

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**REMOCIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y HIERRO TOTAL CON  
SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE *Solanum Tuberosum* DE LIXIVIADOS  
DE CELDAS TRANSITORIAS EN ÉPOCA DE AVENIDA**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**URIARTE BARRAZA, KATHERIN LOURDES**

**Tingo María – Perú**

**2024**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 090-2024-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 07 de agosto de 2024, a horas 8:30 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“REMOCIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y HIERRO TOTAL  
CON SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE *Solanum Tuberosum* DE  
LIXIVIADOS DE CELDAS TRANSITORIAS EN ÉPOCA DE AVENIDA”**

Presentado por la Bachiller: **URIARTE BARRAZA, Katherin Lourdes** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 16 de agosto de 2024

  
Ing. M.Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**  
**PRESIDENTE**

  
Ing. M.Sc. **ABBY S. DA CRUZ RODRIGUEZ**  
**MIEMBRO**

  
Ing. M.Sc. **SANDRA L. ZAVALA GUERRERO**  
**MIEMBRO**



  
Ing. M.Sc. **ALBERTO F. CERNA CUEVA**  
**ASESOR**



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 251 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
REMOCIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y HIERRO TOTAL CON SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE Solanum Tuberosum DE LIXIVIADOS DE CELDAS TRANSITORIAS EN ÉPOCA DE AVENIDA	URIARTE BARRAZA, KATHERIN LOURDES	<b>17 %</b> <b>Diecisiete</b>

Tingo María, 19 de agosto de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN  
Dr. Tomás Menacho Matiqui  
JEFE

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**REMOCIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y HIERRO TOTAL CON  
SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE *Solanum Tuberosum* DE LIXIVIADOS  
DE CELDAS TRANSITORIAS EN ÉPOCA DE AVENIDA**

<b>Título</b>	: Remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total con sulfato de aluminio y almidón de <i>Solanum Tuberosum</i> de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida
<b>Programa de investigación</b>	: Ciencia y Tecnologías Ambientales
<b>Línea de investigación</b>	: Tecnologías para reducir la contaminación
<b>Eje temático</b>	: Reducción de la contaminación ambiental
<b>Autor</b>	: Katherin Lourdes Uriarte Barraza
<b>Asesor(es)</b>	: Ing. M. Sc. Alberto Franco, Cerna Cueva
<b>Lugar de ejecución</b>	: Tingo María - Rupa Rupa – Leoncio Prado
<b>Duración del trabajo</b>	: 6 meses
<b>Financiamiento</b>	: S/ 4,271.30
<b>FEDU</b>	: No
<b>Propio</b>	: Si
<b>Otros</b>	: No

**Tingo María – Perú, 2024**

VICERRECTORADO DE INVESTIGACION  
OFICINA DE INVESTIGACION



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL  
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE  
Y TESISISTA

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

**Universidad** : Universidad Nacional Agraria de la Selva.  
**Facultad** : Facultad de Recursos Naturales Renovables  
**Título de tesis** : Remoción de demanda química de oxígeno y hierro total con sulfato de aluminio y almidón de *solanum tuberosum* de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida  
**Autor** : Uriarte Barraza, Katherin Lourdes  
**Asesor de tesis** : Ing. M. Sc. Alberto Franco Cerna Cueva  
**Escuela Profesional** : Ingeniería Ambiental  
**Programa de investigación** : Ciencia y Tecnologías Ambientales  
**Línea(s) de investigación** : Tecnologías para reducir la contaminación  
**Eje Temático** : Reducción de la contaminación ambiental  
**Lugar de ejecución** : Tingo María  
**Duración** : Inicio : Enero 2024  
Término : Julio 2024  
**Financiamiento** : FEDU : S/0.00  
Propio : S/ 4,271.30  
Otros : S/0.00

Tingo María, Perú, agosto 2024.

Handwritten signature of Katherin Lourdes Uriarte Barraza.

Katherin Lourdes Uriarte Barraza

Tesista

Handwritten signature of Ing. M. Sc. Alberto Franco Cerna Cueva.

Ing. M. Sc. Alberto Franco Cerna Cueva

Asesor

## DEDICATORIA

A Dios, por iluminar mi camino, brindarme las fuerzas necesarias para superar muchos momentos de mi vida y por mostrarme que todo es posible a pesar de las circunstancias.

A mi padre *Lander Emilio Uriarte Santamaria*, por sus enseñanzas a largo de mi vida, por acompañar cada etapa de mi vida siempre creyendo en mí. Seguiré llevando tu ejemplo en cada uno de mis logros, nuestro amor siempre llegara hasta el cielo.

A mi madre *Maria Karina Barraza Sandoval*, por su apoyo continuo, su compañía y su ejemplo de esfuerzo diario, superación y perseverancia que hizo posible este logro. Siempre estaré orgullosa de ti tanto como tú lo estas de nosotros.

A mis hermanos, *Sergio, Becky Rebeca y Michilina*, en especial a *Sergio Fernando Uriarte Barraza*, por ser mi compañero de vida, mi ejemplo y mi motivación durante toda esta etapa. Siempre estaré para ti, la vida siempre será más bonita si estamos juntos.

A mis abuelos, *Enith Sandoval y Jose Barraza* y mis tíos, *Laura Barraza, Jose Fernando Barraza y Karen Timoteo*, por brindarme la oportunidad y el apoyo continuo durante toda mi etapa universitaria. Siempre estaré agradecida, esperando poder ser un apoyo para ustedes.

A mis primas *Sthefany Pedrera y Grecia Uriarte*, por estar presente en todo momento y por sus consejos durante todo este proceso.

A mis familiares y amigos, por siempre creer en mis capacidades para la culminación de mi carrera profesional, brindándome sus mejores deseos y éxitos en mi futuro.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a mi Facultad de Recursos Naturales Renovables mención Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por la oportunidad de adquirir conocimientos y demostrar mis capacidades.

A mi asesor M. Sc. Ing. Franco Cerna Cueva, por su apoyo de asesoramiento, los conocimientos compartidos y acompañamiento durante todo el desarrollo de mi tesis.

A mis miembros de jurado de tesis por las sugerencias, el tiempo brindado y aportes que contribuyeron significativamente a mejorar la presente investigación.

A Danilo II Ortiz Suarez, por su apoyo diario, por sus consejos y por la motivación durante toda la ejecución de mi investigación, que fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mi amigo Dan Figueroa Valeriano, por acompañar y hacer que mi proceso de ejecución sea divertido, y por el conocimiento compartido. Especialmente por botar mis muestras y hacer que tenga que repetir los ensayos muchas veces más.

# ÍNDICE

	Página
I.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
II.REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	3
2.1. Estado de arte.....	3
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	3
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	5
2.1.3. Antecedentes locales .....	6
2.2. Marco teórico.....	7
2.2.1. Lixiviados.....	7
2.2.2. Composición de los lixiviados .....	7
2.2.3. Características de los lixiviados.....	7
2.2.4. Impacto de los lixiviados .....	9
2.2.5. Tratamientos para lixiviados.....	9
2.2.6. Coagulación - floculación .....	10
2.2.7. Sulfato de Aluminio .....	16
2.2.8. Floculante de almidón de papa (solanum tuberosum).....	16
2.2.9. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	17
2.2.10. Hierro total.....	18
2.2.11. Celda transitoria de Leoncio Prado.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
3.1. Lugar de ejecución.....	20
3.1.1. Ubicación política .....	20
3.1.2. Ubicación geográfica .....	20
3.1.3. Aspectos ambientales.....	21
3.2. Materiales y equipos .....	21
3.3. Criterio de investigación.....	21

3.3.1. Tipo de investigación .....	21
3.3.2. Nivel de investigación.....	21
3.3.3. Diseño de la investigación .....	22
3.3.4. Variables de estudio .....	23
3.4. Metodología .....	24
3.4.1. Caracterización del lixiviado de celdas transitorias en época de avenida.....	24
3.4.2. Determinación de dosis óptima de coagulante y floculante, velocidad de agitación y período de mezcla .....	28
3.4.3. Determinación de la remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida.....	31
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	33
4.1. Caracterización del lixiviado de celdas transitorias en época de avenida .....	33
4.2. Dosis óptimas de coagulante y floculante, velocidad de agitación y período de mezcla .	
.....	37
4.2.1. Combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla.....	37
4.2.2. Dosis óptima de coagulante y floculante.....	39
4.3. Remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida .....	46
4.3.1. Remoción de Demanda Química de Oxígeno.....	46
4.3.2. Remoción de Hierro total.....	47
V.CONCLUSIONES .....	50
VI.PROPUESAS A FUTURO .....	51
VII.REFERENCIAS .....	52
ANEXO .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Contenido de amilosa y amilopectina del almidón de papa <i>Solanum tuberosum</i> . ....	17
2. Coordenadas geográficas de los lugares de ejecución.....	20
3. Operacionalización de variables de investigación.....	23
4. Valores de referencia basados en la propuesta de LMP para efluentes de infraestructuras de residuos sólidos.....	27
5. Dosis de coagulante y variación de pH .....	28
6. Niveles de velocidad de mezcla y período de mezcla .....	29
7. Combinaciones de velocidad de agitación y período de mezcla. ....	30
8. Dosis de coagulante y floculante. ....	30
9. Condición climática y dinámica de manejo de lixiviados en el día de la toma de muestra.	33
10. Parámetros fisicoquímicos del lixiviado de la celda transitoria de Leoncio Prado. ....	34
11. Análisis de varianza para la combinación óptima de velocidad y período de mezcla.....	37
12. Prueba de Tukey para la combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla .....	38
13. Análisis de varianza para las dosis óptimas para la remoción de turbidez.....	40
14. Prueba de Tukey para dosis óptimas para la remoción de turbidez.....	40
15. Análisis de varianza para la dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de DQO.....	42
16. Prueba de Tukey para dosis óptima de coagulante y floculante para la remoción de Demanda Química de Oxígeno .....	43
17. Análisis de varianza para la dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de Hierro total.....	44
18. Prueba de Tukey para dosis óptima de coagulante y floculante para la remoción de Hierro total .....	45
19. Remoción de DQO mediante optimización de dosis mediante superficie de respuesta....	47
20. Remoción de Hierro total mediante optimización mediante superficie de respuesta.....	48
21. Variación del pH con la adición de sulfato de aluminio.....	60
22. Ensayo de variación de pH con 3 dosis de sulfato de aluminio. ....	61
23. Ensayos de combinación óptima de velocidad y período de mezcla.....	62
24. Ensayos de dosis óptima de coagulante y floculante.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Proceso de coagulación (Adaptado de Wang, 2023).....	11
2. Proceso de floculación (Adaptado de Wang, 2023). ....	12
3. Esquema del tratamiento de coagulación-floculación (Adaptado de Astorga, 2018). ....	13
4. Mapa de componentes de la Celda Transitoria y puntos de muestreo de lixiviados. ....	19
5. Ubicación de la Celda Transitoria para disposición final de los residuos sólidos.....	20
6. Esquema de diseño de la investigación. ....	23
7. Secciones de muestreo de lixiviados de la Poza N°1. ....	24
8. Superficie de respuesta para remoción de DQO.....	46
9. Superficie de respuesta para remoción de Fe. ....	48
10. Recolección de muestras de lixiviado de la celda transitoria. ....	87
11. Muestras de lixiviado codificadas. ....	87
12. Medición de parámetros fisicoquímicos del lixiviado.....	88
13. Adición de la muestra de lixiviado al vial para determinación de DQO. ....	88
14. Colocación de las muestras en el termoreactor . ....	89
15. Pesado de coagulante y floculante.....	89
16. Elaboración de floculante de almidón de papa gelatinizado. ....	90
17. Muestras de lixiviado para ensayos en test de jarras. ....	90
18. Programación de parámetros de operación para test de jarras.....	91
19. Muestras de lixiviado tratado. ....	91
20. Medición de DQO final .....	92
21. Muestra inicial y muestras finales de DQO.....	92
22. Medición de hierro.....	93
23. Muestra inicial y muestras finales de hierro.....	93
24. Ficha de laboratorio- Ensayo 1.....	944
25. Ficha de laboratorio- Ensayo 2.....	955
26. Ficha de laboratorio- Ensayo 3.....	966
27. Mapa de ubicación de la Celda Transitoria de Leoncio Prado. ....	977

## RESUMEN

La investigación presenta una alternativa de tratamiento para el lixiviado de celdas transitorias mediante coagulación-floculación, utilizando sulfato de aluminio y almidón de *Solanum tuberosum*. El objetivo principal fue remover la Demanda Química de Oxígeno y el hierro total. Se utilizó el lixiviado proveniente de la Celda Transitoria de Leoncio Prado, el cual fue caracterizado. Posteriormente, se determinaron las dosis óptimas de coagulante y floculante, así como las condiciones de velocidad de agitación y período de mezcla. Se probaron dosis de coagulante de 40, 50 y 60 mL y dosis de floculante de 1, 2 y 3 mL, con velocidades de mezcla de 100-200 rpm (rápida) durante 1-3 minutos y 40-50 rpm (lenta) durante 10-15 minutos, seguido de un tiempo de sedimentación de 20 minutos. Para optimizar estas variables, se utilizó la metodología de superficie de respuesta. Los resultados iniciales mostraron altos valores de DQO (1583 mg/L) y hierro total (5,56 mg/L). El tratamiento más efectivo consistió en 50 mL de sulfato de aluminio y 2 mL de almidón de *Solanum tuberosum* gelatinizado, con una mezcla óptima a 200 rpm durante 1 minuto, seguida de 50 rpm durante 10 minutos. Este proceso logró una remoción de 1095,63 mg/L de DQO, logrando una eficiencia del 82,42%, y una remoción de 4,33 mg/L de hierro, con una eficiencia del 95,36%. Los resultados resaltan la efectividad del sulfato de aluminio y el almidón de *Solanum tuberosum* en la coagulación-floculación para la significativa remoción de DQO y hierro en los lixiviados de celdas transitorias.

**Palabras clave:** Sulfato de aluminio, almidón de *Solanum Tuberosum*, Demanda Química de Oxígeno, hierro total, lixiviados.

## ABSTRACT

The research presents an alternative treatment for leachates from transitory cells through coagulation-flocculation, utilizing aluminum sulphate and *Solanum tuberosum* starch. The principal objective was to remove the chemical oxygen demand and the total iron. The leachate from the transitory cell in Leoncio Prado was used, which was characterized. Later, the optimal dose of coagulant and flocculant were determined, as well as the conditions for the agitation velocity and the mixing period. Doses of coagulation of 40, 50 and 60 mL and doses of flocculant of 1, 2 and 3 mL were used with mixing velocities of 100-200 rpm (fast) during 1-3 minutes and 40-50 rpm (slow) during 10-15 minutes, followed by a sedimentation time of 20 minutes. In order to optimize these variables, the surface response methodology was used. The initial results revealed high values for the COD [DQO in Spanish] (1583 mg/L) and total iron (5.56 mg/L). The most effective treatment consisted of 50 mL of aluminum sulphate and 2 mL of gelatinized *Solanum tuberosum* starch, with an optimal mixing of 200 rpm during one minute, followed by 50 rpm during 10 minutes. This process achieved a removal of 1095.63 mg/L of COD, achieving an efficiency of 82.42%, and an iron removal of 4.33 mg/L, with an efficiency of 95.36%. These results highlight the effectiveness of aluminum sulphate and *Solanum tuberosum* starch in the coagulation-flocculation for the significant removal of COD and iron from the leachates of transitory cells.

**Keywords:** aluminum sulphate, *Solanum Tuberosum* starch, oxygen chemical demand, total iron, leachates

## I. INTRODUCCIÓN

La gestión de lixiviados en la disposición de residuos sólidos constituye un desafío global significativo. En muchos lugares, se están implementando estrategias avanzadas para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental de estos líquidos contaminantes. Dado que todas las instalaciones de disposición de residuos sólidos generan lixiviados durante la degradación de los residuos en las áreas de confinamiento, es crucial un tratamiento eficaz de estos líquidos. Un manejo inadecuado puede provocar efectos graves en los componentes físicos y biológicos del entorno, como la pérdida de biodiversidad, alteraciones en los ciclos biológicos, y deterioro de la calidad del agua, aire y suelo.

En Perú, la gestión de residuos sólidos enfrenta serios desafíos, ya que la atención se centra mayormente en la recolección, sin abordar adecuadamente los problemas críticos relacionados con la disposición final. Entre estos problemas destacan el tratamiento ineficiente de lixiviados, la emisión de olores desagradables, la generación de contaminantes y la inadecuada gestión de la cobertura de los residuos. Este enfoque limitado ha llevado a que solo el 55% de los residuos generados en el país sean tratados en rellenos sanitarios adecuados, mientras que el restante se acumula en botaderos a cielo abierto, lo que agrava los problemas ambientales y de salud pública (Dávila et al., 2022).

El manejo de lixiviados en la disposición de residuos sólidos es un aspecto crucial que a menudo se aborda mediante la recirculación en las instalaciones con sistemas de tratamiento, debido a que la normativa nacional promueve su uso para el manejo de lixiviados debido a su eficacia en la reducción de contaminantes y en la optimización de recursos. Sin embargo, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) ha documentado que esta estrategia enfrenta serias limitaciones en regiones específicas, como la Amazonía peruana; donde las condiciones hidrometeorológicas, que incluyen altas precipitaciones y humedad constante, dificultan la implementación efectiva de la recirculación, haciendo que esta solución sea inviable. Esta situación resalta la urgencia de desarrollar y aplicar alternativas de tratamiento de lixiviados que se ajusten a las particularidades locales y que puedan abordar de manera efectiva los desafíos ambientales en diferentes regiones de la Amazonía del país.

Esta investigación se enfoca en presentar una alternativa de solución para el tratamiento de los lixiviados provenientes de la Celda transitoria de Leoncio Prado, mediante la remoción con sulfato de aluminio y almidón de *Solanum Tuberosum* mediante el proceso de coagulación-

floculación. Se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuánto será el porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno y hierro total de los lixiviados de celdas transitorias en época de avenida?, y teniendo como hipótesis, que el porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno y hierro total de los lixiviados de celdas transitorias en época de avenida es mayor al 80%.

### **1.1. Objetivo general**

Remover la Demanda Química de Oxígeno y hierro total con sulfato de aluminio y almidón de *Solanum Tuberosum* de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida

### **1.2. Objetivos específicos**

- Caracterización del lixiviado de celdas transitorias en época de avenida
- Determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante, velocidad de agitación y período de mezcla
- Determinar la remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. Estado de arte

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Orellana (2023). Desarrolló una investigación titulada “Evaluación del tratamiento de lixiviados generados por el relleno sanitario Pichacay mediante la aplicación de precipitantes químicos y polímeros” en Ecuador. Realizando un estudio experimental con el tratamiento de coagulación y floculación mediante el test de jarras, como compuesto se utilizó cloruro férrico y sulfato de aluminio y polímeros aniónicos y catiónicos. Se utilizaron muestra con 1000 mL de lixiviado, con condiciones de operación de mezcla rápida durante un minuto a 120 rpm, luego una mezcla lenta durante 30 minutos a 30 rpm, finalmente se permitió la sedimentación durante 30 minutos. Se analizaron los resultados de reducción de DQO, conductividad y sólidos suspendidos para cada combinación utilizada. El resultado óptimo del tratamiento de lixiviado fue con un 70 mL de sulfato de aluminio y 0,4 de polímero aniónico, obteniendo una remoción de DQO de 43%, referente a turbidez se removió el 73%. Llegando a la conclusión que aplicando los precipitantes químicos y polímeros, se llegó a contaminantes, mostrando una mejora significativa.

Caranqui (2022) llevó a cabo un estudio llamado “Alternativas para el tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario “Romerillos”, cantón Mejía, provincia de Pichincha, mediante procesos de coagulación–floculación” donde se examinó la eficacia de utilizar quitosano como coagulante y cloruro de aluminio como floculante en la eliminación de contaminantes del vertedero Romerillos, la investigación se dividió en dos fases. El estudio incluyó el muestreo, caracterización fisicoquímica y biológica de los lixiviados, así como pruebas de jarras para la determinación de la dosificación necesaria de coagulante y floculante. Los resultados que se obtuvieron fueron dosis óptimas de 1800 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  (cloruro férrico) y 1200 mg/L de PAC (cloruro de poli aluminio), un pH óptimo de coagulación de 6.5, de velocidad óptima de mezcla rápida de 150 rpm por 60 segundos; y tiempo óptimo de floculación de 50 rpm y 20 minutos respectivamente, presentaron una eficiencia de remoción de la turbiedad del agua superior al 80%, respecto a los parámetros DQO y DBO5 obtuvieron una remoción de 82.9% y 85,6% respectivamente.

Bellouk et al. (2022) realizaron un artículo científico que lleva por título “Rendimiento de coagulación-floculación seguida de persulfato/peróxido de hidrogeno activado por rayos ultravioleta/ultrasonido para el tratamiento de lixiviados de vertederos”,

donde evaluaron el uso de procesos de oxidación (POA) para mejorar el tratamiento de lixiviados de vertederos previamente tratados con coagulación- floculación. La CF inicial con 20g de  $\text{FeCl}_3$  eliminó el 71% de DQO y el 95% de la turbidez. Posteriormente se aplicó un tratamiento secundario utilizando diferentes combinaciones de sistemas de oxidantes orgánicos (persulfato de potasio y peróxido de hidrogeno). El proceso secuencial que incluye CF seguido del sistema  $\text{H}_2\text{O}_2$ -PS-US-UV-A demostró una alta eficiencia para la eliminación de DQO con un valor de 97%. La aplicación secuencial del POA después del tratamiento preliminar mediante CF es una alternativa prometedora para reducir la carga orgánica de los lixiviados estabilizados y pueden ser aplicables a otros tipos de afluentes.

Chaouki et al. (2021) realizaron un estudio que lleva por título "Tratamiento de lixiviados del vertedero de la ciudad de Casablanca mediante un proceso de coagulación-floculación y adsorción utilizando polvo de corteza de palma (PBP)". Tuvo como objetivo evaluar el uso de cloruro férrico para la coagulación y posteriormente la adsorción en PBP en lixiviados de vertedero. La efectividad de este método de tratamiento se evaluó en función de demanda química de oxígeno (DQO), eliminación de color y turbidez. El proceso de coagulación minoró la turbidez en un 90%, la DQO en un 50%, el color en un 80% y la demanda biológica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) en un 99%, con una dosis óptima de cloruro férrico de 12 g/L. Posteriormente, el tratamiento secuencial basado en coagulación como pretratamiento y luego adsorción en PBP mejoró la eliminación de turbidez, DQO y color al 99%, 59% y 90%, respectivamente. Estos resultados indican que la combinación de coagulación-floculación y adsorción puede ser una alternativa eficaz para el tratamiento de lixiviados de vertederos.

Muslan (2020) realizó una investigación titulada "Pretratamiento conjunto de aguas residuales municipales y lixiviados de vertederos mediante coagulación química utilizando cloruro férrico y sulfato de aluminio". En este estudio se observó cómo afectan ciertos factores en el desempeño del tratamiento de agua residual, incluyendo variables como pH, tipo y dosis de coagulante necesaria para aguas de ámbito municipal (MW) y lixiviados provenientes de vertedero (LL). El uso de 500 mg/L de cloruro férrico, las eficiencias de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SS) y turbidez fueron del 82%, 99% y 99%. Mientras que con el uso de sulfato de aluminio se reportó que 1500 mg/L son eficientes para la remoción del 63% la DQO, mientras que con la optimización de la dosis se determinó que 1250 mg/L removía el 88% y 89% de SS y turbidez, respectivamente. Se menciona que cuando la dosis de coagulante requerida aumentó en 500 mg/L, la eficiencia de remoción de contaminantes se redujo. Los resultados revelan que la

coagulación podría aplicarse como pretratamiento para el co-tratamiento de MW y LL.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Miyashiro y Meliton (2022) desarrollaron una investigación comparativa de dos tratamientos, uno de electrocoagulación y otro de coagulación- floculación para la remoción de contaminantes de aguas residuales provenientes del camal Conchucos de Lima, donde los parámetros que analizaron fueron DBO, DQO, conductividad, pH y turbidez, los ensayos para el proceso de coagulación-floculación consideraron una velocidad de agitación variada entre 100 rpm a 250 rpm, tiempo de agitación de 15 y 30 minutos. Teniendo como resultados la reducción de 75.99% la remoción de DQO y un 46.31% de coagulación - floculación, utilizando 1000 mg/l y 4 mg/l, y 250 rpm como velocidad de agitación en el proceso, concluyendo que el tratamiento de electrocoagulación tuvo mejores eficiencias.

Bendezu y Capcha (2021) desarrollaron la tesis titulada “Remoción de hierro y plomo en aguas ácidas de la minera Julcani con coagulante opuntia floccosa” donde determinaron los mejores parámetros de operación considerando tiempo del proceso y dosis de coagulante para poder elevar el porcentaje de remoción. La metodología considero como condiciones de coagulación fueron de 100 revoluciones para velocidad de agitación y se consideraron 3 tiempos de mezclado (2, 5 y 8 min) y 5 concentración de coagulante (10, 20, 30, 50 y 70 ppm); para la floculación se consideró 50 revoluciones por minuto de velocidad de agitación por un período de 20 min y mezcla nula para la sedimentación por un período de 60 min. Tras llevar a cabo 15 tratamientos a concentraciones y tiempos diferentes para la remoción, se encontró que el tratamiento con concentración de 50 ppm con una velocidad de 100 rpm por dos minutos logró una remoción máxima con valores de 92,3 % y 87,4 %, para Fe y Pb respectivamente.

Irigoín et. al (2018) elaboraron una tesis titulada “Clarificación fisicoquímica de lixiviados mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación del botadero municipal de la provincia de Moyobamba”. Cuyo objetivo abordó el tratamiento fisicoquímico del lixiviado generado por el botadero municipal de la provincia de Moyobamba mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación; por acción de dos productos por separado el sulfato de aluminio tipo A y el cloruro férrico. Identifico la dosificación óptima de coagulante, así como también se determinó el pH adecuado para elevar la eficiencia de la remoción de turbidez, obteniendo que el sulfato de aluminio de tipo A con dosis de 10000 mg/L tuvo mejores eficiencias a comparación con el uso de cloruro férrico. Los resultados mostraron que las eficiencias de las pruebas con lixiviado estiman remoción entre 43.75% a 51.88% para

la turbidez con el uso de sulfato de aluminio, lográndose disminuir significativamente los parámetros fisicoquímicos en los lixiviados, y constituyéndose como alternativa de solución viable ante la ausencia de una infraestructura para residuos sólidos en Moyobamba

Medrano (2017) elaboró una investigación titulada “Tratamiento de lixiviados del botadero de residuos sólidos de la ciudad de Puno por el proceso de coagulación y floculación” con el propósito de demostrar la reducción de la contaminación ambiental al tratar los lixiviados del vertedero de residuos sólidos urbanos ubicado en Cancharani, mediante el método de coagulación y floculación, utilizando como coagulante el sulfato de aluminio  $AL_2(SO_4)_3$  y como floculante el hidróxido de calcio  $CA(OH)_2$ . Los parámetros fisicoquímicos del lixiviado de los residuos sólidos urbanos contienen hierro (50 mg/L). Las dosis de coagulante que se modificaron en todas las diluciones fueron de 30 a 100 mg/L, se realizaron experimentos variando la velocidad de agitación (20 a 150 rpm) y el tiempo de mezcla (10 a 15 min.), con objeto de establecer sus influencias en los procesos ensayados. Los resultados muestran que se removió el 94,81 % de Fe con la adición de 100 mg/L de  $AL_2(SO_4)_3$  y 20 mg/L de  $CA(OH)_2$ , operando el proceso a una velocidad de agitación de óptima de 150 rpm para la coagulación con tiempo de mezcla de 10 minutos y 60 rpm por 9 minutos para floculación. Se demostró que el tratamiento del lixiviado por el método de coagulación-floculación evita la contaminación medio ambiental.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

En el trabajo de investigación titulado “Capacidad de la borra de café para remover cobre y plomo del lixiviado generado en la celda transitoria de Rupa Rupa – Tingo María – 2023”, Rubio (2024) tuvo como objetivo evaluar la capacidad de la borra de café para remover cobre y plomo del lixiviado generado en la Celda Transitoria, Los lixiviados analizados revelaron altos niveles de Demanda química de oxígeno (DQO) con un valor de 1145 mg/L, donde se encontró que las concentraciones de cobre y plomo disminuyeron considerablemente en las pruebas realizadas, siendo las pruebas con borra de café lavada con NaOH y sometida a tratamiento térmico las más efectivas para la remoción residual de estos metales, alcanzando valores mínimos e 0.138 mg/L para cobre y 0.031 mg/L para plomo. Estos tratamientos también afectaron los parámetros fisicoquímicos del lixiviado, incrementando la conductividad eléctrica y salinidad, mientras que la DQO y el potencial redox disminuyeron. La mejor eficiencia de remoción se logró con la borra de café lavada con NaOH, alcanzando una remoción del 59.49% para el cobre y del 85.68% para el plomo.

Oré et al. (2023) realizó una investigación titulada “Caracterización de

los lixiviados generados en las celdas transitoria de Leoncio Prado – Huánuco” donde tuvo como objetivo determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos, así como también su comparación frente a normativas nacionales e internaciones. Para ello, se tomaron muestras de lixiviados para sus posteriores análisis, se analizaron como el olor y el color, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, cobre, zinc, plomo y cadmio; y parámetros microbiológicos, como la numeración de microorganismos aerobios viables, presencia de Salmonella, coliformes termotolerantes, Staphylococcus aureus y Vibrio cholerae. Los resultados fueron comparados con normas internacionales y nacionales. De acuerdo con los metales encontrados, valor encontrado de plomo en los lixiviados sobrepaso el límite establecido en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Lixiviados**

El lixiviado es un líquido generado a partir de la reacción y posterior transporte de sustancias resultantes de la composición de residuos. Este líquido contiene sustancias ya sean en forma disuelta o en forma de suspensión, que pueden infiltrarse fuera de los lugares donde se depositan los residuos. Esta infiltración puede causar la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representando un riesgo potencial para los organismos vivos. Además, se considera que este efluente residual, esta caracterizado por altos niveles de compuestos inorgánicos y orgánicas (Arredondo, 2022).

### **2.2.2. Composición de los lixiviados**

Presentan una composición compleja que incluye tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos. Entre estos se encuentran los contaminantes orgánicos como los ácidos orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos), compuestos volátiles (metano, amoníaco, COVs), DBO y DQO. Referente a contaminantes de tipo inorgánico tenemos a los metales pesados (plomo, mercurio, cadmio, hierro, zinc, y cobre), nutrientes (nitrógeno y el fósforo), y diversas sales disueltas. Además, pueden contener microorganismos como bacterias, virus y otros patógenos que pueden provenir de residuos orgánicos y distintos productos resultantes de la descomposición de estos. (Foo, 2020)

### **2.2.3. Características de los lixiviados**

Las características de los lixiviados se representan comúnmente por los parámetros: pH, turbidez, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, Demanda

Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, turbiedad, solidos totales y metales pesados.

### **- pH**

Este parámetro va a ser variable en consideración a los años de funcionamiento que presenta la estructura emisora de lixiviado procedentes de los residuos sólidos. El pH puede alcanzar valores muy bajos cercanos o menores a 5, esto se debe a la disponibilidad de ácidos de tipo orgánico que se generan con parte de la fase conocida como acidogénica, el pH suele incrementar su valor conforme va cambiando de fase llegando a a valores cercanos al 8. (Toalá, 2019)

### **- Conductividad eléctrica**

En medios líquidos está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico (Toalá, 2019)

### **- Temperatura**

Los valores de este parámetro en los lixiviados de residuos sólidos pueden variar según diversos factores, como la ubicación geográfica, la temporada, la profundidad del vertedero, la composición de los residuos y la actividad biológica. La temperatura de los lixiviados también ejerce influencia sobre la velocidad de las reacciones químicas y biológicas en el entorno. En entornos con temperaturas elevadas, la descomposición de la materia orgánica puede acelerarse y generar procesos no deseados, como la producción de gases tóxicos o inflamables (Hettiarachchi, 2017).

### **- Oxígeno disuelto (OD)**

El oxígeno disuelto en los lixiviados provenientes de vertederos indica la cantidad de oxígeno molecular presente, que ha estado en interacción con los residuos sólidos, este incorpora a través de procesos de difusión y transporte (Foo, 2020).

### **- Turbidez**

La turbidez es la medida de la transparencia reducida del agua debido a la presencia de partículas suspendidas. La importancia de este radica en que su valor nos permite evaluar la calidad del lixiviado; un alto valor de turbidez afecta a la disponibilidad

del oxígeno disponible, debido al bloqueo de la penetración de la luz en el agua, por lo tanto, es un parámetro que se debe considerar para la eficiencia de tratamientos (Zhang, 2021).

#### **- Sólidos totales**

Es la combinación partículas tanto disueltos como suspendidos totales, que están presentes en un líquido. Los tratamientos convenciones son útiles para eliminar en los sólidos suspendidos presentes en el agua a tratar. (Pavón, 2018)

#### **- Metales pesados**

La disponibilidad de los metales pesados en los lixiviados es resultado de la filtración del agua a través de los residuos sólidos que se encuentran depositados, estos metales pueden estar presentes en forma disuelta o en forma de partículas suspendidas; es importe considerar que su liberación al medio ambiente tiene un alto potencial de contaminación (Hua, 2022).

### **2.2.4. Impacto de los lixiviados**

Los lixiviados constituyen un riesgo a las fuentes naturales de agua, la cantidad de estos es pequeña en comparación con otras aguas residuales, pero su contenido es extremadamente peligroso y pone en riesgo la salud pública junto con el equilibrio medioambiental (Ambaye,2022).

La caracterización de lixiviados de vertederos identifica y cuantifica las sustancias químicas y las características físicas, sin embargo, no es posible inferir su impacto directo en el ecosistema (Franco et al., 2017); cuando los lixiviados no son efectivamente tratados contribuyen a la contaminación del medio ambiente.

### **2.2.5. Tratamientos para lixiviados**

Los métodos para tratar lixiviados se pueden agrupar principalmente en tres categorías:

- Transferencia de lixiviados: recirculación, deposito en lagunas de estabilización
- Tratamientos Biológicos: aeróbicos (biomasa suspendida, biomasa en crecimiento) y anaeróbicos (filtros de lecho hídrico, filtros anaeróbicos)
- Tratamientos fisicoquímicos: adsorción, precipitación química,

coagulación-floculación y oxidación química.

- Tratamientos de membrana: ósmosis inversa, Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración

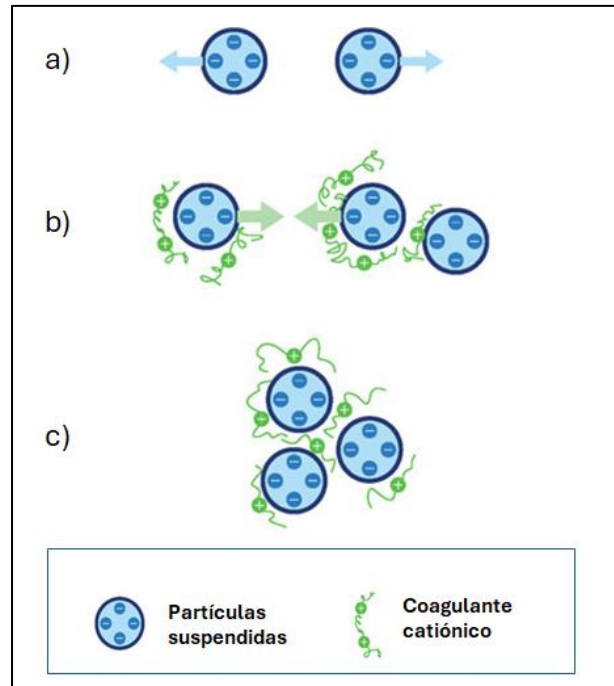
### **2.2.6. Coagulación - floculación**

Este proceso se refiere a la aglutinación de partículas para formar flóculos, los cuales tienen un peso específico mayor que el del agua (Choque-Quispe et al., 2018). Este mecanismo implica dos etapas: primero, la desestabilización, y segundo, el transporte físico que provoca la colisión y agregación de estas partículas previamente desestabilizadas en flóculos. El proceso considera una serie de tres etapas, que incluyen la coagulación seguida de la floculación, y finalmente la sedimentación.

#### **2.2.6.1. Coagulación**

La coagulación consiste en la remoción de sólidos en suspensión y cualquier contaminante asociado con ellos. Las partículas suspendidas presentes en el agua presentan una carga eléctrica superficial, mayormente negativa, esta carga eléctrica les impide aglutinarse unas con otras (Figura 1.a). En la coagulación se agrega un coagulante, este anula la carga eléctrica de la superficie de estas partículas, las partículas sólidas se desestabilizan y se vuelven menos repelentes entre sí debido a la atracción entre las cargas eléctricas opuestas (Figura 1.b) (Chacon & Ramos, 2019).

Los coagulantes como el sulfato de aluminio o cloruro férrico liberan iones metálicos como aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) o hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) en el agua, estos iones se hidrolizan para formar hidróxidos metálicos, que actúan como centro de unión para las partículas suspendidas (Figura 1.c), esto permite que se agrupen para formar flóculos y facilitar así su eliminación ya sea por sedimentación o filtración (Wang, 2023). La eficiencia de la etapa de coagulación depende de varios factores como: la dosificación de coagulante, pH, la agitación y período mezcla rápida.



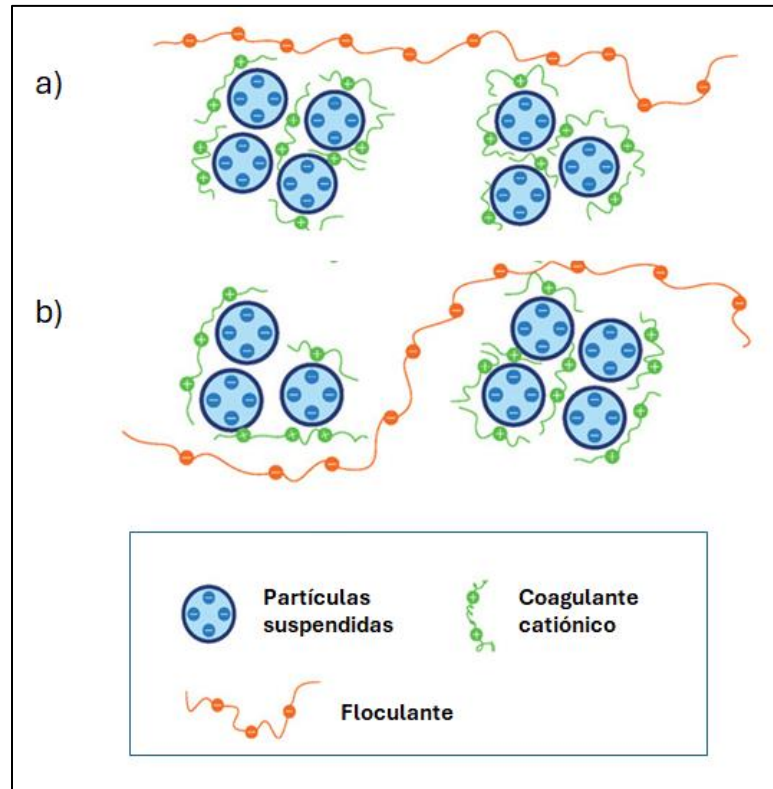
**Figura 1.** Proceso de coagulación (Adaptado de Wang, 2023).

(a) repulsión electrostática entre partículas (b) atracción entre partículas, (c) flóculos formados por atracción luego de adsorción del coagulante catiónico.

### 2.2.6.2. Floculación

Esta etapa del proceso consiste en la adición de un floculante que se adsorbe en los flóculos reduciendo espacios entre los flóculos (Figura 2.a) y mediante una mezcla lenta con la agitación menor se propicia el crecimiento y aglomeración de los flóculos (Figura 2.b) , esto con la finalidad de poder generar un aumento tanto de tamaño como de peso en los flóculos, para que estos procedan a sedimentarse con mayor facilidad(Wang, 2023).

El flóculo formado a partir de partículas desestabilizadas en la etapa previa de coagulación no puede sedimentar fácilmente, debido a que no cuentan con el peso y volumen necesario. Por ello se hace el uso de sustancias floculantes, la aplicación de estas sustancias facilita la sedimentación de estos. La floculación es influenciada por factores como la coagulación previa, donde se considera la dosificación, pH y la agitación óptima del mezclado rápido y lento, debido a que esta agitación lenta evita el rompimiento de los flóculos que se encuentra formados. Según la operación para el movimiento del agua en la mezcla lenta, esta se puede llevar a cabo de manera mecánica utilizando motores, paletas o un sistema hidráulico (Chacon y Ramos, 2019).



**Figura 2.** Proceso de floculación (Adaptado de Wang, 2023).  
 (a) el efecto de adsorción del floculante (b) aglomeración de flóculos.

### 2.2.6.3. Etapas del proceso de coagulación- floculación

Las etapas que conforman el proceso de coagulación – floculación se llevan a cabo inicialmente en un primer tanque de mezcla rápida, donde se hidroliza el coagulante y ocurre la desestabilización de la carga de las partículas, el segundo, es el tanque con el mezclado lento, donde se promueve el contacto entre las partículas ya desestabilizadas y agrupadas en flóculos (Figura 1); finalmente la mezcla pasa a una etapa de velocidad nula donde se produce la sedimentación (Charapaqui, 2019).

#### A. Mezcla rápida

Es una operación en el cual se efectúa un mezclado rápido y uniforme de coagulante y las sustancias de ajuste de pH son añadidos a la muestra; con el objetivo es dispersar los químicos en el agua y destruir la estabilidad de los coloides y promover su agregación, generando el proceso de coagulación (Jones., 2019).

La velocidad de agitación y el tiempo necesarios para alcanzar el propósito de mezcla rápida se determinan por métodos experimentales de laboratorio, ya que estas variables dependen de la naturaleza de las aguas a tratar, del coagulante y floculante a emplear, del pH, del proceso del cual se generan esta agua, la cantidad y concentración de los contaminantes presentes. Generalmente la velocidad de agitación para

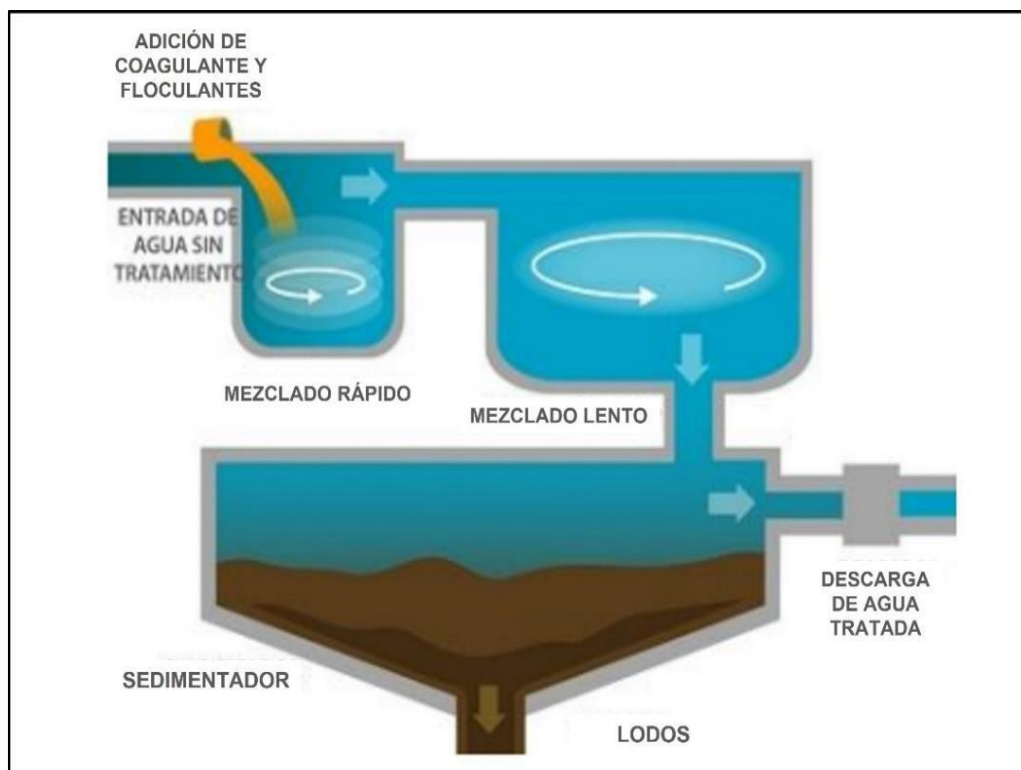
alcanzar una mezcla rápida es de 100 a 150 rpm (Patel, 2019).

### B. Mezcla lenta

El mezclado se efectúa a velocidad moderada, con el objetivo de mantener los componentes de agua mezclados y promover la posibilidad de choque entre partículas y, por consiguiente, la mejora de la calidad de los flóculos, haciéndolos mucho más grandes y pesados, para su posterior precipitación (Chávez et al., 2019). Esta mezcla debe tener una velocidad de agitación de 20 a 50 rpm; debido a que, una vez añadido el floculante, luego de 20 a 30 minutos, se tiene la formación de flóculos.

### C. Sedimentación

Esta etapa se da luego de la adición de coagulantes y floculantes, donde el agua tratada permanece en el tanque a una velocidad nula y en un determinado tiempo de retención que permite la formación completa de los flóculos, durante este tiempo se asegura que los flóculos formados sean lo suficientemente grandes y densos para que sedimenten fácilmente (Astorga, 2018).



**Figura 3.** Esquema del tratamiento de coagulación-floculación (Adaptado de Astorga, 2018).

#### 2.2.6.4. Factores determinantes en el proceso

Los principales factores determinantes son los siguientes:

### - **Dosis de coagulante y floculante**

La dosificación para maximizar la eficiencia del proceso debe ser determinada con un valor requerido necesario que no sobrepase lo necesario, para minimizar los impactos ambientales negativos y los costos operativos. Ttito (2018) menciona, que una cantidad insuficiente, no aseguran la neutralización de las cargas de las partículas suspendidas, por lo tanto, resultaría en una coagulación incompleta o insuficiente. Por otro lado, la adicción de dosis excesivas de coagulante conlleva a la formación excesiva de flóculos demasiado pequeños o compactos que sedimentan en largos períodos de tiempo generando una sedimentación deficiente.

### - **pH del agua**

El pH óptimo para el desarrollo eficiente del proceso depende de la clase coagulante seleccionado, así como también de las características del agua. Cuando se trabaja con un valor diferente al del ph ideal, generalmente se requiere una dosis mayor de compuestos coagulantes para lograr la formación de los flóculos (Garzón, 2021).

### - **Temperatura**

Esta es un parámetro importante que considerar en el proceso de tratamiento; debido a que puede influir en las reacciones ocurridas dentro del proceso y la velocidad de estas, y en la formación de los flóculos. Akram et al. (2021) menciona que las temperaturas más altas mejoran la eficiencia del proceso en comparación con temperaturas bajas que provocan una lenta formación de flóculos

### - **Presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas**

La presencia de estas es crucial para el proceso de coagulación- floculación en el tratamiento de agua, estas sustancias interfieren con la eficiencia de los coagulantes, lo que puede llevar a la necesidad de aumentar las dosis necesarias para tener un proceso efectivo (Zhu, 2023). Por ello, es importante conocer la naturaleza y concentración de estos para poder optimizar el proceso de coagulación- floculación.

### - **Características del mezclado**

El mezclado es fundamental en este proceso, debido a que este influye en la formación de flóculos. El mezclado logra y asegura la dispersión uniforme

tanto del floculante como del coagulante. Garzón (2021) menciona que se debe tener en cuenta que las reacciones ocurren en un período de tiempo determinado, por lo tanto, el mezclado no debe ser por un período de tiempo largo porque ocasionaría que los flóculos formados se rompan y que no se vuelvan a unir, por otro lado, una mezcla lenta puede dar como resultado una coagulación ineficiente debido a la insuficiente dispersión del contaminante.

#### - **Tiempo de retención**

El tiempo de retención es una variable importante en el proceso de coagulación-floculación, debido a que afecta la eficacia de la sedimentación de los flóculos formados. Liu (2023) menciona que un tiempo de retención adecuado permite que se formen flóculos lo suficientemente grandes como para sedimentar, mientras que un tiempo insuficiente puede resultar en una clarificación incompleta del agua.

#### **2.2.6.5. Coagulantes**

Son sustancias utilizadas en el proceso de desestabilización coloidal mediante la neutralización de cargas eléctricas, con el fin de formar un agregado precipitante (Ttito, 2018). Entre los más utilizados comúnmente sales de hierro y aluminio que suele ser de naturaleza inorgánica y de composición simple, entre los que se encuentran: sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y el aluminato de sodio.

#### **2.2.6.6. Floculantes**

Los floculantes son productos utilizados para mejorar las condiciones de los flóculos y facilitar su sedimentación. Esto se logra al unir partículas individuales en aglomerados más grandes, aumentando así el volumen, peso y cohesión del flóculo. Estos compuestos presentan un alto peso molecular, formados por moléculas solubles y orgánicas en agua compuestas por la repetición de monómeros que crean largas cadenas (Manrique, 2024). Los floculantes pueden ser de origen mineral, orgánico natural (como alginatos y almidones) o sintético (polielectrolitos).

Garzón (2021) menciona que aspecto importante que considerar es que los floculantes orgánicos son una fuente alternativa con gran potencial aun no investigado suficientemente, además de ser amigables con el medio ambiente debido a su biodegradabilidad y ofrecen una capacidad de clarificación superior en comparación con los productos inorgánicos empleados en este proceso.

### **2.2.6.7. Prueba de jarras**

Es la técnica utilizada con mayor frecuencia para determinar la dosis y concentración óptima del coagulante y floculante, se determina la intensidad de agitación y el tiempo de mezcla (Choque-Quispe et al., 2018). Esta prueba nos permite reproducir a escala de laboratorio los procesos de coagulación, floculación y sedimentación; donde se utiliza una serie de jarras al mismo tiempo con posibilidad de variación de la velocidad de agitación. En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos, como: pH, temperatura, dosis de las sustancias químicas coagulantes y floculantes, velocidad, período de mezcla y sedimentación.

### **2.2.7. Sulfato de Aluminio**

Este coagulante es ampliamente empleado como coagulante para procesos de tratamiento. Este compuesto está disponible en varias presentaciones, siendo la más común y usada su fórmula en polvo. Al ser añadido al agua, este se disocia en iones de sulfato y aluminio, el último de estos va a interactuar como coloide con una carga alta negativa, neutralizando parcialmente su carga y disminuyendo el potencial z, hasta poder alcanzar la formación de flóculos a partir de las partículas (Bravo, 20217). Según Molano (2019) los compuestos con iones de aluminio tienen una mayor eficiencia frente a otros compuestos usados como los son los compuestos con iones de sodio o calcio.

La máxima coagulación con sulfato de aluminio generalmente se logra en un rango de pH de 6.5 a 7 (Ynofuente,2022). Dentro de este rango, el sulfato de aluminio es más eficiente para desestabilizar las partículas y formar flóculos grandes y densos que pueden ser removidos efectivamente (Yang, 2010).

### **2.2.8. Floculante de almidón de papa (*solanum tuberosum*)**

El almidón de papa es beneficioso para diversos procesos debido a su heterogeneidad en comparación con otros carbohidratos. Este polímero actúa mediante su unión a partículas en suspensión del agua, creando flóculos que sedimentan con mayor facilidad por la gravedad (Hurtado y Yarleque, 2017).

El almidón de *Solanum tuberosum*, contiene los porcentajes de sus principales compuestos de amilosa y amilopectina indicados en la Tabla 1. Respecto al tamaño de sus gránulos, estos presentan un tamaño promedio que varía entre 15,22 y 18,30  $\mu\text{m}$ . Este tamaño de gránulos está relacionado con la proporción de amilosa y amilopectina y puede

implicar una mayor capacidad para absorber agua. Además, su estructura facilita una mejor integración de plastificantes y agua durante la formación de películas (Vélez, 2021).

**Tabla 1.** Contenido de amilosa y amilopectina del almidón de papa *Solanum tuberosum*.

Amilosa (%)	Amilopectina (%)
24%	76%

Fuente: (Vélez, 2021)

La amilosa y la amilopectina, dos componentes principales del almidón, desempeñan roles clave en la remoción de contaminantes. La amilosa, con su estructura lineal, facilita la formación de una red densa durante la gelatinización, que puede atrapar y adsorber contaminantes. La amilopectina, por su parte, con su estructura ramificada, contribuye a la formación de una red tridimensional que mejora la capacidad de absorción (Nunes, 2019).

#### **2.2.8.1. Gelatinización del almidón de papa (*Solanum Tuberosum*)**

El proceso de gelatinización del almidón de papa es crucial para maximizar la capacidad del almidón para adsorber y remover contaminantes de manera efectiva. Este proceso implica la absorción de agua, el hinchamiento y la ruptura de los gránulos conforme la temperatura se eleva, dando como resultado la liberación de cadenas de amilosa y amilopectina, lo que a su vez aumenta la viscosidad y origina la formación de una estructura gelatinosa. Este cambio en la estructura permite que se atrapen y absorban contaminantes debido a la capacidad del *almidón de papa Solanum tuberosum*., como compuestos orgánicos, iones metálicos y otros sólidos suspendidos que pueden estar presentes (Ttito, 2018).

#### **2.2.9. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una medida crucial para evaluar la carga contaminante en los lixiviados producido en sistemas de disposición final de residuos sólidos. Esta prueba determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar los compuestos orgánicos y algunas sustancias inorgánicas que están presentes en el lixiviado. Un alto valor de DQO en los lixiviados indica una alta concentración de materia orgánica y otros contaminantes, podría generar una afectación significativa si no se trata adecuadamente. Por lo tanto, el control y tratamiento eficaz de la DQO en los lixiviados son fundamentales para mitigar su impacto y proteger la calidad del agua y los ecosistemas circundantes (Gao,2023). Para aguas con altos niveles de DQO, es importante ajustar el pH del agua a un rango óptimo para maximizar la eficiencia de los coagulantes y facilitar la formación de flóculos.

### **2.2.10. Hierro total**

El hierro en los lixiviados es un metal que se encuentra comúnmente, generalmente en las formas ferrosa ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y férrica ( $\text{Fe}^{3+}$ ). La concentración de hierro en los lixiviados puede variar ampliamente y es influenciada por el tipo de residuos, las condiciones redox y el pH del lixiviado (Zhang et al., 2021). La presencia de hierro es significativa debido a su capacidad para afectar la química del lixiviado y los procesos de tratamiento, así como su potencial impacto en la calidad de las aguas subterráneas y superficiales.

La sedimentación del hierro está relacionada con el pH, debido a que esta ocurre dentro de rangos de pH, dependiendo de la forma en la que el hierro se encuentra disponible. Generalmente en un rango de 6.5 a 8, debido a que este rango favorece la formación de hidroxilos metálicos, donde el hierro ferroso se oxida a hierro férrico antes de que pueda participar en el proceso, debido a que el hierro en forma férrica es el que contribuye en la formación de flóculos sedimentables (Parker, 2019).

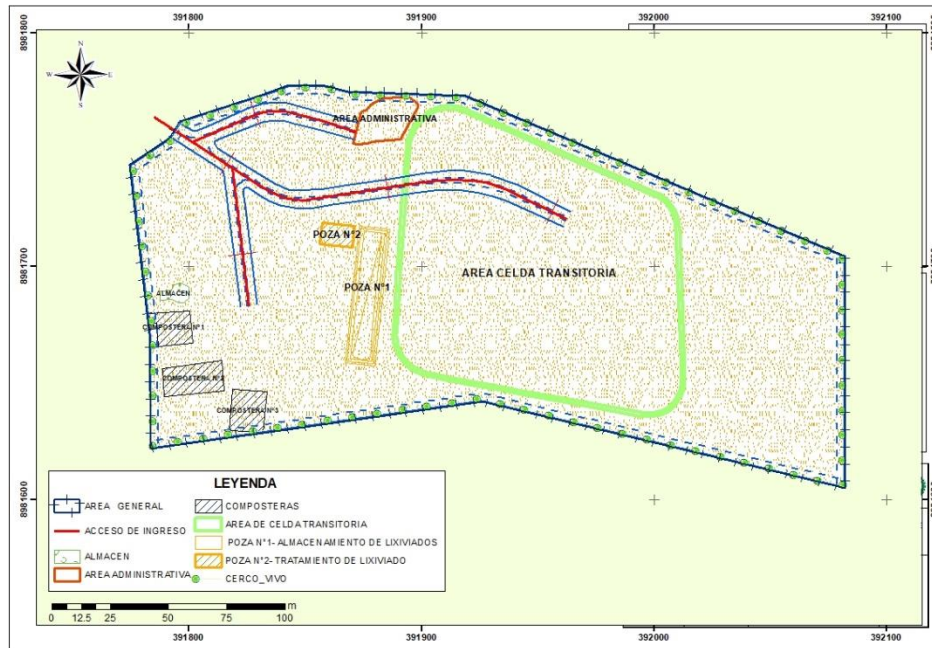
### **2.2.11. Celda transitoria de Leoncio Prado**

La Celda Transitoria para la disposición de residuos sólidos de Leoncio Prado es una instalación diseñada para gestionar de manera segura los residuos sólidos generados con una adecuada disposición final de los distritos de Castillo Grande, Daniel Alomia Robles, Luyando, Mariano Damaso Beraun y Rupa Rupa de Leoncio Prado, región Huánuco (MINAM, 2019). Actualmente la Celda Transitoria se encuentra al 95% de capacidad luego de 2 años y 11 meses de operación.

#### **2.2.11.1. Sistema de manejo de lixiviados**

Para el manejo de los lixiviados, se cuenta con dos pozas, la distribución de estas se muestra en la Figura 4; la Poza N°1 es dedicada a la recolección y almacenamiento y la Poza N°2 al tratamiento de estos líquidos. Los lixiviados son recogidos a través de drenes que conectan con las celdas de confinamiento hasta las pozas para lixiviados. Durante la época de estiaje, los lixiviados se almacenan en la Poza N°1, conocida como la poza principal, la cual está techada y cuenta con una capacidad de 2,135 m<sup>3</sup> y posteriormente estos son recirculados mediante una bomba diseñada específicamente para lixiviados. Por otro lado, durante la época de avenidas, el manejo de los lixiviados cambia debido al incremento en su volumen causado por las precipitaciones, supera la capacidad de la Poza N° 1. En este contexto, los lixiviados se almacenan inicialmente en dicha poza y luego se bombean a la Poza N° 2, dicha poza no

presenta techado y presenta una capacidad de 140 m<sup>3</sup>; donde se realiza un tratamiento con sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio antes de proceder con su descarga (Municipalidad de Leoncio Prado, 2024).



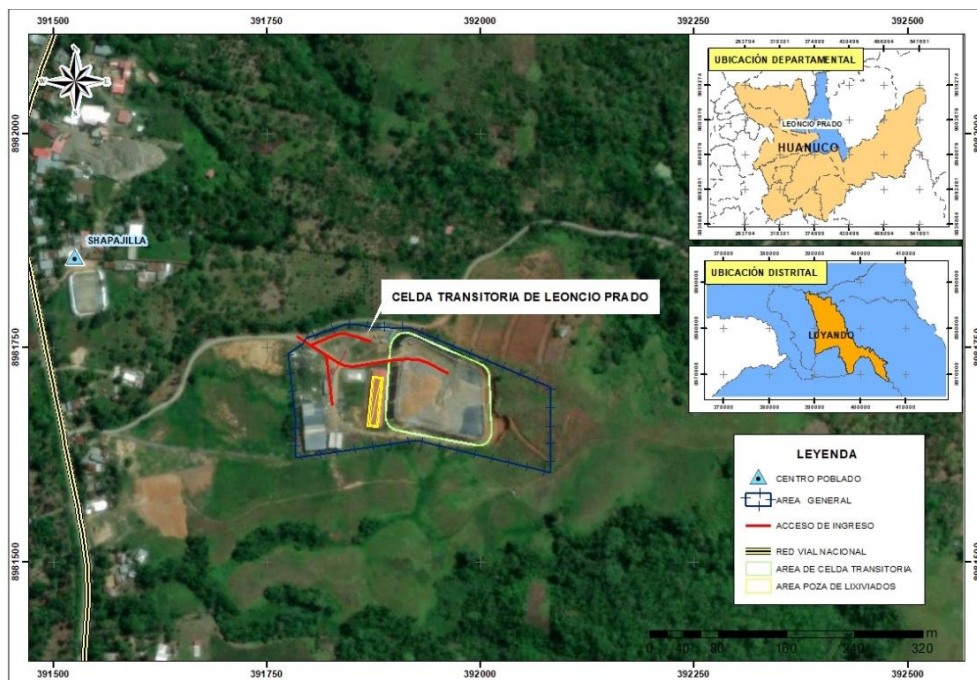
**Figura 4.** Mapa de componentes de la Celda Transitoria y puntos de muestreo de lixiviados.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

##### 3.1.1. Ubicación política

La investigación tuvo dos ámbitos de desarrollo. El primero consistió en obtención de muestras de lixiviado de la poza de lixiviados de la Celda Transitoria de Leoncio Prado (Poza N°1), ubicada en el Distrito de Luyando, Provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco (Figura 4). Posteriormente, para el desarrollo del análisis y aplicación de los tratamientos a las muestras se usó las instalaciones del Laboratorio de Calidad Del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado en el Distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.



**Figura 5.** Ubicación de la Celda Transitoria para disposición final de los residuos sólidos

##### 3.1.2. Ubicación geográfica

En la Tabla 2, se muestran las coordenadas UTM WGS84 para los lugares de ejecución anteriormente mencionados.

**Tabla 2.** Coordenadas geográficas de los lugares de ejecución

Lugar de ejecución	E (m)	N (m)	(msnm)
Celda Transitoria de Leoncio Prado	391927	8981695	656
Laboratorio de Calidad del agua	390548	8970343	667

### **3.1.3. Aspectos ambientales**

#### **3.1.3.1. Clima**

El clima en Rupa-Rupa, Tingo María, es predominantemente cálido y húmedo. Las temperaturas máximas oscilan entre 32°C y 33°C, mientras que las mínimas pueden bajar a 18°C o 19°C. A lo largo del año, la región incluye condiciones climáticas con cielos nublados parciales hasta despejados, con alta humedad y frecuentes lluvias.

SENAMHI (2024) nos menciona de diciembre hasta enero, son los meses donde se producen las lluvias con mayor, siendo enero el mes más lluvioso con una precipitación que alcanza aproximadamente 451.08 mm/mes. La estación seca se extiende de mayo a septiembre, siendo junio uno de los meses con menor precipitación (150 mm) y temperaturas mínimas alrededor de los 18°C.

### **3.2. Materiales y equipos**

Los materiales empleados en esta investigación fueron los siguientes: envases de plástico de 3L y 5 L, embudo de plástico, vasos precipitados de 1000 mL, 500 mL y 25 mL, botellas de vidrio de 300 mL, pipetas de 5 mL y 10 mL, micropipeta, varilla de agitación, papel tissue, cinta Parafilm, guantes de látex, mascarillas, papel toalla, alcohol, rotuladores y guardapolvo. Los equipos que se utilizaron son: turbidímetro portátil HACH 2100Q, multiparámetro IDS, colorímetro portátil multiparamétrico HACH DR900, termoreactor para DQO y test de jarras. Los reactivos que se usaron fueron los siguientes: Agua destilada, sulfato de aluminio, almidón de *Solanum Tuberosum* (almidón de papa comercial), kit de prueba de Hierro HACH y viales para DQO.

### **3.3. Criterio de investigación**

#### **3.3.1. Tipo de investigación**

Esta investigación es de tipo experimental, debido a que se permite la manipulación de las variables del proceso de coagulación- floculación como la dosis de ambos compuestos usados, la velocidad y el período de mezcla para observar su efecto en la remoción de DQO y Hierro total.

#### **3.3.2. Nivel de investigación**

El nivel de la presente investigación es explicativo, porque no solo se limita a describir el proceso coagulación-floculación, sino que también busca entender

cómo los factores operativos influyen en la eficiencia de este proceso en la remoción de contaminantes de los lixiviados, al explicar las relaciones causales entre las variables investigadas, la investigación proporciona una comprensión más profunda del proceso estudiado.

### 3.3.3. Diseño de la investigación

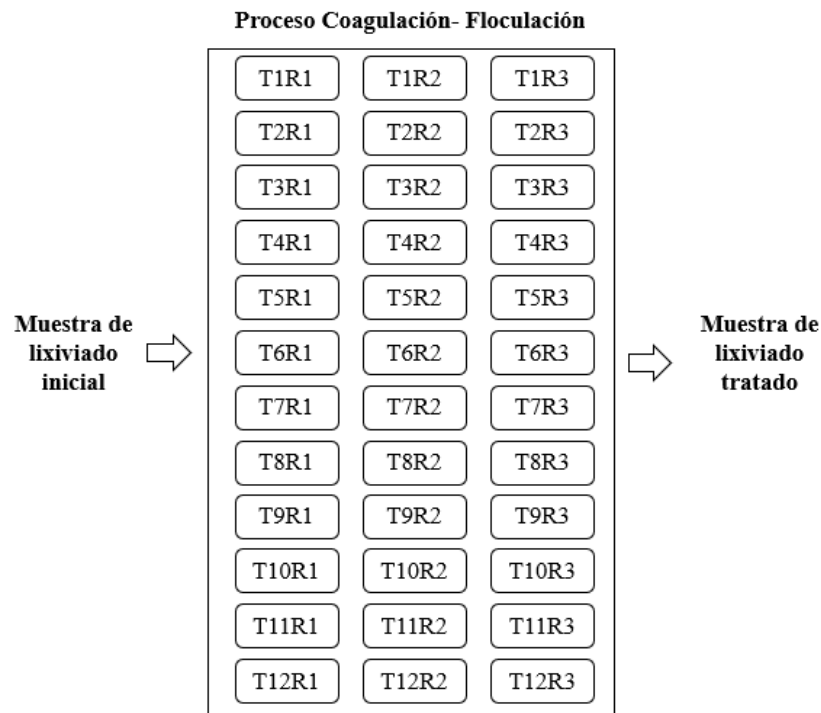
Se aplicó un diseño experimental factorial completo, el cual permite estudiar el efecto de múltiples niveles de cada factor (variable independiente) en la remoción de DQO y Hierro total (variable dependiente). A continuación, la Ecuación (2) muestra el modelo matemático para dos factores ( $X_1$  y  $X_2$ ) con 3 niveles cada uno, que describe la relación entre los factores y la respuesta (Montgomery,2017).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_{11} + \beta_2 X_{12} + \beta_3 X_{13} + \beta_4 X_{21} + \beta_5 X_{22} + \beta_6 X_{23} + \beta_{ij} X_{i1} X_{j2} + \epsilon \quad (2)$$

Donde:

- $Y$  = es la remoción de DQO y Hierro total
- $\beta_0$  = es el intercepto
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = son los coeficientes correspondientes a los niveles del factor  $X_1$  ( $X_{11}, X_{12}, X_{13}$ )
- $\beta_4, \beta_5, \beta_6$  = son los coeficientes correspondientes a los niveles del factor  $X_2$  ( $X_{21}, X_{22}, X_{23}$ )
- $\beta_{ij}$  = es el coeficiente de la interacción entre los a los niveles del factor  $X_1$  y  $X_2$
- $\epsilon$  = es el error aleatorio

La investigación se llevó a cabo utilizando un diseño comprendía 3 niveles de dosis de coagulante y 4 niveles de dosis de floculante, teniendo un total de 12 tratamientos con 3 repeticiones con un total de 36 pruebas, para la determinación de eficiencia de remoción de DQO y Hierro total (Figura 6).



**Figura 6.** Esquema de diseño de la investigación.

Tx: Tratamiento, Rx: Repetición.

### 3.3.4. Variables de estudio

- **Variable independiente**  
Proceso de coagulación-floculación
- **Variable dependiente**  
Remoción de DQO y Hierro total

**Tabla 3.** Operacionalización de variables de investigación.

Variables	Dimensión	Indicador	Unidad de medición
	Velocidad de agitación	Velocidad para mezcla rápida	rpm
		Velocidad para mezcla lenta	rpm
Proceso de coagulación-floculación (independiente)	Período de mezcla	Período de mezcla rápida	min
		Período de mezcla lenta	min
	Dosis de coagulante	Cantidad de coagulante	mg/L
	Dosis de floculante	Cantidad de floculante	mg/L

Variables	Dimensión	Indicador	Unidad de medición
Remoción de DQO y Hierro total (dependiente)	% de remoción de DQO y Hierro total	Remoción de DQO Remoción de Hierro total	mg/L mg/L

### 3.4. Metodología

#### 3.4.1. Caracterización del lixiviado de celdas transitorias en época de avenida

##### 3.4.1.1. Recolección de las muestras de lixiviado de la celda transitoria

Las muestras se tomaron de la Poza N°1, que almacena lixiviados nativos sin la adición de ningún compuesto para tratamiento. Se realizó un muestreo compuesto considerando 3 secciones de la poza de lixiviados (Figura 7), con la ayuda de un balde se extrajo la muestra de cada sección y se realizó la mezcla. Luego, se llenó un envase con 3 litros de lixiviado, que fue codificado y transportado en un cooler para mantener la temperatura y preservar las características de la muestra. Posteriormente, la muestra fue caracterizada fisicoquímicamente en el Laboratorio de Calidad de Agua.

Se recolectaron un total de 6 muestras de lixiviado, con una frecuencia de muestreo quincenal, obteniendo 2 muestras por mes. Durante la época de avenida, abarcando los meses de enero a marzo de 2024 en horario fijo de 8:00 a.m., cada una de estas muestras de lixiviado fue sometida a la caracterización fisicoquímica.

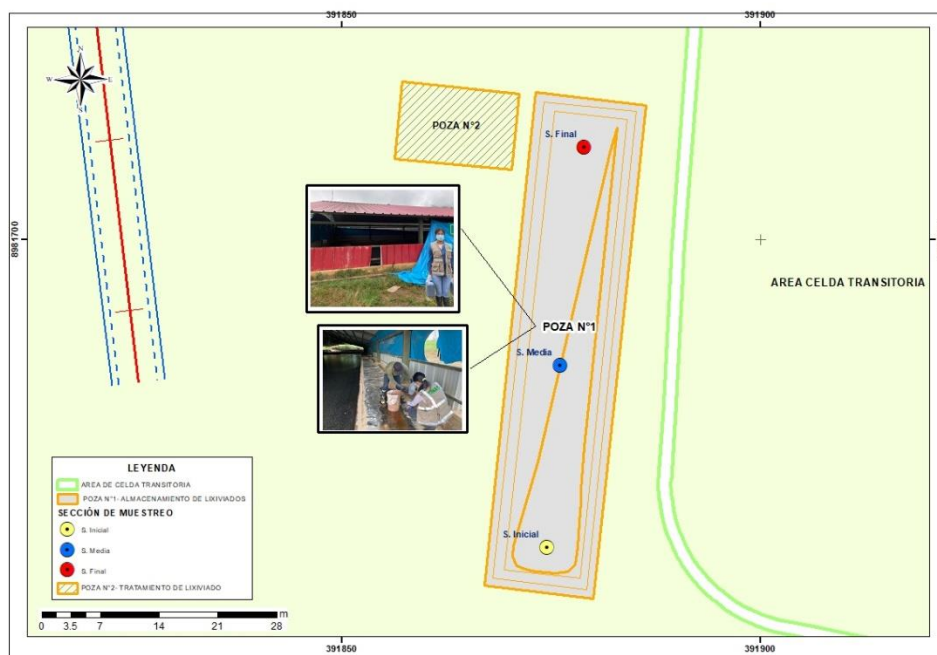


Figura 7. Secciones de muestreo de lixiviados de la Poza N°1.

### 3.4.1.2. Análisis fisicoquímico de la muestra de lixiviado

Una vez tomadas las muestras se realizaron las mediciones de los parámetros como se menciona a continuación:

#### - **pH**

En un vaso precipitado de 500 mL se colocaron 200 mL de muestra de lixiviado, se agitó suavemente la muestra durante 5 segundos, se ingresó el sensor de pH del multiparámetro portátil 3630 IDS y se tomó la lectura después de aproximadamente un 1 minuto cuando los valores se estabilizaron.

#### - **Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

En un vaso precipitado de 500 mL se colocaron 200 mL de muestra de lixiviado, se agitó suavemente la muestra durante 5 segundos, se ingresó el sensor de conductividad del multiparámetro portátil 3630 IDS y se tomó la lectura después de aproximadamente un 1 minuto cuando los valores se estabilizaron.

#### - **Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )**

En un vaso precipitado de 500 mL se colocaron 200 mL de muestra de lixiviado, se agitó suavemente la muestra durante 5 segundos, se ingresó el sensor del multiparámetro portátil 3630 IDS y se tomó la lectura después de aproximadamente un 1 minuto cuando los valores se estabilizaron.

#### - **Turbidez (NTU)**

Para esta medición se utilizó el turbidímetro digital HACH 2100Q. En un vaso precipitados colocó la muestra de lixiviado y se agitó en forma circular para evitar que los sólidos suspendidos se sedimenten, luego se colocaron 10 mL de muestra en el vial de vidrio del equipo y se agitó suavemente; el vial se introdujo en el equipo y se tomó lectura del valor de turbidez.

#### - **Oxígeno disuelto – OD (ppm)**

En un vaso precipitado de 500 mL se colocaron 200 mL de muestra de lixiviado, se agitó suavemente la muestra durante 5 segundos, se ingresó el sensor de oxígeno disuelto del multiparámetro portátil 3630 IDS y se tomó la lectura después de aproximadamente un 1 minuto cuando los valores se estabilizaron.

### - **Salinidad**

En un vaso precipitado de 500 mL se colocaron 200 mL de muestra de lixiviado, se agitó suavemente la muestra durante 5 segundos, se ingresó el sensor de conductividad del multiparámetro portátil 3630 IDS, debido a que la salinidad está relacionada a la conductividad, finalmente se tomó la lectura después de aproximadamente un 1 minuto cuando los valores se estabilizaron.

### - **Demanda química de oxígeno (mg/L)**

Para su medición se emplearon viales de la marca SQA que contienen una mezcla de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ). En este proceso de medición, el dicromato de potasio oxida la M.O. que se encuentre presente, mientras que el ácido sulfúrico proporciona un medio ácido necesario para que ocurra la reacción. Mientras que la materia orgánica es oxidada el color amarillo característico del dicromato de potasio se vuelve verde debido a su reducción a cromo trivalente ( $Cr^{3+}$ ), la intensidad del color verde es según la cantidad materia orgánica oxidada, lo que indica la cantidad de DQO presente en la muestra. Se utilizó el procedimiento del Manual de Análisis de Agua de Hach Company (2000) para la determinación de la DQO mediante de digestión con reactor, el cual se detalla a continuación:

Se agregaron 2 mL de muestra de lixiviado al vial con el uso de una micropipeta, el vial se selló herméticamente y se agitó suavemente para asegurar la homogeneización de la muestra con los reactivos. Como parte del procedimiento de medición, se incluye un blanco, en este caso se añadieron 2 mL de agua destilada a un vial y se agitó para mezclar la solución homogéneamente. Se configuró el termoreactor de DQO a  $150^\circ C$  y, una vez alcanzada la temperatura, se introdujeron los viales (blanco y muestras) para su digestión durante 2 horas. Al finalizar el proceso de digestión, se deja que los viales se enfríen un par de minutos. Luego, se retiran con cuidado, se agitan para homogeneizar, y se colocan en rejillas para que se enfríen a temperatura ambiente durante 20 minutos. Una vez que los viales estuvieron listos, se utilizó el equipo colorímetro portátil multiparamétrico HACH DR900. Se seleccionó el método correspondiente y se realizó primero la lectura del blanco, seguida por la lectura de la muestra de lixiviado.

### - **Determinación de Hierro total**

Para la determinación del hierro se empleará el método de análisis FerroVer propuesto por Hach Company (2018). Este método mide la concentración de

hierro total en una muestra, incluyendo tanto el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) como el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). El reactivo FerroVer permite que todos los estados del hierro presentes en la muestra reaccionen y formen un complejo coloreado, cuya intensidad se mide para determinar la concentración total de hierro. A continuación, se detalla dicho método:

Se comenzó configurando el equipo HACH DR 900 en el método FerroVer. Para preparar la muestra, se enjuagó la celda de vidrio con una pequeña cantidad de muestra y luego se llenó la celda con 10 mL de muestra de lixiviado. A continuación, se añadió un sobre de reactivo Hierro FerroVer a la celda con la muestra, se tapó y se agitó para disolver completamente el reactivo. La muestra tiene un tiempo de reacción de 3 minutos, para lo cual se programó un cronómetro. Para la medición del hierro total, se utilizó un blanco con 10 mL de muestra sin la adición de reactivo. Al finalizar el tiempo del cronómetro, se limpiaron las celdas (blanco y muestra) con papel tissue. Se inició la medición insertando el blanco y tapando el equipo, se presionó la opción de CERO, lo que dio un valor de 0.00 en la pantalla. Luego, se retiró el blanco, se insertó la celda con la muestra, se tapó el equipo y se presionó LEER. El equipo mostró los resultados en mg/L de hierro.

#### 3.4.1.3. Comparación de parámetros con normativa

Se utilizó como referencia el Decreto Supremo que menciona Límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de infraestructuras de residuos sólidos. Es importante señalar que este documento fue una propuesta del Ministerio del Ambiente (2009), pero no fue aprobado oficialmente. La Tabla 4, muestra los LMP indicados en la propuesta los cuales no son legalmente vinculantes; sirven únicamente como guía técnica para establecer valores de referencia en límites de pH, SST, DQO y hierro.

**Tabla 4.** Valores de referencia basados en la propuesta de LMP para efluentes de infraestructuras de residuos sólidos.

Parámetros	Unidad	LMP
<b>Generales</b>		
pH		6,5 - 8,5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	30
<b>Orgánicos</b>		
DQO	mg/L	120
<b>Inorgánicos</b>		
Hierro total	mg/L	2

Fuente: MINAM (2009)

### 3.4.2. Determinación de dosis óptima de coagulante y floculante, velocidad de agitación y período de mezcla

#### 3.4.2.1. Recolección de muestras de lixiviado de la celda transitoria

Las muestras fueron tomadas de la poza de lixiviados de la celda transitoria, previa coordinación con los responsables del área. Para ello se realizó un muestreo compuesto recolectando un total de 15 L, los cuales fueron llenados en envases de 5L con la ayuda de un embudo, el envase fue codificado y se transportó al Laboratorio de Calidad de Agua donde se realizó la caracterización fisicoquímica de los lixiviados. Los muestreos se realizaron los lunes, miércoles y viernes durante los meses de enero a marzo.

#### 3.4.2.2. Preparación de coagulante y floculante

##### A. Preparación del coagulante de sulfato de aluminio

Como coagulante se utilizó Sulfato de Aluminio de tipo A. Se preparó una solución madre a 30 000 ppm. Para ello, se utilizaron 30 g de Sulfato de aluminio, los cuales fueron previamente pesados, posteriormente se le agregó agua destilada hasta completar 1 L para su dilución, se agitó el contenido hasta que el coagulante se disuelva completamente. El coagulante fue preparado cada vez que se necesitara y fue utilizado solo en mismo día de la preparación.

Para la determinación de las dosis de coagulante se consideró añadir la solución de sulfato de aluminio hasta bajar el pH entre un rango de 6.9 – 7, rango donde se produce la formación de hidroxilos que propicia la formación de flóculos con el uso de sulfato de aluminio. Para ello, se fue añadiendo la solución de 30 000 ppm progresivamente en volúmenes de 1 mL con una pipeta a la muestra de 1000 mL de lixiviado, se consideró añadir la solución hasta que el valor final se encuentre dentro del rango del pH y se dé la aparición de los flóculos. La Tabla 5, nos muestra las dosis de coagulante determinadas y el pH final.

**Tabla 5.** Dosis de coagulante y variación de pH

pH inicial	Sulfato de aluminio (mL)	pH final
7.82	40	7.13
7.82	50	7.03
7.82	60	6.93

## B. Preparación del floculante de almidón de *Solanum Tuberosum* gelatinizado

Como floculante se utilizó el almidón de papa comercial elaborado de variedad *Solanum Tuberosum*, característico por su presentación pulverizada.

La preparación de la solución gelatinizado a 15 000 ppm se realizó siguiendo la metodología de Ttito (2018). Esta consiste en pesar 15 g del polvo y diluirlos en 100 mL de agua destilada, posteriormente la solución disuelta se vierte en un vaso precipitado y le agrego agua destilada hasta completar 1000 mL. El resultado de la mezcla mencionada se llevó a estado de ebullición, desde la ebullición no se dejó de mover durante 15 minutos hasta que la formación de una solución con consistencia viscosa y densa; lo cual indica la presencia de los mucilagos. Pasado un par de minutos, se traspasó el contenido frio a un vaso precipitado de 1L. El floculante fue preparado cada vez que se necesitara y fue utilizado solo en mismo día de la preparación. En la investigación se aplicaron dosis de floculante de almidón de *Solanum Tuberosum* gelatinizado de 1 mL, 2 mL, 3mL y una muestra testigo sin floculante.

### 3.4.2.3. Combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla

En este ensayo se evaluó la combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla para una mayor eficiencia de remoción, se consideró como parámetro final la turbidez debido a que la determinación de la DQO y Hierro total implicaba un costo adicional. La Tabla 6 muestra los diferentes niveles de velocidad de agitación y período de mezcla, tanto para mezcla rápida como para lenta.

**Tabla 6.** Niveles de velocidad de mezcla y período de mezcla

Tipo de mezcla	Velocidad de agitación (rpm)		Período de mezcla(min)	
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 2
Mezcla rápida	100	200	1	3
Mezcla lenta	40	50	10	15

Esta Tabla 7 muestra las 16 combinaciones posibles considerando los niveles de velocidad de agitación y período de mezcla para los dos tipos de mezcla (rápida y lenta). Cada fila representa una combinación que fue utilizada, cada una con 3 repeticiones. Se consideraron 20 minutos para la sedimentación de los flóculos.

**Tabla 7.** Combinaciones de velocidad de agitación y período de mezcla.

Combinación	Mezcla rápida		Mezcla lenta	
	Velocidad de agitación (rpm)	Período de mezcla (min)	Velocidad de agitación (rpm)	Período de mezcla (min)
1	100	1	40	10
2	100	1	40	15
3	100	1	50	10
4	100	1	50	15
5	100	3	40	10
6	100	3	40	15
7	100	3	50	10
8	100	3	50	15
9	200	1	40	10
10	200	1	40	15
11	200	1	50	10
12	200	1	50	15
13	200	3	40	10
14	200	3	40	15
15	200	3	50	10
16	200	3	50	15

#### 3.4.2.4. Dosis óptima de coagulante y floculante

En los ensayos para determinar la dosis óptima, se realizaron 12 tratamientos, como se muestra en la Tabla 8 considerando 3 repeticiones para cada uno. La velocidad y el periodo de mezcla se mantuvieron constantes, utilizando los valores previamente determinados, y se consideró 20 minutos de sedimentación. Los parámetros finales medidos fueron turbidez, DQO y hierro.

**Tabla 8.** Dosis de coagulante y floculante.

Tratamiento	Sulfato de Aluminio (mL)	Almidón de <i>Solanum Tuberosum</i> gelatinizado (mL)
1	40	0
2	40	1

Tratamiento	Sulfato de Aluminio (mL)	Almidón de <i>Solanum Tuberosum</i> gelatinizado (mL)
3	40	2
4	40	3
5	50	0
6	50	1
7	50	2
8	50	3
9	60	0
10	60	1
11	60	2
12	60	3

### 3.4.3. Determinación de la remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida

Concluidos los ensayos se procedió a determinar la remoción, esto se realizará con los valores iniciales y finales de DQO y Hierro total, siguiendo la Ecuación (1) que se muestra a continuación:

$$R(\%) = \frac{V_{Inicial} - V_{Final}}{V_{Inicial}} * 100 \quad (1)$$

Donde:

- R (%) = Porcentaje de remoción
- $V_{inicial}$  = Valor inicial
- $V_{final}$  = Valor final

Para la determinación de la eficacia del proceso evaluado con la dosis óptima de coagulante y floculante, se empleó la metodología de superficie de respuesta utilizando el software MATLAB. Los resultados obtenidos de las pruebas factoriales se introdujeron en MATLAB, incluyendo las diversas combinaciones de dosificaciones de coagulante y floculante y las correspondientes respuestas en términos de remoción de hierro y DQO. Se ajustó un modelo cuadrático para relacionar las dosis de coagulante y floculante con la respuesta en términos de porcentaje de remoción, siguiendo la Ecuación (2):

$$z = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 \quad (2)$$

Donde

- $x$  = representa la dosis de sulfato de aluminio (coagulante)
- $y$  = representa la dosis de almidón de *Solanum Tuberosum* (floculante)
- $z$  = la respuesta medida como la remoción de DQO y hierro

Los coeficientes  $p_{00}$ ,  $p_{10}$ ,  $p_{01}$ ,  $p_{20}$ ,  $p_{11}$ ,  $p_{02}$  del modelo se determinaron utilizando la función de ajuste de curvas de MATLAB, proporcionando también los intervalos de confianza al 95%. Con los coeficientes obtenidos, se generaron superficies de respuesta y curvas de nivel que permitieron visualizar la relación entre las dosis de coagulante y floculante y la eficacia en la remoción de contaminantes. Posteriormente, se identificó el punto óptimo en la superficie de respuesta, que correspondió a las dosis de coagulante y floculante que maximizaron la remoción de los contaminantes, utilizando para ello las herramientas de optimización de multivariable (Dhotre,2021).

Posteriormente, se generaron los gráficos tridimensionales y las curvas donde se visualizó cómo las variables independientes afectaron a la respuesta de interés. En el gráfico tridimensional, dos dimensiones representan las variables independientes y la tercera muestra la respuesta, formando una superficie ajustada a partir de los puntos reales obtenido en los ensayos experimentales, que se ingresan como datos dispersos. Las curvas de contorno que se generaron son proyecciones bidimensionales de esta superficie, muestran líneas de igual respuesta y ayudan a identificar regiones óptimas. Los colores en los gráficos, que varían de azul (bajos valores de respuesta) a amarillo (altos valores de respuesta), indican la magnitud de la respuesta. En aplicaciones prácticas, estos gráficos serán fundamentales para optimizar procesos, tomar decisiones informadas y ajustar experimentos o procesos en función de las visualizaciones que se obtuvieron (Al-Omari,2019).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Caracterización del lixiviado de celdas transitorias en época de avenida

La tabla 9 presenta información sobre las condiciones climáticas y la dinámica de lixiviados en el día de la toma de muestras durante la época de avenida, se incluye dentro de la descripción la presencia o ausencia de lluvia en el día del muestreo y los días previos, así como datos sobre el manejo de lixiviados, incluyendo las acciones realizadas, como el bombeo, según el volumen de lixiviados en las diferentes pozas.

**Tabla 9.** Condición climática y dinámica de manejo de lixiviados en el día de la toma de muestras.

Mes de muestreo	Código de muestra	Fecha de muestreo	Descripción
Enero	M1	17/01/2024	El día de la toma de muestras se registró lluvia, pero el volumen de lixiviados se mantenía dentro del rango de almacenamiento de la Poza N° 1, el bombeo a la Poza N°2 se realizó dos días antes.
	M2	31/01/2024	Durante los tres días previos a la toma de muestras se registraron lluvias, aunque el día de la toma no hubo precipitación. Además, un día antes del muestreo se realizó un bombeo en la Poza N° 2 debido al gran volumen de lixiviados que excedió la capacidad de la Poza N°1.
Febrero	M3	16/02/2024	El día de la toma de muestras no se registraron lluvias y no se realizó bombeo a la Poza N° 2, ya que el volumen de lixiviados en la Poza N° 1 se mantenía dentro de su capacidad de almacenamiento. Se presentaron lluvias días antes de la toma de la muestra.
	M4	28/02/2024	El día de la toma de muestras se registró lluvia, se realizó el bombeo a la Poza N°2 previo a la obtención de la muestra. Se presentó lluvia un día previo que incremento el volumen del lixiviado.

Mes de muestreo	Código de muestra	Fecha de muestreo	Descripción
	M5	15/03/2024	El día de la toma de muestras se registró lluvia, pero el volumen de lixiviados se mantenía dentro del rango de almacenamiento de la Poza N° 1. Se presentaron lluvias dos días consecutivos antes de la toma de la muestra.
Marzo	M6	29/03/2024	El día de la toma de muestras no se registraron lluvias y no se realizó bombeo a la Poza N° 2, ya que el volumen de lixiviados en la Poza N° 1 se mantenía dentro de su capacidad de almacenamiento. Cabe destacar que no hubo lluvia por dos días consecutivos antes del muestreo

La Tabla 10 presenta los parámetros fisicoquímicos del lixiviado medidos en diferentes fechas durante la época de lluvias, abarcando los meses de enero, febrero y marzo. En comparación con la normativa de referencia, los valores de pH oscilan entre 7.73 y 7.9, cumpliendo con el LMP de 6.5-8.5. Sin embargo, los valores de sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO) y hierro (Fe) total muestran niveles elevados, excediendo los límites máximos permisibles, lo que indica una contaminación significativa en el lixiviado durante este período.

**Tabla 10.** Parámetros fisicoquímicos del lixiviado de la celda transitoria de Leoncio Prado.

Parámetro	Enero		Febrero		Marzo		Valores de referencia de LMP (MINAN,2009)
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
pH	7,85	7,86	7,84	7,9	7,85	7,73	6,5 -8,5
CE (µs/cm)	9520	9180	9340	9590	9670	9580	-
Salinidad (g/l)	5,5	5,4	5,5	5,6	5,8	5,3	-
Temperatura (°C)	25,8	26,4	25,8	24,6	26,7	27,1	-
Turbidez (NTU)	208	202	216	215	227	220	-

<b>Color (Pto-co)</b>	460	451	456	450	455	420	-
<b>Oxígeno disuelto (mg/L)</b>	0,27	0,38	0,26	0,5	0,37	0,33	-
<b>SST (mg/L)</b>	409	395	472	470	591	523	30
<b>DQO (mg/L)</b>	1097	952	1136	1230	1562	1583	120
<b>Hierro total (mg/L)</b>	4,86	3,96	4,89	4,72	5,56	5,43	2

M1, M2, M3,M4,M5,M6: Número de muestra

En un estudio realizado por Medina (2017) en el relleno sanitario en Huancayo, se encontraron valores de pH ligeramente alcalinos de 7,4 durante la época de lluvia. Estos resultados son cercanos a los obtenidos en la presente investigación, que registró un pH entre 7,73 y 7,86 durante la época de lluvia. Por su parte, el estudio de Rubio (2024) en la celda de Leoncio Prado durante la época de estiaje reportó un valor de pH de 7,58, el cual es ligeramente menor a los hallados en esta investigación, pero ambos resultados indican que el pH se mantiene ligeramente alcalino en ambas; es importante tener en consideración que nuestros resultados de las muestras de lixiviado donde no se presenciaron las lluvias el día de muestreo se obtuvo menores valores de pH.

Oré et al. (2023) reportaron una conductividad eléctrica de 9070  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el lixiviado de la celda de Leoncio Prado, y Rubio (2024) encontró un valor de 11770  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y una salinidad de 6,72 g/l en la misma zona. Nuestros resultados, que registran valores de conductividad eléctrica entre 9180 y 9670  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , son consistentes con estos estudios. Los altos valores de conductividad se deben a una alta concentración de iones, relacionada con una elevada concentración de sales disueltas, lo cual se confirma con la alta salinidad reportada en esta investigación, que varía entre 5,3 y 5,6 g/l.

Ticona et al. (2023) reportaron un valor de oxígeno disuelto de 0,21 mg/L en la celda de residuos sólidos en Juliaca, lo cual indica condiciones anaeróbicas debido a los bajos niveles de oxígeno disuelto. Este resultado, aunque ligeramente inferior, es cercano a los valores observados en la presente investigación, que oscilaron entre 0,26 y 0,5 mg/L, sugiriendo una condición anaeróbica similar. Sin embargo, es relevante destacar que, si bien estos resultados se obtuvieron durante una época de avenida los valores más bajos, que varían entre 0,26 y 0,33 mg/L, se registraron en muestras tomadas en ausencia de lluvia, donde la ausencia de lluvia puede influir en la baja concentración de oxígeno disuelto al limitar el aporte de agua superficial y la entrada de oxígeno al sistema, reducir el flujo de lixiviados y disminuir el contacto entre el

aire y los lixiviados, afectando la dinámica del oxígeno disuelto. Este comportamiento concuerda con el estudio de Rubio (2024), quien reportó un valor cercano a 0,26 mg/L en los lixiviados de la celda de Leoncio Prado en condiciones sin lluvia, sugiriendo que la influencia de la ausencia de lluvias tiene un impacto significativo en la concentración de oxígeno disuelto. Por otro lado, el valor más alto de oxígeno disuelto registrado fue de 0,5 mg/L, significativamente superior al de otras muestras. Este incremento se debió al bombeo previo a la obtención de la muestra, que mejoró la exposición del lixiviado al aire y promovió la aireación, aumentando así la concentración oxígeno disuelto.

Robles (2023) en su investigación realizada en el relleno Sanitario Uchuypampa en Ayacucho, encontró un valor promedio de 1213 mg/L de DQO en lixiviados. Estos resultados son similares a los valores de DQO registrados en esta investigación, donde entre enero y marzo se encontraron valores entre 952 mg/L y 1583 mg/L, es importante resaltar que los días de muestreo con presencia de lluvia generalmente aumenta ligeramente la DQO en los lixiviados debido al mayor arrastre de materia orgánica y a la acidificación que facilita la solubilización de compuestos. Los valores más bajos se registraron en enero, con 952 mg/L y 1097 mg/L. SENAMHI (2024) menciona que enero es el mes más lluvioso para Leoncio Prado, lo que podría explicar los bajos valores de DQO en ese mes debido a la dilución y al incremento del volumen de lixiviados, que superó la capacidad de almacenamiento y requirió bombeo para evitar el desbordamiento de la poza.

La investigación de Sánchez (2018) reportó concentraciones elevadas de hierro durante la época de lluvias, alcanzando hasta 6,0 mg/L, en comparación con los 0,18 mg/L obtenidos en época de estiaje. Sánchez atribuye estos altos niveles a que la precipitación, con su pH más ácido, facilita la solubilización del hierro, intensificando su lixiviación y aumentando su concentración debido al mayor arrastre desde los residuos sólidos. Este patrón se confirma en nuestra investigación, donde el valor máximo de hierro total, 5,56 mg/L, se detectó en una muestra tomada después de dos días consecutivos de lluvia, indicando que la lluvia previa incrementó el arrastre de hierro. Zhang et al. (2021) respaldan este fenómeno al señalar que el hierro es más soluble a un pH menor a 6,5, rango típico durante la lluvia. Estos hallazgos respaldan nuestros resultados, mostrando altos niveles de hierro total en los lixiviados durante la época de avenida, caracterizada por la presencia de lluvia en los meses de muestreo, y confirman la influencia significativa de las lluvias en la concentración de hierro total en los lixiviados.

## 4.2. Dosis óptimas de coagulante y floculante, velocidad de agitación y período de mezcla

### 4.2.1. Combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla

La Tabla 11 presenta un análisis de varianza (ANOVA) que evalúa la combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla. El modelo global es significativo, con un p-valor de 0,0008. Los datos muestran que tanto el período de mezcla rápida (PM\_MR) como el período de mezcla lenta (PM\_ML) son significativamente diferentes, con p-valores de 0,0020 y 0,0262, respectivamente. Sin embargo, la velocidad de mezcla rápida (V\_MR) y la velocidad de mezcla lenta (V\_ML) no presentan diferencias significativas, con p-valores de 0,0995 y 0,1484, respectivamente. La interacción entre las variables tampoco es significativa (p-valor de 0,7436).

**Tabla 11.** Análisis de varianza para la combinación óptima de velocidad y período de mezcla

Fuentes de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	721,71	5	144,34	4,26	0,0008
Velocidad de mezcla rápida (V_ML)	92,24	1	92,24	2,72	0,0995
Período de mezcla rápida (PM_ML)	327,35	1	327,35	9,66	0,0020
Velocidad de mezcla lenta (V_MR)	70,97	1	70,97	2,10	0,1484
Período de mezcla lenta (PM_MR)	168,22	1	168,22	4,97	0,0263
V_MR*PM_MR*V_ML*PM_ML	3,63	1	3,63	0,11	0,7436
Error	16563,82	475	33,87		
Total	17285,53	480			

V\_MR: Velocidad de mezcla rápida, PM\_MR: Período de mezcla rápida, V\_ML: Velocidad de mezcla lenta, PM\_ML: Período de mezcla lenta

La Tabla 12 presenta los resultados de una prueba de Tukey para determinar la combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla en la remoción de turbidez. Todas las combinaciones evaluadas, que varían en velocidad de agitación y períodos de mezcla, no muestran diferencias estadísticas significativas entre sí. La combinación con el mayor porcentaje de remoción es la número 11, con velocidad de agitación rápida de 200 rpm durante un 1 minuto y velocidad de agitación lenta a 50 rpm durante 10 minutos, logrando una media de 79,13% de remoción. En contraste, la combinación con el

menor porcentaje de remoción es la número 6, con una velocidad de agitación de 100 rpm por 3 minutos y un período de mezcla rápido de 40 minutos a una velocidad de 40 rpm, alcanzando una media de 74,71% de remoción.

**Tabla 12.** Prueba de Tukey para la combinación óptima de velocidad de agitación y período de mezcla

Combinación	V_MR	PM_MR	V_ML	PM_ML	Medias	n	E.E.	Sig.
6	100	3	40	15	74,71	30	0,64	A
8	100	3	50	15	75,29	30	0,64	A
14	200	3	40	15	75,40	30	0,64	A
5	100	3	40	10	75,70	30	0,64	A
2	100	1	40	15	76,16	30	0,64	A
16	200	3	50	15	76,33	30	0,64	A
7	100	3	50	10	76,63	30	0,64	A
13	200	3	40	10	76,74	30	0,64	A
4	100	1	50	15	77,09	30	0,64	A
10	200	1	40	15	77,20	30	0,64	A
15	200	3	50	10	77,33	30	0,64	A
1	100	1	40	10	77,50	30	0,64	A
12	200	1	50	15	77,79	30	0,64	A
3	100	1	50	10	78,09	30	0,64	A
9	200	1	40	10	78,20	30	0,64	A
11	200	1	50	10	79,13	30	0,64	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

V\_MR: Velocidad de mezcla rápida, PM\_MR: Período de mezcla rápida, V\_ML: Velocidad de mezcla lenta, PM\_ML: Período de mezcla lenta

En el estudio de Quispe (2023), se determinó que los parámetros de operación son fundamentales para la eficiencia del proceso, y que la duración de la agitación puede optimizarse para obtener mejores resultados. Este hallazgo respalda nuestra investigación, ya que nuestros resultados muestran una diferencia significativa entre los períodos de mezcla rápida y lenta. Según Quispe, el mayor porcentaje de remoción de turbidez, cercano al 80%, se logró utilizando 200 revoluciones por minuto como valor de velocidad de agitación rápida por 1 minuto, posteriormente la velocidad de agitación baja a 50 rpm por un período de 15 minutos, y 20 minutos de sedimentación. En comparación, los resultados de nuestra investigación indicaron un máximo valor de remoción de turbidez del 79,18%,

alcanzado bajo condiciones similares de velocidad de agitación rápida (200 rpm durante 1 minuto), pero con un período de mezcla lenta reducido (50 rpm durante 10 minutos) y el mismo tiempo de sedimentación de 20 minutos.

Caranqui (2022) evaluó el tratamiento de coagulación-floculación donde determino que el tiempo de mezcla rápida de un minuto asegura una dispersión adecuada del coagulante y la formación de flóculos estables; un período mayor a un minuto de agitación puede fragmentar los flóculos incipientes, dificultando su crecimiento y estabilidad durante la floculación. Esto coincide esta investigación, donde el mejor porcentaje de remoción se logró con un período de mezcla rápida de un minuto, lo que confirma la importancia de evaluar los parámetros óptimos de operación para lograr una mayor eficiente remoción de contaminantes.

Caranqui (2022) encontró que una agitación lenta de 50 rpm durante 20 minutos era óptima para la floculación, lo cual concuerda con los hallazgos de Bendezu et al. (2021) encontraron que su proceso alcanzó la máxima eficiencia con el uso de parámetros operativos de 50 rpm durante 20 minutos. En contraste, Medrano (2017) determinó que 60 rpm durante 9 minutos ofrecía el mejor porcentaje de remoción. En nuestra investigación, la mayor eficiencia en la mezcla lenta se obtuvo a 50 rpm a un período de agitación lenta de 10 minutos, los resultados son consistentes en cuanto a la velocidad de agitación menciona por Bendezu et al. y Caranqui, mientras que la duración óptima del período de mezcla lenta en nuestro caso es menor, atribuyendo que este parámetro puede variar dependiendo de las condiciones específicas y características de cada proceso.

## **4.2.2. Dosis óptima de coagulante y floculante**

### **4.2.2.1. Dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de turbidez**

La Tabla 13 presenta los resultados de un análisis de varianza que evalúa el efecto del coagulante y floculante en la remoción de la turbidez. Los resultados indican que tanto el coagulante como el floculante presentan un p-valor menor al a 0,0001, lo que indica que presentan significancia en la remoción de la turbidez.

Sin embargo, la interacción entre el coagulante y el floculante no resultó significativa ( $p = 0,1935$ ), indicando que los efectos del coagulante y del floculante pueden considerarse independientes y sumarse en la remoción de turbidez. Estos resultados concuerdan con Ynofuente (2022) quien, al evaluar el uso del almidón de papa como complemento del sulfato de aluminio, determinó que el almidón de papa actúa de manera

independiente a la remoción obtenida con el coagulante, contribuyendo significativamente a la remoción de turbidez.

**Tabla 13.** Análisis de varianza para las dosis óptimas para la remoción de turbidez

<b>Fuentes de variación</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	1379.49	11	125.41	26.49	<0.0001
Coagulante	555.89	3	277.94	58.71	<0.0001
Floculante	778.46	3	259.49	54.81	<0.0001
Coagulante*Floculante	45.14	6	7.52	1.59	0.1935
Error	113.63	24	4.73		
<b>Total</b>	<b>1493.11</b>	<b>36</b>			

La Tabla 14 muestra los resultados de una prueba de Tukey que compara las medias de diferentes combinaciones. El tratamiento 6 (50 mL de coagulante y 1 mL de floculante) resultó alcanzando la mayor media de remoción de turbidez de 85,4 %. En contraste, la combinación menos efectiva fue el tratamiento 1 (40 mL de coagulante y 0 mL de floculante), con una media de 62,58% de remoción. Los grupos de medias indicados por las letras en la columna de significancia revelan que algunas combinaciones no son significativamente diferentes entre sí. Los tratamientos 4, 5, y 2 indica que sus medias de remoción de turbidez no difieren significativamente, aunque sí difieren significativamente del tratamiento 1 y en mayor medida del tratamiento 6.

**Tabla 14.** Prueba de Tukey para dosis óptimas para la remoción de turbidez

<b>Tratamiento</b>	<b>Coagulante</b>	<b>Floculante</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	<b>Significancia</b>
1	40	0	62,58	3	1,26	A
9	60	0	72,77	3	1,26	B
4	40	3	73,86	3	1,26	B C
5	50	0	74,68	3	1,26	B C
2	40	1	75,88	3	1,26	B C
3	40	2	78	3	1,26	B C D

Tratamiento	Coagulante	Floculante	Medias	n	E.E.	Significancia
12	60	3	79,27	3	1,26	C D E
10	60	1	80,02	3	1,26	C D E F
8	50	3	82,33	3	1,26	D E F
11	60	2	82,53	3	1,26	D E F
7	50	2	85,39	3	1,26	E F
6	50	1	85,94	3	1,26	F

Muslan (2020) llevó a cabo un estudio sobre la coagulación con sulfato de aluminio, evaluando dosis entre 750 mg/L y 1500 mg/L para la remoción de turbidez, encontrando que la dosis más eficaz fue de 1250 mg/L. Observó que dosis excesivas, como 1500 mg/L, resultaron en una disminución del 6% en la remoción debido a la dispersión de las partículas o la formación de flóculos débiles y fragmentados que no sedimentan adecuadamente, aumentando así la turbidez. En la presente investigación, trabajamos con dosis de 40 mL, 50 mL y 60 mL (equivalentes a 1200 mg/L, 1500 mg/L y 1800 mg/L respectivamente) y determinamos que la dosis más eficiente fue de 1500 mg/L, similar a lo reportado por el autor en discusión. Esto demuestra que, tanto en su investigación como en la nuestra, ajustar cuidadosamente las dosis de coagulante es crucial para lograr una remoción eficiente de turbidez, evitando los efectos adversos de la subdosificación y sobredosificación que pueden perjudicar el proceso.

Irigoin (2018) reportó que su investigación utilizando sulfato de aluminio tipo A en dosis de 10,000 mg/L y 15,000 mg/L como coagulante, mostraron una remoción de turbidez entre 43,75% y 51,88%, respectivamente, en el botadero municipal de la provincia de Moyobamba. Sin embargo, estas dosis fueron bastante altas debido a la falta de control del pH, lo que afectó negativamente la formación de flóculos y requirió incrementar las dosis para lograr una remoción efectiva. En contraste, nuestro estudio empleó dosis menores de coagulante y obtuvo porcentajes superiores de remoción de turbidez, entre 62,58% y 74,68%; estos mejores resultados se atribuyen a que la investigación consideró trabajar con el rango de pH óptimo para la coagulación con sulfato de aluminio, asegurando así las condiciones para una mejor eficiencia del proceso de coagulación-floculación.

Ynofuente (2022) determinó que la dosis óptima de almidón es

de 35 mg/L para las variedades de papa Imilla negra y blanca, y 30 mg/L para la variedad roja, logrando una eficiencia de remoción de turbidez del 95,71%. Por otro lado, Ttito (2018) discrepó al reportar una dosis óptima de floculante de almidón gelatinizado es de 15 mg/L, con una eficiencia de remoción del 93%. En nuestra investigación, la mejor eficiencia se obtuvo con una dosis de 1 mL de solución floculante (15 mg/L de almidón de *Solanum Tuberosum*), alcanzando una eficiencia del 85,94%, estos resultados son consistentes con Ttito (2018) referente a la dosificación. Sin embargo, las diferencias en las eficiencias reportadas pueden deberse a variaciones en las condiciones experimentales y las características específicas del agua tratada, así como a las diferentes variedades de papa utilizadas.

#### 4.2.2.2. Dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de DQO

La Tabla 15 presenta los resultados de un análisis de varianza que evalúa el efecto del coagulante y floculante en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO). Los resultados indican que tanto el coagulante como el floculante tienen un efecto significativo en la remoción de DQO, con p-valores menores a 0,0001. Sin embargo, la interacción entre el coagulante y el floculante no resultó significativa ( $p = 0,0666$ ).

**Tabla 15.** Análisis de varianza para la dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de DQO

Fuentes de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	2953,31	11	268,48	36,98	<0,0001
Coagulante	784,87	3	392,43	54,05	<0,0001
Floculante	2067,76	3	689,25	94,94	<0,0001
Coagulante*Floculante	100,68	6	16,78	2,31	0,0666
Error	174,24	24	7,26		
Total	3127,55	36			

La Tabla 16 muestra los resultados de una prueba de Tukey que compara las medias de diferentes combinaciones de tratamientos con coagulantes y floculantes. El tratamiento 7 (50 mL de coagulante y 2 mL de floculante) resultó ser el más eficaz, alcanzando una media de remoción de DQO de 81,4 % y siendo significativamente mayor que los demás tratamientos, ya que no comparte ninguna letra con otros grupos. En contraste, la combinación menos efectiva fue el tratamiento 9 (60 mL de coagulante y 0 mL de floculante),

con una media de 48,95% de remoción.

**Tabla 16.** Prueba de Tukey para dosis óptima de coagulante y floculante para la remoción de DQO

Tratamiento	Coagulante	Floculante	Medias	n	E.E.	Significancia
9	60	0	48,95	3	1,56	A
1	40	0	51	3	1,56	A B
2	40	1	56,21	3	1,56	A B C
5	50	0	58,23	3	1,56	B C
10	60	1	60,25	3	1,56	C D
4	40	3	63,81	3	1,56	C D E
12	60	3	68,13	3	1,56	D E F
11	60	2	68,43	3	1,56	E F
3	40	2	69,42	3	1,56	E F
6	50	1	70,33	3	1,56	E F
8	50	3	72,49	3	1,56	F
7	50	2	81,4	3	1,56	G

Al comparar nuestros resultados con los de investigaciones previas, se observa una diferencia notable en la eficiencia del tratamiento para la remoción de DQO en lixiviados. Chaouki et al. (2021) reportan una remoción del 50% utilizando cloruro férrico a una dosis de 1200 mg/L, mientras que Bellouk et al. (2022) alcanzan una remoción del 71% con 2000 mg/L de cloruro férrico. Orellana (2023) obtiene una remoción del 43% usando sulfato de aluminio a 2800 mg/L como coagulante y 400 mg/L de polímero aniónico como floculante. En contraste, nuestros resultados muestran que el mejor tratamiento (Tratamiento 7) remueve el 81.4% del DQO, con solo 1500 mg/L de sulfato de aluminio (50 mL) y 30 mg/L de almidón de *Solanum Tuberosum* (2 mL), destacando una mayor eficiencia con una dosis menor. Además, el uso de almidón de papa como floculante no solo mejora la efectividad del tratamiento, sino que también representa una alternativa más económica en comparación con los métodos tradicionales.

Miyashiro (2021) menciona que la remoción del porcentaje de DQO aumenta ligeramente a medida que la dosis del coagulante incrementa hasta alcanzar su

punto óptimo de dosificación; a partir de este punto, la adición de más coagulante disminuye la eficiencia debido a la sobredosificación. Lo mencionado concuerda con Muslun (2020) quien indica que a medida que se va incrementando el sulfato de aluminio en una dosis mayor a 1500 mg/L, la remoción de DQO disminuye. Esto coincide con nuestra investigación, en la cual se observa en mismo comportamiento, donde una dosis máxima de coagulante de 60 mL no necesariamente mejora la remoción, sino que, al contrario, reporta valores de remoción menores que al usar una dosis de 50 mL, que nos reporta la mejor eficiencia.

#### 4.2.2.3. Dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de Hierro total

La Tabla 17 presenta los resultados de un análisis de varianza que evalúa el efecto del coagulante y floculante en la remoción de Hierro total. Los resultados indican que tanto el coagulante como el floculante tienen un efecto significativo en la remoción de DQO, con p-valores menores a 0,0001. Sin embargo, la interacción entre el coagulante y el floculante no resultó significativa ( $p = 0,4836$ ).

**Tabla 17.** Análisis de varianza para la dosis óptima de coagulante y floculante para remoción de Hierro total

Fuentes de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	1568,41	11	142,58	14,99	<0,0001
Coagulante	645,24	2	322,62	33,92	<0,0001
Floculante	869,39	3	289,8	30,47	<0,0001
Coagulante*Floculante	53,79	6	8,96	0,94	0,4836
Error	228,27	24	9,51		
Total	1796,68	35			

La Tabla 18 presenta los resultados de una prueba de Tukey que compara las medias de diferentes combinaciones de tratamientos para la remoción de hierro total utilizando coagulantes y floculantes. Las letras en la columna de significancia indican que algunas combinaciones no presentan diferencias significativas entre sí. Los tratamientos 4, 5 y 2 no difieren significativamente en la remoción, mientras que los tratamientos 3, 10 y 12, aunque no comparten todas las letras, forman un grupo (B-C-D) donde no hay diferencias significativas entre ellos, pero sí con respecto al tratamiento 1 y, en mayor medida, al tratamiento 7. Este último, que utilizó 50 mL de coagulante y 2 mL de almidón de *Solanum*

*Tuberosum* como floculante, resultó ser el más efectivo, alcanzando una remoción media del 93,86 %. En comparación, el tratamiento 5, que usó la misma dosis de coagulante, pero sin almidón de papa, obtuvo una eficiencia del 81,26 %. La diferencia del 12,6 % resalta la importante contribución del almidón de *Solanum Tuberosum*, respaldada por Haq (2022), quien indica que los materiales a base de almidón, como el almidón de papa, son altamente eficaces en la eliminación de metales pesados debido a que los iones metálicos se adhieren a la superficie del almidón modificado, facilitando su remoción del agua. En contraste, el tratamiento menos efectivo fue el número 1 (40 mL de coagulante y 0 mL de floculante), con una media de 68,26%.

**Tabla 18.** Prueba de Tukey para dosis óptima de coagulante y floculante para la remoción de Hierro total

Tratamiento	Coagulante	Floculante	Medias	n	E.E.	Significancia
1	40	0	68,26	3	1,78	A
9	60	0	78,11	3	1,78	B
4	40	3	81,03	3	1,78	B C
5	50	0	81,26	3	1,78	B C
2	40	1	82,1	3	1,78	B C
3	40	2	83,68	3	1,78	B C D
10	60	1	84,55	3	1,78	B C D
12	60	3	86,06	3	1,78	B C D E
11	60	2	88,97	3	1,78	C D E
8	50	3	89,19	3	1,78	C D E
6	50	1	92,18	3	1,78	D E
7	50	2	93,86	3	1,78	E

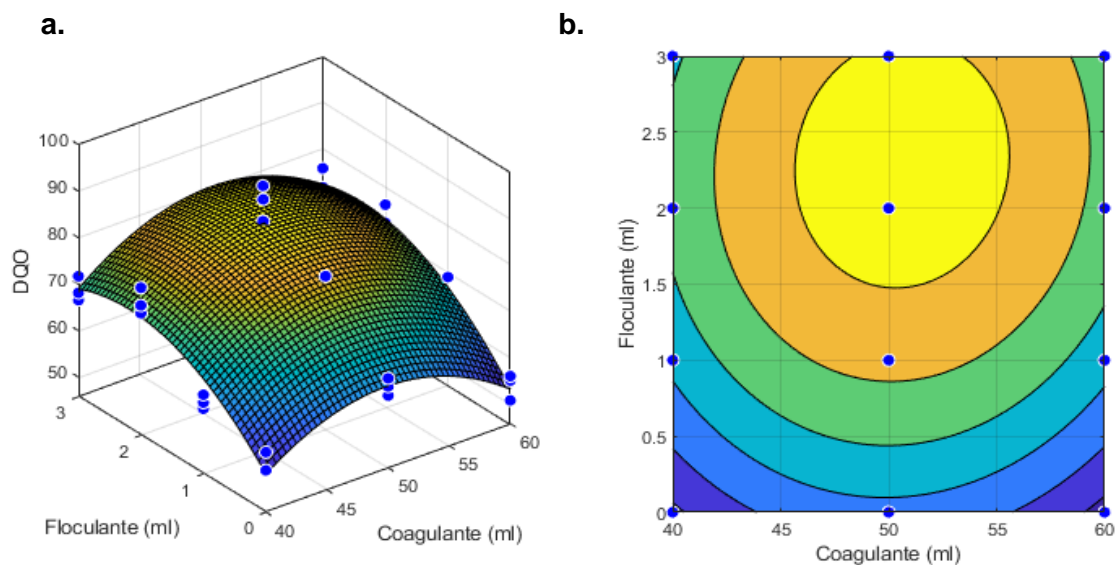
Medrano (2017) reportó una remoción del 94,81% de hierro utilizando 100 mg/L de sulfato de aluminio y 20 mg/L de hidróxido de calcio, destacando la alta eficiencia de estos coagulantes químicos en la eliminación de hierro. En nuestro estudio, obtuvimos resultados comparables con una eficiencia del 93,86% utilizando 50 mL de sulfato de aluminio y 2 mL de almidón de papa como coagulante. La combinación de sulfato de aluminio con almidón de papa no solo muestra una eficacia similar a la de los métodos tradicionales, sino que también ofrece una reducción significativa en los costos. Por otro lado, Mohammad (2018) reportó una eliminación de hierro de hasta el 98% utilizando 5 mg/L de *Moringa oleifera* como floculante natural, destacando la capacidad de los coagulantes naturales

para proporcionar superficies de unión adicionales para los flocúlos, lo que puede potenciar la eliminación de iones metálicos. La comparación de estos estudios sugiere que, aunque el sulfato de aluminio es efectivo por sí solo, su combinación con coagulantes naturales como el almidón de papa puede no solo tener eficiencias similares, sino en algunos casos superar la eficacia de los métodos convencionales, ofreciendo una alternativa más económica al reducir la cantidad de químicos necesarios.

### 4.3. Remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total de lixiviados de celdas transitorias en época de avenida

#### 4.3.1. Remoción de Demanda Química de Oxígeno

La Figura 8.a muestra la relación entre las cantidades de coagulante y floculante (medidas en mL) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como respuesta, medida en porcentaje de remoción. La superficie curva en el espacio tridimensional ilustra cómo varía este porcentaje según los niveles de coagulante y floculante, presentando una forma cóncava que sugiere un punto óptimo en la combinación de estos factores. Los puntos azules dispersos sobre la superficie representan las combinaciones experimentales reales, permitiendo comparar los datos observados con la respuesta predicha por el modelo. Este gráfico nos permite observar la interacción entre los factores y determinar las condiciones óptimas para maximizar la remoción de DQO.



**Figura 8.** Superficie de respuesta para remoción de DQO.

La Figura 8.b. muestra la relación entre las cantidades de coagulante (40 a

60 mL) y floculante (0 a 3 mL) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), medida en porcentaje de remoción. Las líneas de contorno conectan puntos con el mismo porcentaje de remoción, el área con color amarillo en el centro que indican mayor remoción, cercana al 90%, y zonas azules en los bordes que representan menor remoción, cerca del 60%.

La Tabla 19 muestra los resultados obtenidos mediante la metodología de superficie de respuesta, indican una remoción de 1095,63 mg/L de DQO, obteniendo el proceso un valor de 82,42% de remoción utilizando sulfato de aluminio y almidón de *Solanum Tuberosum*. Nuestros resultados de eficiencia son superiores en comparación con Miyashiro (2021), quien aumento su eficiencia en un 4,38% utilizando superficie de respuesta, esta le permitió identificar que una dosis óptima de sulfato de aluminio y cloruro férrico alcanza una remoción predictiva de DQO del 66,17% en aguas de camal; el autor destaca la importancia de la optimización de dosis para obtener una mayor eficiencia. Por otro lado, nuestra eficiencia es ligeramente menor al comparar con Huamán (2023), quien al optimizar la dosis de sulfato de aluminio para la coagulación- floculación de aguas residuales reportó una remoción máxima del 85,7% de DQO usando solo sulfato de aluminio, la optimización de las condiciones del proceso le permitió lograr una mayor eficiencia frente a otras concentraciones utilizadas, usando una dosis significativamente más baja; resaltando la importancia de la optimización de dosis para obtener una mayor eficiencia, minimizar el uso de compuestos y reducir costos operativos. Estos resultados sugieren que, existe un potencial para mejorar la eficiencia del proceso optimizando la cantidad de coagulante y floculante utilizado, adoptando la metodología de superficie de respuesta.

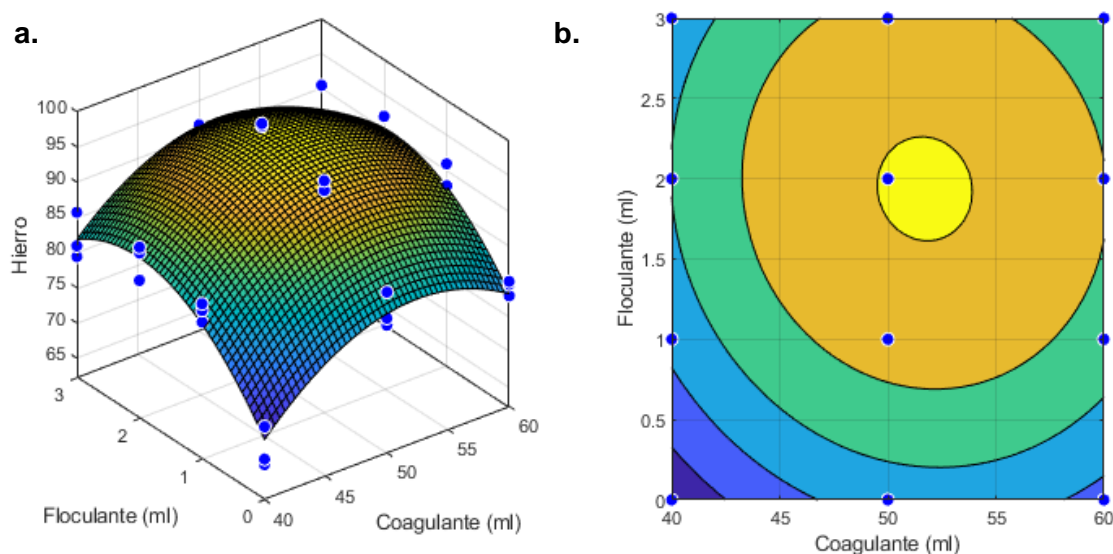
**Tabla 19.** Remoción de DQO mediante optimización de dosis mediante superficie de respuesta.

Dosis de Sulfato de aluminio (mg/L)	Dosis de almidón de <i>Solanum Tuberosum</i> (mg/L)	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	Remoción de DQO (mg/L)	Remoción DQO (%)
1518,6	34,35	1329,33	233,7	1095,63	82,42

#### 4.3.2. Remoción de Hierro total

La Figura 9.a. muestra la variación de los niveles de coagulante (40 a 60 mL) y floculante (0 a 3 mL) en relación con la remoción de hierro total (en porcentaje),

mostrando una superficie curva cóncava que indica la remoción de hierro total entre aproximadamente el 60% y el 95%. Los puntos azules dispersos representan las combinaciones experimentales utilizadas en el estudio. A la derecha la Figura 9.b., se proyecta en dos dimensiones esta relación mediante anillos concéntricos, donde las áreas más claras en el centro indican las zonas de mayor remoción alrededor del 95%, mientras que las zonas azules en los bordes muestran las remociones menores porcentuales, acercándose al 60%. Los puntos azules en ambos gráficos permiten comparar los datos experimentales con las predicciones del modelo y determinar las combinaciones óptimas para maximizar la remoción de hierro.



**Figura 9.** Superficie de respuesta para remoción de Hierro total.

La Tabla 20 nos muestra que se logró remover 4,33 mg/L de hierro total, con eficiencia estimada del 95,36% de remoción del proceso, utilizando sulfato de aluminio y almidón de *Solanum Tuberosum*.

**Tabla 20.** Remoción de Hierro total mediante optimización de las dosis mediante superficie de respuesta

Dosis de Sulfato de aluminio (mg/L)	Dosis de almidón de <i>Solanum Tuberosum</i> (mg/L)	Hierro total inicial (mg/L)	Hierro total final (mg/L)	Remoción de hierro total (mg/L)	Remoción de Hierro total (%)
1551,3	29,1	4,54	0,21	4,33	95,36

En el estudio de Gutiérrez (2019), utilizando la metodología de superficie de respuesta, se estimó una eficiencia máxima de remoción de hierro del 50% con cloruro férrico y almidón de yuca, atribuyendo la baja eficiencia al contenido relativamente

bajo de amilosa en el almidón de yuca. Bakar (2015), también empleando RSM, estimó una eficiencia del 99,7% con coagulante PAC y polímero aniónico, destacando una mayor eficiencia. Nuestros resultados resaltan una mayor remoción de hierro total, destacando la efectividad del almidón de *Solanum Tuberosum*, especialmente debido a su mayor contenido de amilosa, en comparación con otros floculantes naturales como el almidón de yuca, aunque sigue siendo inferior al polímero aniónico. Sin embargo, es importante considerar que el almidón de papa, al ser un floculante natural, es más económico y ofrece ventajas ambientales sobre los floculantes sintéticos, lo que lo convierte en una opción viable para la remoción del hierro.

## V. CONCLUSIONES

1. Se logró una remoción mayor al 80% de remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total presente en el lixiviado de las celdas transitorias.
2. Se caracterizó el lixiviado de las celdas transitoria de Leoncio Prado en época de avenida, encontrando en todas las muestras analizadas altas concentraciones Demanda Química de Oxígeno y hierro total.
3. Se determinó que la dosis óptima para la remoción de Demanda Química de Oxígeno y hierro total es 1518,6 mg/L de sulfato de aluminio y 34,35 mg/L de almidón de *Solanum tuberosum* gelatinizado, con agitación a 200 rpm durante 1 minuto, seguida de 50 rpm durante 10 minutos
4. Se evaluó la remoción de la Demanda Química de Oxígeno y hierro total con sulfato de aluminio y con almidón de *Solanum Tuberosum*, logrando altos porcentaje de eficiencia resultando efectivo para la remoción de contaminantes de los lixiviados de celdas transitorias.

## VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Se propone a las autoridades municipales de la celda transitoria de Leoncio Prado la aplicación conjunta de sulfato de aluminio y almidón de *Solanum Tuberosum* para el tratamiento de lixiviados, dado la alta eficiencia en la remoción de contaminantes.
2. Se recomienda a todo el personal involucrado en el tratamiento de lixiviados participar en capacitaciones sobre la preparación y manejo eficiente de coagulantes y floculantes, así como en la operación del proceso de coagulación-floculación, como preparación para una posible futura implementación del proceso.
3. Se sugiere a los gestores responsables del tratamiento de lixiviados, realizar un estudio de viabilidad del proceso de coagulación-floculación a escala real, considerando tanto los costos como los beneficios asociados con su implementación en el tratamiento de lixiviados.
4. Se sugiere para futuras investigación realizar un análisis de los lodos sedimentados como subproducto de la coagulación- floculación, así como también investigar opciones de tratamiento que permitan su disposición final o posible reutilización.
5. Se propone a los nuevos investigadores incorporar procesos complementarios al tratamiento de coagulación-floculación para mejorar la remoción de contaminantes.

## VII. REFERENCIAS

- Akram, M., Inam, W., Saeed, M., Mustaqeem, M., Inam, M., & Park, K. (2021). Optimization of antimony removal by coagulation-flocculation-sedimentation process using response surface methodology. *Processes*, 9(1), 117. <https://doi.org/10.3390/pr9010117>
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Prasad, S., & Rtimi, S. (2022). Techniques for treating leachate discharges: A critical review. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 29, 58405–58428.
- Arredondo, K. (2022). Disminución de la DBO del lixiviado del botadero de Haquira mediante procesos de coagulación - floculación - región Cusco [Tesis de grado]. Repositorio de la Universidad Continental, [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12389/2/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Arredondo\\_Licono\\_2022.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12389/2/IV_FIN_107_TE_Arredondo_Licono_2022.pdf)
- Astorga, C. (2018). Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario: Propuesta y evaluación de un sistema de humedales artificiales. Repositorio Universidad de Chile, [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixiviados-de-un-relleno-sanitario-Propuesta-y-evaluaci% c3% b3n-de-un-sistema.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixiviados-de-un-relleno-sanitario-Propuesta-y-evaluaci%c3%b3n-de-un-sistema.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. In Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos (Ed.). Autoridad Nacional del Agua, Autoridad Nacional del Agua, <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209>
- Al-Omari, A., Wright, J. P., Macdonald, Y. M. D., & McHugh, W. R. (2019). Application of response surface methodology for the optimization of the removal of heavy metals from landfill leachate using a hybrid process of chemical precipitation and adsorption. *Journal of Environmental Management*, 232, 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.065>
- Bakar, A., Halim, A., Hanafiah, M. (2015). Optimization of coagulation-flocculation process for automotive wastewater treatment using response surface methodology. *Nature Environment and Pollution Technology*, 14(3), 567.

- Bellouk, H., Mrabet, I., Tanji, K., Nawdali, M., Benzina, M., Eloussaief, M., & Zaitan, H. (2022). Performance of coagulation-flocculation followed by ultra-violet/ultrasound activated persulfate/hydrogen peroxide for landfill leachate treatment. *Scientific African*, 17. e01312. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01312>
- Bendezu, E., Capcha Rios, A. L. (2021). Remoción de hierro y plomo en aguas ácidas de la Minera Julcani con coagulante *Opuntia floccosa*. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3956>
- Bravo, M. (2017). Coagulantes Y Floculantes Naturales Usados En La Reducción De Turbidez, Sólidos Suspendedos, Colorantes Y Metales Pesados En Aguas Residuales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Caranqui Chuma, C. D. (2022). Tratabilidad de lixiviados sanitarios: alternativa para el tratamiento de lixiviados generados en el Relleno Sanitario “Romerillos”, cantón Mejía, provincia de Pichincha, mediante procesos de coagulación–floculación. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22953>
- Chacon, I., Ramos, C. (2019). Optimización de parámetros para remoción de turbidez, DBO5 Y DQO mediante procesos de coagulación/floculación de aguas residuales domésticas empleando organoarcilla. [Tesis de Grado]. Universidad Peruana Unión
- Chaouki, Z., Hadri, M., Nawdali, M., Benzina, M., & Zaitan, H. (2021). Treatment of a landfill leachate from Casablanca city by a coagulation-flocculation and adsorption process using a palm bark powder (PBP). *Scientific African*, 12. e00721. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2021.E00721>
- Charapaqui, J. (2019). Dosificación de coagulantes y floculantes para la remoción de sedimentos del agua en el embalse Cuchoquesera, Ayacucho [Tesis de pregrado]. RepositorioUNAM, <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20,500,12996/4158/charapaqui- anccasi-juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez, C. (2017). Evaluación del filtro roca en el tratamiento fisicoquímico del lixiviado en la planta de tratamiento de residuos sólidos - Cajamarca [Tesis de pregrado]. RepositorioUNAM, <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/1730/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chavez, J., Cunaique, I., & Pinco, J. (2019). Proceso de obtención y evaluación de la eficiencia del almidón del plátano de seda (*musa acuminata aaa*) para la coagulación –

floculación de las aguas superficiales del río Puchca – Ancash a nivel de laboratorio.

- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A., & Ramos-Pacheco, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298–309, [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Dávila, R., Agüero, E., Velarde, L., Zapana, D., Palomino, J., & Ruiz, J. (2022). Manejo y disposición de desechos sólidos en la zona industrial Lurigancho del Perú. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(1), 116–122. <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.621.015>
- Dhotre, A. S., & Patil, P. P. (2021). Optimization of turbidity and COD removal from leachate by coagulation-flocculation using aluminum sulfate and natural coagulant. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101414.
- Foo, Y., & Hameed, H. (2020). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122764. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122764>
- Franco, A., Marques, C., Martins, O., Mussel, L., & Thode, S. (2017). Ecotoxicological evaluation of the application of landfill leachate on the germination of cabbage (*Brassica oleracea var. capitata*). *Revista Eletronica Em Gestão*, 21, <https://doi.org/10.5902/2236117029732>
- Gao, X., Liu, Y., & Yang, Y. (2023). Characterization and Treatment of Landfill Leachate: Focus on Chemical Oxygen Demand (COD) and Its Implications for Environmental Protection. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131318.
- Garzón, W. (2021). Estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua. [Tesis de grado]. Repositorio Institucional UNAD, <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/44813/Wgarzonmu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ghosh, P., Thakur, S., & Kaushik, A. (2023). A Review of Landfill Leachate Treatment by Microalgae: Current Status and Future Directions. *Processes*, 11(2), 1110. <https://doi.org/10.3390/pr1102021110>

- Gutiérrez, P. (2019). Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del río Uchusuma (Provincia, Tacna) y propuesta de diseño de un reactor batch a nivel domiciliar. [Tesis de grado]. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB\\_81acbe87528a0b1dd0c32c4dffb9](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB_81acbe87528a0b1dd0c32c4dffb9)
- HACH (2000). Manual de Análisis de Agua de Hach Company. Procedimientos fotométricos. procedimientos de titulación y procedimientos microbiológicos. Segunda Ed. en español. *HACH COMPANY*, Loveland, Colorado 140-147
- Haq, F., Mehmood, S., Haroon, M. et al. Función de los materiales a base de almidón como biosorbentes para la eliminación de colorantes y metales pesados de las aguas residuales. *J Polym Environ* 30, 1730–1748 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02337-6>.
- Hettiarachchi, H., Kumarathilaka, P., & Mahatantila, K. (2017). Impact of leachate on water quality in landfills: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 15(4), 699-715.
- Huamán, D. (2023). Optimización del sulfato de aluminio para la remoción de la DQO y DBO en aguas residuales domésticas de la PTAR Maria Reich, Miraflores, 2022. [Tesis de grado]. Repositorio Universidad nacional Federico Villareal, [https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7908/UNFV\\_FIGAE\\_Huaman\\_Guzman\\_Diana\\_Titulo\\_profesional\\_2023.pdf?sequence=1](https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7908/UNFV_FIGAE_Huaman_Guzman_Diana_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1)
- Hurtado, M., & Yarleque, E. (2017). Determinación de la capacidad clarificadora del coagulante natural extraído de la papa (*Solanum tuberosum*) en la purificación del agua del río Patari para uso de consumo humano. In Universidad Nacional del Callao (Vol. 0. Issue 0).
- Irigoin, S., & Zaldivar, J. (2018). Clarificación fisicoquímica de lixiviados mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación del botadero municipal de la provincia de Moyobamba. In Universidad Nacional de Tarapoto.
- Irigoin, S., & Zaldivar, J. (2018). Clarificación fisicoquímica de lixiviados mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación del botadero municipal de Moyobamba. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSM\\_1bdf6dfd62f1837604263e5d11e238d4](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSM_1bdf6dfd62f1837604263e5d11e238d4)
- Jones, S., & Clark, M. M. (2019). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater*

- Treatment*. In L. K. Wang, N. C. Pereira, & Y. T. Hung (Eds.), *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (pp. 1-74).
- Liu, Y., Zhang, W., & Wang, H. (2023). Impact of Retention Time on Coagulation-Flocculation Performance in Water Treatment: Optimization and Practical Considerations. *Water Research*, 240, 119828
- Manrique, F. A. (2023). Revisión de coagulantes/floculantes naturales obtenidos a partir de semillas de Moringa oleífera Lam (Moringa) y del mucílago de la Penca de Opuntia ficus-indica (Tuna) usados en la remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre. [Tesis de grado]. Repositorio de la Universidad Católica Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/2ea28beb-298e-4cef-b3bc-c2e86ab5c7ec>
- Medina, J., del Águila, M., Cruz, L. (2016). Fenton process optimization in the treatment of landfill leachates lixiviated. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 454-466
- Medrano, R. (2017). Tratamiento de lixiviados del botadero de residuos sólidos de la ciudad de Puno por el proceso de coagulación y floculación, Universidad Nacional del Altiplano.
- Ministerio del Ambiente. (2009). Propuesta de Decreto Supremo N° 2009-MINAM. Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes de infraestructuras de residuos sólidos. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/311078/lmp\\_de\\_efluentes\\_de\\_residuos.pdf?v=1556767769](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/311078/lmp_de_efluentes_de_residuos.pdf?v=1556767769)
- Miyashiro, R. Meliton, J. (2022). Estudio comparativo de los tratamientos de electrocoagulación y coagulación/floculación para la remoción de contaminantes de aguas residuales del camal Conchucos, Lima, 2021. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/31248/Tesis.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Mohammad, M. H., & Bina, B. (2018). Application of Moringa oleifera coagulant protein as natural coagulant aid with alum for removal of heavy metals from raw water. *Desalination and water treatment*, 116, 187-194. [https://www.researchgate.net/publication/326859306\\_Application\\_of\\_Moringa\\_oleifera\\_coagulant\\_protein\\_as\\_natural\\_coagulant\\_aid\\_with\\_alum\\_for\\_removal\\_of\\_heavy\\_metals\\_from\\_raw\\_water](https://www.researchgate.net/publication/326859306_Application_of_Moringa_oleifera_coagulant_protein_as_natural_coagulant_aid_with_alum_for_removal_of_heavy_metals_from_raw_water)
- Molano, J. (2018). Tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-

- floculación utilizando almidón de *Solanum tuberosum* L. como alternativa al manejo convencional. *Biotempo*, 15(1), 83-112.
- Montgomery, D. (2017), Design and analysis of experiments (9th ed.), *John Wiley & Sons*, <https://archive.org/details/designanalysisof0000mont/page/n5/mode/2up>
- Muslan, S. (2020). Co-pretreatment of municipal wastewater and landfill leachate by chemical coagulation using ferric chloride and aluminum sulfate. *Gazi University Journal of Science*, 1-1. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1148971>
- Nunes, M. A., & Nascimento, J. R. (2019). Starch-based materials for water purification. *Carbohydrate Polymers*, 206, 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.040>
- Oré, L., Medina, E., Aliaga, W., Ramírez, I., Cierzo, J., Escobar, A. (2023). Caracterización de lixiviados de residuos sólidos generados en las celdas transitoria de Santa Rosa de Shapajilla–Leoncio Prado–Huánuco. *Qantu Yachay*, 3(1), 149-154.
- Orellana, A. (2023). Evaluación del tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario Pichacay mediante aplicación de precipitantes químicos y polímeros. <https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/82dc6cdc-52be-49ab-9dbd-6d0bccc9d3c3/content>
- Parker, R., & Hall, P. (2019). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pavón, M. (2018). Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del cantón Mejía-Ecuador. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2882>
- Quispe, S. (2024). Eficiencia del extracto de sábila para la remoción de turbidez en el tratamiento de agua para consumo humano. <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/1866cfd8-e9f7-4b96-95f9-f98073b81ad7>
- Robles, C. (2023). Tratamiento de lixiviados con semillas y carbón activado de Moringa oleífera en el relleno Sanitario de Uchuypampa, Ayacucho 2023. [Tesis de grado]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/112068>
- Rubio, L. (2024). Capacidad de la borra de café para remover cobre y plomo del lixiviado generado en la celda transitoria de Rupa Rupa–Tingo María-2023. [Tesis de grado]. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/d09e5b15-8c72-42d5-b70c-8312096b057b>
- Sánchez, W. (2020). Evaluación de los lixiviados generados en el botadero de Carhuashjirca

- y los impactos ambientales generados en la quebrada Vientojirca–Independencia–Huaraz–Ancash–2018. [Tesis de grado]. Repositorio Institucional UNASAM, <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4239>
- Ticona, J., Pineda, J. (2023). Tratamiento de los lixiviados de residuos sólidos en las celdas de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 4(3), 85-92. <https://doi.org/10.47190/nric.v4i3.268>
- Toalá, S. (2019). Caracterización de lixiviados en un biorreactor con residuos estabilizados del SDF (sitio de disposición final) de Berriozábal Chiapas. <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmLui/handle/123456789/3381>
- Ttito, R. (2018). Evaluación de la eficacia del almidón de tres variedades de papa (*Solanum tuberosum*) como auxiliar del sulfato de aluminio en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas, 2018. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 35–45, <https://doi.org/10.17162/RICTD.V6I2.1456>
- Wang, H., Zhang, Q., Bian, J., & Zhang, D. (2023). Synergistic coagulation effect of the cationic coagulant and anionic flocculant on fluorite tailings. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103096.
- Ynofuente Quispe, L., Flores Condori, M., & Vigo Rivera, J. E. (2022). Residuos de papa como auxiliar del sulfato de aluminio para clarificación de agua. *Cuadernos de Investigación UNED*, 14(2), 94-106. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/cuadernos/article/download/4282/6109/19226>
- Zhang, Y., He, P. J., & Shao, L. M. (2021). Occurrence and characteristics of microplastics in leachates from different municipal solid waste landfills: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 287, 112330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112330>
- Zhu, Q., Liu, X., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2023). "Effect of Interfering Substances on Coagulation-Flocculation Efficiency in Water Treatment: A Comprehensive Review." *Journal of Environmental Management*, 340, 118407.

## **ANEXO**

**ANEXO A. Datos de laboratorio.****Tabla 21.** Variación del pH con la adición de sulfato de aluminio.

<b>pH inicial</b>	<b>Sulfato de aluminio (mL)</b>	<b>pH final</b>	<b>Observación</b>
7,85	0	7,83	-
7,85	1	7,80	-
7,85	2	7,79	-
7,85	3	7,75	-
7,85	4	7,73	-
7,85	5	7,70	-
7,85	6	7,68	-
7,85	7	7,64	-
7,85	8	7,62	-
7,85	9	7,60	-
7,85	10	7,56	-
7,85	11	7,53	-
7,85	12	7,52	-
7,85	13	7,50	-
7,85	14	7,47	-
7,85	15	7,45	-
7,85	16	7,44	-
7,85	17	7,43	-
7,85	18	7,40	-
7,85	19	7,41	-
7,85	20	7,37	-
7,85	21	7,35	-
7,85	22	7,34	-
7,85	23	7,33	-
7,85	24	7,32	-
7,85	25	7,31	-
7,85	26	7,30	-
7,85	27	7,30	-
7,85	28	7,28	-
7,85	29	7,27	-
7,85	30	7,24	-
7,85	31	7,21	-
7,85	32	7,20	-
7,85	33	7,20	-
7,85	34	7,19	-
7,85	35	7,17	-
7,85	36	7,16	-
7,85	37	7,15	-

7,85	38	7,14	-
7,85	39	7,12	
<b>7,85</b>	<b>40</b>	<b>7,11</b>	<b>Aparición del primer floc</b>
7,85	41	7,11	Presencia de flóculos
7,85	42	7,10	Presencia de flóculos
7,85	43	7,80	Presencia de flóculos
7,85	44	7,07	Presencia de flóculos
7,85	45	7,06	Presencia de flóculos
7,85	46	7,04	Presencia de flóculos
7,85	47	7,04	Presencia de flóculos
7,85	48	7,03	Presencia de flóculos
7,85	49	7,03	Presencia de flóculos
7,85	50	7,02	Presencia de flóculos
7,85	51	7,01	Presencia de flóculos
7,85	52	7,00	Presencia de flóculos
7,85	53	6,99	Presencia de flóculos
7,85	54	6,98	Presencia de flóculos
7,85	55	6,96	Presencia de flóculos
7,85	56	6,95	Presencia de flóculos
7,85	57	6,94	Presencia de flóculos
7,85	58	6,92	Presencia de flóculos
7,85	59	6,92	Presencia de flóculos
7,85	60	6,91	Presencia de flóculos
7,85	61	6,91	Presencia de flóculos
7,85	62	6,90	Presencia de flóculos
7,85	63	6,90	Presencia de flóculos
7,85	64	6,89	Presencia de flóculos y espumas
7,85	65	6,89	Presencia de flóculos y espumas

**Tabla 22.** Ensayo de variación de pH con 3 dosis de sulfato de aluminio.

Repetición	pH inicial	Sulfato de aluminio (mL)	pH final
R1	7,85	40	7,11
R2	7,9	40	7,14
R3	7,7	40	7,15
R1	7,85	50	7,02
R2	7,9	50	7,04
R3	7,7	50	7,03
R1	7,85	60	6,91
R2	7,9	60	6,90
R3	7,7	60	6,97

**Tabla 23.** Ensayos de combinación óptima de velocidad y período de mezcla.

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C1	230	R1	40	100	1	0	40	10	80,40	65,04
C1	230	R1	40	100	1	1	40	10	67,40	70,70
C1	230	R2	40	100	1	1	40	10	67,50	70,65
C1	230	R3	40	100	1	1	40	10	68,40	70,26
C1	230	R1	40	100	1	2	40	10	66,80	70,96
C1	230	R2	40	100	1	2	40	10	65,50	71,52
C1	230	R3	40	100	1	2	40	10	66,40	71,13
C1	230	R1	40	100	1	3	40	10	70,90	69,17
C1	230	R2	40	100	1	3	40	10	70,20	69,48
C1	230	R3	40	100	1	3	40	10	69,90	69,61
C2	210	R1	40	100	1	0	40	15	67,90	67,67
C2	210	R1	40	100	1	1	40	15	58,40	72,19
C2	210	R2	40	100	1	1	40	15	58,60	72,10
C2	210	R3	40	100	1	1	40	15	58,00	72,38
C2	210	R1	40	100	1	2	40	15	55,50	73,57
C2	210	R2	40	100	1	2	40	15	55,30	73,67
C2	210	R3	40	100	1	2	40	15	55,10	73,76
C2	210	R1	40	100	1	3	40	15	56,10	73,29
C2	210	R2	40	100	1	3	40	15	56,60	73,05
C2	210	R3	40	100	1	3	40	15	56,40	73,14
C3	225	R1	40	100	1	0	50	10	80,00	64,44
C3	225	R1	40	100	1	1	50	10	67,50	70,00

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C3	225	R2	40	100	1	1	50	10	67,40	70,04
C3	225	R3	40	100	1	1	50	10	68,40	69,60
C3	225	R1	40	100	1	2	50	10	66,30	70,53
C3	225	R2	40	100	1	2	50	10	66,70	70,36
C3	225	R3	40	100	1	2	50	10	66,20	70,58
C3	225	R1	40	100	1	3	50	10	68,20	69,69
C3	225	R2	40	100	1	3	50	10	68,00	69,78
C3	225	R3	40	100	1	3	50	10	68,10	69,73
C4	210	R1	40	100	1	0	50	15	80,90	61,48
C4	210	R1	40	100	1	1	50	15	61,90	70,52
C4	210	R2	40	100	1	1	50	15	61,20	70,86
C4	210	R3	40	100	1	1	50	15	60,60	71,14
C4	210	R1	40	100	1	2	50	15	63,10	69,95
C4	210	R2	40	100	1	2	50	15	63,00	70,00
C4	210	R3	40	100	1	2	50	15	63,90	69,57
C4	210	R1	40	100	1	3	50	15	64,80	69,14
C4	210	R2	40	100	1	3	50	15	65,30	68,90
C4	210	R3	40	100	1	3	50	15	65,70	68,71
C5	230	R1	40	100	3	0	40	10	89,80	60,96
C5	230	R1	40	100	3	1	40	10	62,30	72,91
C5	230	R2	40	100	3	1	40	10	63,40	72,43
C5	230	R3	40	100	3	1	40	10	62,50	72,83
C5	230	R1	40	100	3	2	40	10	61,90	73,09
C5	230	R2	40	100	3	2	40	10	61,60	73,22

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C5	230	R3	40	100	3	2	40	10	60,90	73,52
C5	230	R1	40	100	3	3	40	10	69,20	69,91
C5	230	R2	40	100	3	3	40	10	69,50	69,78
C5	230	R3	40	100	3	3	40	10	69,00	70,00
C6	224	R1	40	100	3	0	40	15	81,30	63,71
C6	224	R1	40	100	3	1	40	15	66,40	70,36
C6	224	R2	40	100	3	1	40	15	66,20	70,45
C6	224	R3	40	100	3	1	40	15	66,60	70,27
C6	224	R1	40	100	3	2	40	15	64,70	71,12
C6	224	R2	40	100	3	2	40	15	64,70	71,12
C6	224	R3	40	100	3	2	40	15	64,10	71,38
C6	224	R1	40	100	3	3	40	15	69,10	69,15
C6	224	R2	40	100	3	3	40	15	69,10	69,15
C6	224	R3	40	100	3	3	40	15	68,90	69,24
C7	205	R1	40	100	3	0	50	10	78,60	61,66
C7	205	R1	40	100	3	1	50	10	60,30	70,59
C7	205	R2	40	100	3	1	50	10	59,50	70,98
C7	205	R3	40	100	3	1	50	10	59,90	70,78
C7	205	R1	40	100	3	2	50	10	58,60	71,41
C7	205	R2	40	100	3	2	50	10	58,30	71,56
C7	205	R3	40	100	3	2	50	10	58,40	71,51
C7	205	R1	40	100	3	3	50	10	61,80	69,85
C7	205	R2	40	100	3	3	50	10	62,30	69,61
C7	205	R3	40	100	3	3	50	10	62,00	69,76

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C8	240	R1	40	100	3	0	50	15	85,80	64,25
C8	240	R1	40	100	3	1	50	15	74,50	68,96
C8	240	R2	40	100	3	1	50	15	75,40	68,58
C8	240	R3	40	100	3	1	50	15	75,70	68,46
C8	240	R1	40	100	3	2	50	15	71,90	70,04
C8	240	R2	40	100	3	2	50	15	71,20	70,33
C8	240	R3	40	100	3	2	50	15	70,60	70,58
C8	240	R1	40	100	3	3	50	15	74,50	68,96
C8	240	R2	40	100	3	3	50	15	75,40	68,58
C8	240	R3	40	100	3	3	50	15	75,20	68,67
C9	207	R1	40	200	1	0	40	10	71,10	65,65
C9	207	R1	40	200	1	1	40	10	56,00	72,95
C9	207	R2	40	200	1	1	40	10	56,50	72,71
C9	207	R3	40	200	1	1	40	10	55,00	73,43
C9	207	R1	40	200	1	2	40	10	50,40	75,65
C9	207	R2	40	200	1	2	40	10	50,60	75,56
C9	207	R3	40	200	1	2	40	10	50,00	75,85
C9	207	R1	40	200	1	3	40	10	62,10	70,00
C9	207	R2	40	200	1	3	40	10	62,40	69,86
C9	207	R3	40	200	1	3	40	10	61,50	70,29
C10	205	R1	40	200	1	0	40	15	70,70	65,51
C10	205	R1	40	200	1	1	40	15	53,20	74,05
C10	205	R2	40	200	1	1	40	15	52,70	74,29
C10	205	R3	40	200	1	1	40	15	53,30	74,00

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C10	205	R1	40	200	1	2	40	15	52,80	74,24
C10	205	R2	40	200	1	2	40	15	52,70	74,29
C10	205	R3	40	200	1	2	40	15	52,80	74,24
C10	205	R1	40	200	1	3	40	15	58,50	71,46
C10	205	R2	40	200	1	3	40	15	59,10	71,17
C10	205	R3	40	200	1	3	40	15	58,10	71,66
C11	227	R1	40	200	1	0	50	10	84,80	62,64
C11	227	R1	40	200	1	1	50	10	59,90	73,61
C11	227	R2	40	200	1	1	50	10	59,60	73,74
C11	227	R3	40	200	1	1	50	10	59,90	73,61
C11	227	R1	40	200	1	2	50	10	52,70	76,78
C11	227	R2	40	200	1	2	50	10	52,40	76,92
C11	227	R3	40	200	1	2	50	10	51,10	77,49
C11	227	R1	40	200	1	3	50	10	58,60	74,19
C11	227	R2	40	200	1	3	50	10	58,40	74,27
C11	227	R3	40	200	1	3	50	10	58,90	74,05
C12	209	R1	40	200	1	0	50	15	77,10	63,11
C12	209	R1	40	200	1	1	50	15	65,80	68,52
C12	209	R2	40	200	1	1	50	15	65,50	68,66
C12	209	R3	40	200	1	1	50	15	65,70	68,56
C12	209	R1	40	200	1	2	50	15	52,20	75,02
C12	209	R2	40	200	1	2	50	15	52,10	75,07
C12	209	R3	40	200	1	2	50	15	52,50	74,88
C12	209	R1	40	200	1	3	50	15	57,60	72,44

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C12	209	R2	40	200	1	3	50	15	57,40	72,54
C12	209	R3	40	200	1	3	50	15	57,70	72,39
C13	217	R1	40	200	3	0	40	10	84,10	61,24
C13	217	R1	40	200	3	1	40	10	59,70	72,49
C13	217	R2	40	200	3	1	40	10	60,30	72,21
C13	217	R3	40	200	3	1	40	10	60,10	72,30
C13	217	R1	40	200	3	2	40	10	58,40	73,09
C13	217	R2	40	200	3	2	40	10	58,20	73,18
C13	217	R3	40	200	3	2	40	10	58,10	73,23
C13	217	R1	40	200	3	3	40	10	60,90	71,94
C13	217	R2	40	200	3	3	40	10	60,20	72,26
C13	217	R3	40	200	3	3	40	10	60,40	72,17
C14	228	R1	40	200	3	0	40	15	90,60	60,26
C14	228	R1	40	200	3	1	40	15	62,40	72,63
C14	228	R2	40	200	3	1	40	15	61,80	72,89
C14	228	R3	40	200	3	1	40	15	61,60	72,98
C14	228	R1	40	200	3	2	40	15	60,90	73,29
C14	228	R2	40	200	3	2	40	15	60,70	73,38
C14	228	R3	40	200	3	2	40	15	60,80	73,33
C14	228	R1	40	200	3	3	40	15	75,50	66,89
C14	228	R2	40	200	3	3	40	15	75,70	66,80
C14	228	R3	40	200	3	3	40	15	75,80	66,75
C15	230	R1	40	200	3	0	50	10	81,30	64,65
C15	230	R1	40	200	3	1	50	10	63,50	72,39

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C15	230	R2	40	200	3	1	50	10	62,40	72,87
C15	230	R3	40	200	3	1	50	10	62,90	72,65
C15	230	R1	40	200	3	2	50	10	60,00	73,91
C15	230	R2	40	200	3	2	50	10	60,20	73,83
C15	230	R3	40	200	3	2	50	10	60,70	73,61
C15	230	R1	40	200	3	3	50	10	65,40	71,57
C15	230	R2	40	200	3	3	50	10	65,00	71,74
C15	230	R3	40	200	3	3	50	10	64,80	71,83
C16	228	R1	40	200	3	0	50	15	90,60	60,26
C16	228	R1	40	200	3	1	50	15	62,40	72,63
C16	228	R2	40	200	3	1	50	15	61,80	72,89
C16	228	R3	40	200	3	1	50	15	61,60	72,98
C16	228	R1	40	200	3	2	50	15	58,50	74,34
C16	228	R2	40	200	3	2	50	15	58,70	74,25
C16	228	R3	40	200	3	2	50	15	59,00	74,12
C16	228	R1	40	200	3	3	50	15	75,50	66,89
C16	228	R2	40	200	3	3	50	15	75,70	66,80
C16	228	R3	40	200	3	3	50	15	75,80	66,75
C1	230	R0	50	100	1	0	40	10	63,10	72,57
C1	230	R1	50	100	1	1	40	10	39,30	82,91
C1	230	R2	50	100	1	1	40	10	42,30	81,61
C1	230	R3	50	100	1	1	40	10	41,80	81,83
C1	230	R1	50	100	1	2	40	10	38,80	83,13
C1	230	R2	50	100	1	2	40	10	39,10	83,00

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C1	230	R3	50	100	1	2	40	10	38,20	83,39
C1	230	R1	50	100	1	3	40	10	44,60	80,61
C1	230	R2	50	100	1	3	40	10	44,20	80,78
C1	230	R3	50	100	1	3	40	10	44,00	80,87
C2	224	R1	50	100	1	0	40	15	68,90	69,24
C2	224	R1	50	100	1	1	40	15	37,90	83,08
C2	224	R2	50	100	1	1	40	15	37,70	83,17
C2	224	R3	50	100	1	1	40	15	37,60	83,21
C2	224	R1	50	100	1	2	40	15	36,90	83,53
C2	224	R2	50	100	1	2	40	15	37,60	83,21
C2	224	R3	50	100	1	2	40	15	37,40	83,30
C2	224	R1	50	100	1	3	40	15	37,50	83,26
C2	224	R2	50	100	1	3	40	15	38,20	82,95
C2	224	R3	50	100	1	3	40	15	38,60	82,77
C3	217	R1	50	100	1	0	50	10	64,60	70,23
C3	217	R1	50	100	1	1	50	10	36,60	83,13
C3	217	R2	50	100	1	1	50	10	36,10	83,36
C3	217	R3	50	100	1	1	50	10	36,70	83,09
C3	217	R1	50	100	1	2	50	10	34,20	84,24
C3	217	R2	50	100	1	2	50	10	34,60	84,06
C3	217	R3	50	100	1	2	50	10	34,70	84,01
C3	217	R1	50	100	1	3	50	10	39,50	81,80
C3	217	R2	50	100	1	3	50	10	39,30	81,89
C3	217	R3	50	100	1	3	50	10	39,50	81,80

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C4	220	R1	50	100	1	0	50	15	66,90	69,59
C4	220	R1	50	100	1	1	50	15	36,50	83,41
C4	220	R2	50	100	1	1	50	15	36,10	83,59
C4	220	R3	50	100	1	1	50	15	36,90	83,23
C4	220	R1	50	100	1	2	50	15	36,90	83,23
C4	220	R2	50	100	1	2	50	15	35,50	83,86
C4	220	R3	50	100	1	2	50	15	37,10	83,14
C4	220	R1	50	100	1	3	50	15	38,10	82,68
C4	220	R2	50	100	1	3	50	15	38,40	82,55
C4	220	R3	50	100	1	3	50	15	37,80	82,82
C5	219	R1	50	100	3	0	40	10	67,10	69,36
C5	219	R1	50	100	3	1	40	10	42,40	80,64
C5	219	R2	50	100	3	1	40	10	41,50	81,05
C5	219	R3	50	100	3	1	40	10	41,90	80,87
C5	219	R1	50	100	3	2	40	10	38,70	82,33
C5	219	R2	50	100	3	2	40	10	38,20	82,56
C5	219	R3	50	100	3	2	40	10	38,80	82,28
C5	219	R1	50	100	3	3	40	10	42,10	80,78
C5	219	R2	50	100	3	3	40	10	42,30	80,68
C5	219	R3	50	100	3	3	40	10	41,10	81,23
C6	224	R1	50	100	3	0	40	15	63,70	71,56
C6	224	R1	50	100	3	1	40	15	39,30	82,46
C6	224	R2	50	100	3	1	40	15	42,30	81,12
C6	224	R3	50	100	3	1	40	15	41,80	81,34

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C6	224	R1	50	100	3	2	40	15	38,40	82,86
C6	224	R2	50	100	3	2	40	15	39,60	82,32
C6	224	R3	50	100	3	2	40	15	39,00	82,59
C6	224	R1	50	100	3	3	40	15	44,60	80,09
C6	224	R2	50	100	3	3	40	15	44,20	80,27
C6	224	R3	50	100	3	3	40	15	44,30	80,22
C7	216	R1	50	100	3	0	50	10	63,00	70,83
C7	216	R1	50	100	3	1	50	10	37,70	82,55
C7	216	R2	50	100	3	1	50	10	38,20	82,31
C7	216	R3	50	100	3	1	50	10	38,20	82,31
C7	216	R1	50	100	3	2	50	10	37,50	82,64
C7	216	R2	50	100	3	2	50	10	37,20	82,78
C7	216	R3	50	100	3	2	50	10	37,50	82,64
C7	216	R1	50	100	3	3	50	10	35,10	83,75
C7	216	R2	50	100	3	3	50	10	35,50	83,56
C7	216	R3	50	100	3	3	50	10	35,70	83,47
C8	226	R1	50	100	3	0	50	15	68,60	69,65
C8	226	R1	50	100	3	1	50	15	44,60	80,27
C8	226	R2	50	100	3	1	50	15	43,80	80,62
C8	226	R3	50	100	3	1	50	15	43,90	80,58
C8	226	R1	50	100	3	2	50	15	39,50	82,52
C8	226	R2	50	100	3	2	50	15	40,10	82,26
C8	226	R3	50	100	3	2	50	15	40,20	82,21
C8	226	R1	50	100	3	3	50	15	39,60	82,48

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C8	226	R2	50	100	3	3	50	15	39,50	82,52
C8	226	R3	50	100	3	3	50	15	39,80	82,39
C9	221	R1	50	200	1	0	40	10	63,00	71,49
C9	221	R1	50	200	1	1	40	10	40,50	81,67
C9	221	R2	50	200	1	1	40	10	40,40	81,72
C9	221	R3	50	200	1	1	40	10	40,40	81,72
C9	221	R1	50	200	1	2	40	10	33,20	84,98
C9	221	R2	50	200	1	2	40	10	33,60	84,80
C9	221	R3	50	200	1	2	40	10	33,40	84,89
C9	221	R1	50	200	1	3	40	10	40,20	81,81
C9	221	R2	50	200	1	3	40	10	40,60	81,63
C9	221	R3	50	200	1	3	40	10	41,00	81,45
C10	224	R1	50	200	1	0	40	15	63,40	71,70
C10	224	R1	50	200	1	1	40	15	45,60	79,64
C10	224	R2	50	200	1	1	40	15	45,20	79,82
C10	224	R3	50	200	1	1	40	15	46,20	79,38
C10	224	R1	50	200	1	2	40	15	37,50	83,26
C10	224	R2	50	200	1	2	40	15	37,70	83,17
C10	224	R3	50	200	1	2	40	15	37,90	83,08
C10	224	R1	50	200	1	3	40	15	41,70	81,38
C10	224	R2	50	200	1	3	40	15	42,50	81,03
C10	224	R3	50	200	1	3	40	15	41,30	81,56
C11	225	R1	50	200	1	0	50	10	58,40	74,04
C11	225	R1	50	200	1	1	50	10	36,00	84,00

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C11	225	R2	50	200	1	1	50	10	36,80	83,64
C11	225	R3	50	200	1	1	50	10	36,90	83,60
C11	225	R1	50	200	1	2	50	10	29,10	87,07
C11	225	R2	50	200	1	2	50	10	29,00	87,11
C11	225	R3	50	200	1	2	50	10	29,00	87,11
C11	225	R1	50	200	1	3	50	10	35,10	84,40
C11	225	R2	50	200	1	3	50	10	35,40	84,27
C11	225	R3	50	200	1	3	50	10	35,50	84,22
C12	220	R1	50	200	1	0	50	15	56,10	74,50
C12	220	R1	50	200	1	1	50	15	38,70	82,41
C12	220	R2	50	200	1	1	50	15	38,70	82,41
C12	220	R3	50	200	1	1	50	15	39,00	82,27
C12	220	R1	50	200	1	2	50	15	34,10	84,50
C12	220	R2	50	200	1	2	50	15	34,40	84,36
C12	220	R3	50	200	1	2	50	15	34,60	84,27
C12	220	R1	50	200	1	3	50	15	37,90	82,77
C12	220	R2	50	200	1	3	50	15	37,00	83,18
C12	220	R3	50	200	1	3	50	15	37,20	83,09
C13	222	R1	50	200	3	0	40	10	63,40	71,44
C13	222	R1	50	200	3	1	40	10	38,80	82,52
C13	222	R2	50	200	3	1	40	10	37,80	82,97
C13	222	R3	50	200	3	1	40	10	38,40	82,70
C13	222	R1	50	200	3	2	40	10	38,60	82,61
C13	222	R2	50	200	3	2	40	10	39,20	82,34

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C13	222	R3	50	200	3	2	40	10	38,50	82,66
C13	222	R1	50	200	3	3	40	10	45,40	79,55
C13	222	R2	50	200	3	3	40	10	45,50	79,50
C13	222	R3	50	200	3	3	40	10	46,00	79,28
C14	221	R1	50	200	3	0	40	15	64,50	70,81
C14	221	R1	50	200	3	1	40	15	46,10	79,14
C14	221	R2	50	200	3	1	40	15	47,10	78,69
C14	221	R3	50	200	3	1	40	15	45,90	79,23
C14	221	R1	50	200	3	2	40	15	37,90	82,85
C14	221	R2	50	200	3	2	40	15	37,60	82,99
C14	221	R3	50	200	3	2	40	15	38,30	82,67
C14	221	R1	50	200	3	3	40	15	44,30	79,95
C14	221	R2	50	200	3	3	40	15	44,70	79,77
C14	221	R3	50	200	3	3	40	15	44,60	79,82
C15	224	R1	50	200	3	0	50	10	62,30	72,19
C15	224	R1	50	200	3	1	50	10	38,10	82,99
C15	224	R2	50	200	3	1	50	10	39,70	82,28
C15	224	R3	50	200	3	1	50	10	39,30	82,46
C15	224	R1	50	200	3	2	50	10	39,10	82,54
C15	224	R2	50	200	3	2	50	10	39,40	82,41
C15	224	R3	50	200	3	2	50	10	39,20	82,50
C15	224	R1	50	200	3	3	50	10	35,90	83,97
C15	224	R2	50	200	3	3	50	10	36,80	83,57
C15	224	R3	50	200	3	3	50	10	36,70	83,62

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C16	225	R1	50	200	3	0	50	15	66,10	70,62
C16	225	R1	50	200	3	1	50	15	45,50	79,78
C16	225	R2	50	200	3	1	50	15	45,10	79,96
C16	225	R3	50	200	3	1	50	15	45,60	79,73
C16	225	R1	50	200	3	2	50	15	42,60	81,07
C16	225	R2	50	200	3	2	50	15	42,20	81,24
C16	225	R3	50	200	3	2	50	15	42,50	81,11
C16	225	R1	50	200	3	3	50	15	49,00	78,22
C16	225	R2	50	200	3	3	50	15	49,10	78,18
C16	225	R3	50	200	3	3	50	15	48,80	78,31
C1	230	R1	60	100	1	0	40	10	65,90	71,35
C1	230	R1	60	100	1	1	40	10	56,70	75,35
C1	230	R2	60	100	1	1	40	10	56,00	75,65
C1	230	R3	60	100	1	1	40	10	55,60	75,83
C1	230	R1	60	100	1	2	40	10	46,90	79,61
C1	230	R2	60	100	1	2	40	10	46,70	79,70
C1	230	R3	60	100	1	2	40	10	46,10	79,96
C1	230	R1	60	100	1	3	40	10	57,40	75,04
C1	230	R2	60	100	1	3	40	10	57,70	74,91
C1	230	R3	60	100	1	3	40	10	56,80	75,30
C2	230	R1	60	100	1	0	40	15	78,10	66,04
C2	230	R1	60	100	1	1	40	15	51,70	77,52
C2	230	R2	60	100	1	1	40	15	51,80	77,48
C2	230	R3	60	100	1	1	40	15	52,10	77,35

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C2	230	R1	60	100	1	2	40	15	41,20	82,09
C2	230	R2	60	100	1	2	40	15	41,80	81,83
C2	230	R3	60	100	1	2	40	15	41,10	82,13
C2	230	R1	60	100	1	3	40	15	43,20	81,22
C2	230	R2	60	100	1	3	40	15	43,90	80,91
C2	230	R3	60	100	1	3	40	15	44,20	80,78
C3	223	R1	60	100	1	0	50	10	71,90	67,76
C3	223	R1	60	100	1	1	50	10	44,20	80,18
C3	223	R2	60	100	1	1	50	10	44,10	80,22
C3	223	R3	60	100	1	1	50	10	43,80	80,36
C3	223	R1	60	100	1	2	50	10	43,40	80,54
C3	223	R2	60	100	1	2	50	10	43,40	80,54
C3	223	R3	60	100	1	2	50	10	43,10	80,67
C3	223	R1	60	100	1	3	50	10	42,90	80,76
C3	223	R2	60	100	1	3	50	10	43,20	80,63
C3	223	R3	60	100	1	3	50	10	42,90	80,76
C4	223	R1	60	100	1	0	50	15	68,50	69,28
C4	223	R1	60	100	1	1	50	15	43,20	80,63
C4	223	R2	60	100	1	1	50	15	43,90	80,31
C4	223	R3	60	100	1	1	50	15	43,10	80,67
C4	223	R1	60	100	1	2	50	15	48,50	78,25
C4	223	R2	60	100	1	2	50	15	48,30	78,34
C4	223	R3	60	100	1	2	50	15	48,00	78,48
C4	223	R1	60	100	1	3	50	15	43,20	80,63

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C4	223	R2	60	100	1	3	50	15	43,10	80,67
C4	223	R3	60	100	1	3	50	15	43,00	80,72
C5	235	R1	60	100	3	0	40	10	70,80	69,87
C5	235	R1	60	100	3	1	40	10	49,60	78,89
C5	235	R2	60	100	3	1	40	10	50,40	78,55
C5	235	R3	60	100	3	1	40	10	49,60	78,89
C5	235	R1	60	100	3	2	40	10	47,80	79,66
C5	235	R2	60	100	3	2	40	10	46,20	80,34
C5	235	R3	60	100	3	2	40	10	46,50	80,21
C5	235	R1	60	100	3	3	40	10	47,90	79,62
C5	235	R2	60	100	3	3	40	10	47,50	79,79
C5	235	R3	60	100	3	3	40	10	48,60	79,32
C6	233	R1	60	100	3	0	40	15	70,00	69,96
C6	233	R1	60	100	3	1	40	15	46,80	79,91
C6	233	R2	60	100	3	1	40	15	46,90	79,87
C6	233	R3	60	100	3	1	40	15	47,10	79,79
C6	233	R1	60	100	3	2	40	15	46,40	80,09
C6	233	R2	60	100	3	2	40	15	47,80	79,48
C6	233	R3	60	100	3	2	40	15	47,10	79,79
C6	233	R1	60	100	3	3	40	15	58,50	74,89
C6	233	R2	60	100	3	3	40	15	58,90	74,72
C6	233	R3	60	100	3	3	40	15	59,50	74,46
C7	220	R1	60	100	3	0	50	10	60,50	72,50
C7	220	R1	60	100	3	1	50	10	46,30	78,95

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C7	220	R2	60	100	3	1	50	10	46,30	78,95
C7	220	R3	60	100	3	1	50	10	46,70	78,77
C7	220	R1	60	100	3	2	50	10	40,80	81,45
C7	220	R2	60	100	3	2	50	10	40,70	81,50
C7	220	R3	60	100	3	2	50	10	40,80	81,45
C7	220	R1	60	100	3	3	50	10	42,10	80,86
C7	220	R2	60	100	3	3	50	10	41,80	81,00
C7	220	R3	60	100	3	3	50	10	42,00	80,91
C8	228	R1	60	100	3	0	50	15	68,20	70,09
C8	228	R1	60	100	3	1	50	15	56,00	75,44
C8	228	R2	60	100	3	1	50	15	56,00	75,44
C8	228	R3	60	100	3	1	50	15	55,60	75,61
C8	228	R1	60	100	3	2	50	15	46,10	79,78
C8	228	R2	60	100	3	2	50	15	46,70	79,52
C8	228	R3	60	100	3	2	50	15	46,10	79,78
C8	228	R1	60	100	3	3	50	15	57,60	74,74
C8	228	R2	60	100	3	3	50	15	57,90	74,61
C8	228	R3	60	100	3	3	50	15	57,70	74,69
C9	214	R1	60	200	1	0	40	10	68,00	68,22
C9	214	R1	60	200	1	1	40	10	54,80	74,39
C9	214	R2	60	200	1	1	40	10	54,70	74,44
C9	214	R3	60	200	1	1	40	10	54,20	74,67
C9	214	R1	60	200	1	2	40	10	37,20	82,62
C9	214	R2	60	200	1	2	40	10	37,60	82,43

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C9	214	R3	60	200	1	2	40	10	37,10	82,66
C9	214	R1	60	200	1	3	40	10	52,50	75,47
C9	214	R2	60	200	1	3	40	10	53,60	74,95
C9	214	R3	60	200	1	3	40	10	52,40	75,51
C10	221	R1	60	200	1	0	40	15	66,40	69,95
C10	221	R1	60	200	1	1	40	15	47,30	78,60
C10	221	R2	60	200	1	1	40	15	46,10	79,14
C10	221	R3	60	200	1	1	40	15	46,00	79,19
C10	221	R1	60	200	1	2	40	15	42,60	80,72
C10	221	R2	60	200	1	2	40	15	43,70	80,23
C10	221	R3	60	200	1	2	40	15	42,40	80,81
C10	221	R1	60	200	1	3	40	15	48,20	78,19
C10	221	R2	60	200	1	3	40	15	48,20	78,19
C10	221	R3	60	200	1	3	40	15	46,70	78,87
C11	227	R1	60	200	1	0	50	10	68,10	70,00
C11	227	R1	60	200	1	1	50	10	47,30	79,16
C11	227	R2	60	200	1	1	50	10	47,00	79,30
C11	227	R3	60	200	1	1	50	10	46,40	79,56
C11	227	R1	60	200	1	2	50	10	37,70	83,39
C11	227	R2	60	200	1	2	50	10	37,50	83,48
C11	227	R3	60	200	1	2	50	10	38,50	83,04
C11	227	R1	60	200	1	3	50	10	45,10	80,13
C11	227	R2	60	200	1	3	50	10	44,60	80,35
C11	227	R3	60	200	1	3	50	10	45,30	80,04

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C12	210	R1	60	200	1	0	50	15	71,30	66,05
C12	210	R1	60	200	1	1	50	15	40,50	80,71
C12	210	R2	60	200	1	1	50	15	40,60	80,67
C12	210	R3	60	200	1	1	50	15	40,80	80,57
C12	210	R1	60	200	1	2	50	15	43,00	79,52
C12	210	R2	60	200	1	2	50	15	42,10	79,95
C12	210	R3	60	200	1	2	50	15	42,00	80,00
C12	210	R1	60	200	1	3	50	15	49,60	76,38
C12	210	R2	60	200	1	3	50	15	49,40	76,48
C12	210	R3	60	200	1	3	50	15	49,70	76,33
C13	235	R1	60	200	3	0	40	10	78,60	66,55
C13	235	R1	60	200	3	1	40	10	63,00	73,19
C13	235	R2	60	200	3	1	40	10	63,20	73,11
C13	235	R3	60	200	3	1	40	10	62,40	73,45
C13	235	R1	60	200	3	2	40	10	53,90	77,06
C13	235	R2	60	200	3	2	40	10	54,00	77,02
C13	235	R3	60	200	3	2	40	10	54,00	77,02
C13	235	R1	60	200	3	3	40	10	57,00	75,74
C13	235	R2	60	200	3	3	40	10	56,80	75,83
C13	235	R3	60	200	3	3	40	10	56,90	75,79
C14	229	R1	60	200	3	0	40	15	77,10	66,33
C14	229	R1	60	200	3	1	40	15	43,30	81,09
C14	229	R2	60	200	3	1	40	15	43,10	81,18
C14	229	R3	60	200	3	1	40	15	41,90	81,70

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C14	229	R1	60	200	3	2	40	15	40,00	82,53
C14	229	R2	60	200	3	2	40	15	40,10	82,49
C14	229	R3	60	200	3	2	40	15	40,50	82,31
C14	229	R1	60	200	3	3	40	15	43,10	81,18
C14	229	R2	60	200	3	3	40	15	42,70	81,35
C14	229	R3	60	200	3	3	40	15	42,70	81,35
C15	232	R1	60	200	3	0	50	10	78,90	65,99
C15	232	R1	60	200	3	1	50	10	50,80	78,10
C15	232	R2	60	200	3	1	50	10	49,10	78,84
C15	232	R3	60	200	3	1	50	10	48,20	79,22
C15	232	R1	60	200	3	2	50	10	43,10	81,42
C15	232	R2	60	200	3	2	50	10	43,80	81,12
C15	232	R3	60	200	3	2	50	10	42,90	81,51
C15	232	R1	60	200	3	3	50	10	46,10	80,13
C15	232	R2	60	200	3	3	50	10	46,20	80,09
C15	232	R3	60	200	3	3	50	10	45,50	80,39
C16	228	R1	60	200	3	0	50	15	77,60	65,96
C16	228	R1	60	200	3	1	50	15	59,60	73,86
C16	228	R2	60	200	3	1	50	15	58,40	74,39
C16	228	R3	60	200	3	1	50	15	58,90	74,17
C16	228	R1	60	200	3	2	50	15	56,30	75,31
C16	228	R2	60	200	3	2	50	15	56,80	75,09
C16	228	R3	60	200	3	2	50	15	56,80	75,09
C16	228	R1	60	200	3	3	50	15	59,80	73,77

Combinación	Turbiedad Inicial (NTU)	Repetición	Sulfato de Aluminio (mL)	Velocidad Agitación Rápida (rpm)	Período Mezcla Rápida (min)	Almidón de papa (mL)	Velocidad Agitación Lenta (rpm)	Período de Mezcla Lenta (min)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia (%)
C16	228	R2	60	200	3	3	50	15	59,90	73,73
C16	228	R3	60	200	3	3	50	15	58,90	74,17

**Tabla 24.** Ensayos de dosis óptima de coagulante y floculante.

Condiciones de operación	Mezcla rápida						Mezcla lenta					
	Velocidad de agitación: 200 rpm						Velocidad de agitación: 50 rpm					
	Período de mezcla: 1 min						Período de mezcla: 10 min					
Tratamiento	Sulfato Aluminio (mL)	Almidón de papa (mL)	Repetición	Turbiedad Inicial (NTU)	DQO Inicial (mg/L)	Hierro Inicial (mg/L)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia Turbidez (%)	DQO Final (mg/L)	Eficiencia DQO (%)	Hierro Final (mg/L)	Eficiencia Hierro (%)
T1	40	0	R1	218	1336	4,79	77,53	64,43	619	53,70	1,36	71,59
T1	40	0	R2	218	1277	4,79	90,10	58,67	641	49,80	1,58	66,99
T1	40	0	R3	211	1217	4,06	74,64	64,62	615	49,50	1,37	66,20
T2	40	1	R1	218	1336	4,79	51,34	76,45	564	57,78	0,80	83,27
T2	40	1	R2	218	1277	4,79	52,70	75,82	561	56,09	0,85	82,33
T2	40	1	R3	211	1217	4,06	51,98	75,36	551	54,76	0,78	80,68
T3	40	2	R1	205	1492	3,5	42,11	79,46	410	72,52	0,53	84,72
T3	40	2	R2	218	1197	4,74	50,39	76,88	395	67,03	0,91	80,82

Condiciones de operación			Mezcla rápida					Mezcla lenta				
			Velocidad de agitación: 200 rpm					Velocidad de agitación: 50 rpm				
			Período de mezcla: 1 min					Período de mezcla: 10 min				
Tratamiento	Sulfato Aluminio (mL)	Almidón de papa (mL)	Repetición	Turbiedad Inicial (NTU)	DQO Inicial (mg/L)	Hierro Inicial (mg/L)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia Turbidez (%)	DQO Final (mg/L)	Eficiencia DQO (%)	Hierro Final (mg/L)	Eficiencia Hierro (%)
T3	40	2	R3	224	1299	5,37	50,03	77,67	406	68,72	0,78	85,52
T4	40	3	R1	222	1122	5,15	60,90	72,57	431	61,58	1,03	79,94
T4	40	3	R2	215	1169	4,46	49,52	76,97	431	63,14	0,68	84,72
T4	40	3	R3	214	1326	4,36	59,83	72,04	441	66,71	0,94	78,44
T5	50	0	R1	218	1336	4,79	51,24	76,49	534	60,05	0,76	84,06
T5	50	0	R2	218	1277	4,79	59,24	72,83	532	58,30	0,94	80,35
T5	50	0	R3	211	1217	4,06	53,35	74,72	531	56,34	0,84	79,36
T6	50	1	R1	205	1492	3,5	31,03	84,86	392	73,75	0,36	89,71
T6	50	1	R2	218	1197	4,74	27,83	87,24	390	67,43	0,28	94,09
T6	50	1	R3	224	1299	5,37	32,00	85,72	392	69,80	0,39	92,74
T7	50	2	R1	205	1492	3,5	29,30	85,71	225	84,90	0,14	96,08
T7	50	2	R2	218	1197	4,74	37,86	82,63	216	81,98	0,52	89,08
T7	50	2	R3	224	1299	5,37	27,27	87,83	295	77,31	0,19	96,44
T8	50	3	R1	222	1122	5,15	36,79	83,43	329	70,70	0,49	90,49
T8	50	3	R2	215	1169	4,46	39,25	81,74	319	72,74	0,51	88,57

Condiciones de operación			Mezcla rápida					Mezcla lenta				
			Velocidad de agitación: 200 rpm					Velocidad de agitación: 50 rpm				
			Período de mezcla: 1 min					Período de mezcla: 10 min				
Tratamiento	Sulfato de Aluminio (mL)	Almidón de papa (mL)	Repetición	Turbiedad Inicial (NTU)	DQO Inicial (mg/L)	Hierro Inicial (mg/L)	Turbiedad Final (NTU)	Eficiencia Turbidez (%)	DQO Final (mg/L)	Eficiencia DQO (%)	Hierro Final (mg/L)	Eficiencia Hierro (%)
T8	50	3	R3	214	1326	4,36	38,92	81,81	344	74,04	0,50	88,53
T9	60	0	R1	218	1336	4,79	55,30	74,63	655	51,00	1,11	76,90
T9	60	0	R2	218	1277	4,79	59,72	72,61	638	50,07	1,01	78,93
T9	60	0	R3	211	1217	4,06	61,02	71,08	660	45,78	0,87	78,51
T10	60	1	R1	205	1492	3,5	48,93	76,13	537	64,03	0,80	77,04
T10	60	1	R2	218	1197	4,74	35,64	83,65	518	56,71	0,48	89,86
T10	60	1	R3	224	1299	5,37	44,17	80,28	519	60,01	0,71	86,75
T11	60	2	R1	222	1122	5,15	42,97	80,64	365	67,43	0,47	90,83
T11	60	2	R2	215	1169	4,46	34,60	83,91	391	66,53	0,52	88,29
T11	60	2	R3	214	1326	4,36	36,29	83,04	380	71,33	0,53	87,78
T12	60	3	R1	222	1122	5,15	41,43	81,34	373	66,74	0,54	89,47
T12	60	3	R2	215	1169	4,46	46,40	78,42	388	66,78	0,68	84,67
T12	60	3	R3	214	1326	4,36	46,99	78,04	386	70,87	0,70	84,05

## ANEXO B. Autorización de ingreso a Celda transitoria

  
 Año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo

**MEMORANDUM N° 036-2023-GGADC/MPLP**

**DE :** Ing. ALAIN ACOSTA JARA  
 Gerente de Gestión Ambiental y Defensa Civil.

**A :** Ing. RINA GARRIDO GARCIA  
 Subgerente de Calidad Ambiental y Proyectos

**ASUNTO :** BRINDAR FACILIDADES DE INGRESO

**REF. :** Exp. Adm. N° 202318464

**FECHA :** Tingo María, 19 de julio de 2023.

---

Por medio del presente se le comunica a Usted que, en merito al documento en referencia deberá brindar facilidades de ingreso a señorita **Katherin Lourdes Uriarte Barraza** tesista de la facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria a las Celdas Transitorias, según cronograma adjunto.

A la espera del normal cumplimiento de lo aquí dispuesto, quedo de usted.

**Atentamente:**  
  
**ING. ALAIN ACOSTA JARA**  
 GERENTE DE GESTIÓN AMBIENTAL Y DEFENSA CIVIL



062 - 598301    Ay. Alameda Perú N° 525    [www.muniflingomaria.gob.pe](http://www.muniflingomaria.gob.pe)



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Tingo María, 31 de enero del 2024

**CARTA N°-2024-SLP-GGAYRD-MPLP/TM**

**KATHERIN LOURDES URIARTE BARRAZA**

*Tesista-UNAS*

**Presente.-**

ASUNTO : **ACEPTACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE LIXIVIADO EN LA CELDA TRANSITORIA**  
 REFERENCIA : **N° Exp. 202400191**

Mediante el presente me dirijo a usted para saludarle cordialmente y a la vez manifestarle lo siguiente:

La subgerencia de Limpieza Pública, a través de la evaluación del equipo técnico del área correspondiente, menciona que la extracción de tomas de muestras de lixiviado es viable en la celda transitoria. Previa carta de aceptación de ingreso de la gerencia de gestión ambiental y del riesgo de desastres.

Por lo consiguiente, la actividad de extracción se realizará 3 veces a la semana hasta finales del mes de marzo, por lo que tendrá la obligación del uso de equipo de protección, los cuales son los mínimos requeridos (casco, zapatos punta de acero/botas, doble mascarilla, guantes PVC) para la tesista, caso contrario no se permitirá el ingreso. Además, la información y datos obtenidos serán **BRINDADOS A LA SUBGERENCIA DE LIMPIEZA PÚBLICA**. Nota: Se le recomienda tomar un tarro de leche para la desintoxicación pulmonar.

Sin otro en particular, me suscribo de usted, no sin antes expresarle las muestras de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente,

**ANEXO C. Panel fotográfico**

**Figura 10.** Recolección de muestras de lixiviado de la celda transitoria.



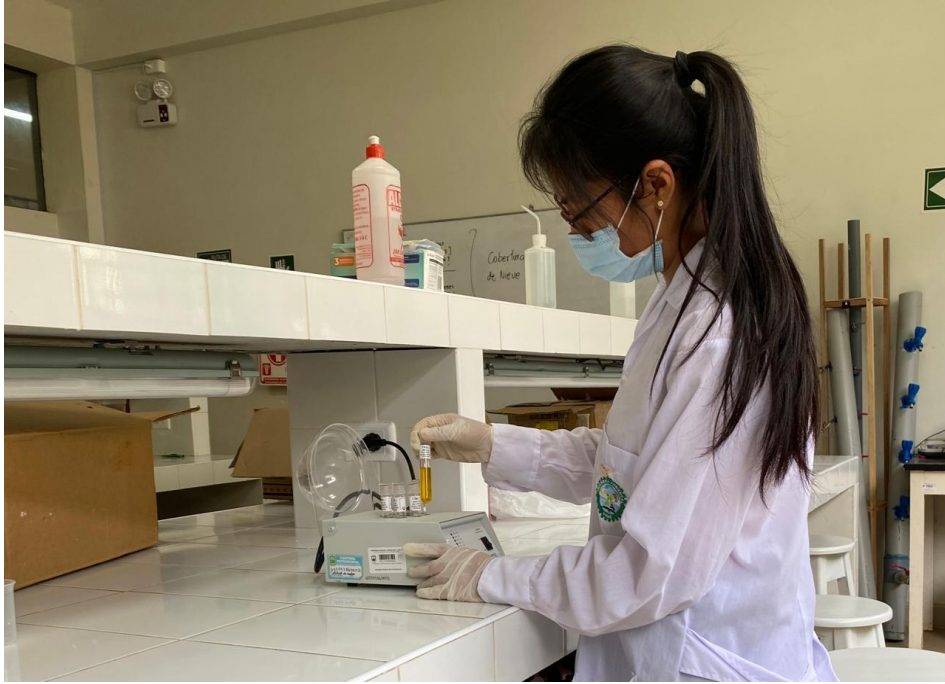
**Figura 11.** Muestras de lixiviado codificadas.



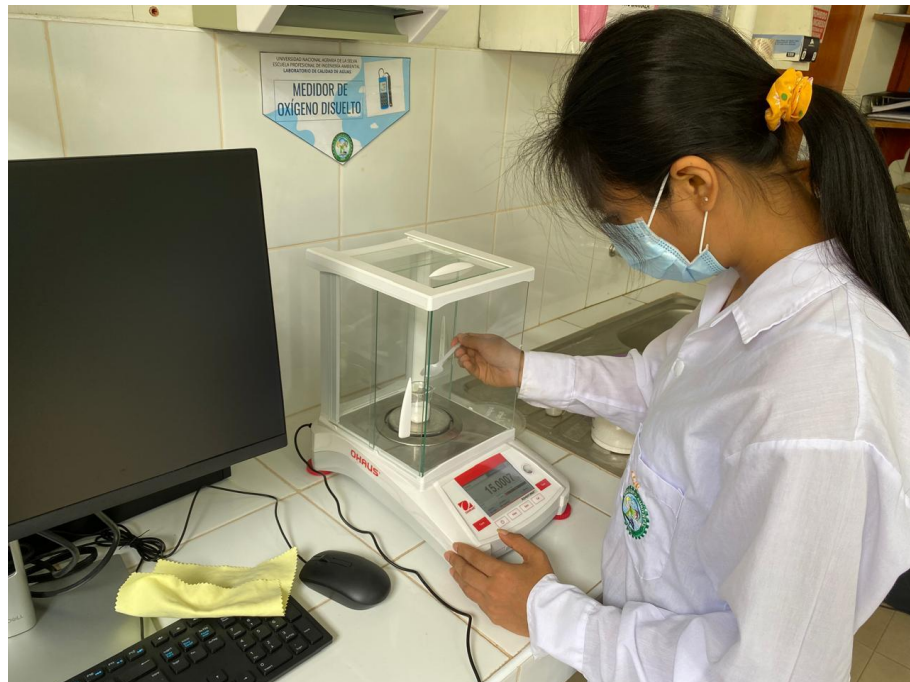
**Figura 12.** Medición de parámetros fisicoquímicos del lixiviado.



**Figura 13.** Adición de la muestra de lixiviado al vial para determinación de DQO.



**Figura 14.** Colocación de las muestras en el termoreactor .



**Figura 15.** Pesado de coagulante y floculante.



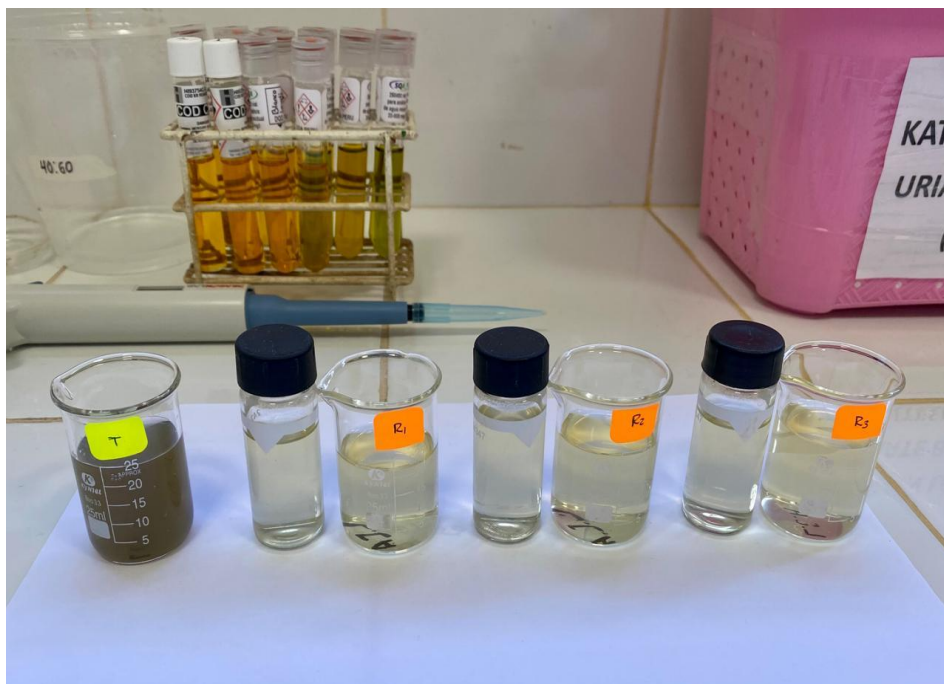
**Figura 16.** Elaboración de floculante de almidón de papa gelatinizado.



**Figura 17.** Muestras de lixiviado para ensayos en test de jarras.



**Figura 18.** Programación de parámetros de operación para test de jarras.



**Figura 19.** Muestras de lixiviado tratado.



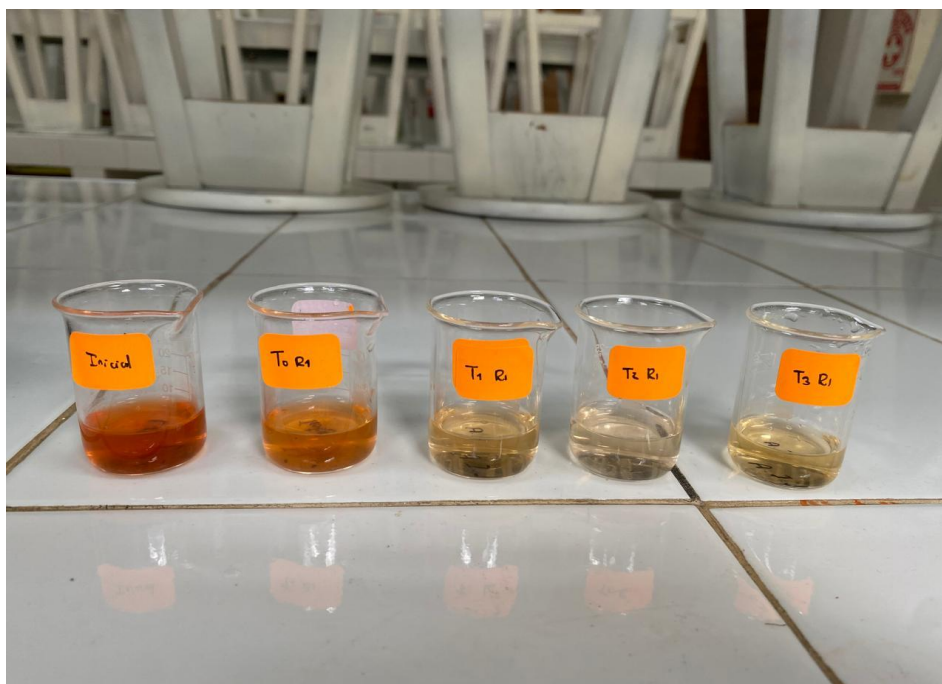
**Figura 20.** Medición de DQO final



**Figura 21.** Muestra inicial y muestras finales de DQO.



**Figura 22.** Medición de hierro



**Figura 23.** Muestra inicial y muestras finales de hierro.



**Lugar:** Laboratorio de Calidad de Agua

**Ensayo N°:** 1

**Volumen de la muestra:** 1L

**Condiciones iniciales para Ensayo 1**

pH inicial	7,9
Velocidad de mezcla rápida (rpm)	200
Tiempo de mezcla rápida (min)	1
Velocidad de mezcla lenta (rpm)	50
Tiempo de mezcla lenta (min)	10
Tiempo de sedimentación (min)	20

**Resultados de obtenidos en el Ensayo 1,**

Tratamiento	Sulfato de aluminio (mL)	Almidón de papa gelatinizado (mL)	pH final	Turbiedad final (NTU)	DQO final (mg/L)	Fe final (mg/L)
T1 R1	40	0	7,1	77,53	619	1,36
T1 R2	40	0	7,1	90,10	641	1,58
T1 R3	40	0	7,1	74,64	615	1,37
T2 R1	40	1	7,1	51,34	564	0,80
T2 R2	40	1	7,1	52,70	561	0,85
T2 R3	40	1	7,1	51,98	551	0,78
T3 R1	40	2	7,04	42,11	410	0,53
T3 R2	40	2	7,04	50,39	395	0,91
T3 R3	40	2	7,04	50,03	406	0,78
T4 R1	40	3	7,04	60,90	431	1,03
T4 R2	40	3	7,04	49,52	431	0,68
T4 R3	40	3	7,04	59,83	441	0,94

**Figura 24.** Ficha de laboratorio- Ensayo 1.



**Lugar:** Laboratorio de Calidad de Agua

**Ensayo N° :** 2

**Volumen de la muestra:** 1L

**Condiciones iniciales para Ensayo 2**

pH inicial	7,74
Velocidad de mezcla rápida (rpm)	200
Tiempo de mezcla rápida (min)	1
Velocidad de mezcla lenta (rpm)	50
Tiempo de mezcla lenta (min)	10
Tiempo de sedimentación(min)	20

**Resultados de obtenidos en el Ensayo 2.**

Tratamiento	Sulfato de aluminio (mL)	Almidón de papa gelatinizado (mL)	pH final	Turbiedad final (NTU)	DQO final (mg/L)	Fe final (mg/L)
T5 R1	50	0	7,02	51,24	534	0,76
T5 R2	50	0	7,02	59,24	532	0,94
T5 R3	50	0	7,01	53,35	531	0,84
T6 R1	50	1	7,01	31,03	392	0,36
T6 R2	50	1	7,00	27,83	390	0,28
T6 R3	50	1	7,01	32,00	392	0,39
T7 R1	50	2	7,00	29,30	225	0,14
T7 R2	50	2	7,00	27,86	216	0,52
T7 R3	50	2	7,00	27,27	295	0,19
T8 R1	50	3	7,01	36,79	329	0,49
T8 R2	50	3	7,01	39,25	319	0,51
T8 R3	50	3	7,01	38,92	344	0,50

**Figura 25.** Ficha de laboratorio- Ensayo 2.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL**



**Lugar:** Laboratorio de Calidad de Agua

**Ensayo N° :** 3

**Volumen de la muestra:** 1L

**Condiciones iniciales para Ensayo 3**

pH inicial	7,84
Velocidad de mezcla rápida (rpm)	200
Tiempo de mezcla rápida (min)	1
Velocidad de mezcla lenta (rpm)	50
Tiempo de mezcla lenta (min)	10
Tiempo de sedimentación(min)	20

**Resultados de obtenidos en el Ensayo 3.**

Tratamiento	Sulfato de aluminio (mL)	Almidón de papa gelatinizado (mL)	pH final	Turbiedad final (NTU)	DQO final (mg/L)	Fe final (mg/L)
T9 R1	60	0	6,90	55,30	655	1,11
T9 R2	60	0	6,90	59,72	638	1,01
T9 R3	60	0	6,90	61,02	660	0,87
T10 R1	60	1	6,92	48,93	537	0,80
T10 R2	60	1	6,90	35,64	518	0,48
T10 R3	60	1	6,92	44,17	519	0,71
T11 R1	60	2	6,81	42,97	365	0,47
T11 R2	60	2	6,80	34,60	391	0,52
T11 R3	60	2	6,80	36,29	380	0,53
T12 R1	60	3	6,80	41,43	373	0,54
T12 R2	60	3	6,80	46,40	388	0,68
T12 R3	60	3	6,80	46,99	386	0,70

**Figura 26.** Ficha de laboratorio- Ensayo 3.

ANEXO D. Mapa de ubicación

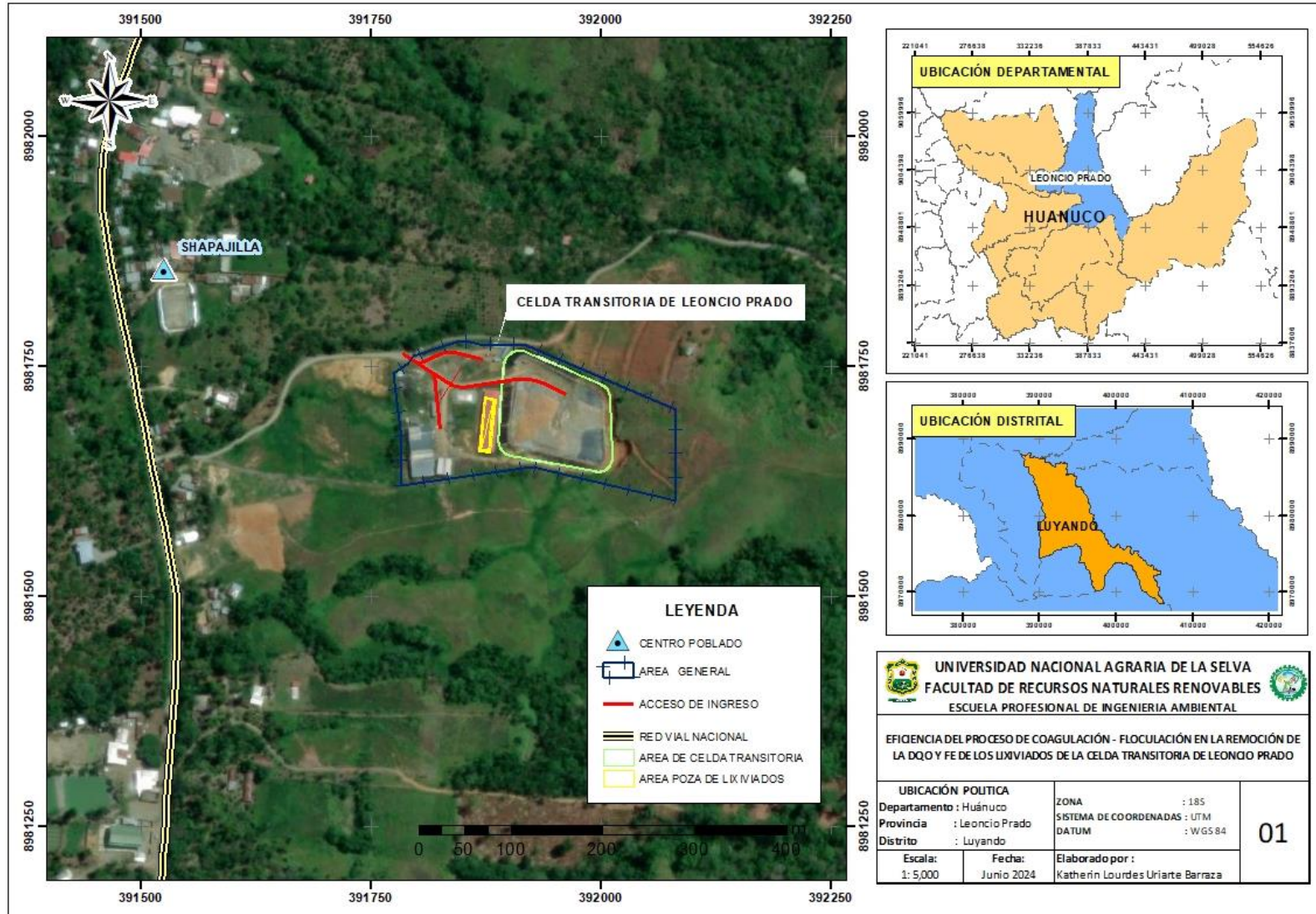


Figura 27. Mapa de ubicación de la Celda Transitoria de Leoncio Prado.