMEN

El aumento constante en la generación de residuos sólidos en el Ecuador es proporcional a la elevada producción de lixiviados que resultan de su proceso propio de descomposición mezclados con el agua que se infiltra. Estos líquidos son considerados como tóxicos, pues poseen altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y otros contaminantes, por lo que hace necesario la aplicación de mecanismos de tratamiento. En este marco, el objetivo del presente estudio es evaluar la eficacia de reducción de nitrógeno y compuestos nitrogenados en lixiviados de relleno sanitario mediante la utilización de un reactor biológico aerobio anóxico, las muestras estudiadas son provenientes del Complejo de Desarrollo Ecológico "Pichacay" y fueron trasladadas al laboratorio del Centro de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología (CIITT) de la Universidad Católica de Cuenca para su análisis respectivo. La investigación se basó en un diseño experimental de medias repetidas, con un solo tratamiento (aerobio-anóxico), dos muestras y una repetición. Durante el pre tratamiento de Jar test, se disminuyó sólidos disueltos (15,5%) y amonio (18,64%); en el reactor biológico secuencial (SBR), sin lodos activados (M1) que evidenció remoción de amonio (89,21%); pero no se observó remoción de nitratos, sin embargo; se redujo la demanda química de oxígeno (DQO) (20,48%). Por su parte en la segunda muestra (M2) se adicionó una muestra 10 gr de lodos activados, se obtuvo mayor remoción de amonio (96%), nitratos (88%) y DQO (36,8%) que por ende lo vuelve más eficiente en la eliminación biológica de nitrógeno.

*Palabras clave:* tratamiento biológico, lixiviados, lodos activados, reactor biológico secuencial, nitrógeno, demanda química de oxígeno

## ABSTRACT

The constant increase in solid waste generation in Ecuador is proportional to the high production of leachates resulting from its decomposition process mixed with the water that infiltrates. These liquids are considered toxic because they have high concentrations of ammoniacal nitrogen and other pollutants, making it necessary to apply treatment mechanisms. In this context, the objective of this study is to evaluate the effectiveness of nitrogen and nitrogen compounds reduction in landfill leachate by using an anoxic aerobic biological reactor. The samples studied are from the "Pichacay" Ecological Development Complex and were taken to the laboratory of the Center for Research, Innovation and Technology Transfer (CIITT by its Spanish acronym) of the Catholic University of Cuenca for their respective analysis. The research was based on a repeated means experimental design, with a single treatment (aerobic-anoxic), two samples, and one repetition. During the *Jar test* pretreatment, dissolved solids (15,5%) and ammonium (18,64%) were reduced in the sequential biological reactor (SBR) without activated sludge (M1), which showed ammonium removal (89,21%); but nitrate removal was not observed; however, chemical oxygen demand (COD) was reduced (20,48%). On the other hand, in the second sample (M2), a 10 g sample of activated sludge was added, obtaining a higher removal of ammonium (96%), nitrates (88%), and COD (36,8%), which makes it more efficient in the biological elimination of nitrogen.

**Keywords:** leachate, biological treatment, activated sludge, SBR reactor, nitrogen

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO	I
CERTIFICACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE ANEXOS	XIII
CAPÍTULO I	- 1 -
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 OBJETIVOS	- 3 -
1.1.1 <i>Objetivo General</i>	- 3 -
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	- 3 -
CAPÍTULO II	- 4 -
2. MARCO TEÓRICO	- 4 -
2.1 RESIDUOS SÓLIDOS	- 4 -
2.2 RELLENO SANITARIO	- 5 -
2.3 LIXIVIADOS	- 6 -
2.3.1 <i>Características de los lixiviados</i>	- 6 -
2.3.2 <i>Tipos de lixiviados según la edad</i>	- 8 -
2.4 CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS LIXIVIADOS	- 8 -
2.4.1 <i>Compuestos nitrogenados</i>	- 8 -
2.4.2 <i>Metales pesados</i>	- 10 -
2.4.3 <i>Compuestos inorgánicos</i>	- 11 -
2.5 CONSECUENCIAS DE LOS LIXIVIADOS EN EL AGUA	- 11 -
2.6 TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE AGUAS NEGRAS O RESIDUALES	- 12 -
2.7 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	- 13 -
2.7.1 <i>Proceso aerobio</i>	- 13 -
2.7.2 <i>Proceso anóxico</i>	- 13 -
2.7.3 <i>Eliminación de nitrógeno</i>	- 14 -
2.8 REACTOR BIOLÓGICO	- 14 -

2.8.1	Reactor discontinuo secuencial (SBR)	- 15 -
2.8.2	Esquema del reactor SBR	- 15 -
2.9	EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	- 16 -
2.10	MARCO LEGAL	- 17 -
2.10.1	Constitución de la república del Ecuador	- 17 -
2.10.2	Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)	- 17 -
2.10.3	Código Orgánico del Ambiente (COA)	- 17 -
2.10.4	Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA)	- 17 -
2.10.5	Acuerdo ministerial 97	- 18 -
CAPÍTULO III		- 20 -
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	- 20 -
3.1	ZONA DE ESTUDIO	- 20 -
3.2	MATERIALES	- 21 -
3.3	TIPO DE INVESTIGACIÓN Y DISEÑO	- 21 -
3.3.1	Tipo	- 21 -
3.3.2	Diseño	- 22 -
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA	- 22 -
3.4.1	Población	- 22 -
	<i>La población estudiada fue conformada por todo el lixiviado contenido en el tanquero transportador (Figura 6).</i>	- 22 -
3.4.2	Muestra	- 22 -
3.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	- 23 -
3.6	PROCEDIMIENTO	- 25 -
3.6.1	Caracterización inicial del lixiviado	- 25 -
3.6.2	Pre-tratamiento	- 25 -
3.6.3	Ensayos diarios de laboratorio	- 27 -
3.7	ELABORACIÓN Y OPERACIÓN DEL REACTOR AEROBIO/ANÓXICO A ESCALA DE LABORATORIO	- 31 -
CAPÍTULO IV		- 32 -
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 32 -
4.1	ANALIZAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO NORMALIZADOS	- 32 -
4.1.1	Pre-tratamiento	- 33 -
•	Jar test para reducción de materia sedimentable	- 33 -
4.2	ELABORAR UN PROTOTIPO DE REACTOR A NIVEL DE LABORATORIO PARA LA REDUCCION DE NITROGENO Y COMPUESTOS NITROGENADOS EN LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO, A NIVEL EXPERIMENTAL	- 35 -

4.2.1 Amonio	- 35 -
4.2.2 Nitratos	- 37 -
4.2.3 DQO	- 39 -
4.2.4 Comparación	- 40 -
4.3 EVALUAR LOS RESULTADOS DEL TRATAMIENTO A NIVEL DE LABORATORIO PARA EXTRAPOLARLOS CON EL FIN DE ELABORAR UNA PROPUESTA QUE CONTRIBUYA CON EL MANEJO ADECUADO DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO.	- 43 -
4.3.1 Propuesta para el tratamiento de lixiviados viejos de relleno sanitario mediante la utilización de un reactor aerobio/anóxico.	- 43 -
CAPÍTULO V	- 49 -
5. CONCLUSIONES	- 49 -
CAPÍTULO VI	- 50 -
6. RECOMENDACIONES	- 50 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 51 -
ANEXOS	59

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Elementos típicos de un relleno sanitario _____	- 6 -
<b>Figura 2:</b> Esquema de reactor de oxidación para tratamiento de aguas contaminadas ____	- 12 -
<b>Figura 3:</b> Transformación del nitrógeno por nitrificación y desnitrificación _____	- 14 -
<b>Figura 4:</b> Diagrama de funcionamiento de un reactor SBR _____	- 16 -
<b>Figura 5:</b> Mapa de ubicación del relleno sanitario Pichacay. _____	- 20 -
<b>Figura 6:</b> Toma de muestras de lixiviado _____	- 22 -
<b>Figura 7:</b> Mapa de ubicación de la Planta de operaciones EMAC EP _____	- 23 -
<b>Figura 8:</b> Diseño experimental de la operación de los reactores a construir _____	- 24 -
<b>Figura 9:</b> Coagulante de cloruro férrico _____	- 26 -
<b>Figura 10:</b> Prueba de Jar Test _____	- 26 -
<b>Figura 11:</b> Viales en el termoreactor para la digestión _____	- 27 -
<b>Figura 12:</b> Crisol utilizado en la determinación de sólidos totales _____	- 30 -
<b>Figura 13:</b> Diagrama de flujo del procedimiento de los parámetros ensayados en el laboratorio -	
30 -	
<b>Figura 14:</b> Diagrama esquematizado (izquierda) y prototipos construidos (derecha) _____	- 31 -
<b>Figura 15:</b> Colocación del lixiviado en el reactor construido para iniciar la experimentación -	31 -
<b>Figura 16:</b> Comportamiento del amonio en la M1, sin lodo activado _____	- 35 -
<b>Figura 17:</b> Comportamiento del amonio en la M2, con lodo activado _____	- 36 -
<b>Figura 18:</b> Comportamiento de los nitratos en la M1, sin lodo activado _____	- 37 -
<b>Figura 19:</b> Comportamiento de los nitratos en la M2, con lodo activado _____	- 38 -
<b>Figura 20:</b> Comportamiento del DQO en M1, sin lodo activado _____	- 39 -
<b>Figura 21:</b> Comportamiento del DQO en M2, con lodos activados _____	- 40 -
<b>Figura 22:</b> Comparación entre M1 y M2 para los parámetros de nitratos, amonio y DQO. -	41 -
<b>Figura 24:</b> Primer esquema para el tratamiento aeróbico/anóxico _____	- 48 -

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Parámetros básicos para la caracterización de lixiviados _____	- 7 -
<b>Tabla 2:</b> Características del lixiviado según la edad del relleno sanitario _____	- 8 -
<b>Tabla 3:</b> Límites permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce _____	- 18 -
<b>Tabla 4:</b> Descripción del diseño experimental _____	- 24 -
<b>Tabla 5:</b> Parámetros monitoreados antes de la experimentación _____	- 25 -
<b>Tabla 6:</b> Caracterización del lixiviado previo a la experimentación _____	- 32 -
<b>Tabla 7:</b> Caracterización del lixiviado después del Jar test _____	- 33 -

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Flujograma de la metodología aplicada _____	59
<b>Anexo 2:</b> Toma de muestra la de lixiviado del tanquero de transporte en el centro de acopio	60
<b>Anexo 3:</b> Materiales usados en la experimentación _____	60
<b>Anexo 4:</b> Proceso de sedimentación _____	61
<b>Anexo 5:</b> Resultados de los ensayos realizados emitidos por parte del laboratorio CIITT ____	61

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, el constante desarrollo y avance urbano han ocasionado que la producción de residuos sólidos se incremente día a día, agravando los problemas ambientales por contaminación y formando pasivos ambientales cada vez más alarmantes. El mal manejo o aplicación de malas prácticas en los desechos, se traducen en impactos negativos en la salud y la calidad de vida de los ecosistemas, la ecología y los organismos vivos (Segura et al., 2020).

En el Ecuador este problema es cada vez más evidente desde el año 2018. En nuestro país, se generaba aproximadamente de 129000 toneladas de residuos sólidos cada día, en donde solo el 35% llega a los rellenos sanitarios, mientras que el 65% restante se distribuye de la siguiente manera: 23,3 % llega a celdas emergentes, escombreras o depósitos controlados mientras que el 41,7% va a basurales de cielo abierto, arroyos y ríos. Del total de la generación de residuos, los orgánicos representan el 57% y los inorgánicos el 43% (Solíz, Durango, Solano, & Yépez, 2020).

Los rellenos sanitarios son el tipo de instalaciones más utilizadas y comunes en todo el mundo al momento de tratar residuos. Se empieza con la selección de un sitio adecuado y apto para depositar los residuos sólidos generados, de esta manera evitando la dispersión de los mismos (Solíz et al., 2020). En la ciudad de Cuenca provincia del Azuay, se encuentra el relleno sanitario Pichacay que empezó sus operaciones desde octubre del 2001, está situado en la parroquia Santa Ana y recibe diariamente 430 toneladas de residuos sólidos (Barragán, Arias, & Terrados, 2016). Fue diseñado para recolectar los desechos sólidos generados en la ciudad de Cuenca y de poblaciones cercanas dentro de la zona austral del país. La desintegración natural que sufren los residuos origina un líquido de color negruzco y olor desagradable llamado lixiviado (Conto & Tipan, 2018).

Una de las problemáticas ambientales de mayor impacto aparte de la emisión de gases de efecto invernadero que representa un relleno sanitario, es la contaminación de cuerpos de agua con estos líquidos cuando son vertidos directamente a los cuerpos de agua y no han recibido ningún tratamiento previo a su descarga, pues estos contienen una alta concentración de contaminantes, entre ellos nitrógeno amoniacal, mismo que, junto con las variaciones de pH asociadas a la edad del lixiviado genera un efecto tóxico del recurso hídrico y suelo lo que conlleva una pérdida de calidad ecosistémica por eutrofización que finalmente afecta a microorganismos, flora y fauna acuática (Roldan, 2018). Es por ello que su vertido directo en sistemas acuáticos se traduce en un enorme riesgo de contaminación ambiental, que incluso puede llegar a contaminar aguas subterráneas (Roldan, 2018) y se debe tener en cuenta que el agua es un recurso importante dentro de las dinámicas sociales, económicas y ambientales (Gonzalez & Taipe, 2020).

Se han desarrollado una gran variedad de alternativas en donde se destacan los procesos biológicos. Existe un sin número de antecedentes de pruebas de tratamiento que van desde experimentaciones de laboratorio hasta experimentaciones a escala real, y según los datos reportados los valores de residencia hidráulica que van de los 2 días hasta los 20 días, alcanzaron un 70% de remoción de metales (Boyle & Ham, 1974).

Con el fin de garantizar una salud ambiental óptima, es de gran importancia reducir o eliminar el nitrógeno presente en los lixiviados con el fin de conseguir que se transformen en compuestos inocuos para el medio y para los seres humanos. En los procesos de tratamiento convencionales es posible degradar el amonio, los nitritos y los nitratos presentes en los lixiviados obteniendo nitrógeno atmosférico, esto haciendo uso de tratamientos aerobios como lodos activados, seguidos de tratamiento anaerobios, como filtros anaerobios de flujo ascendente, pero la combinación de dichos procesos tiene numerosos inconvenientes técnicos y económicos y la alta generación de lodos (Roldan, 2018).

En su estudio titulado Tratamiento biológico de lixiviados de rellenos sanitarios, (Alvarez & Suarez, 2006), señalaron que las características de un lixiviado que proviene de un relleno van a depender de un sin número de factores tales como: diseño y operación del relleno sanitario, edad del relleno, composición de la basura, solubilidad de los residuos, procesos microbiológicos y de transformación química, balance de agua e interacciones de los lixiviados con el medio ambiente.

En el contexto mencionado, el objetivo de esta investigación es evaluar a nivel de laboratorio la eficacia de reducción de nitrógeno y compuestos nitrogenados en lixiviados que proceden del relleno sanitario Pichacay mediante la utilización de un reactor biológico aerobio anóxico (sin oxígeno). Para ello, se realizó un análisis y evaluación experimental de laboratorio con el fin de eliminar los nitritos, nitratos y los compuestos de nitrógeno que puedan estar presentes en el lixiviado.

Los reactores que se implementaron son de tipo discontinuos secuenciales, conocidos por siglas como SBR, constituyen una tecnología versátil y de fácil adaptación, usados hoy en día para tratar aguas residuales y lixiviados, por lo que continúan obteniendo importancia al momento de eliminar contaminantes, además de los alentadores resultados previos que se han obtenido en la eliminación biológica de nutrientes (Muñoz & Ramos, 2014). Los reactores se diseñaron para realizar pruebas y ensayos utilizando muestras reales de lixiviados. Si los resultados de la experimentación son satisfactorios en el reactor a escala de laboratorio, es posible realizarlos a escala real.

Sabiendo que existe una cantidad de generación considerable de lixiviados es importante el estudio de nuevas alternativas, tecnologías y técnicas de tratamiento que arrojen resultados positivos. Es por ello que, tomando en cuenta los beneficios y eficiencia de los SBR, para esta experimentación se aplicará este tratamiento, permitiendo una estandarización que puede ser replicada en lugares que no tengan un correcto manejo de lixiviados.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Evaluar a nivel de laboratorio la eficacia de reducción de nitrógeno y compuestos nitrogenados en lixiviados de relleno sanitario mediante la utilización de un reactor biológico aerobio anóxico.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analizar las características físico químicas de lixiviados de relleno sanitario mediante ensayos de laboratorio normalizados.
- Elaborar un prototipo de reactor a nivel de laboratorio para la reducción de nitrógeno y compuestos nitrogenados en lixiviados de relleno sanitario, a nivel experimental.
- Evaluar los resultados del tratamiento a nivel de laboratorio para extrapolarlos con el fin de elaborar una propuesta que contribuya con el manejo adecuado de lixiviados de relleno sanitario.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Residuos sólidos

Los residuos sólidos son los productos o subproductos restantes de actividades industriales y de consumo que ya no pueden ser utilizadas en ninguna otra actividad, que ya han acabado su vida útil y se encuentran en estado sólido. Se clasifican en: desechos sólidos urbanos y domiciliarios, y su constitución puede ser de naturaleza orgánica (materia orgánica) o de naturaleza inorgánica (maderas, papel, plásticos, vidrio, cartón, metales, textiles, cenizas, entre otros (Buendía, Calizaya, Castillo, Neira, & Vidarte, 2021).

En el Ecuador, los residuos orgánicos superan el 70% de los residuos recolectados en las principales ciudades, mientras que los materiales reciclables no superan el 10%. Estos valores son sesgados por el trabajo de recicladores informales, muy común en países tercermundistas, que retiran la mayor parte de material reciclable antes de que éste pueda llegar a la fase de recolección. Por el contrario, los residuos orgánicos apenas son reciclados, los que lo hacen son para fines de jardinería principalmente. Se estima que solo un 13% de la materia orgánica puede llegar a ser material aprovechable. La mayor parte de los desechos son trasladados hacia un relleno sanitario para su disposición final, causando enormes costos para los municipios y cuyos resultados no siempre son los esperados (Organización Panamericana de la Salud, 2010).

La falta de mercados, altos costos de operación, tecnologías inadecuadas, poca participación de los sectores formales y la escasa participación social para lograr una recogida selectiva ocasionan que la mejor opción para el manejo de desechos sólidos sean los rellenos sanitarios. A pesar del esfuerzo técnico y administrativo para que el sistema de gestión de residuos sólidos por medio de los de rellenos sanitarios sea eficiente, la realidad de los países en vías de desarrollo es que existen mayores prioridades para los gobiernos que el tratamiento de residuos. Es por esta razón, que la investigación y desarrollo de tecnologías de bajo costo, pero eficientes, son de gran importancia para mitigar los efectos negativos que estas instalaciones pueden ocasionar, entre ellas la generación de gases y lixiviados a partir de la disgregación de la materia orgánica y por el contacto de sustancias nocivas con fuentes de agua (Sáez & Urdaneta, 2014).

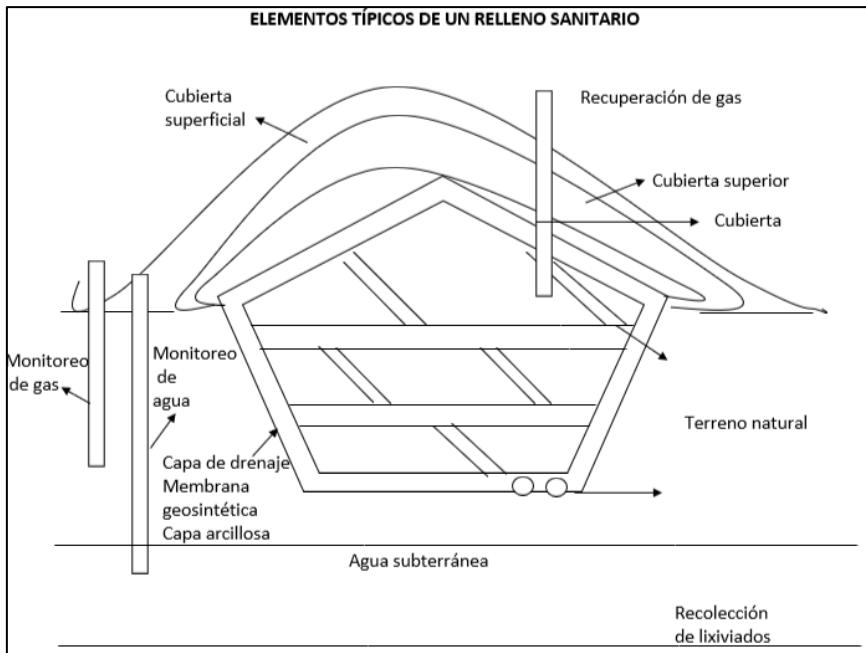
## 2.2 Relleno sanitario

De acuerdo con Corena (2008), un relleno sanitario consiste en un espacio técnicamente diseñado utilizado o destinado para la disposición final controlada de los desechos, en donde no exista ningún tipo de amenaza o peligro para la salud de los habitantes y del ambiente. En este lugar se realiza el aislamiento de los residuos sólidos (compactación y cubrimiento), control de gases y vertidos aquí generados (Claros, 2017).

Esta técnica es muy utilizada en la región debido a su bajo costo y también porque genera fuentes de trabajo como mano de obra no calificada, ambas ventajas políticamente muy aceptadas. Otras ventajas de los rellenos sanitarios son: la recuperación de zonas degradadas (canteras y terrenos improductivos), bajo consumo energético y poca inversión (Ullca, 2006).

Por otro lado, los rellenos sanitarios exigen extensas áreas aisladas, debido al mal olor que generan y la mala percepción social. Además, el suelo requiere de características geológicas especiales (permeabilidad reducida del suelo subyacente y materiales aislantes adecuados) para evitar la filtración de lixiviados que puedan alcanzar flujos de aguas subterráneas. También, existe el riesgo de contaminación por la emanación de gases y el riesgo de accidentes por la acumulación de gas metano producido por la descomposición del material orgánico (Ullca, 2006).

El diseño del relleno sanitario debe asegurar la contención del cuerpo de basura, así como el correcto drenado de líquidos y gases producidos, para su tratamiento posterior y disposición final (Figura 1) (Mias, 2022). Es necesario que el suelo se componga de una barrera geológica de baja permeabilidad como arcilla, limo, roca disgregada o terreno margoso. Se debería colocar una capa de plástico, como polietileno de alta densidad (PEHD), impermeable y resistente contra calor, desgaste y roedores (Llivichuzca, 2016). Sobre ésta, debería ir una capa de geomembrana para proteger el plástico de piedras u objetos puntiagudos. La siguiente sería una capa de drenaje, una capa de grava o piedra bola que conduzca las aguas lixiviadas a una planta de tratamiento. Debido a que los lixiviados se continúan produciendo años después del cierre del relleno sanitario, la capa de drenaje debe estar bien construida evitando la presencia de partículas finas y pudiendo contener un sistema de tuberías perforadas para asegurar una conducción rápida y eficiente de lixiviados a la planta de tratamiento (Röben, 2002).



**Figura 1:** Elementos típicos de un relleno sanitario

Fuente: (Mias, 2022)

## 2.3 Lixiviados

Los lixiviados son los fluidos resultantes de la descomposición de la fracción orgánica de los desechos sólidos de vertederos o rellenos sanitarios los cuales se mezclan con del agua superficial y el agua de lluvia percolada sobre estos (Roldan, 2018). Por lo general, en los lixiviados encontramos compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en cantidades significativas, entre ellos tenemos: amonio, sales y metales pesados por lo que se considera como un líquido de gran impacto ambiental. El volumen de lixiviado generado y su calidad dependen de las características del residuo, condiciones de la superficie y también de la disponibilidad del agua (Astorga, 2018). Además de sustancias tóxicas, los lixiviados contienen importantes grupos de patógenos que se traducen en problemas para la salud. En lixiviados que se originan de materia orgánica se encuentran géneros de hongos como *Neurospora*, *Trichoderma*, *Verticillium*, *Aspergillus*, *Cryptococcus*, *Candida*, entre otros, y bacterias como *Alcaligenes faecalis*, *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Pseudomonas*, etc. las cuales causan enfermedades en seres humanos, animales y plantas (Benavides, 2010).

### 2.3.1 Características de los lixiviados

Según Chávez (2011), las características que generalmente tienen los lixiviados son representados por los parámetros: (DQO) como la cantidad de sustancias capaces de ser oxidadas, demanda bioquímica de oxígeno (BDO5) como la cantidad de dióxigeno consumido por

microorganismos al degradar el material orgánico de una muestra líquida en 5 días a 20 °C, relación DBO5/DQO, pH y conductividad eléctrica (ver Tabla 1).

La medición de DBO5 es un proceso delicado, que requiere especial atención en factores ambientales como temperatura, pH y presencia de sustancias tóxicas. Estos parámetros pueden afectar la capacidad de los microorganismos (bacterias, hongos y plancton) de realizar la degradación del material orgánico en solución acuosa (Jobbágy et al., 2021). Como regla general, un valor elevado de DBO sugiere mayor contaminación por sustancias orgánicas, especialmente compuestos nitrogenados y fosforados (Ramos, Muñoz, & Saldarriaga, 2017). Por otro lado, la DQO mide la cantidad total de material orgánico químicamente oxidado, es decir, biodegradable y no biodegradable. En este sentido, la DQO engloba a la DBO y su valor siempre será mayor, aunque su relación (DBO5/DQO) va a depender del tipo de lixiviado y su origen. Como referencia, el valor de la DQO en aguas industriales varía entre 50 y 5000 mg/L (Dearmas & Ramirez, 2015).

Otro parámetro importante en la caracterización de lixiviados es el pH. Existen varios factores que pueden alterar el pH en el lixiviado de un relleno sanitario, entre ellos, la presencia de lluvias ácidas, origen del lixiviado (desechos industriales con metales pesados), integridad de la canalización de los lixiviados y su contacto con minerales del suelo (Rondón et al., 2016). A pesar de ello, los valores de pH obtenidos en lixiviados pueden establecer la evolución de un relleno sanitario, en la fase inicial están presentes valores ácidos (pH 3,7), pudiendo tener valores alcalinos (pH 8,5) varios años después de finalizar sus operaciones (Robles et al., 2011).

**Tabla 1:** Parámetros básicos para la caracterización de lixiviados

Parámetro	Descripción
DQO	Valor total de la reducción de materiales orgánicos, susceptibles a ser oxidados, en muestras acuosas.
DBO5	Medición del oxígeno disuelto necesario para la oxidación bioquímica de la materia orgánica por parte de los microorganismos.
DBO5/DQO	Relación entre dos parámetros para determinar la edad del lixiviado, a mayor valor, menor es la edad del lixiviado. Los valores bajos representan un lixiviado maduro y estable.
pH	Indica la edad del lixiviado, un pH alto indica que el lixiviado es maduro y un pH bajo, por presencia de ácidos orgánicos, es indicativo de un lixiviado joven.
Conductividad eléctrica	Se relaciona con la presencia de sales, en medios acuosos, que se disocian en iones los cuales transportan energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico.

Fuente: (Chávez, 2011)

### 2.3.2 Tipos de lixiviados según la edad

Keifer & Effenberger (2020) señalan que, según el tiempo transcurrido, las características de los lixiviados van a variar, teniendo la siguiente clasificación: lixiviado joven (contiene sustancias altamente contaminantes), lixiviado maduro y lixiviado viejo (baja biodegradabilidad). Para determinar el tipo de lixiviado se consideran los intervalos de valores, de los principales parámetros, detallados en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Características del lixiviado según la edad del relleno sanitario

Tipo de Lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	< 5	5-10	>10
pH	<6,5	6,5-7,5	>7,5
DBO <sub>5</sub> /DQO	>0,5	0,1-0,5	<0,1
DQO (mg/L)	>15000	5000-15000	<5000
N-NH <sub>3</sub> (mg/L)	<400	-	>400
Metales pesados (mg/L)	>2	<2	<2
Características	Altamente contaminante, presenta problemas de toxicidad.	Biológicamente degradable.	Baja biodegradabilidad, requiere tratamientos físico-químicos.

Fuente: (Astorga, 2018)

## 2.4 Contaminantes presentes en los lixiviados

Los lixiviados originados de la descomposición de compuestos orgánicos contienen altas concentraciones de: materia orgánica, ácidos orgánicos, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, sales y nitrógeno amoniacal (Guevara, 2019). Se han identificado más de 200 compuestos orgánicos como hidrocarburos cíclicos, fenoles, hidrocarburos aromáticos, furanos, bencenos, éteres cíclicos, lantanos, alcoholes y ácidos. Estos elementos son difíciles de descomponer por lo que se convierten en contaminantes de fuentes de agua y suelos. Aquellos que se degradan, de manera biológica o físico química dejan trazas de nitrógeno, fósforo, sulfuros y sílice. Además, se han encontrado sustancias conocidas por su toxicidad para los seres vivos como tolueno, etilbenceno, xilano, estireno, naftaleno, pireno, y otras (Sancha, 2013).

### 2.4.1 Compuestos nitrogenados

En la naturaleza el nitrógeno de forma orgánica como inorgánica; en la atmósfera lo encontramos mayormente en su forma diatómica (N<sub>2</sub>), representando cerca del 78% (v/v) de la atmósfera terrestre. La absorción de nitrógeno por los seres vivos para su desarrollo va a depender de las formas asimilables disponibles que este (Claros, 2017).

Existen ciertos organismos capaces de fijar nitrógeno atmosférico y convertirlo en amonio para obtener energía, dentro de este grupo se encuentran organismos fijadores en vida libre y organismos fijadores en simbiosis (Venegas, 2015). Las bacterias fijadoras en vida libre pueden ser anaerobias, como *Clostridium*, aerobias, como *Azotobacter*, y facultativas, como *Klebsiella*; pero también existen arqueobacterias, como *Methanosarcina*, bacterias fotosintéticas, como *Rhodospirillum*, y cianobacterias, como *Oscillatoria* (Ferrer & Seco, 2018). De los organismos fijadores en simbiosis, los más importantes son aquellos que forman simbiosis con leguminosas (soya, fréjol, trébol, alfalfa, etc.), pertenecen a las proteobacterias, como *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*, y se denominan rizobios. Los rizobios tienen una gran importancia agronómica, debido a que forman nódulos en los tallos de las plantas e intercambian compuestos nitrogenados, asimilables por las plantas, por carbohidratos. Otros fijadores en simbiosis son el actinomiceto *Frankia*, cianobacterias, como *Nostoc* y *Anabaena*, y  $\beta$ -proteobacterias como *Ralstonia* (Peralta & González, 2019).

En las capas de la superficie del suelo, el nitrógeno se encuentra de manera orgánica, como UREA, ácido úrico, aminas y amidas; las cuales son desechadas por el metabolismo de organismos multicelulares y también por la desintegración de restos animales y vegetales (Alzate, 2019). Con la mineralización, de manera biológica, el nitrógeno orgánico se convierte en amonio. El amonio producido es aprovechado por bacterias aerobias quimiolitótrofas, como *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus*, las cuales obtienen energía de la descomposición del amonio y amoniaco en nitritos. Los nitritos son oxidados por otro grupo de bacterias aerobias, como las *Nitrobacter*, para convertirlos en nitratos (Gerardi, 2003).

Los nitratos pueden ser convertidos en nitrógeno molecular mediante la desnitrificación, proceso realizado por bacterias anaerobias facultativas, como *Alcaligenes* y *Pseudomonas*; las cuales usan el nitrato como receptor de electrones en condiciones anóxicas (Ferrer & Seco, 2018). Estas bacterias son heterótrofas, por lo que requieren de fuentes de alimento (materia orgánica), mientras que las bacterias desnitrificantes autótrofas, como *Thiobacillus* y *Thiomicrospira* pueden oxidar compuestos inorgánicos de azufre para reducir nitratos. En ambos casos, la presencia de oxígeno y el pH menor a 6 reducen la actividad de la enzima óxido nítrico reductasa, misma que es responsable de reducir los nitratos en óxido nítrico, que luego se convierte en nitrógeno molecular (Gerardi, 2003).

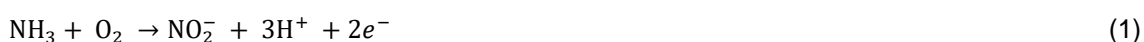
En los cuerpos de agua, el nitrógeno por lo general se encuentra de forma inorgánica: amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Chávez, 2011). Su presencia se atribuye a dos causas, la primera es de manera natural por el ciclo bioquímico del nitrógeno y la otra causa se debe a las actividades antropogénicas, siendo las causas principales las actividades agrícolas e industriales (Alzate, 2019).

Uno de los principales problemas que se generan por la contaminación por nitrógeno es la eutrofización de los ríos, lagos, arroyos y de cuerpos de agua en general, ya que ésta ocasiona una alteración en ecosistemas acuáticos dando origen a la proliferación de fitoplancton. Este suceso

causa efectos toxicológicos en los organismos que se encuentren en este hábitat (Botero et al., 2020).

#### **2.4.1.1. Nitritos**

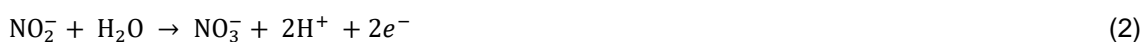
Los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) se forman como producto del metabolismo del amonio, realizado por bacterias aerobias quimiolitótrofas, mediante el proceso de nitrificación (Ferrer & Seco, 2018). Este proceso se realiza en presencia de oxígeno y con la intervención de varias enzimas y proteínas en la membrana plasmática, a través de la cadena de transporte de electrones, para generar energía (1) (Gerardi, 2003).



Los nitritos son fácilmente arrastrados desde las fuentes de contaminación por las lluvias hasta las fuentes hidrológicas, debido a su carga negativa, en donde contaminan el agua y son tóxicos para los peces. Los peces mueren con una concentración tan baja de nitritos como 0,15 mg/L (Claros, 2017). En los seres humanos, la ingesta de alimentos o bebidas contaminadas con nitritos puede causar hipoxia, debido a su interacción oxidante con la hemoglobina de la sangre, de manera que ya no puede cumplir su función de transporte de oxígeno. Además, se ha descrito como una sustancia potencialmente cancerígena (Organización Panamericana de la Salud, 1997).

#### **2.4.1.2. Nitratos**

Después del amonio, el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es catalogado como el segundo compuesto más abundante en medios acuáticos contaminados. Su toxicidad es similar a la del nitrito ya que el nitrato al ser reducido se convierte en nitrito (al interior de los organismos vivos) (Claros, 2017). Los nitratos se obtienen por el proceso de nitrificación en bacterias aerobias quimiolitótrofas, a través de la oxidación de nitritos. El proceso ocurre en la membrana plasmática, con la actividad de la enzima nitrito oxidorreductasa, y es parte de la cadena de transferencia de electrones para obtener energía (2) (Gerardi, 2003).



A diferencia de los nitritos, los nitratos pueden ser asimilados por las plantas para la síntesis de aminoácidos, por lo que se consideran un abono primario (Morales, 2007). Sin embargo, para peces y seres humanos posee una toxicidad relativamente alta, debido a su reducción en nitritos y posterior transformación en nitrosaminas dentro del organismo, se lo cataloga como potencialmente cancerígeno (Organización Panamericana de la Salud, 1997).

### **2.4.2 Metales pesados**

Los lixiviados de relleno sanitario pueden contener metales pesados disueltos o formando coloides liofílicos o liofóbicos, los cuales contaminan fuentes de agua si son vertidos sin ningún tratamiento previo. Entre los metales pesados más comúnmente encontrados en lixiviados,

dependiendo del tipo de residuos industriales que reciba el relleno sanitario, se encuentran el plomo, níquel, cromo, plata, cadmio, mercurio, selenio y bario (Gómez & Silva, 2020). Los riesgos para la salud asociados al contacto con metales pesados van desde afecciones neurológicas, hepatotoxicidad, nefrotoxicidad, enfermedades vasculares, afecciones pulmonares, hasta cáncer (Robles et al., 2011).

Aun cuando los lixiviados contengan concentraciones bajas de metales pesados, debido a que precipitan con facilidad y pueden sedimentarse en el suelo del relleno sanitario, en casos de pH ácido, éstos se mantienen en solución junto a compuestos orgánicos, lo cual representa un riesgo de toxicidad y requiere un tratamiento para su eliminación. Los metales pesados que suelen encontrarse en mayores cantidades son el mercurio, plomo, cromo, níquel y cadmio (Morales, 2007).

### **2.4.3 Compuestos inorgánicos**

Los compuestos inorgánicos que se pueden encontrar en lixiviados de relleno sanitario están formados por los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y el anión  $\text{Cl}^-$ . Estos iones tienen una alta solubilidad, por lo que casi siempre se encuentran en suspensión. El sodio proviene de residuos de comida, jabón y telas, en compuestos como sulfato de sodio, bicarbonato de sodio, fosfato de sodio, sal común, sosa cáustica, entre otros (Espinosa et al., 2010). El potasio proviene principalmente de fertilizantes constituidos por cloruro de potasio, sulfato de potasio, nitrato de potasio y potasa cáustica. Los restos de magnesio y calcio provienen de bicarbonatos y oxihidróxidos de calcio, residuos de alimentos y cementos, en compuestos como óxido de calcio, cal e hidróxido de calcio (Reina, 2011).

En los lixiviados de relleno sanitario también se pueden encontrar cloruros provenientes de disolventes colorados, desengrasantes y productos de limpieza, en compuestos como cloruro de metilo y cloruro de vinilo. Además de los elementos mencionados, es posible encontrar sílice disuelto proveniente de residuos de vidrio. La mayoría de compuestos inorgánicos se descomponen con los cambios de pH en los lixiviados, mientras otros se mantienen en suspensión. Sin embargo, la mayoría no representan gran riesgo para la salud o los ecosistemas (Reina, 2011).

## **2.5 Consecuencias de los lixiviados en el agua**

De acuerdo a (Gómez & Silva, 2020) la alteración de la composición química del agua produce distinta afectación que constituye un peligro en la salud de las personas como en los ecosistemas y responde al nivel de concentración:

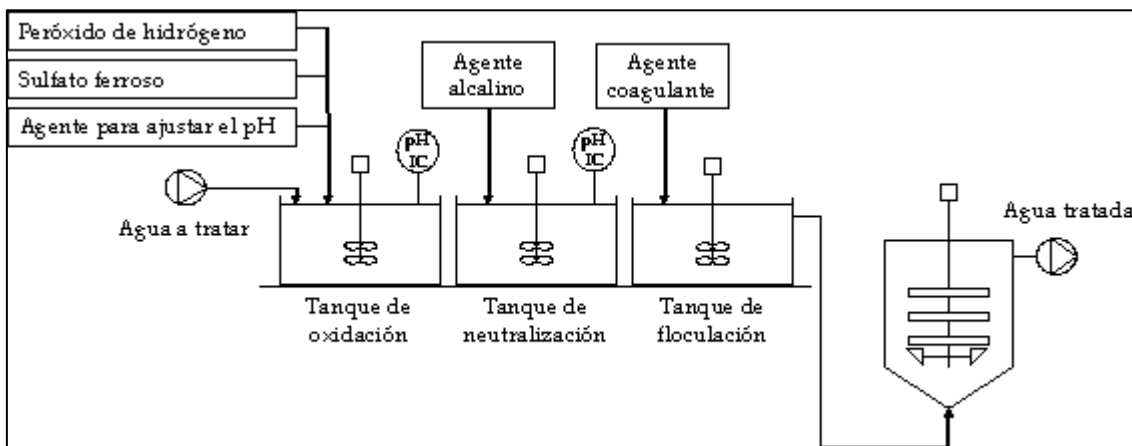
- Metales pesados: la presencia de metales en cantidades excesivas provoca que los lixiviados y aguas que hayan entrado en contacto con ellos, se vuelvan tóxicos. No son fácilmente biodegradables y pueden causar efectos sobre los microorganismos.
- Compuestos orgánicos xenobióticos.

- Macrocompuestos inorgánicos: Pueden tener constituyentes metálicos y no metálicos y provienen principalmente de productos de uso doméstico. Son altamente solubles y reactivos por lo que su concentración en los lixiviados es muy variada.
- La materia orgánica: la cantidad de oxígeno disuelto se reduce y existe un acelerado desarrollo y proliferación de algas debido a un aumento de nutrientes ( nitrógeno y fósforo) teniendo como resultado un desequilibrio en los organismos presentes en el agua, se altera la calidad por lo que estas no pueden ser consumidas (Alzate, 2019).

## 2.6 Tratamientos físico-químicos de aguas negras o residuales

Los tratamientos físico-químicos se aplican para tratar aguas residuales, siendo los métodos más utilizados son de oxidación química, adsorción y el de coagulación-floculación, los cuales para llevarse a cabo necesitan ser complementados con reactivos (Vilar, 2015).

Estos tratamientos son aplicados para remover sólidos disueltos que no puedan precipitar con facilidad y requieren de un agente catalizador. El sistema de coagulación-floculación, requiere de un coagulante metálico que puede ser policloruro de aluminio, sulfato de aluminio, cloruro férrico o sulfato férrico (Alzate, 2019). Este tratamiento es adecuado para aplicar a lixiviados con turbidez alta con la finalidad de remover la mayor cantidad de sólidos disueltos posible. Para el tratamiento de adsorción, se suele usar carbón activado granular en una columna de adsorción con flujo ascendente. En el caso de oxidación química, el método más utilizado es la oxidación Fenton (Figura 2), la cual requiere añadir hierro (II) y peróxido de hidrógeno de una forma controlada en la solución a tratar, manteniendo un pH bajo (Méndez et al., 2009).



**Figura 2.** Esquema de reactor de oxidación para tratamiento de aguas contaminadas

Fuente: (Martínez et al., 2008)

El reactor de oxidación Fenton requiere la adición de un agente coagulante para incrementar la efectividad del tratamiento, además es necesario neutralizar el pH añadiendo un agente alcalino. Los tratamientos físico químicos son eficientes para la remoción de contaminantes específicos, sin

embargo, en el tratamiento de lixiviados no se han observado resultados favorables; esto debido a que los lixivados contienen muchos contaminantes, la mayoría no se pueden especificar, y los reactivos necesarios son costosos para implementar a gran escala (Méndez et al., 2009).

## **2.7 Tratamientos biológicos**

Constituye el uso de organismos biorremediadores que utilizan los nutrientes del medio para sus procesos metabólicos reduciendo la concentración de compuestos contaminantes en los cuerpos de agua. Usualmente son empleados en la eliminación de la fracción orgánica biodegradable de los lixiviados jóvenes, esto gracias a su confiabilidad, rentabilidad y bajos costos; sin embargo, éste necesita periodos más largos de remediación y mantener un ambiente controlado de temperatura, pH y concentración de oxígeno (Gómez & Silva, 2020).

Este tipo de técnicas se utilizan conjuntamente con métodos físicos y con métodos químicos en tratamientos primarios para aguas residuales demostrando ser eficientes al momento de remover de compuestos orgánicos. El tratamiento más usado es el que combina las etapas aerobia y anaerobia para la eliminación de compuestos nitrogenados amoniacales por reducción del amonio en nitrógeno molecular (Badillo & Plata, 2019).

### **2.7.1 Proceso aerobio**

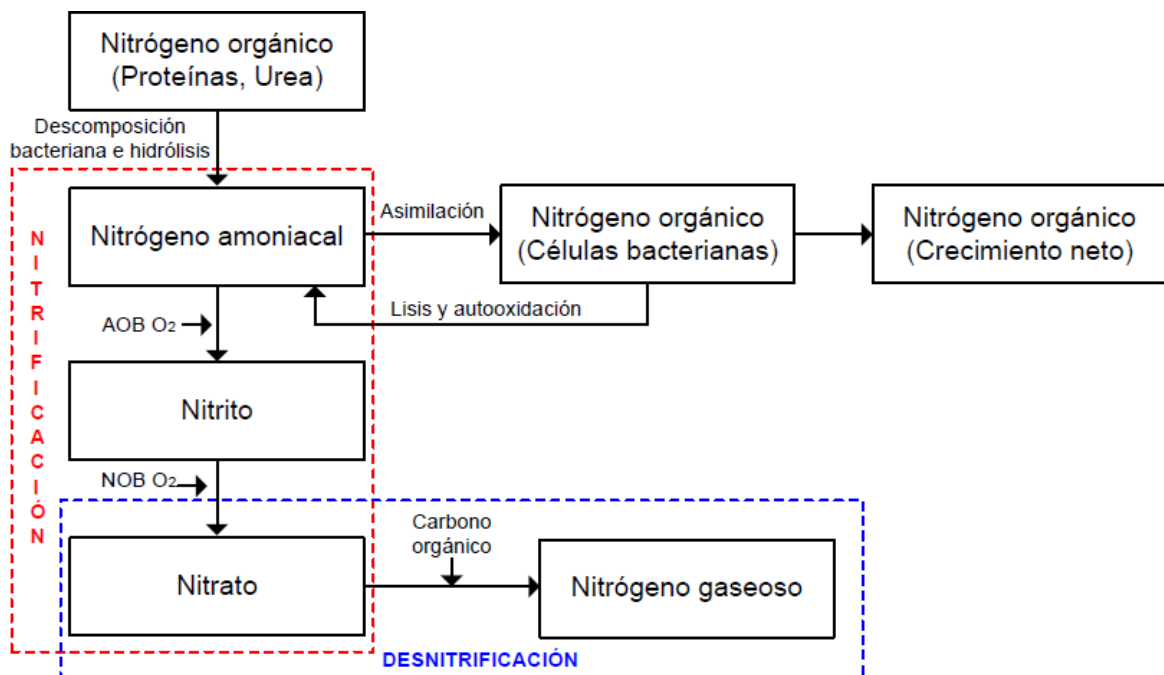
Una de las opciones es la aplicación de microorganismos ya que contribuyen a la mejora del lixiviado. Es necesario la implementación de agitadores para preservar la vida de estos organismos, controlar el pH que puede inhibir su actividad y mantener una buena saturación de oxígeno en la solución a tratar, debido a que el proceso aerobio es dependiente de oxígeno (Ferrer & Seco, 2018). Este proceso es usado para la oxidación de amonio en nitritos y nitratos, productos intermedios en transformación de amonio en nitrógeno molecular. A pesar de que el costo sea mayor al de los procesos anaerobios, la eficiencia de estos es de hasta el 90% en la eliminación de DBO (Guevara, 2019).

### **2.7.2 Proceso anóxico**

El tratamiento anóxico, al igual que el anaerobio se realiza en ausencia de oxígeno, tomando en cuenta los niveles de oxígeno disuelto con los que cuenta el agua, si este es menor a 0,5mg/L es considerado como anóxico. Este proceso se logra gracias a la presencia de organismos facultativos, mismos que pueden trabajar ya sea con la o ausencia de oxígeno (Venegas, Manga, Abad, & Ribes, 2004). Cuando hay ausencia de oxígeno, las bacterias anaerobias facultativas emplean los nitratos como aceptores de electrones en la cadena de transporte de electrones para obtener energía, de esta manera, convierten los nitratos en nitrógeno diatómico (Morales, 2014).

### 2.7.3 Eliminación de nitrógeno

Para la remoción de nitrógeno se necesita de dos conversiones (Figura 3): una aerobia en donde el amonio se convierte en nitrato (nitrificación) y otra anóxica en donde el nitrato es transformado en gas nitrógeno (desnitrificación) (Roldan, 2018). Las bacterias nitrificantes autótrofas que por obligación son aerobias son las encargadas de dar cumplimiento al proceso de nitrificación, en cambio la desnitrificación la realizan bacterias heterótrofas que son aerobias facultativas. Cuando se tienen condiciones anóxicas, estas pueden usar los nitratos como aceptores de electrones en vez de oxígeno disuelto (Muñoz & Ramos, 2014).



**Figura 3:** Transformación del nitrógeno por nitrificación y desnitrificación

Fuente: (Claros, 2017)

### 2.8 Reactor biológico

Un reactor biológico o biorreactor es un equipo diseñado para controlar las condiciones de crecimiento y actividad de ciertos microorganismos que poseen una función específica para una necesidad en particular (Alzate, 2019). Algunos ejemplos del uso de un biorreactor son la producción de levaduras, producción de enzimas como insulina, fermentación de bebidas alcohólicas, descomposición de materia orgánica y tratamiento de aguas residuales. Dependiendo de la actividad metabólica, los reactores se deben suplir con ciertos requerimientos como pH, oxígeno disuelto, material orgánico, reactivos catalizadores o inhibidores (Telwesa, 2021).

Para el tratamiento de aguas residuales se utiliza un reactor con un conjunto de microorganismos que son capaces de degradar la materia orgánica y transformar el nitrógeno amoniacal como parte de su actividad metabólica para su propio crecimiento. Por esta razón, el reactor debe contener los nutrientes necesarios para la supervivencia y proliferación de los microorganismos. En el caso de lixiviados, los microorganismos dependerán del ecosistema que se haya formado con los compuestos provenientes de los desechos sólidos, los cuales son variables y cambian con el tiempo (Venegas, 2015). Aunque los biorreactores tienen limitaciones relacionadas a la supervivencia y actividad de los microorganismos, las ventajas que poseen en relación a su precio, efectividad y diseño, permiten que estos mecanismos se conviertan en una de las mejores alternativas al momento de eliminar compuestos orgánicos de aguas residuales o contaminadas (Telwesa, 2021).

### **2.8.1 Reactor discontinuo secuencial (SBR)**

Los reactores discontinuos secuenciales permiten realizar diferentes operaciones en un mismo equipo; su funcionalidad está dada por etapas, se fundamenta en la sucesión de periodos de llenado y vaciado, pero al realizarse en el mismo equipo, su costo es reducido y favorable. Además de que es posible utilizarlos para tratar aguas residuales de diferentes fuentes de contaminación domésticas e industriales (Farrás, 2017); (Muñoz & Ramos, 2014).

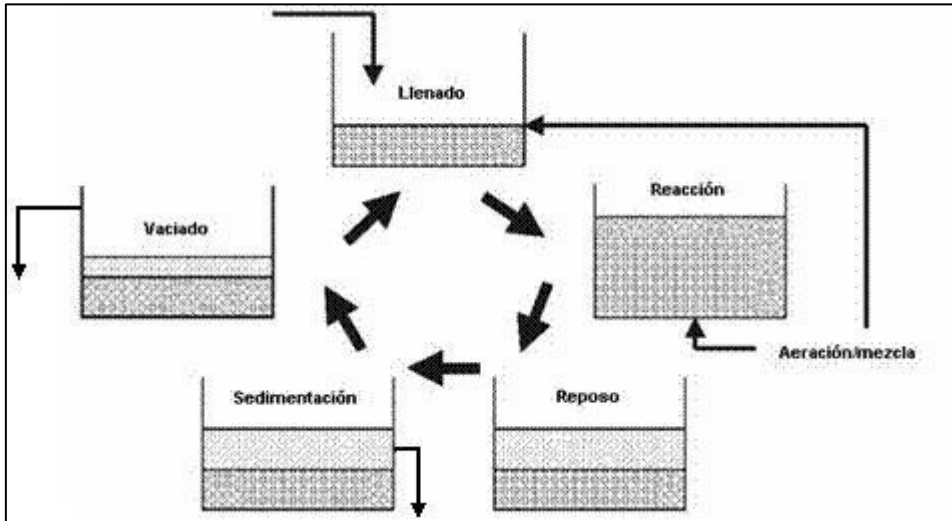
### **2.8.2 Esquema del reactor SBR**

Los reactores pueden ser de estado estático, mezclado o aireado, esto va a depender de la finalidad que tenga el tratamiento. En el llenado estático, se tiene un mínimo de energía y una alta concentración de sustrato final. El llenado aireado se lleva a cabo al principio de las reacciones aerobias y se tiene la presencia de concentraciones bajas de sustrato. Para cualquiera de los casos, el proceso de alimentación puede ser múltiple o simple (Muñoz & Ramos, 2014).

Por lo general las etapas que cumplen estos reactores son (Figura 4):

- Etapa de llenado: se introduce en el reactor el líquido contaminado asegurando los parámetros que se hayan fijado para una correcta eliminación de compuestos nitrogenados y otros compuestos orgánicos.
- Etapa de reposo: periodo de tiempo de espera para que se produzca la actividad metabólica que oxida los compuestos orgánicos y los convierte en subproductos o productos finales.
- Etapa de reacción: consta de una fase anaerobia que permite la liberación de fósforo en forma de ortofosfatos, una fase aerobia en donde se da la oxidación de material orgánico y en condiciones anóxicas aparece la desnitrificación.
- Etapa de sedimentación: regula la cantidad de sólidos disueltos al precipitarlos en el lodo del reactor. Este lodo aparece al terminar la fase de reacción o sedimentación. En condiciones de quietud, los sólidos se separan del líquido y se tiene como resultado un sobrenadante clarificado. El tiempo de asentamiento puede durar entre 0,5 y 1,5 horas y la acumulación de gas impide que el manto de sólidos flote.

- Etapa de vaciado: el producto final es el agua tratada que se descarga del reactor como sobrenadante clarificado y evitando la descarga de material flotante que puede contener sólidos disueltos, de manera que debe ser diseñado para cumplir este propósito. Además, se remueve el exceso de lodo activado en intervalos de tiempo de duración variable desde un 5 a un 30% del tiempo total.



**Figura 4.** Diagrama de funcionamiento de un reactor SBR

Fuente: (Muñoz & Ramos, 2014)

## 2.9 Eficiencia de los sistemas de tratamiento

Los sistemas actuales constan de varias etapas las cuales están en función del tipo de agua a tratar y de la calidad del efluente que se desea obtener. Para ello, se necesita un estudio minucioso el cual permita la evaluación de la eficiencia de las fases del tratamiento (Hapsari & Ritohardoyo, 2013). Para evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento, se realiza el cálculo de porcentaje de remoción de contaminantes con la concentración inicial y la concentración final estándar monitoreados durante todo el proceso (3).

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{concentración inicial} - \text{concentración final}}{\text{concentración inicial}} \times 100 \quad (3)$$

## **2.10 Marco legal**

### **2.10.1 Constitución de la república del Ecuador**

En el artículo 86 de la Constitución de la República del Ecuador, garantiza a que la población pueda vivir en un ambiente ecológicamente sano y declara que es de interés público la conservación del medio ambiente y su biodiversidad; así como también la prevención de la destrucción de los ecosistemas y la recuperación de las áreas destruidas o contaminadas. Es deber del gobierno nacional el cuidado y preservación del patrimonio genético del Ecuador (Asamblea Nacional Constituyente, 2008).

En este marco constitucional, el artículo 264 se determina que los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales serán los encargados de brindar los servicios básicos a la población como: el manejo de residuos, saneamiento de aguas negras, dotación de agua potable, alcantarillado y desarrollar actividades de saneamiento ambiental.

### **2.10.2 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)**

El Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) (2014), en su artículo 55, otorga a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales: “d) Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental y aquellos que establezca la ley”.

### **2.10.3 Código Orgánico del Ambiente (COA)**

El Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017) en su artículo 228, habla acerca de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, indicando que “la gestión de los residuos sólidos no peligrosos, en todos los niveles y formas de gobierno, estará alineada a la política nacional dictada por la Autoridad Ambiental Nacional y demás instrumentos técnicos y de gestión que se definan para el efecto”.

De igual manera el artículo 229, indica que, un adecuado manejo de los desechos ayuda a minimizar los riesgos tanto en la salud de las personas por la ejecución de actividades correspondientes a cada una de las etapas, como los impactos ambientales que se puedan ocasionar. La Autoridad Ambiental Nacional será la encargada de definir las fases para la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos.

### **2.10.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA)**

El Código Orgánico del Ambiente a través del Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA), en su artículo 565 dispone los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADM) elaboren

un plan de gestión integral municipal de residuos y desechos sólidos, en donde se consideren alternativas para el tratamiento de los residuos sólidos y sus derivados.

Así mismo, el RCOA establece en su artículo 578 la elaboración del Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos (PNGIDS), en donde participen los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, empresas públicas y privadas, estudiantes, y sociedad en general. A través del Plan Nacional se generarán estrategias y proyectos para la gestión de los residuos y desechos sólidos no peligrosos. La Autoridad Ambiental Nacional será la encargada de aprobar las técnicas o procesos que se emplearan para poder cambiar las características de los desechos mediante procesos físicos, químicos o biológicos (RCOA, 2019).

El Programa PNGIDS Ecuador, establece como objetivo, proveer de equipamientos e insumos técnicos y de esta manera lograr que la calidad de los servicios de saneamiento, tengan una buena calidad y así poder garantizar una disposición final adecuada y un tratamiento técnico de lixiviados.

### 2.10.5 Acuerdo ministerial 97

Según la Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente (TULSMA, 2015a), Libro VI, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento 2, Acuerdo Ministerial 97, establece que:

Los lixiviados de los rellenos sanitarios se ajustarán a las especificaciones acordadas, teniendo en cuenta los estándares de calidad aplicados para cuerpos receptores. Asimismo, el límite máximo permisible de la cantidad de lixiviados que ingresen a los cuerpos de agua será prescrito de acuerdo con las normas ambientales que se expidan al efecto.

En la tabla 3, se presentan los límites permisibles establecidos para la descarga de aguas residuales a un cuerpo de agua dulce, mismos que son utilizados como guía para este trabajo.

**Tabla 3:** Límites permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	250
Nitrógeno amoniacal	N	mg/L	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/L	50,0

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Potencial de hidrogeno	pH	-	5-9
Temperatura	°C	-	< 35

Fuente: Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2015

La disposición Transitoria Décima Primera del Acuerdo Ministerial No. 61 que ha sido publicada en el Registro Oficial Suplemento 316 el 4 de mayo de 2015, da a conocer que se tomara como vigente este anexo hasta la publicación de uno nuevo.

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Zona de estudio

El Complejo de Desarrollo Ambiental “Pichacay” se encuentra localizado en la comunidad del mismo nombre, de la parroquia Santa Ana, del cantón Cuenca, en la provincia del Azuay, al sur del Ecuador (Figura 5). Si se toma como referencia el núcleo urbano de la ciudad, el complejo se encuentra a 21 km de distancia, a una altitud de 2619 msnm (Conto & Tipan, 2018), en las coordenadas geográficas Latitud: 730084,1 y Longitud: 9671995,9, en DATUM WGS 84, 17S.

Su funcionamiento arrancó el 3 de septiembre del año 2001, rigiéndose a las políticas y normas que han sido emitidas para este tipo de infraestructuras sanitarias por lo que el Ministerio del ambiente le asignó una licencia ambiental en el 2002 (Inga & Romero, 2013). Además, sus características técnicas, de seguridad y salud ocupacional y ambientales han permitido que conserve un sistema integrado de gestión basado en políticas internacionales como la ISO 9001, ISO 14001 BSI OHSAS 18001 (EMAC, 2022).



Figura 5: Mapa de ubicación del relleno sanitario Pichacay.

El relleno tiene un área de 123 hectáreas y cuenta con tres fases: Fase I (terminada), Fase II y Fase III se encuentran habilitadas. La vida útil del relleno sanitario está contemplada para 30 años, dentro de la infraestructura podemos encontrar dos piscinas que se usan en la recolección de lixiviados con una capacidad de 2400 m<sup>3</sup> aproximadamente. Desde estas piscinas, el lixiviado es colocado en tanqueros para su transporte hacia los tanques de ferrocemento y tanques de tormentas en el centro de acopio de la Planta de operaciones de la EMAC, en donde se almacenan temporalmente antes de ser bombeados y transportados hacia los tanques de descarga amortiguada, para finalmente ser dirigidos hacia la planta de tratamiento de aguas residuales de ETAPA (Empresa de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cuenca) (Conto & Tipan, 2018).

## 3.2 Materiales

Para el desarrollo de esta experimentación se utilizó:

- Materiales
  - Libreta de apuntes para la toma diaria de datos
  - Botellas ambas de 1000ml
  - Mangueras de equipos de venoclisis
  - Teflón
  - Materiales de laboratorio para ensayos diarios como: vasos de precipitación, pipetas, pinzas, filtros, probetas, embudos, desecador, etc.
- Equipos
  - Espectrofotómetro
  - Balanza analítica
  - Estufa
  - Equipo de *Jart Test*
  - Multiparamétrico
- Reactivos
  - Viales para: DQO y Amonio
  - Reactivos para: nitritos, nitratos y amonio
  - Coagulante de cloruro férrico
  - Agua destilada tipo I

## 3.3 Tipo de investigación y diseño

### 3.3.1 Tipo

El tipo de investigación empleado fue descriptivo, pues se midió diferentes parámetros y se recopiló información con el fin de poder especificar y describir el comportamiento de los parámetros estudiados en las muestras del tratamiento de lixiviados.

### 3.3.2 Diseño

El diseño es empírico ya que fue una investigación basada en la experimentación, es decir se manipuló la variable estudiada y se obtuvo las respectivas evidencias, pudiendo así mediante la observación y experimentación, llegar a obtener los resultados.

## 3.4 Población y muestra

### 3.4.1 Población

La población estudiada fue conformada por todo el lixiviado contenido en el tanquero transportador (Figura 6).

### 3.4.2 Muestra

Las muestras analizadas fueron muestras simples, denominadas así ya que son tomadas de una fuente en un tiempo y espacio determinado, es decir son colectadas en un solo punto de muestreo (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2015; Reutelshofer & Guzmán, 2015). Estas fueron tomadas del tanquero que transporta los lixiviados (Figura 6), desde el relleno sanitario Pichacay, hacia los tanques de ferrocemento localizados en el centro de acopio de la planta de operaciones de la EMAC (Figura 7). El lixiviado es transportado diariamente desde las piscinas de recolección de lixiviado del relleno sanitario, por lo que en este punto las muestras no han sido alteradas por factores humanos o ambientales. Las muestras de lixiviado fueron almacenadas en un envase plástico de 20 L. de capacidad e inmediatamente fueron trasladadas al laboratorio para los análisis pertinentes.



**Figura 6:** Toma de muestras de lixiviado

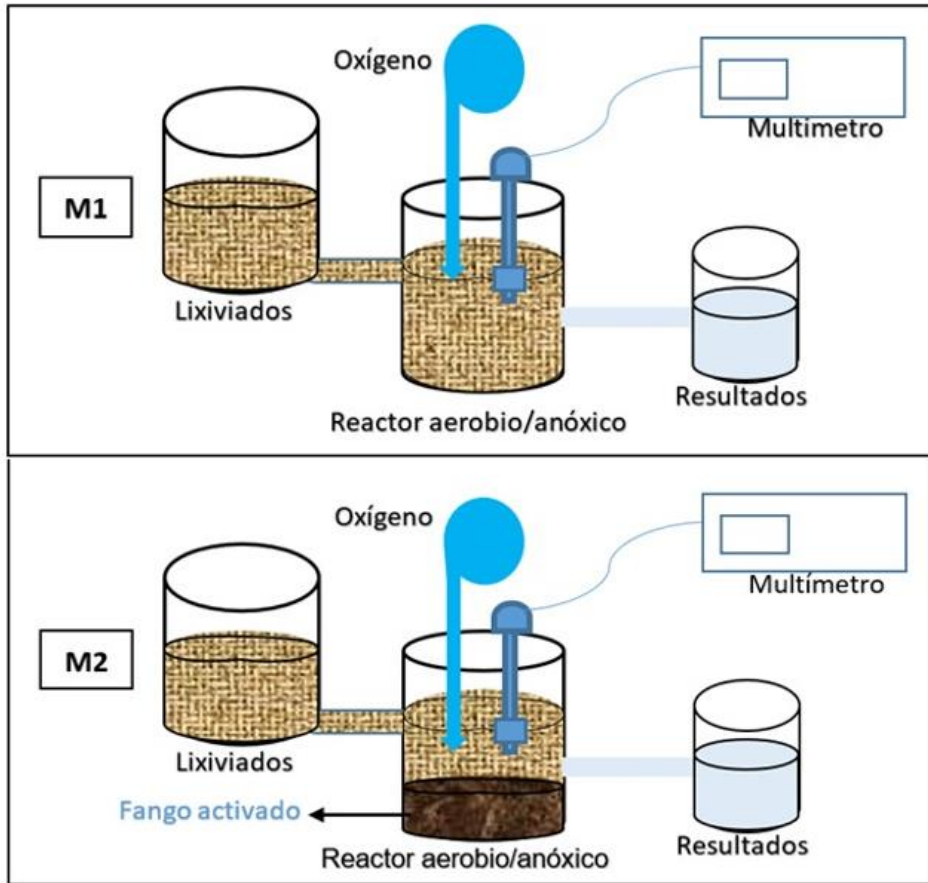


**Figura 7:** Mapa de ubicación de la Planta de operaciones EMAC EP

### 3.5 Diseño experimental

La investigación se basó en un diseño experimental de medias repetidas, con un solo tratamiento (aerobio-anóxico), dos muestras y una repetición. El diseño de medias repetidas con una repetición consiste en registrar varias mediciones por cada parámetro en el intervalo de tiempo seleccionado (cada día durante 40 días), de cada una de las muestras y en cada repetición.

En la Figura 8, se muestra el diseño experimental utilizado en la investigación, en donde se puede apreciar la esquematización de la operación de los reactores construidos. Una vez construidos los reactores, se colocó el lixiviado en el reactor, para la etapa aerobia se aportó oxígeno y para la etapa anóxica se quitó el oxígeno garantizando que no exista ingreso del mismo al reactor, esto fue controlado con la medición diaria de oxígeno en donde se constató que su presencia sea negativa.



**Figura 8:** Diseño experimental de la operación de los reactores a construir

Una vez definido el diseño experimental, se procedió a rotular las dos muestras analizadas como M1 y M2 respectivamente. Cabe recalcar que dichas muestras tuvieron el mismo origen y las mismas condiciones, pues fueron tomadas el mismo día y corresponden a la misma población.

**Tabla 4:** Descripción de las muestras de análisis

Muestras	Características
M1	Muestra de lixiviado sin fango monitoreada durante 40 días
M2	Muestra de lixiviado con fango monitoreada durante 40 días

Tanto la M1 como la M2 (Tabla 4), fueron monitoreadas bajo los mismos parámetros, es decir tiempo de experimentación y tratamientos (aerobio y anóxico), con la única diferencia que en la M2 se agregó 10 gr de lodo activado, proveniente del relleno sanitario de Azogues, para evaluar su efecto en la eficiencia del tratamiento utilizado. Se realizaron varias mediciones de cada parámetro y los valores obtenidos (Anexo 5) se analizaron en RStudio (RStudio Team, 2020) para obtener los resultados.

### 3.6 Procedimiento

La investigación tuvo tres etapas, las cuales fueron:

#### 3.6.1 Caracterización inicial del lixiviado

Antes de empezar el tratamiento de las muestras, se realizó ensayos previos a la experimentación para obtener datos de entrada. Los parámetros monitoreados fueron:

**Tabla 5:** Parámetros monitoreados para la obtención de datos de entrada

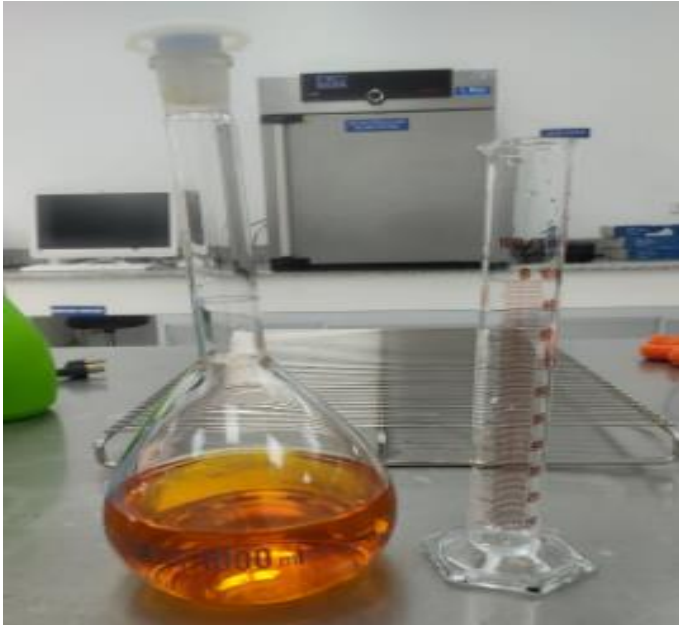
Parámetro	Unidad
DQO	mg/L
Amonio	mg/L
Solidos disueltos	ppm
Temperatura	°C
pH	-
Turbidez	NTU

#### 3.6.2 Pre-tratamiento

##### a. *Jar test*

Una vez que se caracterizó el lixiviado que no tenía ningún tratamiento previo, se procedió a realizar la prueba de *Jar Test* o prueba de jarras, tratamiento físico-químico de coagulación-floculación que busca reducir sólidos disueltos, sólidos suspendidos, partículas coloidales y otro tipo de materias no sedimentables mediante la coagulación para una posterior sedimentación por efecto de la gravedad (Marín, 1998). La dosis de coagulante varió en cada jarra con el fin de encontrar la dosis óptima para el tratamiento.

Para llevar a cabo la prueba, primero se colocó 1500 ml de lixiviado en 4 vasos de precipitación, añadiendo a cada uno de ellos 50 ml, 60 ml, 60 ml y 70 ml respectivamente de coagulante de cloruro férrico previamente preparado (Figura 9).



**Figura 9:** Coagulante de cloruro férrico

Luego se procedió a realizar una mezcla rápida a 125 rpm durante un minuto y luego una mezcla lenta a 20 rpm durante 20 minutos (Figura 10). Por último, se dejó sedimentar las muestras; a partir de los 10 minutos ya se empezó a ver material sedimentado. La dosificación óptima fue de 60 ml de coagulante en 1500 ml de lixiviado.



**Figura 10:** Prueba de Jar Test

### 3.6.3 Ensayos diarios de laboratorio

Después de la caracterización inicial y del tratamiento primario, se analizaron diariamente las siguientes variables con sus respectivos métodos:

#### a. *DQO*

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno que se requiere para la oxidación de material orgánico y demás compuestos que puedan ser oxidados (Vilar, 2015). Para determinar este parámetro se aplicó el Método 5220-literal D, Técnica: espectrofotometría.

#### **Procedimiento:**

- Para empezar, se preparó dos viales, uno que nos sirvió de blanco y el otro fue el que contenía la muestra.
- A continuación, los dos viales fueron colocados a 150 °C durante dos horas en el termoreactor para la digestión (figura 11).
- Por último, se dejó enfriar los viales a temperatura ambiente para luego proceder a su lectura en el espectrofotómetro.



**Figura 11:** Viales en el termoreactor para la digestión

#### b. *Nitratos*

Para definir el valor de los nitratos se aplicó el método 4500-NO<sub>3</sub> literal E, propuesto por American Public Health Association (1992), con la técnica: espectrofotometría.

#### **Procedimiento:**

- Primero se colocó 10 ml de muestra de lixiviado en dos celdas.
- En una de ellas colocamos un sobre de reactivo (Nitrover 5) y agitamos durante un minuto.
- Luego dejamos reposar durante 5 minutos.
- Por último, se colocó en el espectrofotómetro la celda con la muestra de lixiviado (blanco) para la calibración del equipo y luego la celda que contenía el lixiviado con el reactivo, el cual fue el que nos dio el valor de nitratos.

### **c. Amonio**

Para obtener valores de amonio se empleó el Método del Salicilato 10031 Hach planteado por HACH COMPANY (2004).

#### **Procedimiento:**

- Rotulamos dos viales, uno fue el blanco para la calibración del equipo y, el otro fue el que contenía la muestra para la medición.
- Para la preparación del blanco, se añadió con la micropipeta 0,1 ml de reactivo en el vial, y para la preparación de la muestra, de igual manera se añadió 0,1 ml de lixiviado.
- Después, se colocó un sobre de silicato y uno de cianurato en el vial con lixiviado, se agitó y se esperó 20 minutos (tiempo de reacción).
- Transcurridos los 20 minutos, se llevó los viales al espectrofotómetro para la medición respectiva.

### **d. Turbidez**

La medición de turbidez se realizó con la utilización del turbidímetro y la aplicación del Método 2130-literal B.

#### **Procedimiento:**

- Se colocó la muestra de lixiviado en la celda (20 ml de muestra).
- Luego se introdujo la celda en el turbidímetro y se obtuvo el valor de turbidez.

### **e. pH**

Para la medición del pH se utilizó el multiparamétrico, aplicando el Método 4500-H literal B.

#### **Procedimiento:**

- Colocamos 150 ml de muestra de lixiviado en un vaso de precipitación.
- Luego, se introdujo la sonda del multiparamétrico para medir el pH.
- Por último, esperamos a que se estabilice y se obtuvo el valor de pH.

#### **f. Sólidos disueltos**

Para la determinación de los sólidos disueltos presentes en el lixiviado, se utilizó el multiparamétrico, cuyas unidades vienen en parte por millón (ppm).

##### **Procedimiento:**

- Primero, se colocó 150 ml de lixiviado en un vaso de precipitación.
- A continuación, se introdujo la sonda del multiparamétrico en el vaso de precipitación.
- Por último, esperamos a que se estabilice el equipo y se obtiene el resultado.

#### **g. Sólidos totales**

Los sólidos totales son el material de residuo que se obtiene luego de la evaporación de una muestra a una temperatura entre 103 y 105 °C. Este valor incluye los sólidos disueltos totales que pueden pasar por un filtro y también los sólidos no disueltos que se encuentran en suspensión y corresponden a la materia que puede ser retenida por un filtro (Carpio et al., 2017).

Para calcular los sólidos totales se utilizó la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{(PF)-(PI)}{V} \quad (4)$$

Donde,

ST= sólidos totales

PF= peso final

PI= peso inicial

V= volumen

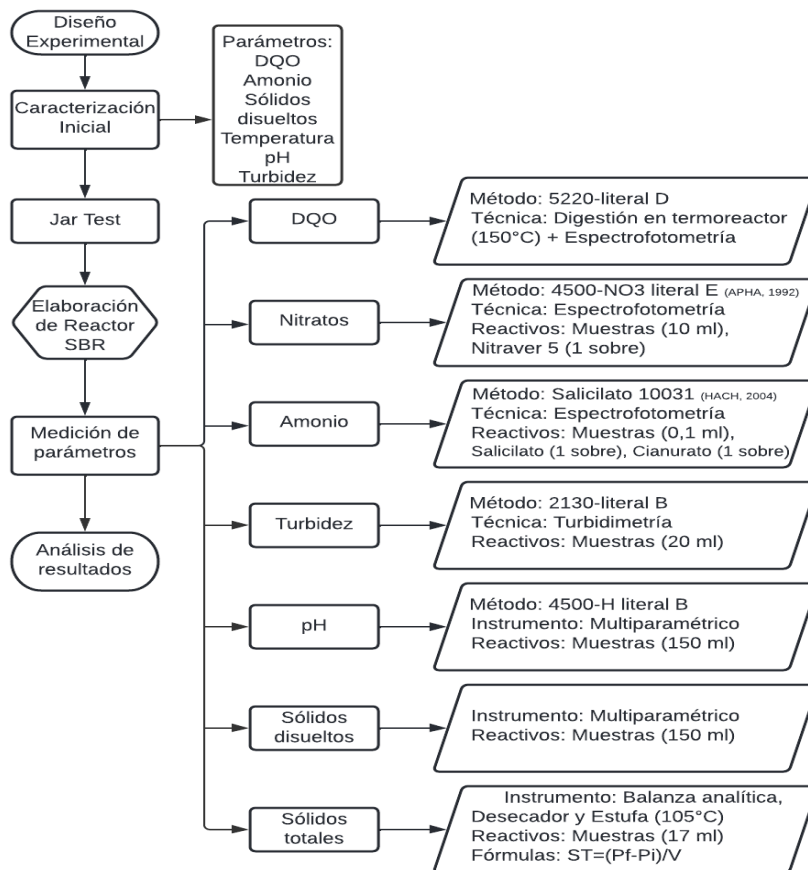
##### **Procedimiento:**

- Se usó un crisol (figura 12), mismo que fue sometido durante 15 minutos en la estufa a 105 °C y luego en el desecador durante 10 minutos para eliminar la humedad.
- Luego se pesó el crisol en la balanza analítica (de esta manera se obtuvo el peso inicial).
- Una vez que se determinó el peso inicial, se colocó 17 ml de lixiviado (volumen) en el crisol para dejarlo evaporar en la estufa durante 1 hora a 105 °C.
- Transcurrida la hora, se colocó el crisol nuevamente en el desecador durante 10 minutos.
- Finalmente, se pesó el crisol en la balanza analítica y se obtuvo el peso final.



**Figura 12:** Crisol utilizado en la determinación de sólidos totales

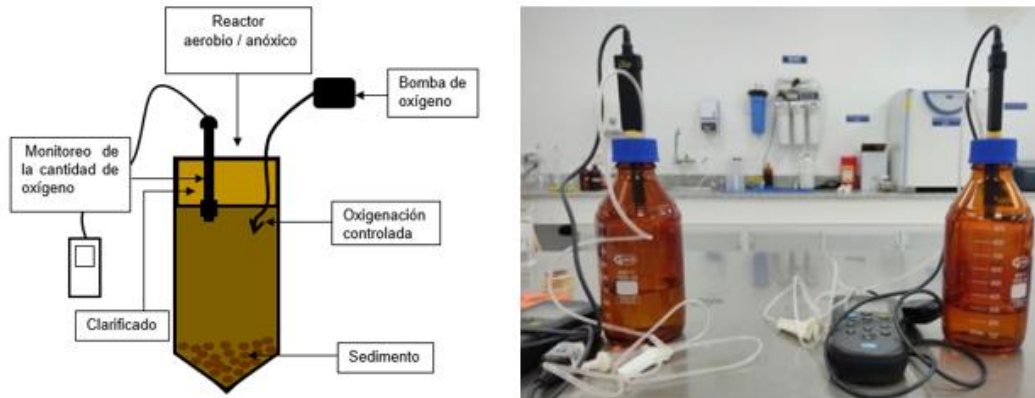
La figura 13 muestra el flujograma correspondiente al procedimiento, mismo que indica un resumen de cada uno de los parámetros monitoreados con su respectivo método aplicado en los ensayos de laboratorio.



**Figura 13:** Diagrama de flujo del procedimiento de los parámetros ensayados en el laboratorio

### 3.7 Elaboración y operación del reactor aerobio/anóxico a escala de laboratorio

El equipo de operación que se construyó, consta de una botella ámbar con capacidad de 1000 ml, una manguera de equipo de venoclipis conectada a una bomba de oxígeno para el sistema de aireación y una sonda de oxígeno para el monitoreo de la presencia (etapa aerobia) o ausencia (etapa anóxica) del mismo (Figura 14). Cabe señalar que se elaboraron dos reactores con las mismas características, empleados en la primera experimentación y en la repetición, respectivamente.



**Figura 14:** Diagrama esquematizado (izquierda) y prototipos construidos (derecha)

En la figura 15 se puede apreciar el equipo totalmente construido el cual contiene el lixiviado para arrancar con la experimentación, este fue empleado para las dos etapas: aerobia y anóxica; en la primera (aerobia) se suministró oxígeno al reactor de manera controlada y mecánica. Posteriormente, el equipo fue herméticamente sellado, de tal forma que no ingresó oxígeno para la segunda etapa (anóxica) constatando con el monitoreo diario la ausencia de oxígeno en esta etapa.



**Figura 15:** Colocación del lixiviado en el reactor construido para iniciar la experimentación

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Analizar las características físico químicas de lixiviados de relleno sanitario mediante ensayos de laboratorio normalizados

Se realizó la caracterización del lixiviado mediante el análisis de parámetros físico químicos antes de empezar con la experimentación, con el fin de obtener los valores referenciales para comparar con los valores finales luego de la aplicación del método. Los resultados de la caracterización se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6:** Caracterización del lixiviado previo a la experimentación

Parámetro	Unidades	Valor obtenido
DQO	mg/L	16780
Amonio	mg/L	2950
Solidos disueltos	Ppm	22040
Temperatura	°C	23,4
pH	-	8,07
Turbidez	NTU	602

El DQO presentó un valor de 16780 mg/L, mismo que es alto para el tipo de lixiviado, puesto que al ser catalogado como viejo (relleno sanitario mayor a 10 años) su valor debería ser menor a 5 000 mg/L. Esto se puede explicar debido a que las características de los lixiviados pueden llegar a ser versátiles y cambian debido a las condiciones de humedad y precipitación; pero además dependen del diseño y operación del vertedero y de la interacción del lixiviado en sí con el medio ambiente (Pellón et al. 2015; Qarani et al., 2010). Por lo tanto, es importante notar la estacionalidad del muestreo, como lo reportan Medina et al. (2016) quienes, al evaluar lixiviados tomados en época de lluvia y estiaje, encontraron que los valores del DQO oscilaban entre 2221,87 mg/L y 3141,52 mg/L, respectivamente. Es así, que el valor elevado de DQO encontrado en el estudio, puede deberse a la disolución de los lixiviados con las precipitaciones, por ende, disminuye la cantidad de contaminantes, dado que la muestra estuvo expuesta a temporadas lluviosas y, por lo tanto, a un recambio de agua y oxigenación que pudieron alterar el DQO con respecto al referencial.

El pH con 8,07 se encuentra en un valor neutro. Se considera que los valores de pH entre 6 a 9 no afectan significativamente al crecimiento de microorganismos, siendo el mejor rango entre 6,5 y 7,5. Este valor es importante considerar dado que puede afectar los mecanismos de remoción: a pH 4,5 la nitrificación comenzará a experimentar inhibición debido al consumo de compuestos alcalinos en dilución; a pH debajo de 5, la desnitrificación también se ve afectada. En caso de

encontrar un pH ácido, se recomienda subir el pH agregando hidróxido de sodio para evitar la inhibición metabólica de los microorganismos (Yáñez, 2018).

El amonio presentó un valor de 2950 mg/L, que de acuerdo a la tabla 2 se clasifica como un lixiviado viejo. Los lixiviados viejos tienen una concentración de amonio de 400 mg/L o superior, lo que se corrobora con la edad del relleno sanitario, pues éste se encuentra en funcionamiento desde hace 20 años (Astorga, 2018).

Se encontró un valor de 22040 ppm de sólidos disueltos, el cual se corresponde con la turbidez encontrada de 602 NTU. Los sólidos en suspensión pueden llegar a ser importantes en el tratamiento de lixiviados, debido a que pueden formarse minerales en disolución y formar precipitados o influir en la movilidad de los contaminantes, así como adquirir afinidad por los metales pesados e impedir su eliminación (Espinosa et al., 2010).

#### 4.1.1 Pre-tratamiento

- **Jar test para reducción de materia sedimentable**

Con el fin de reducir la materia sedimentable, se llevó a cabo un tratamiento primario fisicoquímico de *Jar test* o prueba de jarras. En la tabla 7, se puede observar que existe una disminución de sólidos disueltos, de 22040 mg/L a 18640 mg/L, disminuyendo en un 15,5%. Reyes (2015) menciona que la prueba de jarras es ideal y se aplica justamente para lixiviados de vertedero de más edad con la finalidad de reducir sólidos disueltos. La remoción se debe al fenómeno de coagulación- floculación, en donde se altera la estabilidad de los materiales y partículas coloidales presentes en el lixiviado. En la coagulación se desestabilizan los coloides presentes por la neutralización de sus cargas, es decir, estas son anuladas. En el proceso de floculación, se crean flóculos por la colisión y adherencia entre las partículas coaguladas, provocando el aumento del volumen y peso de las mismas, por lo que posteriormente, éstas tienden a sedimentar (Fu & Wang, 2010).

**Tabla 7:** Caracterización del lixiviado después del Jar test

Parámetro	Unidades	Valor obtenido
DQO	mg/L	19720
Amonio	mg/L	2400
Sólidos disueltos	Ppm	18640
Sólidos totales	mg/L	23294
pH	-	7,49
Turbidez	NTU	528

Esto es corroborado por Valencia et al. (2007) quienes determinaron que la coagulación-floculación-sedimentación realizada a nivel de laboratorio es una elección acertada y viable al momento de tratar lixiviados viejos. Especialmente mencionan que el pH de coagulación es

fundamental para este procedimiento, siendo más efectivos los pH ácidos. Además, la dosificación del coagulante es una variable fundamental en el proceso, para este estudio se empleó cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) en diferentes dosis, estableciéndose como óptima una dosis de 60 ml de coagulante en 1,5 L de lixiviado. Esto es de vital importancia debido a que la velocidad a la que se realice la mezcla tiene un impacto en su efectividad. Laines et al. (2008) estudió mezclas con potencial coagulante, siendo el cloruro férrico el mejor de todos, en conjunto con el sulfato de aluminio. Por lo tanto, es indispensable la caracterización inicial de los lixiviados y la validación de los protocolos para una eficiente remoción de contaminantes.

La disminución de sólidos disueltos, repercute en la turbidez, puesto que ésta se crea por los sólidos; si los sólidos disminuyen, la turbidez también disminuye. En la caracterización inicial se tenía 602 NTU y después del *Jar test* se obtuvo 528 NTU, confirmando lo mencionado anteriormente.

En cuanto al amonio, se observa que disminuyó de 2950 mg/L a 2400 mg/L, es decir se redujo en un 18,64%. Esto es beneficioso dado que la reducción del amonio es una consecuencia del proceso que a su vez aumentará la remoción de la materia orgánica en el tratamiento biológico (Schiopu & Gavrilescu, 2010).

El pH se redujo de 8,07 a 7,49 después de la prueba de jarras, es decir ligeramente más ácida, esto a pesar de que se observó disminución de amonio disuelto. Aunque el cambio es poco significativo y no influirá en el tratamiento aerobio/anóxico, es importante resaltar el efecto del coagulante sobre el pH; al precipitarse las sustancias alcalinas, que se agregan al coagulante por afinidad, quedan los compuestos orgánicos ácidos en suspensión y causan un ligero cambio en el pH de la solución (Yáñez, 2018).

En este tratamiento previo, no se obtuvo la reducción de DQO, ya que se inició con 16780 mg/L y se finalizó con 19720 mg/L, lo que se contrapone con lo presentado por Espinosa et al. (2007) donde se logró una eliminación de materia orgánica (DQO) de un 85%, reduciendo un 50% el volumen del lodo resultante en el proceso de coagulación-floculación; cabe destacar que utilizaron el ozono como post tratamiento.

Se debe considerar que el método de coagulación-floculación tiene algunos inconvenientes como emplear una elevada cantidad de reactivos, además de que los lodos producidos pueden presentar altas cantidades del reactivo, en este caso de hierro, por lo que no puede ser empleado para mejoramiento de suelos. Además, la disposición final de éstos en los rellenos o vertederos podría aumentar la presencia de los compuestos reactivos en los lixiviados (Yilmaz et al., 2010). Este tipo de tratamientos previos, como la prueba de jarras, se puede combinar con otros para mejorar los resultados obtenidos, como por ejemplo la ionización, misma que disminuye la carga contaminante en el efluente tratado (Ntampou et al., 2006).

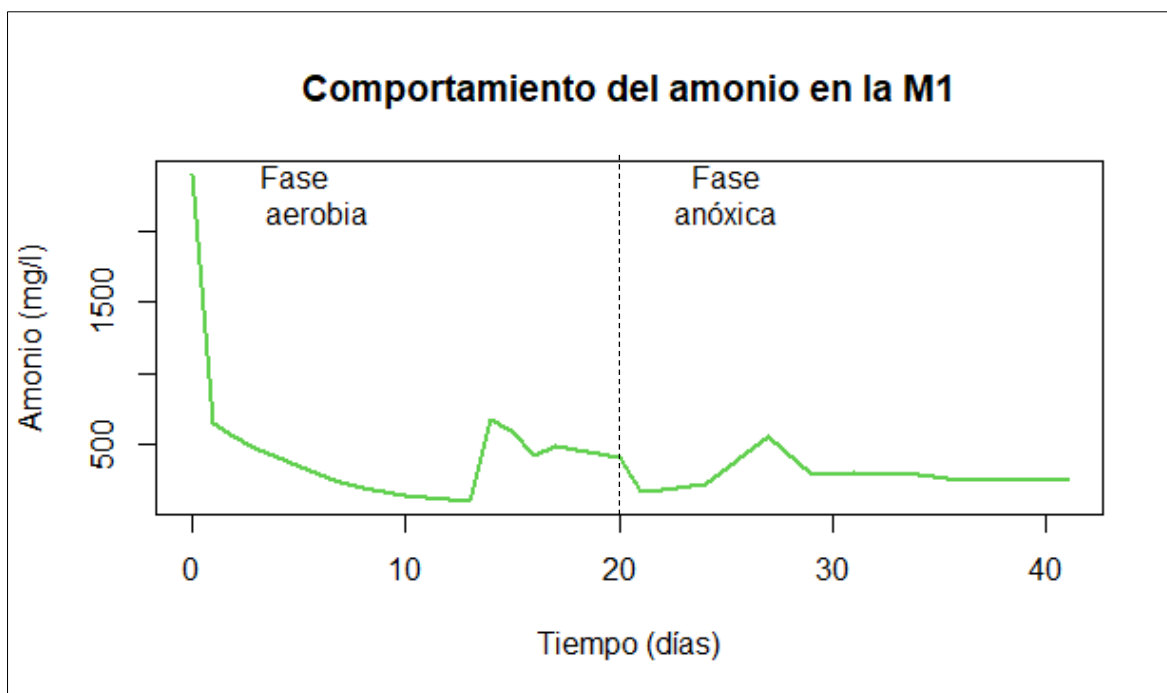
## 4.2 Elaborar un prototipo de reactor a nivel de laboratorio para la reducción de nitrógeno y compuestos nitrogenados en lixiviados de relleno sanitario, a nivel experimental

El monitoreo se llevó a cabo durante 40 días (20 días en el estado aerobio y 20 días en el estado anóxico) donde se monitorearon 3 parámetros: amonio, nitratos y DQO, tanto para la muestra 1 (M1) como para la muestra 2 (M2) a la cual se le adicionó 10 gr de lodo activado proveniente del relleno sanitario de Azogues.

### 4.2.1 Amonio

#### 4.2.1.1. Amonio en la muestra 1 sin lodo activado

La remoción de nitrógeno se produce en dos fases, una aerobia en donde el amonio se convirtió en nitrato (nitrificación) y una fase anóxica donde los nitratos se convierten en gas nitrógeno (desnitrificación). El comportamiento del amonio, que es el compuesto inicial que se convertirá en nitratos, para la muestra 1 (M1) se observa en la figura 16.

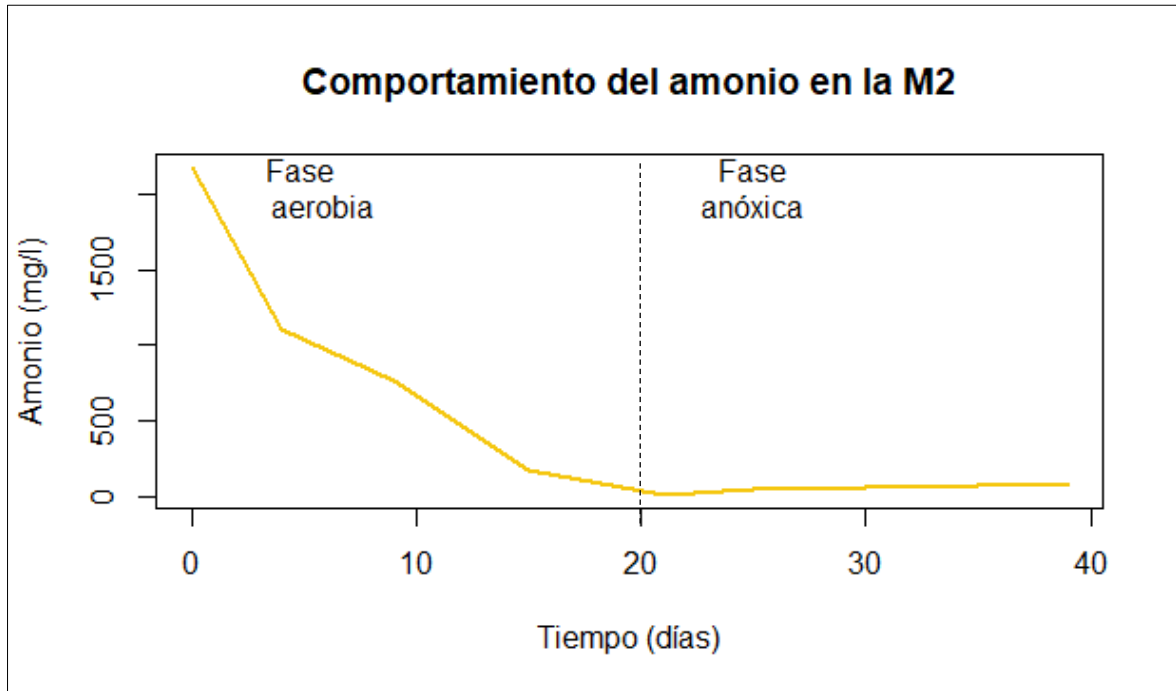


**Figura 16:** Comportamiento del amonio en la M1, sin lodo activado

Podemos observar que el valor inicial fue de 2950 mg/L y durante la fase aerobia disminuye a 406,73 mg/L, con una remoción del 86,21%. Esto es debido a las bacterias nitrificantes presentes en el lodo, que transforman el amoníaco en nitratos. Podemos observar algunos picos de aumento de amonio, pero éstos no son altos. En la fase anóxica se reduce aún más la concentración a 258,87 mg/L, aumentando la remoción a 91,22%, dada la capacidad de las bacterias de soportar condiciones de anoxia.

#### 4.2.1.2. Amonio en la muestra 2 con lodo activado

En la muestra 2 (M2) que tiene adicionado lodo activado, la reducción de amonio es directa sin ningún pico de aumento, obteniéndose al final de la fase aerobia 12,28 mg/L, con una remoción del 99,58%. En la fase anóxica observamos un ligero aumento de la concentración hasta 86 mg/L con una remoción final del 96% (Figura 17).



**Figura 17:** Comportamiento del amonio en la M2, con lodo activado

El oxígeno es un parámetro fundamental en la nitrificación, ya que es indispensable para oxidar el amoníaco a nitrato además de que actúa como aceptor de electrones, es por esto que en la fase aerobia se aportó oxígeno con el fin de garantizar que el funcionamiento de la etapa sea el correcto. Múltiples autores determinan que mejores velocidades de nitrificación se dan cuando la concentración de oxígeno disuelto es 1 mg/L (Campos et al., 2007).

Se debe considerar para ambos tratamientos que los microorganismos nitrificantes son bastante sensibles a las condiciones del ambiente, crecen lento y no toleran concentraciones bajas de oxígeno, por lo que variaciones en este elemento pudo haber alterado la eficacia en la transformación. La nitrificación, además, se da en dos pasos donde el amonio se transforma en nitrito para después oxidarse a nitrato, ambos pasos son llevados a cabo por diferentes clases de bacterias, por lo que una diferencia en su biomasa pudo también alterar el proceso; esto es especialmente importante para M1 al que no se le adicionó lodos activados, considerando que se asegura la entrada de microorganismos con su colocación. Así lo mencionan Chávez et al. (2018) quienes determinaron que se requieren condiciones específicas de pH, temperatura, concentración de amoníaco y biomasa ideal para las actividades microbiológicas.

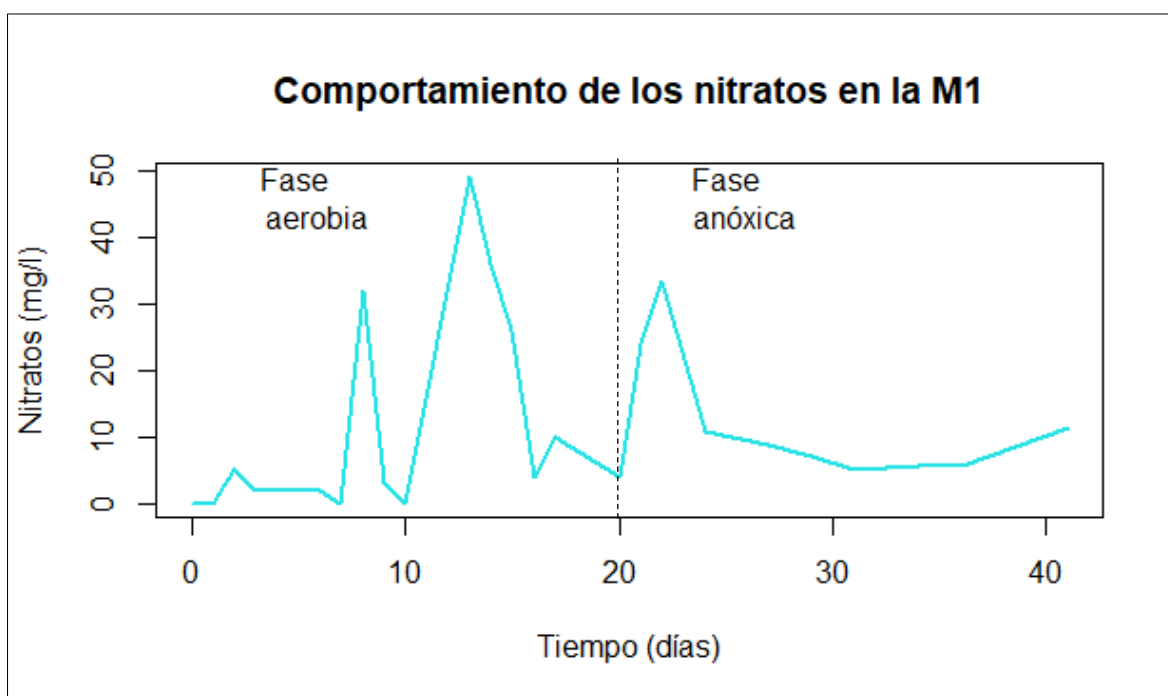
La concentración de amonio es importante porque puede afectar el crecimiento de las bacterias nitrificantes. Se ha determinado que concentraciones mayores a 20 mg/L de nitrógeno amoniacal inhibe el crecimiento, además que un exceso de este compuesto es más sensible de inhibir la nitratación (Droppelmann & Oettinger, 2009).

Para estos procesos se debe considerar el pH, dado que Tang & Chen (2015) reportan que a un pH de 6,51 se produce una inhibición del 95% del proceso de nitrificación en el tratamiento de aguas residuales utilizando un reactor con lodos activados, mientras que con un pH de 7,2 la inhibición estaba por debajo del 40%.

## 4.2.2 Nitratos

### 4.2.2.1. Nitratos en la muestra 1 sin lodo activado

En la segunda parte de remoción de nitrógeno, los nitratos durante la fase anóxica se convierten en gas nitrógeno. El comportamiento de los nitratos en las fases aerobia y anóxica para la muestra 1 (M1) se observa en la figura 18.



**Figura 18:** Comportamiento de los nitratos en la M1, sin lodo activado

En la fase aerobia, que es el momento en el que se está transformando el amoniaco a nitratos, podemos observar que éstos están hasta el día 6 en una concentración baja, no sobrepasando los 10 mg/L, pero a partir del día 7 hay un incremento significativo en cuanto a su presencia, debido a que el proceso o fase de nitrificación está en curso. Entre los días 10 y 17, existe el pico más alto, demostrando así que el proceso de nitrificación se dio de manera favorable. En la fase anóxica, por otro lado, se puede observar una disminución considerable de los nitratos, ya que tiene lugar el

proceso de desnitrificación que convierte a los nitratos en gas nitrógeno, dado que los nitratos pasan a ser aceptores de electrones, constituyendo un mecanismo alternativo de respiración. Hacia el final de la fase anóxica se obtuvo una concentración de 11,2 mg/L de N.

#### 4.2.2.2. Nitratos en la muestra 2 con lodo activado

En la muestra dos (M2), a la que se le agregó 10 gr de lodo activado, proveniente del relleno sanitario de Azogues, observamos que el comportamiento de los nitratos es más eficaz, pues su eliminación es más rápida, iniciando con una concentración de Nitratos de 82 mg/L y obteniendo al final 18,2 mg/L, con una remoción del 77,80% en la fase aerobia. En la fase anóxica esta concentración va disminuyendo satisfactoriamente y su concentración tiende a bajar conforme avanza el tiempo hasta los 9,8 mg/L (Figura 19), con una remoción final de 88%. Esto corresponde al comportamiento del amonio que disminuyó significativamente en ambas fases, produciendo que los nitratos también disminuyan.

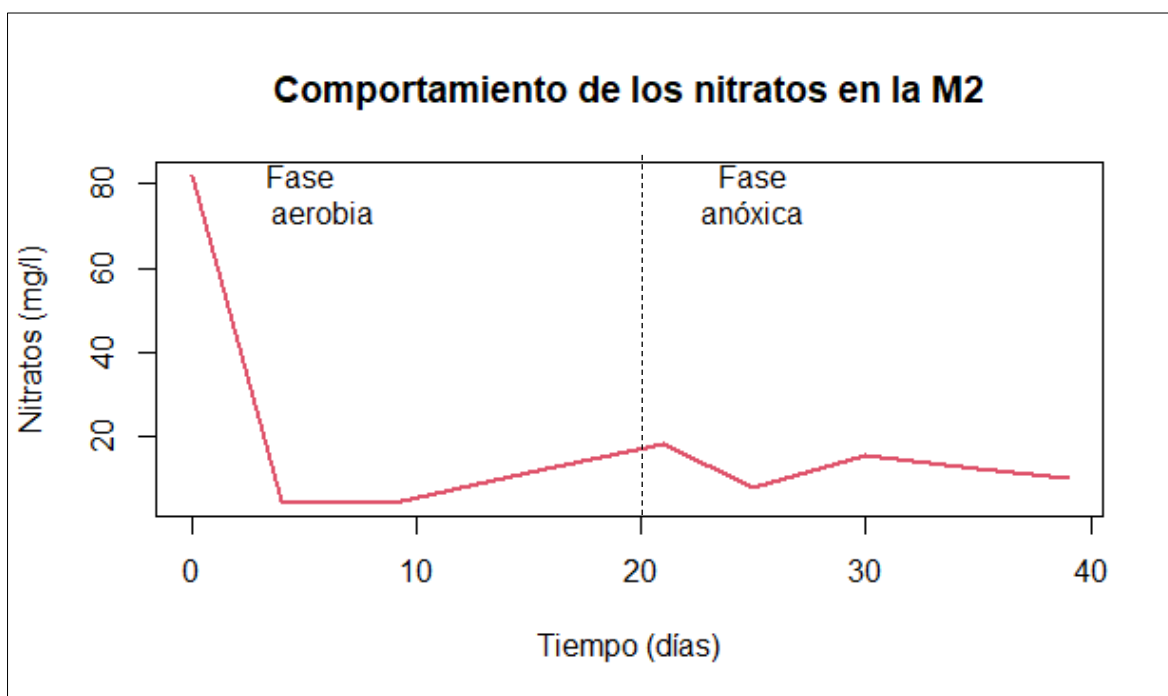


Figura 19: Comportamiento de los nitratos en la M2, con lodo activado

Como ya se mencionó, si existen concentraciones bajas de oxígeno, la acumulación de nitrito será favorable, por lo que un cambio en esta variable pudo haber ocasionado un acaparamiento de nitritos y su inhibición para transformarse en nitratos, que podría explicar el comportamiento en M1. Así, Canziani et al., (2006), con una concentración de 0,5 mg/L de oxígeno disuelto en un reactor de membrana logró inhibir la nitratación. Para este tratamiento se puede considerar que al tener una concentración más alta de amonio al compararla con M2 se pudo inhibir en cierto grado la nitrificación, además de que las bacterias heterótrofas que usan este compuesto terminan siendo menos sensible para su transformación. La desventaja que más resalta en este método, es la cantidad alta de oxígeno disuelto que se necesita para trabajar, de esta manera el nitrógeno no

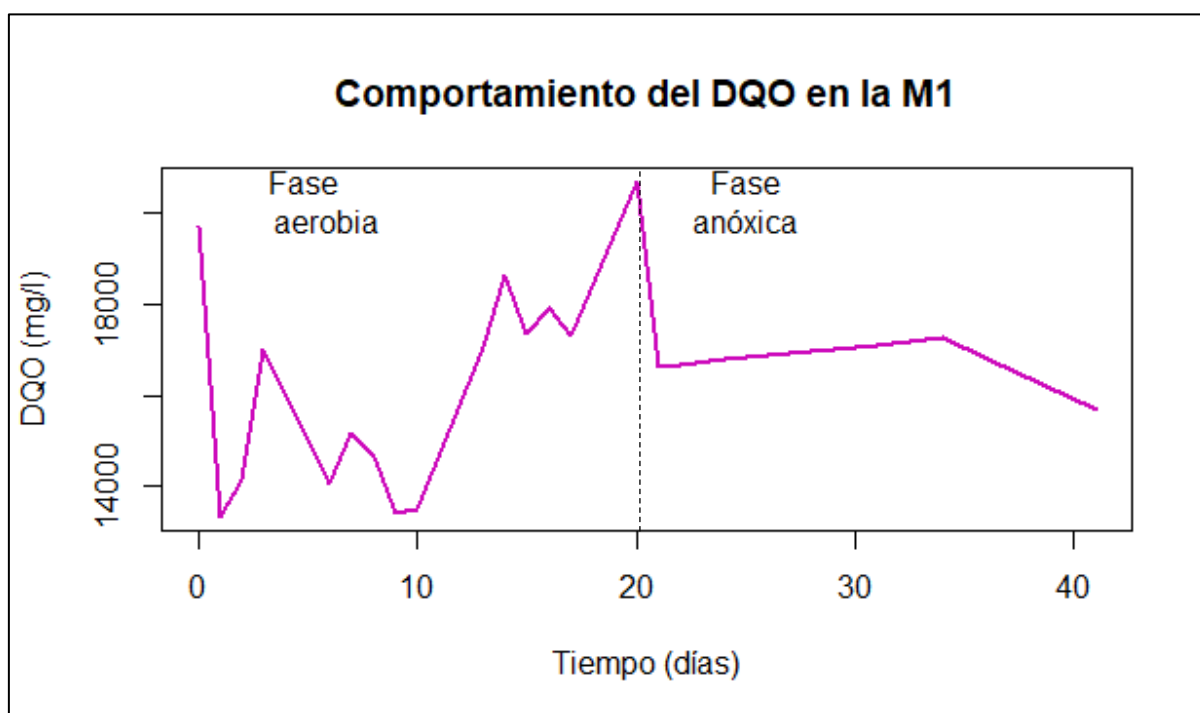
compite con el oxígeno en la respiración de las bacterias facultativas, permitiendo mantener altas tasas de nitrificación en la fase aerobia (Chávez, 2018).

El comportamiento observado, tanto en el amonio como en los nitratos en ambos tratamientos, se debe a que la nitrificación y desnitrificación se da de manera simultánea durante la fase aeróbica que logra inicialmente la reducción del nitrato, esto debido a que las bacterias desnitrificantes son anaerobias facultativas (Chávez, 2018). También, la temperatura tiene un papel fundamental para el correcto funcionamiento biológico de las bacterias, especialmente en la fase anaerobia, así lo mencionan Maldonado et al., (2017) quienes, al tratar lixiviado en filtros anaerobios en dos fases con varias temperaturas, demostraron que la remoción de 72,86% de DQO se realizó a 34°C. Esta variable deber ser considerada en experimentos posteriores.

### 4.2.3 DQO

#### 4.2.3.1. DQO en la muestra 1 sin lodo activado

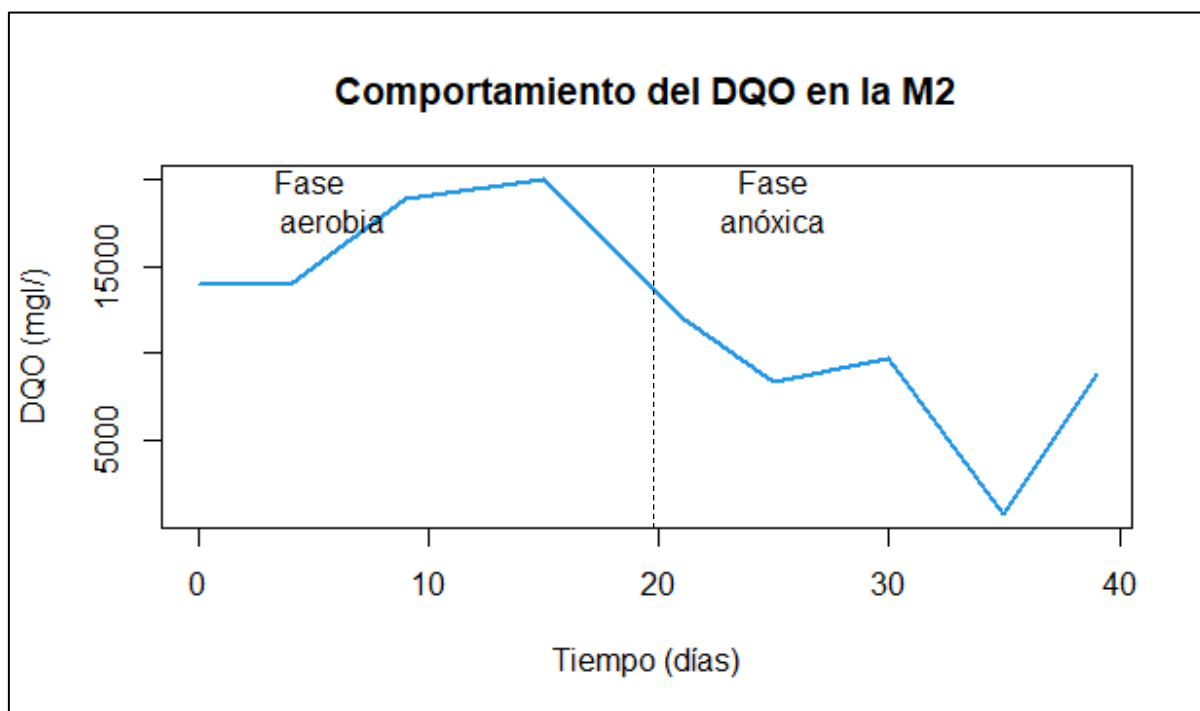
El DQO se considera como el valor total de la reducción de materiales presentes en muestras acuosas, siendo una forma de medir la efectividad del proceso de tratamiento de lixiviados. En la Figura 20, podemos observar que en M1 el valor de DQO que inició con 19720 mg/L disminuyó hasta menos de 13520 mg/L en el día 10, para posteriormente tener un alza sobre el valor inicial, obteniéndose al final de la fase aerobia 20700 mg/L. En la fase anóxica, por otro lado, tenemos una disminución de nuevo hasta los 15680 mg/L después de los 40 días de muestreo. Con una reducción final de DQO del 20,48%.



**Figura 20:** Comportamiento del DQO en M1, sin lodo activado

#### 4.2.3.2. DQO en la muestra 2 con lodo activado

En M2 el valor inicial es de 13960 mg/L y hacia el final de la fase aerobia se mantiene con 12050 mg/L, para posteriormente en la fase anóxica reducirse hasta 8820 mg/L, con una reducción del 36,81% (Figura 21).

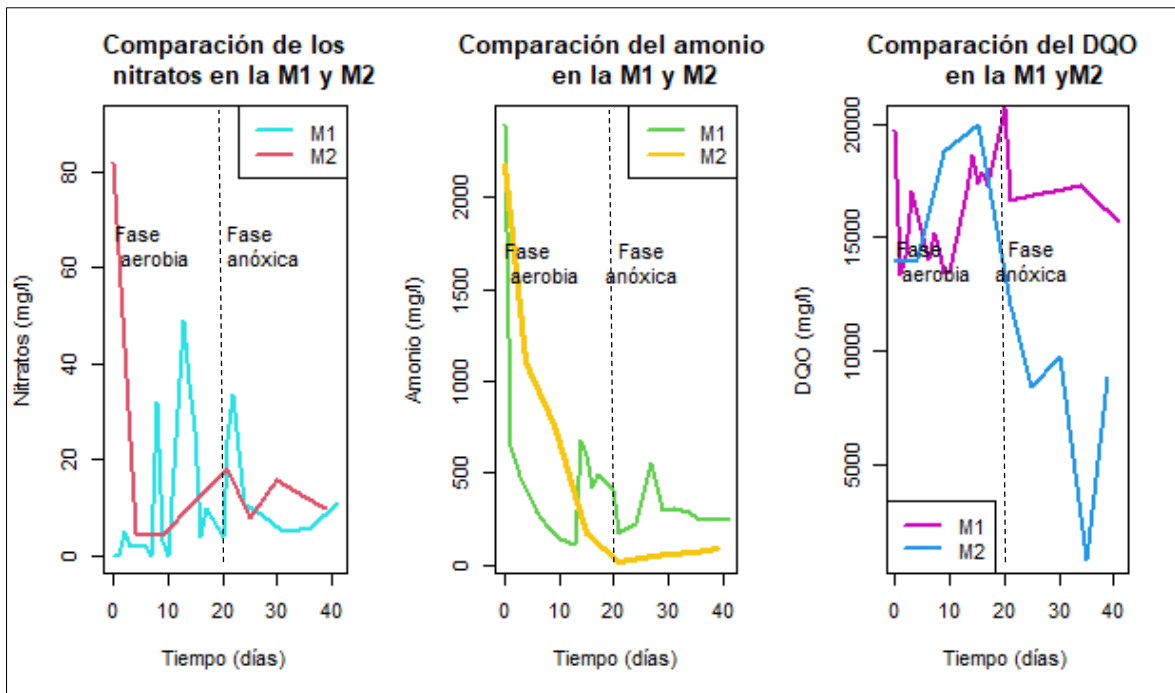


**Figura 21:** Comportamiento del DQO en M2, con lodos activados

El DQO es el parámetro más crítico en el tratamiento de lixiviados, sin embargo, no se conoce totalmente el aporte de cada componente del lixiviado al valor total debido a la variedad de fuentes que puede tener desde el relleno sanitario. La remoción de DQO se puede inhibir debido al nitrógeno amoniacal, así como determina Li y Zhao (2001), ellos demuestran que la remoción de DQO en lixiviados trabajando con fangos activados, empobrece en un 8% cuando se aumenta la concentración de  $N-NH_4$  desde 0,19 a 143 mg/L dentro del reactor.

#### 4.2.4 Comparación

Al realizar una comparación de ambos sistemas M1 y M2 con lodos activados (Figura 22) se observó que la reducción de amonio en ambos tratamientos inicia con cantidades similares sobre los 2000 mg/L, llegando en M1 a 258,87 mg/L y en M2 a 86 mg/L, con una remoción del 89,21% y 96%, respectivamente.



**Figura 22:** Comparación entre M1 y M2 para los parámetros de nitratos, amonio y DQO.

Al analizar la transformación del nitrógeno hacia nitratos es bastante similar, llegando a una remoción a menos de 12 mg/L; sin embargo, se debe considerar que en M2 se inicia con 80mg/L por lo que existe una remoción del 88%, mientras que en M1 un ligero aumento respecto al inicio de 11,2 mg/L.

En el parámetro que se encontró mayor diferencia entre ambas muestras fue el DQO, teniendo una mayor remoción en M2 que inicia con un valor de 13960 mg/L y finaliza con 8820 mg/L, con una eficiencia del 36,81%. Mientras que en M1, el valor inicial fue 19720 mg/L para luego reducirse a 15680 mg/L, lo cual significa una eficiencia de remoción de DQO del 20,48%.

Como podemos observar en la Figura 22, M2 de manera general, tiene mayor eficiencia en la remoción de los parámetros estudiados, esto se puede explicar debido a que los lodos activados poseen una concentración de microorganismos que son capaces de oxidar la materia orgánica. Por lo tanto, la variable concentración de lodos activados en el lixiviado a tratar es fundamental. Si bien no se analizó la adición de lodos activados a diferentes concentraciones, los 10 g utilizados parecen tener una excelente eficiencia (Flórez & Pérez, 2019).

Cabe señalar que, además de que no se agregó lodos activados a M1, la aireación y agitación pudieron haber impedido una adecuada actividad bacteriana o no favorecieron su crecimiento. (Chávez et al., 2018), indica que en un reactor biológico discontinuo secuencial (SBR) con fango activado, logro una disminución de un 95% de DBO cuando combinó aguas residuales con lixiviados, y hasta un 90% de DQO en fangos activados con 10 días de retención, ya que los lodos activados

permiten la eliminación de contaminantes debido a la flexibilidad de operación, considerando que los lixiviados tienen una alta variabilidad en calidad y cantidad (Chávez et al., 2018).

Por su parte (Alzate, 2019), indica que al suministrar una carga másica de 440 mg (L día) con concentración de OD  $\leq$  2 mg O<sub>2</sub>/L y pH = 7, existe una buena actividad nitrificante, representando una remoción de hasta el 99%.

Al analizar el tipo de reactor estudiado, los SBR (reactores discontinuos secuenciales), en los procesos de nitrificación y desnitrificación en conjunto, permiten un ahorro de energía al utilizar los nitratos como aceptores de electrones en vez del oxígeno (Ferrer & Seco, 2018). Además, Muñoz & Ramos (2014) mencionan que la eficiencia en la eliminación de nitrógeno por desnitrificación, mejora notablemente si se agrega un ciclo anóxico después de un ciclo de aireación; es importante recalcar que el autor menciona una alternancia entre estos períodos para mejorar su aplicación.

Los tratamientos aerobios permiten reducir altas cargas orgánicas y a su vez permiten la sedimentación de los metales pesados en el lodo, estos al no estar en grandes concentraciones no representarían un riesgo toxicológico para las bacterias encargadas de la remoción de materia orgánica. Sin embargo, estos tratamientos tienden a requerir una gran cantidad de energía por la necesidad de suplementar oxígeno, además de generar grandes cantidades de lodo que posteriormente deben ser estabilizados y pueden ser afectados por las variaciones en la carga de contaminantes. Por el contrario, los sistemas anaerobios no requieren suministro de energía y permiten obtener y almacenar biogás; asimismo, se considera que estos sistemas pueden soportar las fluctuaciones de carga de contaminantes (Li et al., 2010). Dado estas ventajas y desventajas, se debe considerar la mejor combinación de técnicas que permitan la mayor eficiencia de remoción, tanto de los compuestos de nitrógeno como de la materia orgánica. Además de enriquecer la concentración microbiana del reactor con lodos activados, también es factible realizar cambios en varios parámetros como temperatura, pH y concentración de oxígeno, de tal manera que se pueda maximizar la actividad microbiana para incrementar la reducción de compuestos nitrogenados (Yáñez, 2018). Conjuntamente, se podría combinar esta metodología con el uso de técnicas de depuración fisicoquímicas como oxidación con catalizadores, electrodiálisis, evaporación forzada; uso de membranas con ósmosis inversa, micro y nanofiltración; recirculación, aireación y otras, para mejorar la eliminación de contaminantes en los lixiviados (Zafra & Romero, 2019).

Los valores obtenidos de DQO (15680 mg/L en la M1 y 8820 mg/L en la M2) y nitrógeno amoniacal (258,87 mg/L en la M1 y 86 mg/L en la M2) no cumplen con la normativa vigente para su descarga, 250 y 30 mg/L respectivamente, por lo que sería necesario implementar más ciclos en el reactor u optar por otras técnicas que ayuden a la remoción del mismo.

### **4.3 Evaluar los resultados del tratamiento a nivel de laboratorio para extrapolarlos con el fin de elaborar una propuesta que contribuya con el manejo adecuado de lixiviados de relleno sanitario.**

#### **4.3.1 Propuesta para el tratamiento de lixiviados viejos de relleno sanitario mediante la utilización de un reactor aerobio/anóxico.**

##### **4.3.1.1 Introducción**

La presente propuesta presenta una alternativa para el tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, aplicando métodos biológicos para la eliminación de contaminantes, en este caso la eliminación de nitrógeno y sus derivados. Los tratamientos convencionales representan costos altos para el tratamiento de aguas residuales, por lo que la aplicación de la tecnología de los reactores SBR, representa una excelente oportunidad de innovación debido a su fácil automatización y a su flexibilidad en la operación. También tengamos en cuenta que, en los últimos años, la aplicación de estos sistemas ha demostrado gran eficiencia en la eliminación biológica de contaminantes.

Esta propuesta está basada en la experimentación llevada a cabo nivel de laboratorio, la cual consistió en la elaboración de un reactor aerobio/anóxico para la eliminación biológica de nitrógeno y compuestos nitrogenados que se encuentran en el lixiviado generado en el Relleno Sanitario Pichacay, perteneciente a la ciudad de Cuenca.

##### **4.3.1.2 Objetivos**

###### **Objetivo General**

- Contribuir con una propuesta para el tratamiento de lixiviados con la aplicación de un método biológico.

###### **Objetivo Específico**

- Presentar una alternativa para el manejo adecuado y eficaz del lixiviado en la eliminación de contaminantes.

### 4.3.1.3 Generalidades

Los lixiviados son uno de los principales efluentes de los rellenos sanitarios, se originan principalmente por la desintegración de los residuos, y aumenta de acuerdo a la cantidad de lluvia que se precipite en la zona donde se encuentre ubicado el relleno. La cantidad de las aguas lixiviadas que se producen en un relleno sanitario depende de factores diferentes como son:

- La precipitación
- El área del relleno
- El modo de operación (relleno manual o compactado con maquinaria, sistema de compactación)
- El tipo de basura.

El cálculo del caudal de lixiviados que se produce en un relleno sanitario, se debe basar en un balance hídrico, en el que se considera: Precipitación pluvial en el área del relleno, escorrentía superficial y/o infiltración subterránea, evapotranspiración, humedad natural de los residuos, grado de compactación, capacidad de campo (capacidad del suelo y de los residuos para retener humedad). Una forma simple de realizar el cálculo del caudal es utilizando el Método SUIZO que se detalla a continuación.

La fórmula a aplicar es la siguiente:

$$Q = \frac{1}{t} \times P \times A \times K$$

En la cual:

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (l/s)

P = Precipitación media mensual (mm/mes), para el máximo mensual

A = Área superficial del relleno (m<sup>2</sup>)

t = Número de segundos en un mes (30 días)

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura.

Debido a la variabilidad que presentan este tipo de residuos se debe aplicar métodos diferenciados de acuerdo a los parámetros y etapas de madures de los mismos. En este caso se realizó el experimento con lixiviados viejos o sea mayores a diez años, por lo que se encontró una alta presencia de sólidos disueltos (lodos), amonio, nitratos, entre otros (Cevallos & Manoto, 2019).

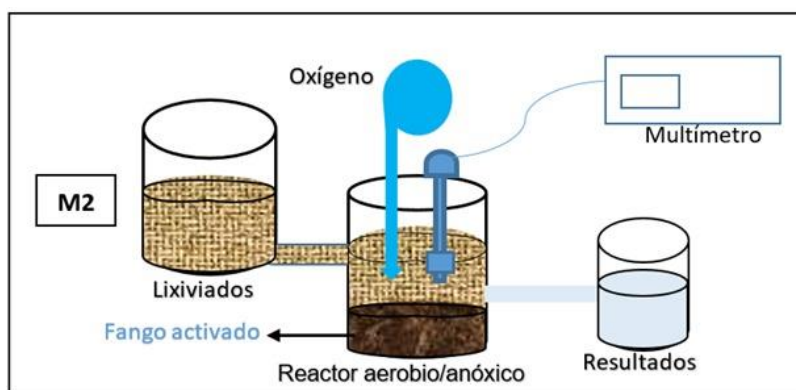
A continuación, se describen algunos de los términos utilizados:

- Proceso aerobio: proceso que se lleva a cabo con la presencia de oxígeno.

- Proceso anóxico: proceso que se lleva a cabo con la ausencia de oxígeno, pero están presentes otros aceptores de electrones (nitratos) que permiten que se lleve a cabo la desnitrificación.
- Metabolismo de microorganismos: conjunto de procesos que permiten a los microorganismos obtener energía y los nutrientes necesarios para su desarrollo y reproducción.
- Microorganismos heterótrofos: son aquellos organismos que necesitan de la materia orgánica para mantenerse y desarrollarse.
- Microorganismos autótrofos: organismos que son capaces de sintetizar la materia orgánica a partir de las sustancias minerales.
- Microorganismos facultativos: organismos capaces de desarrollarse sin ningún problema con la presencia o ausencia de oxígeno.

#### 4.3.1.4 Metodología

En los análisis realizados en el laboratorio se concluyó que el tratamiento más eficaz para este tipo de residuos es el que contiene fangos activados ya que se logró una efectividad de oxidación y eliminación de fangos del 93%. Por esta razón se utilizó el diseño de la figura 23 con el fin de poder extrapolar los resultados en futuros estudios y de esta manera poder tratar este tipo de residuo a escalas más grandes o con un mayor porcentaje de afluente.



**Figura 23:** Diseño a escala de laboratorio utilizado para el tratamiento de lixiviados

#### 4.3.1.5 Características del tratamiento a nivel de laboratorio

La tabla 8 muestra las características y cantidades utilizadas en el tratamiento de laboratorio realizado en el presente estudio.

**Tabla 8.** Insumos utilizados en el experimento

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Reactor	1000 ml (1L)
Lixiviados	1000 ml (1L)
Fangos activados	20 gr

#### 4.3.1.6 Parámetros operacionales del reactor

- Cantidad de fangos a utilizar en el reactor

Para definir la cantidad exacta de fangos a utilizar según la cantidad de litros de lixiviados a ser tratados se debe usar la siguiente fórmula.

$$\text{Fango activado} = n \times 20 \text{ gr/L}$$

Donde,

n: cantidad de lixiviados a tratar (L)

- Tiempo de residencia hidráulico (TRH)

Es el tiempo promedio que un volumen de agua residual permanece en un tanque o reactor, desde que inicia el proceso hasta que termina. El TRH define el tiempo que el líquido debe estar sometido al tratamiento (Alzate, 2019).

Para calcular el TRH, aplicamos:

$$TRH = \frac{Vr}{Qa}$$

Donde:

Vr: es el volumen de trabajo del reactor (L)

Qa: caudal del afluente

- Diseño del reactor

En el caso del reactor aerobio/anóxico se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones matemáticas para determinar sus dimensiones.

- Volumen del reactor

$$VR = Ql \times TRH$$

Donde:

VR: volumen del reactor

Ql: es el caudal medido en (m<sup>3</sup>/día)

TRH: es el tiempo de retención hidráulica

- Dimensiones del reactor

**Tabla 9:** Formulas para calcular las dimensiones del reactor

Dimensiones del reactor	Fórmulas
Altura	$h = \sqrt[3]{\frac{v}{2}}$
Largo	$a = 2h$
Profundidad	$p = h$

Donde:

v: volumen

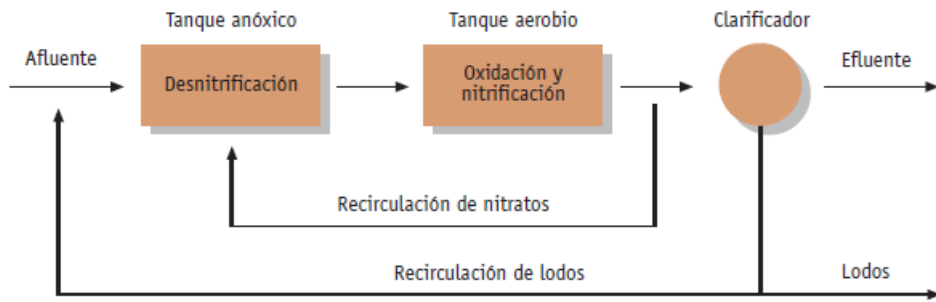
a: largo

h: altura

p: profundidad

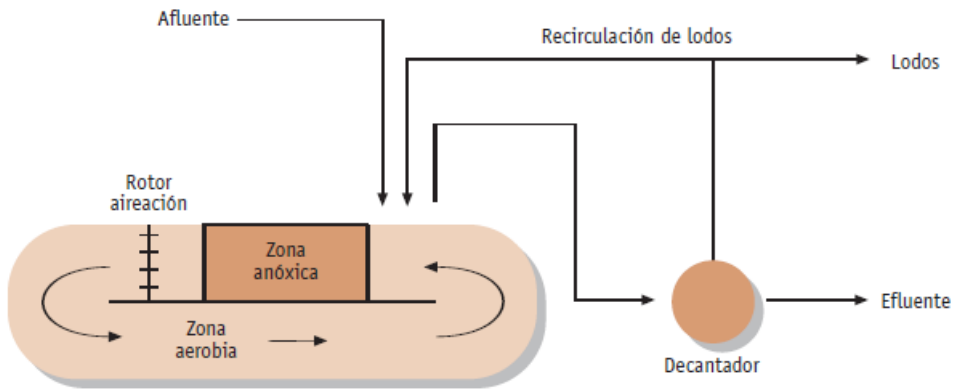
De acuerdo a lo expuesto por Fernández (2015) para aplicar los sistemas aerobios/anóxicos, la eliminación del nitrógeno en lixiviados se puede hacer de dos formas:

Primero mediante la utilización de dos reactores individuales aerobios y anóxicos de manera que los lodos y nitratos recirculen por canales o tuberías separadas como se ve en la figura 24. Este diseño presenta un costo adicional.



**Figura 24:** Primer esquema para el tratamiento aeróbico/anóxico

El segundo esquema se presenta la utilización de un sistema que usa un solo reactor pero que debe estar delimitada la parte anóxica con la aeróbica como se detalla en la figura 25.



**Figura 25:** Segundo esquema para el tratamiento aeróbico/anóxico

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación realizado podemos concluir que el lixiviado obtenido del Relleno Sanitario Pichacay presentó valores de DQO (16780 mg/L) por encima del referencial para un lixiviado viejo, mientras que el amonio (2950 mg/L) sí se encuentra dentro de los referenciales, con un pH de 8,07 y 22040 ppm de sólidos disueltos. Se considera que las condiciones ambientales, especialmente las precipitaciones pudieron alterar las características del lixiviado obtenido.

El pre-tratamiento de *Jar test* disminuyó los sólidos disueltos en un 15,5% al agregar 60 ml de cloruro férrico en 1500 ml de lixiviado, además redujo el amonio de 2950 a 2400 mg/L, es decir en un 18,64%, lo que resultó beneficioso en la remoción de materia orgánica en los procesos biológicos.

Con el prototipo de reactor SBR aerobio anóxico sin lodos activados (M1) se obtuvo una remoción de amonio del 89,21%; no se observó una remoción de nitratos, pero sí reducción de un 20,48% de DQO respecto a la caracterización inicial. Con el prototipo de reactor SBR anaerobio anóxico, con 10 gr de lodos activados (M2), se obtuvo una remoción de amonio del 96%, de nitratos del 88% y de DQO en un 36,8%, pudiendo concluir que M2 resultó más eficiente en la eliminación biológica de nitrógeno.

La eliminación biológica de nitrógeno en lixiviados del relleno sanitario Pichacay mediante un reactor de dos fases aerobio/anóxico es reproducible a gran escala, eficiente, relativamente de bajo costo y fácil de implementar. A pesar de no haber alcanzado los valores requeridos por la normativa vigente, sí se consiguió una reducción considerable de contaminantes nitrogenados en las muestras de lixiviados tratadas, 89 y 96% de reducción en las muestras M1 y M2, respectivamente. Aunque la cantidad de amonio eliminada fue alta, el valor de DQO no tuvo una reducción importante en las muestras tratadas, 20 y 37% de reducción en las muestras M1 y M2, respectivamente. Los valores de DQO obtenidos indican una alta variedad de compuestos oxidables en las muestras, además de compuestos nitrogenados, por lo que es necesario complementar el tratamiento de lixiviados con otras técnicas o tecnologías emergentes.

Del mismo modo, es importante considerar las características del lixiviado a tratar, pH, turbidez, temperatura, cantidad de oxígeno disuelto, etc.; de tal modo que puedan ser optimizados, mediante pretratamientos como el *Jar test* con un coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ), para mejorar la eficiencia del reactor SBR aerobio/anóxico.

## CAPÍTULO VI

### 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda tener en consideración la estacionalidad para el tratamiento de lixiviados debido a que puede influir en sus resultados; así mismo, es importante realizar una caracterización inicial con la finalidad de diseñar el sistema óptimo para su tratamiento.

Evaluar la aplicación de otras técnicas, como la ionización, después del tratamiento de jarras, para mejorar la remoción de sólidos disueltos, además de evaluar el pH de coagulación y la dosificación del coagulante para obtener la máxima eficiencia durante este proceso.

Controlar el suministro de oxígeno que se proporciona en la fase aerobia para determinar la mejor concentración que favorezca una rápida oxidación del amoníaco a nitrato; además, controlar los valores de amoníaco durante todas las fases por su capacidad de inhibir la nitrificación y el crecimiento de las bacterias que llevan a cabo estos procesos.

Evaluar el tiempo de retención óptima de los lixiviados en el que se obtendría la máxima remoción de compuestos nitrogenados y orgánicos.

Evaluar la cantidad de lodos activos en diferentes dosis y así determinar una dosis que brinde mayor eficiencia en el sistema de remoción.

Con el propósito de ampliar el alcance de esta investigación, es de gran importancia seguir realizando pruebas a nivel de laboratorio, mismas que ayuden a determinar la eficiencia de todo el sistema propuesto. Así también es importante realizar más de una repetición del proceso con la misma muestra y en el mismo tiempo para que de esta manera se pueda analizar y a la vez comparar el comportamiento de las mismas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, A., & Suarez, J. (2006). Tratamiento biológico de lixiviados de rellenos sanitarios. *Respuestas*, 11(1), 24–32. <https://doi.org/10.22463/0122820X.627>
- Alzate, J. C. (2019). Remoción biológica de nitrógeno por nitrificación y desnitrificación aeróbica en reactor de cargas secuenciales SBR. 1–128. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60403>
- American Public Health Association. (1992). APHA Method 4500-NO<sub>3</sub>: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 552(3), 4500. Retrieved from [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-biochemical-oxygen-demand-white-paper.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-biochemical-oxygen-demand-white-paper.pdf)
- Asamblea Nacional Constituyente, R. D. E. (2008). Constitución De La República Del Ecuador. Registro Oficial 449 de 20 Oct. 2008, 1–222. Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/09/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador.pdf>
- Astorga, C. F. (2018). Tratamiento De Lixiviados De Un Relleno Sanitario : Propuesta y evaluación de un sistema de humedales artificiales (Vol. 1).
- Badillo, L., & Plata, D. (2019). Construcción y operación de reactor SBR a escala para tratamiento de vinaza proveniente de un ingenio azucarero ( Valle del Cauca ).
- Barragán, E. A., Arias, P. D., & Terrados, J. (2016). Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: estudio de caso, Cuenca, Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 16.
- Benavides A., K. A. (2010). *Caracterización microbiológica de lixiviados de materias primas para la fabricación de un compostaje de materia rumial*. Tesis de maestría, Universidad Católica de Manizales. Recuperado el 2 de Abril de 2022, de <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/74/1/Karen%20Adriana%20Benavides.pdf>
- Botero, C., Montoya-Moreno, Y., Aguirre-Ramírez, N., Vélez-Macías, F., Hernández-Atilano, E. (2020). Vegetación acuática y semiacuática en tres rios altoandinos y su relación con la fisicoquímica del agua. *Revista Politécnica*, 16(31), 138-150. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a10>
- Boyle, W. C., & Ham, R. K. (1974). Biological Treatability of Landfill Leachate. *Revista*

(Federación de Control de La Contaminación Del Agua), 46, 1. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/25038729>

- Buendía, N., Calizaya, K., Castillo, R., Neira, E., & Vidarte, J. (2021). Propuesta metodológica para el muestreo de lixiviados en rellenos sanitarios operativos.
- Campos, J., Garrido, A., Mosquera-Corral, A., & Mendez, R. (2007). Stability of a nitrifying Activated Sludge Reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 87-92.
- Canziani, R. (2006). Effect of Oxygen Concentration on Biological Nitrification and Microbial Kinetics in a Cross- Flow Membrane Bioreactor (MBR) and Moving-Bed Biofilm Reactor (MBBR) Treating Old Landfill Leachate. *Journal of Membrane Science*.
- Carpio, T., Hernandez, A. M., & Duque, M. (2017). Sólidos Totales secados a 103 - 105°C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2-8.
- Cevallos, M., & Manoto, J. (2019). *Linea base para la propuesta tecnica del mejoramiento del sistema de tratamiento de aguas residuales del hospital basico de la parroquia Shell*.
- Chávez, A., Ramírez, T., & Casallas, N. (2018). Nitrificación en el tratamiento de lodos de lixiviados en un reactor biológico discontinuo secuencial - SBRR. *Producción + Limpia*, 75-82.
- Chávez, W. M. (2011). Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua. Méx. *Cimav*, 8-9.
- Claros, J. A. (2017). Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. *Science of the Total Environment*, 601-602, 1084-1096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.177>
- COA. Código Orgánico Del Ambiente. , Registro Oficial Suplemento 983 § (2017).
- Conto, O., & Tipan, D. (2018). Evaluación del comportamiento hidráulico de los lixiviados de la fase norte I del relleno sanitario de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/54/1/08495.pdf>
- COOTAD. (2014). Código Orgánico de organización territorial autonomía y descentralización (COOTAD). 1-188.
- Corena, M. de J. (2008). Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios.
- Dearma, D., & Ramírez Hernández, L. F. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en el tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. RIIA,

6(2), 183-196. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5628793>

Droppelmann, C., & Oettinger, M. (2009). Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario. *Información Tecnológica*.

EMAC. (2022). Relleno Sanitario. Retrieved from <https://emac.gob.ec/servicios/relleno-sanitario/>

Espinosa, M. d., López, M., Alexis, P., Robert, M., Diaz, S., González, A., . . . Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de La Habana. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(4), 313-325.

Espinosa, M., Torres, M., Pellón, A., Fernández, L., & Bataller, M. (2007). "Perspectives of ozone application as treatment alternative for leachates of municipal solid wastes in Cuba. Centro de Investigaciones del Ozono.

Farrás, Q. (2017). Diseño de un reactor biológico secuenciado ( $q$  a.r= 9000 m<sup>3</sup>/d) para reducir la producción de fangos mediante la aplicación de un desacoplador metabólico. Retrieved from [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/77405/151216\\_TFM\\_FARRAS\\_GENTO\\_QUERALT\\_1481795528107417457534161014436.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/77405/151216_TFM_FARRAS_GENTO_QUERALT_1481795528107417457534161014436.pdf?sequence=3)

Fernández, A. R. (2015). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. *VT*

Ferrer, J., & Seco Torrecillas, A. (2018). Tratamientos biológicos de aguas residuales. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Flórez, P., & Pérez, A. (2019). Manejo y tratamiento de lixiviados provenientes de residuos. Universidad Santiago de Cali.

Fu, F., & Wang, Q. (2010). Removal of heavy metals ions from wastewaters: A review. . *Journal of Environmental Management*, 1209-1218.

Gerardi, M. H. (2003). *Nitrification and denitrification in the activated sludge process*. John Wiley & Sons.

Gómez, J. R., & Silva Leal, J. A. (2020). Tecnologías de tratamiento aplicadas al manejo de lixiviados. Una revisión. Tesis de Especialización En Control de La Contaminación Ambiental, 14 páginas. Retrieved from <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/4949>

Guevara, M. (2019). Construcción de un prototipo fenton coadyuvante de tratamientos biológicos para lixiviados en el relleno sanitario Porlón. Retrieved from <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/10576/1/236T0420.pdf>

- HACH COMPANY. (2004). Ammonia nitrogen. *Nippon Rinsho. Japanese Journal of Clinical Medicine*, 62 Suppl 1, 597–599.
- Hapsari, A., & Ritohardoyo, S. (2013). Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Inga, M., & Romero Pacheco, L. (2013). Problemas De Estabilidad De Taludes En El Relleno Sanitario De Pichacay, Parroquia Santa Ana, Canton Cuenca (Vol. 1).
- Jobbagy, E., Pascual, M., Barral, M., Poca, M., García, L., Oddi, J., Castellanos, G., Clavijo, A., Díaz, B., & Villagra, P. (2021). Representación espacial de la oferta y la demanda de los servicios ecosistémicos vinculados al agua. *Ecología Austral* 32:918-933
- Keifer, G., & Effenberger, F. (2020). Evaluación del tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario El Ojito en el municipio de Popayán (cauca) mediante el uso de filtros empacados (carbón mineral y grava) a escala piloto. (Vol. 6).
- Laines, J., Goñi, A., Adams, R., & Camacho, W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*.
- Li, W., Hua, T., Zhou, Q., Zhang, S., & Li, F. (2010). Treatment of stabilized landfill leachate by a combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption. *Journal of Desalination*.
- Li, X., & Zhao, Q. (2001). Efficiency of Biological Treatment Affected by High Strength of Ammonium- Nitrogen in Leachate and Chemical Precipitation of Ammonium-Nitrogen as Pretreatment. *Chemosphere*, 37-43.
- Llivichuzca, M. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de huevos helmintos. Tesis. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12048/1/UPS-CT005871.pdf>
- Maldonado, J., Rodríguez, J., & Cajiao, A. (2017). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en filtros anaerobios de flujo ascendente. *Ingeniería UC*, 91-104.
- Inga, M., & Romero, L. (2013). Problemas De Estabilidad De Taludes En El Relleno Sanitario De Pichacay, Parroquia Santa Ana, Canton Cuenca (Vol. 1).
- Marín Galvín, R. (1998). “Jar-test” en el tratamiento de aguas: una valiosa herramienta. *Tecnología Del Agua*, (181), 25–34.
- Martínez, F., Pariente, M. I., Melero, J. A., & Botas, J. A. (2008). Catalytic wet peroxide oxidation

process for the continuous treatment of polluted effluents on a pilot plant scale. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 11(1), 65-74. doi:<https://doi.org/10.1515/jaots-2008-0108>

Medina, C., Montero, E., & Cruz, L. (2016). Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 454-466. Recuperado en 14 de febrero de 2022, de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2016000400007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000400007&lng=es&tlng=es).

Méndez Novelo, R. I., Castillo, B. E., Sauri, R. M., Quintal, F. C., Giácoman, V. G., & Jiménez, C. B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 133-145. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s0188-49992009000300002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s0188-49992009000300002&script=sci_arttext)

Mías, C. (2022). Correcta gestión de los rellenos sanitarios. *Mercados y Empresas Para Servicios Públicos*. Retrieved from <https://mercadoyempresas.com/web/aporte-tecnico.php?id=190>

Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2015). Revisión y Actualización de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Registro Oficial No. 387, (97), 1–40. Retrieved from <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>

Morales, C. J. (2007). Estudio para remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios. Tesis, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2704>

Morales, B. A. (2014). Estudio comparativo bibliográfico de tratamientos biológicos anaeróbico, aeróbico y anóxico aplicados en lixiviados mediante la utilización de biorreactores. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 5(2), 40–51.

Muñoz, J. F., & Ramos Ramos, M. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 49-66. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702014000100003&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702014000100003&script=sci_abstract&tlng=pt)

Ntampou, X., Zouboulis, A., & Samaras, P. (2006). Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation / flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere*, 722-730.

Organización Panamericana de la Salud. (1997). Toxicocinética: Nitritos y Nitratos. Recuperado el 5 de Abril de 2022, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/eco/030492/030492-06.pdf>

- Organización Panamericana de la Salud. (2010). Informe de la Evaluación Regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. Recuperado el 2 de Abril de 2022, de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Informe-de-la-evaluaci%C3%B3n-regional-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-2010.pdf>
- Peralta, J., & González, E. (2019). Organismos fijadores de nitrógeno. Recuperado el 4 de Abril de 2022, de Leguminosas de Navarra. Herbario de la Universidad Pública de Navarra: [https://www.unavarra.es/herbario/leguminosas/htm/organismos\\_fijadores\\_L.htm](https://www.unavarra.es/herbario/leguminosas/htm/organismos_fijadores_L.htm)
- Pellón, A., López, M., & Espinoza, M. (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 3-16.
- Qarani, S., Abdul, H., Suffiani, M., Bashir, M., & Umar, M. (2010). Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills. *Journal of Environmental Management*.
- RCOA. (2019). Decreto Ejecutivo 752. Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. Recuperado el 7 de abril de 2022 de <https://REGLAMENTO%20AL%20CODIGO%20ORGANICO%20DEL%20AMBIENTE.pdf>
- Reutelshofer, T., & Guzmán Bejarano, L. F. (2015). Guía para la toma de muestras de agua residual. In *Senasba* (Vol. 1).
- Reina, V. C. (2011). Caracterización química inorgánica y orgánica de los lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza". Tesis, Universidad Central de Venezuela. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/10872/9220/1/Tesis%20Vanessa%20Carolina%20Reina.pdf>
- Reyes, M. (2015). Lixiviados en plantas de residuos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Röben, E. (2002). Diseño, construcción, operación y cierre de Rellenos sanitarios municipales. Ilustre Municipalidad de Loja. Recuperado el 2 de Abril de 2022, de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57601624/loja-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1649112273&Signature=Dm0DE4Z2WgJRkkWkzIxsugSlrPN0rZP1QveBx5xap7EL67M0APIV2xvvoT3aY~KrgwFOXdSbxyvlg9T2eQJP4HJqH45mMZ-0f5ulqNjvJ8C6ycAOuZybkdOQj26eQ6TkLlrKexCmYOmgtgnC2kiNd5oc>
- Robles, F., Morales-López, Y., Piña-Guzmán, A. B., Espíndola-Serafín, O., Tovar-Gálvez, L. R., & Valencia-del Toro, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la ciudad de México. *Universidad y ciencia*, 27(2), 121-132. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v27n2/v27n2a2.pdf>

- Roldan, D. (2018). Estudio de reactores anóxicos tipo batch para la reducción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica presente en lixiviados maduros provenientes de la disposición final de residuos sólidos municipales. *Journal of Business Ethics*, 14(3), 37–45. Retrieved from <https://www-jstor.org.libproxy.boisestate.edu/stable/25176555?Search=yes&resultItemClick=true&searchText=%28Choosing&searchText=the&searchText=best&searchText=research&searchText=design&searchText=for&searchText=each&searchText=question.%29&searchText=AND>
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. In *Manuales de la CEPAL*. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. Obtenido de <http://www.rstudio.com/>
- Sáez, A., & Urdaneta G., J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Sancha, M. (2013). Caracterización físico-química y microbiológica de un proceso de tratamiento de lixiviados de vertedero. Tesis Majistral, Universidad de Oviedo. Obtenido de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/23352/TFM\\_MelaniaSanchaAntu%C3%B1a.pdf?sequence=6&isAllowed=y#:~:text=Los%20lixiviados%20aunque%20representan%20una,pesados%2C%20adem%C3%A1s%20de%20sales%20inorg%C3%A1nicas.](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/23352/TFM_MelaniaSanchaAntu%C3%B1a.pdf?sequence=6&isAllowed=y#:~:text=Los%20lixiviados%20aunque%20representan%20una,pesados%2C%20adem%C3%A1s%20de%20sales%20inorg%C3%A1nicas.)
- Schiopu, A., & Gavrilescu, M. (2010). Options for the Treatment and Management of Municipal Landfill Leachate: Common and Specific Issues. *Clean – Soil, Air, Water*, 1101-1110.
- Segura, Á., Rojas, L., & Pulido, Y. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *Revista Espacios*, 41(17), 1–9. Retrieved from <http://es.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>
- Solíz, M. F., Durango, S., Solano, J., & Yépez, M. (2020). Cartografía de los residuos sólidos en Ecuador 2020.
- Tang , H., & Chen, H. (2015). Nitrification at full-scale municipal wastewater treatment plants: Evaluation of inhibition and bioaugmentation of nitrifiers. *Bioresource Technology*, 79-81.
- Telwesa. (2021). Reactor biológico. Recuperado el 6 de Abril de 2022, de <https://telwesa.com/reactor-biologico/>

- TULSMA. (2015). Acuerdo Ministerial 97, Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI, decreto ejecutivo 3516. Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Ullca, J. (2006). Los rellenos sanitarios. La Granja. *Revista de ciencias de la vida*(4), 2-17. Recuperado el 2 de Abril de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047388001.pdf>
- Valencia, V., Agudelo, J., Restrepo, I., & Cajigas, A. (2007). Evaluación del tratamiento fisicoquímico de lixiviados parcialmente estabilizados. Seminario de Gestión Integral de Residuos Sólidos, LATINOSAN.
- Vilar, A. (2015). Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos.
- Yáñez, S. (2018). Influencia del pH en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en humedales construidos de flujo vertical. Tesis, Universidade Da Coruña. Obtenido de [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20315/YanezTorrente\\_Sandra\\_TFG\\_2018.pdf?sequence=1](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20315/YanezTorrente_Sandra_TFG_2018.pdf?sequence=1)
- Yilmaz, T., Apaydin, S., & Ali, B. (2010). Coagulation-flocculation and air stripping as a pretreatment of young landfill leachate. *The Open Environmental Engineering Journal*, 42-48.
- Zafra, C., & Romero-Torres, D. (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 125-147. doi:<https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a8>

## ANEXOS

Anexo 1: Flujograma de la metodología aplicada

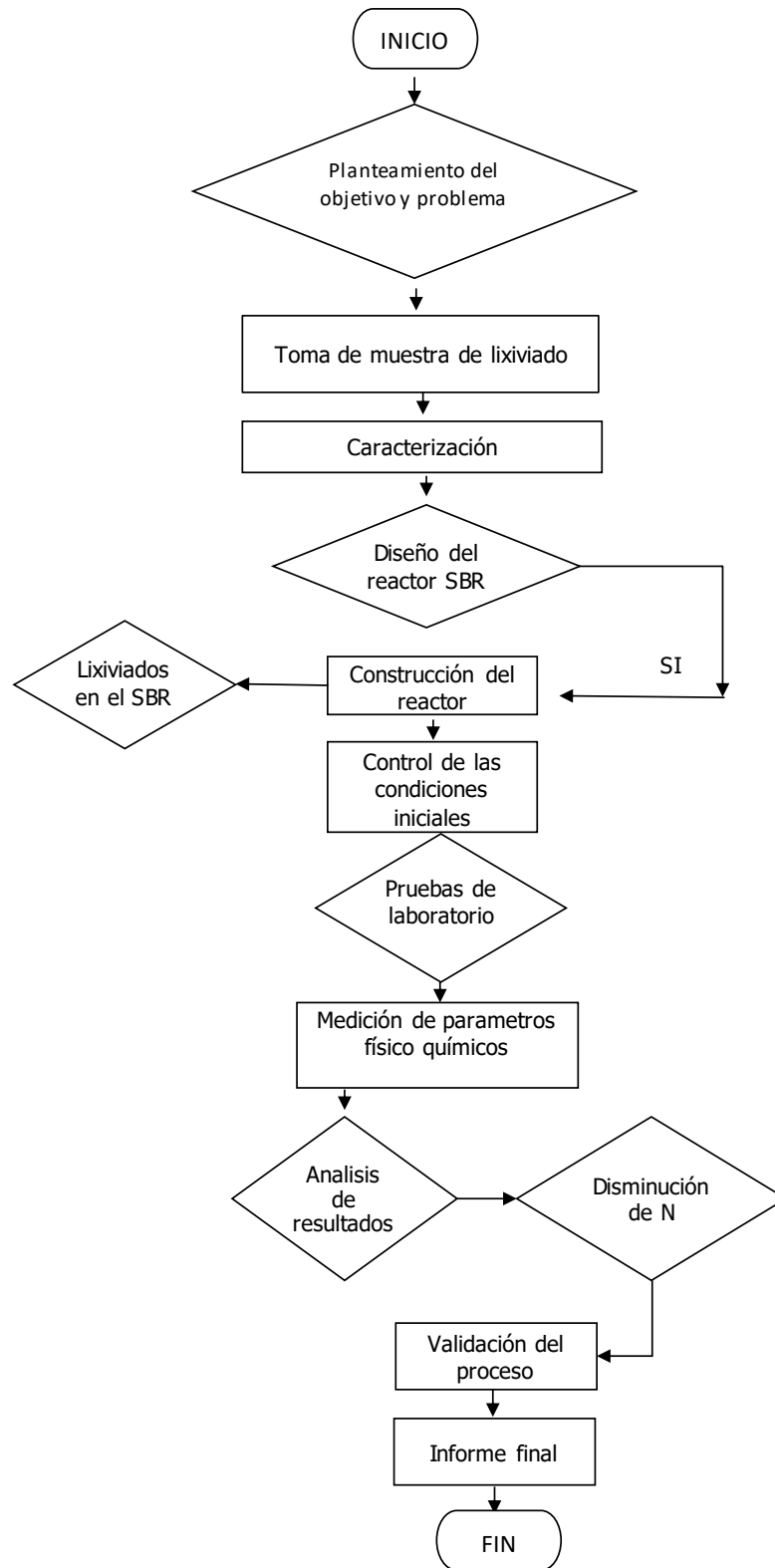


Figura 1: Flujograma correspondiente a la metodología

**Anexo 2:** Toma de muestra la de lixiviado del tanquero de transporte en el centro de acopio



**Figura 2:** Obtención de la muestra de lixiviado desde el tanquero transportador

**Anexo 3:** Materiales usados en la experimentación



**Figura 3:** Lixiviado resultante del Jar Test

**Anexo 4:** Proceso de sedimentación



**Figura 4:** Sedimento resultante de la experimentación

**Anexo 5:** Resultados de los ensayos realizados emitidos por parte del laboratorio CIIT

 Universidad Católica de Cuenca		CIIT- LABORATORIO DE CONTAMINACION Y AGUAS RESIDUALES HACIENDA MIRACIELOS-RICAURTE			
<b>CODIGO:</b> UCC-LCAR-F06	<b>ELABORADO:</b> Ing. Maria Eugenia Quinteros Msc.	<b>ELABORADO Y REVISADO:</b> Ing. Carlos Matovelle B. Msc.	<b>Nº INFORME:</b> IN-CAR-024		
<b>CODIGO MUESTRA:</b>	CAR-001	<b>FECHA DE EMISION DEL INFORME:</b>	9/11/2021		
<b>PROYECTO:</b>	Evaluación de un reactor biologico aerobio/anóxico para la eliminación de nitrógeno en lixiviado del relleno sanitario de Pichacay.	<b>SOLICITANTE:</b>	Jessica Villa		
<b>UNIDAD ACADEMICA SOLICITANTE:</b>	Ingeniería Ambiental	<b>RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:</b>	Jessica Villa		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Lixiviado	<b>MODO DE CONSERVACIÓN:</b>			
<b>FECHA DE RECOLECCION DE MUESTRAS:</b>	19/8/2021-11/10/2021	<b>HORA DE RECOLECCION:</b>	9:00		
<b>FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS:</b>	19/8/2021-11/10/2021	<b>HORA DE RECEPCION:</b>	9:30		
<b>FECHA DE INICIO DE ENSAYOS</b>	19/8/2021	<b>FECHA DE FIN DE ENSAYOS:</b>	11/10/2021		

Análisis	Método de Referencia / Método Interno	Unidad	MUESTRA			
			Día	Resultados 21-050	Valores máximos permisibles	Límite de cuantificación
			1	0-0		
			2	10-0		
			3	4-0		
			6	4-0		



CIITT- LABORATORIO DE CONTAMINACION Y AGUAS  
RESIDUALES  
HACIENDA MIRACIELOS-RICAURTE

Nitratos	Método 4500-NO3 Literal: E. Técnica: Espectrofotometría	mg/L	7	0-0	No aplica	0,3-30 mg/L
			8	22-42		
			9	6-0		
			10	0-0		
			13	68-30		
			14	44-36-26		
			15	16-26-48		
			16	0-10-4		
			17	10-50-0		
			20	0-4-30		
			21	24-46-0		
			22	33,4-26,6-35,6		
			24	12,8-10,8-10,2		
			27	8,8-8,8-6,2		
			29	7-5-7,8		
			31	7,2-5,2-0		
34	5,6-3,8-7,2					
36	8,4-2,8					
41	10,4-11,2-11,4					
			1	13.340		
			2	14.160		
			3	17.000		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método 5220- Literal D. Técnica: Espectrofotometría	mg/L	6	14.040	No aplica	20-1500 mg/L
			7	15.180		
			8	14.640		
			9	13.420		
			10	13.520		
			13	17.060		
			14	18.640		
			15	17.360		
			16	17.900		
			17	17.300		
			20	20.700		
41	15.680					
Amonio	Método del Salicilato 10031 Hach	mg/L	14	682,13	No aplica	0,4-50 mg/L NH3
			15	593,15		
			16	418,39		
			17	495,71		
			20	406,73		
			27	555,02		
41	258,87					

NOTAS:

Los resultados incluidos en el presente Informe están relacionados únicamente a las muestras analizadas.

Los resultados obtenidos en el ensayo, son comparados con: No aplica

Observaciones:



Coordinador de Laboratorio

Técnico Responsable



**CIITT- LABORATORIO DE CONTAMINACION Y AGUAS**  
**RESIDUALES**  
**HACIENDA MIRACIELOS-RICAURTE**

<b>CODIGO:</b> UCC-LCAR-F06	<b>ELABORADO:</b> Ing. Maria Eugenia Quinteros Msc.	<b>ELABORADO Y REVISADO:</b> Ing. Carlos Matovelle B. Msc.	<b>Nº INFORME:</b> IN-CAR-028
<b>CODIGO MUESTRA:</b>	CAR-001	<b>FECHA DE EMISION DEL INFORME:</b>	9/11/2021
<b>PROYECTO:</b>	Evaluación de un reactor biologico aerobio/anóxico para la eliminación de nitrogeno en lixiviado del relleno sanitario de Pichacay.	<b>SOLICITANTE:</b>	Jessica Villa
<b>UNIDAD ACADEMICA SOLICITANTE:</b>	Ingeniería Ambiental	<b>RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:</b>	Jessica Villa
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Lixiviado	<b>MODO DE CONSERVACIÓN:</b>	
<b>FECHA DE RECOLECCION DE MUESTRAS:</b>	20/09/2021-29/10/2021	<b>HORA DE RECOLECCION:</b>	9:00
<b>FECHA DE RECEPCION DE MUESTRAS:</b>	20/09/2021-29/10/2021	<b>HORA DE RECEPCION:</b>	9:30
<b>FECHA DE INICIO DE ENSAYOS</b>	20/9/2021	<b>FECHA DE FIN DE ENSAYOS:</b>	29/10/2021

Análisis	Método de Referencia / Método Interno	Unidad	MUESTRA			
			Día	Resultados 21-050	Valores máximos permisibles	Límite de cuantificación
Solidos Disueltos		ppm	0	15960	No aplica	No aplica
Solidos Suspendidos		mg/L	0	490	No aplica	No aplica
pH	Método 4500-H Literal: B		0	8,05	No aplica	0-14
Turbidez	Método 2130- Literal: B	NTU	0	188	No aplica	0-1000
Nitratos	Método 4500-NO3 Literal: E. Técnica: Espectrofotometria	mg/L	0	80-98-82	No aplica	0,3-30 mg/L
			4	4,6-4,2-16,20		
			9	2,8-4,2-4,2		
			15	12,6-11,4-0		
			21	18,2-16,8-120,2		
			25	14-7,6-7,8		
			30	15,6-15,8-13,2		
			35	13,20-12,2-11,2		
			39	9,8-9,4-10		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método 5220- Literal D. Técnica: Espectrofotometría	mg/L	0	13.960	No aplica	20-1500 mg/L
			4	14.000		
			9	18.820		
			15	19.950		
			21	10390-12050		
			25	8.430		
			30	9.760		
			35	844		
			39	8.820		
			0	2.173,49		
			4	1.105,81		



Universidad  
Católica  
de Cuenca

**CIITT- LABORATORIO DE CONTAMINACION Y AGUAS  
RESIDUALES  
HACIENDA MIRACIELOS-RICAURTE**

Amonio	Método del Salicilato 10031 Hach	mg/L	9	758,39	No aplica	0,4-50 mg/L NH3
			15	174,76		
			21	12,28		
			25	42,15		
			30	62,28		
			35	73,29		
			39	86,00		

<b>NOTAS:</b>	
Los resultados incluidos en el presente Informe están relacionados únicamente a las muestras analizadas.	Los resultados obtenidos en el ensayo, son comparados con: No aplica

**Observaciones:**

  <hr/> <b>Coordinador de Laboratorio</b>	 <hr/> <b>Técnico Responsable</b>
---	--

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Jessica Elizabeth Villa Criollo portadora de la cédula de ciudadanía N.º 0106830953. En calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Evaluación de un reactor aerobio/anóxico para la eliminación biológica de nitrógeno en lixiviados de relleno sanitario Pichacay” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 01 de julio del 2022



F: .....

Jessica Elizabeth Villa Criollo  
0106830953