

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
FORESTAL



**“EFICIENCIA DEL ÓXIDO DE GRAFENO EN LA ADSORCIÓN DE
CADMIO Y PLOMO EN EL EFLUENTE MINERO DE LA UNIDAD
MINERA SAN RAFAEL, 2024”**

Bach. Omar Cancapac Velasquez

Bach. Yoni Alex Mamani Mamani

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesora: Dra. Eliana Mullisaca Contreras

Juliaca, 2025

Cancapac, O., & Mamani, Y. (2025). *Eficiencia del óxido de grafeno en la adsorción de cadmio y plomo en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, 2024. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.*

AUTOR(ES): Omar Cancapac Velasquez, Yoni Alex Mamani Mamani.

TÍTULO: Eficiencia del óxido de grafeno en la adsorción de cadmio y plomo en el efluente minero de la unidad minera San Rafael, 2024.

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2025

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (134 pp.)

NOTA: Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal – Universidad Nacional de Juliaca

CÓDIGO: 01-000068-01/M21

NOTA: Incluye bibliografía.

ASESOR: Dra. Eliana Mullisaca Contreras

PALABRAS CLAVE: Adsorción, cinéticas, efluente minero, isotermas, óxido de grafeno.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL
“EFICIENCIA DEL ÓXIDO DE GRAFENO EN LA ADSORCIÓN DE
CADMIO Y PLOMO EN EL EFLUENTE MINERO DE LA UNIDAD
MINERA SAN RAFAEL, 2024”
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL

Presentada por:

Bach. Omar Cancapac Velasquez

Bach. Yoni Alex Mamani Mamani

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo

PRESIDENTE DE JURADO



M.Sc. Hugo Apaza Aquino

JURADO (Secretario)

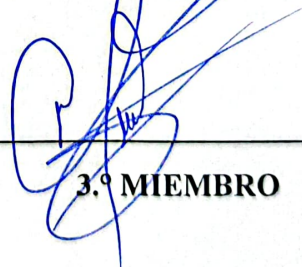
2.º MIEMBRO



M.Sc. Milton Quispe Tisnado

JURADO (Vocal)


3.º MIEMBRO



ASESOR(A) DE TESIS
Dra. Eliana Mullisaca Contreras

Omar Cancapac Velasquez Yoni Alex Mamani Mam...

EFICIENCIA DEL ÓXIDO DE GRAFENO EN LA ADSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN EL EFLUENTE MINERO DE LA UNIDAD ...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:541212548

134 páginas

Fecha de entrega

16 dic 2025, 10:14 a.m. GMT-5

32.131 palabras

Fecha de descarga

16 dic 2025, 10:17 a.m. GMT-5

178.372 caracteres

Nombre del archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA (2).pdf

Tamaño del archivo

7.7 MB






12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
6 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DEDICATORIA

A mis padres, quienes han sido mi inspiración constante y me han brindado su apoyo incondicional, enseñándome a ser fuerte, respetuoso y leal. A mis hermanos, por motivarme y confiar en este proyecto, dándome el impulso necesario para alcanzar esta meta. A Yudi, por su constante apoyo emocional y motivación durante la redacción de esta tesis.

Omar Cancapac Velasquez

A Dios, por ser mi guía constante, brindándome la fortaleza para avanzar en cada etapa y la serenidad para enfrentar las dificultades sin perder la dignidad. A Él le debo el valor de no rendirme ante los desafíos. A mis amados padres, quienes me han dado todo lo que soy. Gracias por inculcarme valores, principios, perseverancia y el coraje necesario para perseguir mis sueños y alcanzar mis metas. Su apoyo incondicional y amor me han acompañado siempre y han sido la base de mi camino.

Yoni Alex Mamani Mamani

AGRADECIMIENTO

Agradecemos, ante todo, a Dios, quien ha sido nuestro refugio y fortaleza en cada paso de este camino. Su presencia nos ha permitido avanzar con seguridad y superar los desafíos.

Nuestra gratitud infinita es para nuestros padres y hermanos, cuya dedicación y apoyo incondicional han sido el impulso necesario para llegar hasta aquí. Gracias por estar siempre a nuestro lado, por su paciencia y por darnos las bases que hicieron posible este logro.

Queremos reconocer a la Universidad Nacional de Juliaca, en particular a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal. Este viaje no habría sido posible sin el respaldo de esta institución, que nos brindó el espacio para desarrollarnos como profesionales y nos proporcionó las herramientas necesarias para alcanzar nuestras metas.

Queremos expresar un especial agradecimiento a nuestra asesora, M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras, por su guía constante, su rigor académico y su paciencia. Su acompañamiento nos impulsó a no conformarnos y a buscar siempre la excelencia en cada etapa de este trabajo.

*Omar Cancapac Velasquez
Yoni Alex Mamani Mamani*

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	12

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema.....	14
1.2. Formulación del problema de investigación.....	15
1.2.1. Problema general	15
1.2.2. Problemas específicos	16
1.3. Objetivos de la investigación.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. Hipótesis.....	17
1.4.1. Hipótesis general.....	17
1.4.2. Hipótesis específicas	17
1.5. Justificación de la investigación	17

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	19

2.1.2. Antecedentes nacionales	21
2.1.3. Antecedentes locales	22
2.2. Marco teórico.....	23
2.2.1. Contaminación del agua.....	23
2.2.2. Efluentes mineros.....	23
2.2.3. Calidad del agua	24
2.2.4. Metales pesados	24
2.2.5. Toxicidad de elementos metálicos.....	26
2.2.6. Tratamiento de efluentes mineros.....	27
2.2.7. Tecnologías de remoción.....	28
2.2.8. Adsorción.....	29
2.2.9. Mecanismos de adsorción.....	30
2.2.10. Cinéticas de adsorción.....	31
2.2.11. Isotermas de adsorción	32
2.2.12. Tipos de adsorbentes	34
2.2.13. Óxido de grafeno (OG).....	36
2.2.14. Aplicación del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de metales pesados (Pb y Cd)	38
2.2.15. Método Hummers.....	38
2.2.16. Interacciones químicas durante la síntesis del oxido de grafeno	39
2.2.17. Normativa peruana en efluentes mineros	40

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio.....	42
3.2. Materiales, equipos y reactivos	43
3.2.1. Materiales.....	43
3.2.2. Equipos	43
3.3. Tipo y diseño de investigación.....	43
3.3.1. Tipo de investigación	43
3.3.2. Diseño de investigación	44

3.4. Población y muestra.....	44
3.4.1. Población	44
3.4.2. Muestra	45
3.5. Variable de estudio	45
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
3.6.1. Técnicas de recolección de datos	45
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.....	46
3.7. Procedimiento experimental.....	46
3.7.1. Procedimiento experimental N.º 01: Síntesis y caracterización del óxido de grafeno.....	46
3.7.2. Procedimiento experimental N.º 02: Eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II)	48
3.7.3. Procedimiento experimental N.º 03: Cinéticas e isothermas de adsorción	50
3.7.4. Análisis estadístico	52

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Síntesis y caracterización del óxido de grafeno (OG)	54
4.1.1. Síntesis del óxido de grafeno (OG) por el método modificado de Hummers	54
4.1.2. Caracterización del óxido de grafeno.....	55
4.2. Eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II) mediante óxido de grafeno	62
4.2.1. Efecto de la presencia de iones en la adsorción de cadmio y plomo	64
4.2.2. Diferencia de la eficiencia de adsorción de cadmio y plomo	65
4.2.3. Efecto de la dosis de óxido de grafeno en la adsorción de cadmio y plomo	65
4.3. Cinética e isothermas de adsorción.....	66
4.3.1. Cinéticas de adsorción	66
4.3.2. Isothermas de adsorción	72
4.4. Análisis estadístico	78
4.4.1. Prueba de normalidad	79
4.4.2. Varianza constante	80
4.4.3. Prueba de independencia	80
4.4.4. Análisis de varianza.....	81
4.4.5. Diagrama de Pareto	85

4.4.6. Análisis de la interacción para la eficiencia de adsorción de iones Cd(II) y Pb(II).....	85
4.4.7. Gráfica de superficie 3D.....	86

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	89
5.2. Recomendaciones	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Diversos métodos de síntesis del óxido de grafeno.</i>	37
Tabla 2. <i>Límites Máximos Permisibles (LMP) en efluentes minero-metalúrgicos.</i>	41
Tabla 3. <i>Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categorías 3 y 4.</i>	41
Tabla 4. <i>Puntos de monitoreo del efluente de la U. M. San Rafael.</i>	44
Tabla 5. <i>Estructura de registro de datos para Cd y Pb.</i>	49
Tabla 6. <i>Parámetros para cinética.</i>	50
Tabla 7. <i>Datos para el modelo de Langmuir y Freundlich.</i>	51
Tabla 8. <i>Estructura de combinaciones del diseño experimental.</i>	52
Tabla 9. <i>Esquema de organización para el análisis de varianza.</i>	53
Tabla 10. <i>Rendimiento de la eficiencia de síntesis del óxido de grafeno.</i>	54
Tabla 11. <i>Parámetros de la ley de Bragg para los picos definitorios de OG en DRX.</i>	56
Tabla 12. <i>Reporte de las concentraciones iniciales de Cd y Pb.</i>	62
Tabla 13. <i>Eficiencia y capacidad de adsorción de Cd(II) y Pb(II).</i>	63
Tabla 14. <i>Reporte de la concentración de iones en el efluente minero.</i>	64
Tabla 15. <i>Resultados para el modelo de pseudo-primer orden para el Cd(II) y Pb(II).</i>	67
Tabla 16. <i>Resultados de los parámetros de los modelos cinéticos pseudo-primer orden.</i>	68
Tabla 17. <i>Resultados para el modelo de pseudo-segundo orden.</i>	69
Tabla 18. <i>Resultados de los parámetros de los modelos cinéticos pseudo-primer orden.</i>	70
Tabla 19. <i>Resultado de capacidades de adsorción (Q_t) para Cd(II) y Pb(II)</i>	71
Tabla 20. <i>Resultados para el modelo de Langmuir de metales Cd(II) y Pb(II).</i>	72
Tabla 21. <i>Parámetros para la isoterma de Langmuir para el Cd(II).</i>	74
Tabla 22. <i>Parámetros obtenidos de Langmuir para Pb(II).</i>	75
Tabla 23. <i>Resultados para el modelo de Freundlich de metales Cd(II) y Pb(II).</i>	76
Tabla 24. <i>Parámetros de Freundlich para Cd(II) y Pb(II).</i>	77
Tabla 25. <i>Variables independientes y variable dependiente.</i>	78
Tabla 26. <i>Estructura de combinaciones.</i>	79
Tabla 27. <i>Análisis de varianza para Cd(II)</i>	82
Tabla 28. <i>Análisis de varianza para Pb(II).</i>	83

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Numero de estudio realizados en suelo</i>	27
Figura 2. <i>Mecanismo del efecto tóxico de la exposición al plomo</i>	28
Figura 3. <i>Diagrama de flujo entre la contaminación y las tecnologías de remoción</i>	29
Figura 4. <i>Proceso de adsorción de contaminantes metálicos</i>	30
Figura 5. <i>Estructura del carbón activado</i>	35
Figura 6. <i>Estructuras alótropas a partir de grafeno</i>	36
Figura 7. <i>Representación del proceso de síntesis del óxido de grafeno</i>	39
Figura 8. <i>Localización de los puntos de muestreo</i>	42
Figura 9. <i>Flujograma para la síntesis de óxido de grafeno</i>	47
Figura 10. <i>Difracción de rayos X del óxido de grafeno sintetizado</i>	55
Figura 11. <i>Espectros del análisis por FTIR del óxido de grafeno sintetizado</i>	58
Figura 12. <i>Interpretación del análisis por FTIR</i>	59
Figura 13. <i>Representación del modelo cinético de pseudo-primer orden</i>	68
Figura 14. <i>Modelo cinético de pseudo-segundo orden para Cd y Pb</i>	70
Figura 15. <i>Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción</i>	71
Figura 16. <i>Isotermas de Langmuir para Cd(II)</i>	73
Figura 17. <i>Isotermas de Langmuir para Pb(II)</i>	74
Figura 18. <i>Isotermas de Freundlich para Cd y Pb</i>	76
Figura 19. <i>Distribución normal para datos de Cd y Pb</i>	79
Figura 20. <i>Varianza constante para Cd y Pb</i>	80
Figura 21. <i>Distribución normal para datos de Cd y Pb</i>	81
Figura 22. <i>Diagrama de Pareto para Cd y Pb</i>	85
Figura 23. <i>Interacción de dosis y tiempo para Cd y Pb</i>	86
Figura 24. <i>Gráfica de superficie 3D para Cd y Pb</i>	87

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. <i>Panel fotográfico de ejecución del trabajo de investigación.</i>	108
Anexo 2. <i>Análisis de difracción de rayos X.</i>	113
Anexo 3. <i>Análisis de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).</i>	118
Anexo 4. <i>Informe de ensayo fisicoquímico efluente mineros para Cd y Pb.</i>	122
Anexo 5. <i>Informe de ensayo fisicoquímico efluente minero – metales totales.</i>	125
Anexo 6. <i>Matriz de consistencia</i>	128
Anexo 7. <i>Cadena de custodia.</i>	129

RESUMEN

El cadmio (Cd) y el plomo (Pb) son metales pesados altamente tóxicos que ocasionan impactos negativos en los cuerpos de agua, por lo que es fundamental desarrollar tecnologías eficientes y sostenibles para la remoción de estos contaminantes. La investigación evaluó la eficiencia del óxido de grafeno (OG) en la adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael. La metodología empleada para la síntesis de óxido de grafeno fue el método de Hummers, para la eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II) se empleó óxido de grafeno como adsorbente, variando tanto la dosis del material como el tiempo de contacto, bajo un diseño factorial 3^2 . Se analizaron los mecanismos de adsorción mediante modelos cinéticos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden, así como mediante las isotermas de Freundlich y Langmuir. Los resultados de la caracterización del óxido de grafeno revelaron patrones de difracción de rayos X con picos a 10.84° y 27.76° , correspondientes a distancias interplanares de entre 0.8 y 0.9 nm. Asimismo, los espectros de FTIR confirmaron la presencia de grupos funcionales como epóxido, hidroxilo y carboxilo. En las pruebas de adsorción realizadas, se alcanzaron eficiencias de adsorción de 60.19 % para Cd (II) y 92.31 % para Pb (II), con dosis y tiempos óptimos de 30 mg y 90 minutos para Cd (II); 10 mg y 90 minutos para Pb (II). Los datos experimentales mostraron un mejor ajuste al modelo de isoterma de Freundlich ($R^2 = 0.994$ para Cd (II) y $R^2 = 0.982$ para Pb (II)), mientras que la cinética se describió adecuadamente con el modelo de pseudo-segundo orden ($R^2 = 0.998$ para Cd (II) y $R^2 = 0.995$ para Pb (II)). En conclusión, el óxido de grafeno demostró una alta eficiencia en la adsorción de cadmio y plomo en condiciones naturales.

Palabras clave: adsorción, cinética, efluente minero, isoterma, óxido de grafeno.

ABSTRACT

Cadmium (Cd) and lead (Pb) are highly toxic heavy metals that have negative impacts on water bodies, making it essential to develop efficient and sustainable technologies for removing these contaminants. The research evaluated the efficiency of graphene oxide (GO) in adsorbing Cd(II) and Pb(II) present in the mining effluent from the San Rafael Mining Unit. The methodology used for the synthesis of graphene oxide was the Hummers method. For the adsorption efficiency of Cd(II) and Pb(II), graphene oxide was used as an adsorbent, varying both the dose of the material and the contact time, under a 32 factorial design. In addition, the adsorption mechanisms were analyzed using pseudo-first and pseudo-second order kinetic models, as well as Freundlich and Langmuir isotherms. The results of the graphene oxide characterization revealed X-ray diffraction patterns with peaks at 10.84° and 27.76° , corresponding to interplanar distances between 0.8 and 0.9 nm. Likewise, FTIR spectra confirmed the presence of functional groups such as epoxide, hydroxyl, and carboxyl. In the adsorption tests performed, adsorption efficiencies of 60.19% for Cd(II) and 92.31% for Pb(II) were achieved, with optimal doses and times of 30 mg and 90 minutes for Cd(II) and 10 mg and 90 minutes for Pb(II). The experimental data showed a better fit to the Freundlich isotherm model ($R^2 = 0.994$ for Cd(II) and $R^2 = 0.982$ for Pb(II)), while the kinetics were adequately described by the pseudo-second-order model ($R^2 = 0.998$ for Cd(II) and $R^2 = 0.995$ for Pb(II)). In conclusion, graphene oxide demonstrated high efficiency in the adsorption of cadmium and lead under natural conditions.

Keywords: adsorption, kinetics, mining effluent, isotherm, graphene oxide.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en los efluentes mineros es una problemática ambiental de alcance global, especialmente en países con actividades extractivas intensivas como Perú (Correa, 2021). Elementos como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) figuran entre los metales más peligrosos debido a su alta toxicidad y potencial cancerígeno (Banihashemi et al., 2025). Su alta solubilidad en medios acuosos favorece su dispersión en el ambiente y aumenta la probabilidad de que sean absorbidos por organismos vivos (Cano & Flores, 2020). Esta propiedad facilita su acumulación en los ecosistemas y su incorporación a la cadena alimentaria, lo que representa un riesgo significativo para la salud humana (Zhang et al., 2025).

En Perú, la actividad minera ha contribuido significativamente a la contaminación de ríos y lagos con metales pesados (Paredes et al., 2024). Estudios en la región de Puno han evidenciado la presencia de estos contaminantes en aguas utilizadas para consumo humano, riego y ganadería, afectando la calidad de vida de las comunidades locales (Carrasco, 2025). Este se debe en gran parte a los pasivos ambientales de minas activas y abandonadas, donde se registraron sedimentos con altos valores en metales pesados (Brousett et al., 2021). Además, los análisis realizados en puntos cercanos han revelado concentraciones de metales que superan los límites establecidos por la normativa ambiental vigente (Alvares, 2018).

Aunque los metales como el cadmio y el plomo están presentes de forma natural en el ambiente, su liberación ha aumentado debido a actividades industriales y mineras (Saha et al., 2025). El cadmio, altamente tóxico incluso en concentraciones bajas, se libera tanto por fuentes naturales como humanas, como la minería y la refinación (Hokonya et al., 2022). Los efluentes mineros también pueden contener cianuro, proveniente de procesos como la lixiviación de metales, lo que requiere un tratamiento y control riguroso (Chegeni et al., 2021). En cuerpos de agua, tanto el cadmio como el plomo permanecen en forma de compuestos solubles, cuya persistencia y transporte dependen de variables fisicoquímicas como la acidez, la presencia de materia orgánica y el estado de oxidación-reducción del medio (Nyaba & Nomngongo, 2020).

Asimismo, en la cuenca del río Ramis los efluentes mineros representan un problema constante por su elevada carga de metales pesados, entre ellos cadmio y plomo, como consecuencia de la intensa actividad extractiva desarrollada en la zona (Alvarez, 2018). Esta se lleva a cabo a diferentes escalas: desde la minería informal en sectores como Chaquiminas y Pampa Blanca (distrito de Ananea), pasando por la pequeña minería y la minería artesanal, representadas por organizaciones como la Corporación Minera Ananea y CECOMSAP (Giraldo, 2020). Todos estos efluentes terminan vertiéndose en el sistema hídrico, incrementando la concentración de contaminantes y profundizando la problemática ambiental (Laqui, 2019). En este contexto, la gestión de efluentes constituye un serio desafío, por lo que resulta fundamental evaluar soluciones innovadoras, a través del empleo de óxido de grafeno en la captura y eliminación de metales pesados.

Ante la creciente necesidad de tratar eficazmente las aguas contaminadas por efluentes mineros, la búsqueda de métodos accesibles y eficientes ha sido prioritaria en los últimos años (Adel et al., 2022). Entre las opciones disponibles, la adsorción se ha consolidado como una de las técnicas más efectivas y económicas para la remoción de estos contaminantes (Khedr et al., 2024). Aunque se emplean tecnologías como coagulación-floculación, precipitación química, ultrafiltración, electrodiálisis, intercambio iónico y ósmosis inversa, la adsorción destaca por su simplicidad operativa y bajo costo (Alias et al., 2025). En este contexto, el óxido de grafeno (OG) se presenta como un material prometedor debido a su estructura nanolaminada y sus características fisicoquímicas, que favorecen la captura de metales pesados como el cadmio y el plomo (Yang et al., 2025). La presencia de grupos activos funcionales en su superficie, como hidroxilo, carboxilo y epoxi, facilita la interacción con los iones metálicos, mejorando su eficiencia en la remoción de contaminantes (Wu et al., 2024).

Con el fin de proponer alternativas sostenibles y efectivas, se evaluó la eficiencia de adsorción de cadmio y plomo en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael. Para ello, se sintetizó y caracterizó el óxido de grafeno mediante el método de Hummers y técnicas instrumentales. Así mismo, se determinaron los parámetros óptimos que demuestren la mejor eficiencia en la adsorción de plomo y cadmio. Además, se determinó las cinéticas e isothermas que mejor describen los mecanismos de adsorción del cadmio y plomo con el óxido de grafeno sintetizado.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Los efluentes mineros representan una problemática internacional (Li et al., 2021), ya que con frecuencia son vertidos en cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo (Salas, 2022), lo que conlleva la presencia de metales pesados como el Cd(II) y el Pb(II). El cadmio es un metal extremadamente peligroso debido a su notable capacidad de disolverse en el agua (Sabando et al., 2024), mientras que el plomo es altamente soluble, especialmente en medios ácidos (Yan et al., 2020), lo que favorece su bioacumulación en los ecosistemas acuáticos (Zeng et al., 2024).

El cadmio está asociado a diversos efectos negativos para la salud humana, entre ellos daño renal, alteraciones óseas y riesgo de cáncer (Muleta et al., 2024)). Por su parte, el plomo, clasificado como el segundo contaminante más peligroso a nivel mundial, puede provocar efectos adversos en los órganos y el sistema nervioso cuando los niveles en la sangre alcanzan o superan los 100 mg/L (Abo Markeb et al., 2023).

En Perú, el vertimiento de los efluentes provenientes de la actividad minera constituye un grave problema ambiental que aún persiste (Mantari & Pinchi, 2021). Estas actividades generan impactos significativos en el entorno natural (Ccapa, 2022), entre los cuales destaca la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) en cuerpos de agua como ríos y lagunas (Cano & Flores, 2020). Un estudio realizado por Salcedo (2022), en el centro de salud de Colquijirca, región Pasco, reveló que la concentración de plomo en la sangre de 20 niños presentó un rendimiento escolar bajo y el 30% mostró un rendimiento muy bajo.

En la región de Puno, la población expresa una preocupación constante por los efluentes mineros, debido al riesgo de contaminación de las aguas superficiales utilizadas en actividades domésticas, agrícolas y ganaderas. (Brousett Minaya et al., 2021). La actividad minera en la cuenca del río Ramis ha generado pasivos ambientales, especialmente en la zona de Ananea, donde se han identificado sedimentos con altos niveles de metales pesados en minas actualmente en operación (Lizarraga & Portillo, 2022). Así mismo, las muestras de agua recolectadas en las localidades de Capachica, Mañazo, San Antonio de Esquilache, Vilque y Coata no cumplen con los estándares

establecidos en el reglamento de calidad del agua, al presentar concentraciones elevadas de determinados contaminantes (Ferro et al., 2023).

Existen diversos métodos para la eliminación de metales pesados, entre ellos la ultrafiltración, intercambio iónico, electrodiálisis, ósmosis inversa, coagulación-floculación y precipitación química (Carolin et al., 2017); sin embargo, estos métodos no son tan eficientes como la adsorción, que se considera uno de los métodos más antiguos y efectivos para la remoción de contaminantes en aguas residuales (Adel et al., 2022). Se ha investigado una amplia variedad de materiales adsorbentes, entre los cuales destaca el óxido de grafeno, caracterizado por la presencia de grupos funcionales activos en su superficie, como hidroxilos, carboxilos y epóxidos. (Luo & Zhang, 2018). Estas características le confieren una excelente capacidad de adsorción para la eliminación de iones metálicos como Cd(II) y Pb(II) en efluentes mineros (Vilela et al., 2016). Asimismo, Kadari et al. (2023) señalan que la eficiencia de adsorción del óxido de grafeno es superior en comparación con otros materiales similares.

No obstante, la capacidad de adsorción del óxido de grafeno puede verse influenciada por distintos parámetros, entre ellos la cantidad de adsorbente empleada, el periodo de contacto y la concentración inicial de los metales. Esta variabilidad introduce incertidumbre respecto a su comportamiento en matrices reales, como los efluentes mineros, donde la presencia de múltiples iones puede interferir en los mecanismos de adsorción y reducir su eficiencia (Nikam et al., 2025). En este contexto, el problema central de la presente investigación se enfoca en evaluar la eficiencia real del óxido de grafeno para la remoción de cadmio y plomo en un entorno real.

1.2. Formulación del problema de investigación

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la eficiencia de adsorción de cadmio y plomo en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, 2024, empleando óxido de grafeno?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál será la viabilidad de sintetizar óxido de grafeno mediante el método Hummers y caracterizarlo mediante técnicas instrumentales?
- ¿Cuáles serán los parámetros óptimos que demuestren mejor eficiencia de adsorción de plomo y cadmio en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, empleando óxido de grafeno?
- ¿Cuál será el modelo cinético y la isoterma de adsorción que describen mejor los mecanismos de adsorción?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia del óxido de grafeno en la adsorción de cadmio y plomo en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- Sintetizar y caracterizar el óxido de grafeno mediante el método Hummers y técnicas instrumentales, respectivamente.
- Determinar los parámetros óptimos que demuestren mejor eficiencia en la adsorción de plomo y cadmio en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, mediante óxido de grafeno.
- Determinar las cinéticas e isotermas que mejor describan los mecanismos de adsorción del cadmio y plomo con óxido de grafeno sintetizado.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El óxido de grafeno sintetizado demostrará una eficiencia superior al 50% en la adsorción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) presentes en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, evidenciando una capacidad de adsorción significativamente mayor en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El óxido de grafeno será sintetizado mediante el método de Hummers y caracterizado a través de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), lo cual demostrará la eficiencia de este método en la síntesis de nanomateriales.
- La variación en la dosificación y tiempo de contacto del adsorbente permitirá determinar los parámetros óptimos para la adsorción eficiente de plomo y cadmio utilizando óxido de grafeno en el efluente minero de la Unidad Minera San Rafael.
- Se podrá identificar la cinética y la isoterma que describan de manera más adecuada el comportamiento de la adsorción de cadmio y plomo mediante óxido de grafeno, considerando que estos modelos permiten interpretar con mayor precisión los mecanismos del proceso de adsorción.

1.5. Justificación de la investigación

En lo ambiental, el proyecto aborda la grave problemática generada por los metales pesados presentes en los efluentes mineros, especialmente el plomo y el cadmio. Dichos metales no son biodegradables y tienden a bioacumularse en los organismos vivos, lo que representa un riesgo considerable para la salud humana y el ambiente (Nikam et al., 2025). Además, las regulaciones ambientales se han vuelto progresivamente más estrictas en los últimos años. Por lo tanto, se propone utilizar óxido de grafeno para reducir las concentraciones de plomo y cadmio en los efluentes, asegurando que cumplan con la normativa ambiental peruana. Este enfoque constituye

un aporte ambiental significativo, al ofrecer una solución sostenible para la remediación de efluentes mineros contaminados con cadmio y plomo.

En lo social, la contaminación por efluentes mineros está afectando a la salud de la cuenca del río Ramis y aguas abajo (Cano & Flores, 2021). Las comunidades locales dependen del agua de este río para beber, abastecer a sus animales y riego de cultivos y pastizales. Durante el transcurso de los años, los pobladores han expresado su descontento a través de protestas y manifestaciones, instando al Gobierno central a tomar medidas para abordar la contaminación ambiental del río Ramis (Giraldo, 2017). A pesar de estos esfuerzos, el problema ambiental persiste en años recientes. En consecuencia, la utilización de óxido de grafeno para disminuir las concentraciones de cadmio y plomo permitirá reducir los riesgos sanitarios y prevenir afecciones en la población de la cuenca del Ramis. Este resultado representa un aporte social significativo, ya que promueve el bienestar y la calidad de vida de las comunidades afectadas.

En lo tecnológico, existen varios métodos para la remediación de metales pesados en los efluentes mineros; no obstante, estas tecnologías son muy complejas y poco efectivas (Guo et al., 2024). Por otro lado, la tecnología de adsorción se destaca como uno de los métodos más empleados para remover iones como el plomo y cadmio, debido a su alto grado de eficiencia (Ajith et al., 2020). El óxido de grafeno es una tecnología eficiente en la adsorción de plomo y cadmio, debido a su naturaleza hidrofílica y presencia de grupos funcionales, como hidroxilo y carboxilo (Manzoor et al., 2024), validando su desempeño en condiciones reales de un efluente minero.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Lima (2021), analizó la capacidad del óxido de grafeno (OG) como material adsorbente en la eliminación de iones Cd(II) y Pb(II) presentes en soluciones acuosas. El OG se caracterizó mediante FTIR, espectroscopía Raman, MEV y análisis de punto de carga cero (PCZ), confirmando su oxidación y exfoliación. El ensayo incluyó cantidades de adsorbente entre 0.5 y 2 g, tiempos de contacto de 30 a 180 minutos, así como concentraciones iniciales de metales en un rango de 10 a 100 mg/L. Se aplicó modelos isotérmicos (Langmuir, Freundlich y Sips) y cinéticos (pseudo-primero orden, pseudo-segundo orden y Weber-Morris). Freundlich ajustó mejor los datos para Pb(II) ($R^2=0.96$) y Cd(II) ($R^2=0.98$). El OG mantuvo eficiencias mayores al 90% tras cinco ciclos de adsorción-desorción con NaOH.

Bhardwaj et al. (2024), en su estudio abordó la síntesis y fabricación de óxido de grafeno a partir de cáscara de coco y funcionalizados con tiol para la eliminación de Cd y Pb de un medio acuoso. El OG y OG-MBT sintetizados se caracterizó empleando HR-TEM, XPS, EDX, FTIR, FE-SEM, TGA, AAS y XRD; la cinética de adsorción siguió el modelo de pseudo-segundo orden con coeficientes de regresión cercanos a 1 (0.99) tanto para Pb(II) como para Cd(II). El OG-MBT funcionalizado con tiol mostró la capacidad de adsorción de OG-MBT para Pb(II) y Cd(II) con un valor de 116.959 mg/g a pH 6 y 112.99 mg/g a pH 7, respectivamente. Las capacidades máximas de adsorción fueron 52 % para Pb(II) y 51 % para Cd(II) en los primeros 10 min.

Rahman & Raheem (2024), fabricó óxido de grafeno magnético/celulosa (CN/IOG/Cel) modificado con β -ciclodextrina para la eliminación de iones Cd(II). El material se caracterizó mediante diversas técnicas analíticas como FTIR, XRD, TGA/DTA, SEM, TEM y XPS. Los factores controlables se optimizaron mediante el diseño de Taguchi y los valores óptimos fueron: dosis de adsorbente de 16 mg, tiempo de equilibrio de 40 min y concentración inicial de iones Cd(II) de 40 mg/L. El material muestra una alta capacidad de adsorción (303.98 mg/g). El buen

ajuste del modelo de Langmuir a los datos de adsorción ($R^2 = 0.9918 - 0.9936$) reveló la cobertura de la monocapa en la superficie del adsorbente.

Guo et al. (2021), fabricó y caracterizó un adsorbente eficiente basado en óxido de grafeno magnético de pocas capas (FLMOG) para eliminar Cd(II) en soluciones acuosas. Los resultados muestran que los dos componentes óxido de grafeno (OG) y Fe₃O₄ de FLMOG se promueven mutuamente, lo que permite a FLMOG superar a OG o Fe₃O₄. Específicamente, FLMOG adsorbe Cd(II) con cantidades de adsorción de 401.14 mg·g⁻¹ en 5 min. Además, FLMOG se puede recuperar fácilmente mediante separación magnética utilizando un imán de mano. Las adsorciones son espontáneas, endotérmicas y de entropía creciente, que son las mejor descritas por el modelo de Freundlich y de pseudo-segundo orden.

Bao et al. (2020), presentó un novedoso enfoque para la síntesis de óxido de grafeno magnético (OG magnético) con el fin de eliminar iones de metales pesados del agua. Se utilizó *n*-propiltrimetoxisilano (NPTS) como agente de acoplamiento cruzado que permitió unir Fe₃O₄/SiO₂ con óxido de grafeno, obteniendo un material con propiedades magnéticas y alta eficiencia de adsorción. El OG magnético mostró un excelente rendimiento para la eliminación de Cd(II) y Pb(II), alcanzando capacidades máximas de adsorción de 128.2 mg/g y 385.1 mg/g, respectivamente. Los resultados indicaron que la adsorción de ambos metales se ajustó bien al modelo de Langmuir y al modelo de pseudo-segundo orden.

Lin et al. (2023), sintetizó óxido de grafeno reducido biofuncional (B-rOG) utilizando *Lysinibacillus sphaericus*, logrando eliminar el 99.2 % de Cd(II) a 10.0 mg/L. Las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) generadas durante la reducción microbiana mejoraron notablemente la capacidad de adsorción. En comparación, otros estudios solo alcanzaron 34.2 % y 50.9 % de remoción con óxido de grafeno comercial y reducido con extracto de té verde, respectivamente. La adsorción de Cd(II) por B-rOG se confirmó mediante técnicas de caracterización, ajustándose al modelo de Langmuir y al modelo cinético de pseudo-segundo orden. En aguas residuales, el B-rOG alcanzó una eficiencia del 65.9 %, mostrando potencial ambiental.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Guevara (2020), realizó un estudio para evaluar la eficacia del óxido de grafeno (OG) en la remoción de arsénico del agua del río Constanca. Utilizando el método de Hummers mejorado para sintetizar OG, se experimentó con dosis de 0.4 g, 0.5 g y 0.6 g y periodos de tiempo de 1, 2 y 3 horas. Los resultados mostraron una reducción significativa de arsénico en el agua, de 0.25 mg/l a 0.19 mg/l, lo que representa una disminución del 70% en la concentración del metal. La adsorción de arsénico se verificó mediante pruebas de absorción atómica, concluyendo que el OG es un método efectivo y sencillo para tratar efluentes contaminados con metales.

Rojas & Sánchez (2020), abordaron el desafío de remover arsénico del agua. En su estudio, utilizaron bentonita combinada con óxido de grafeno (OG) como material adsorbente. Se experimentó con tres composiciones diferentes de bentonita-OG (2%, 4%, 6% de OG), y se caracterizaron utilizando Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). La investigación evaluó la capacidad de adsorción en muestras de agua con concentraciones iniciales de arsénico de 0.04, 0.1 y 0.16 ppm. Los resultados mostraron que el material compuesto logró remover más del 95% de arsénico en todas las composiciones, demostrando su eficacia significativa en la purificación de agua contaminada.

Delgado & Mendoza (2020), realizaron un estudio sobre la eficiencia del óxido de grafeno (OG) en la remoción de metales pesados, específicamente plomo (Pb) y cobre (Cu), en aguas del río Huarmey. El OG se sintetizó mediante el método de Hummers y caracterizado por difracción de rayos X, lo que permitió confirmar su estructura. Se evaluó diferentes tiempos de contacto (7, 14 y 21 días) y dosis de aplicación (0.5%, 1% y 1.5%) para determinar su efectividad. Los mejores resultados se obtuvieron a los 21 días con una dosis de 0.5%, alcanzando una remoción del 99.78% para Pb y 99.88% para Cu, lo que demostró la alta eficiencia del OG como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas.

Culque & Leno (2021), desarrollaron una investigación sobre la reducción de cobre (Cu) y grasas en aguas de la cuenca media del río Rímac, utilizaron un filtro de grafeno como material adsorbente. El grafeno reducido se preparó en tres dosis (4 g, 8 g y 12 g), mezclado con ácido acético, agua desionizada y quitosano, siendo sometido a sonicación por 4 horas a 60 °C. Posteriormente, se utilizó nitrógeno líquido y glutaraldehído para la formación de la esponja de

grafeno. Se evaluó parámetros fisicoquímicos como pH, turbidez, DQO, temperatura y oxígeno disuelto. Los resultados mostraron una reducción del Cu de 3313.83 mg/L a 1901.56 mg/L y de grasas de 4.51 mg/L a <0.25 mg/L, demostrando alta eficiencia del material.

Zevallos (2019), abordó el problema de la gestión de residuos en Perú, enfocándose en la eficiencia de un nanofiltro de grafeno con hierro en la reducción de contaminantes en lixiviados del relleno sanitario de Zapallal. El estudio aplicó un enfoque cuantitativo, utilizando 20 litros de lixiviados como muestra. Se evaluaron cinco dosis diferentes de óxido de grafeno con nanopartículas de hierro (Fe), analizando las variaciones en propiedades fisicoquímicas y metálicas. Los resultados mostraron que la dosis óptima de 3 g de óxido de grafeno logró reducir significativamente los niveles de plomo, calcio, aceites y grasas, evidenciando la alta eficacia del nanofiltro en el tratamiento de lixiviados.

2.1.3. Antecedentes locales

Condori (2024), investigó la remoción del ion zinc presente en aguas residuales de la ciudad de Puno mediante el proceso de adsorción utilizando carbón activado obtenido del eucalipto. Se recolectaron seis muestras de tres estaciones de muestreo y se procesaron mediante agitación magnética a distintas velocidades y rangos de pH. El estudio logró reducir la concentración inicial de zinc, que excedía los límites máximos permisibles, hasta 0.04032 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 88.51 %. Los resultados demostraron que el carbón activado de eucalipto posee una alta capacidad adsorbente para la eliminación de iones metálicos, específicamente zinc, en aguas residuales.

Apaza (2018), desarrolló una investigación sobre la remoción de metales pesados en aguas residuales vertidas en la laguna de Espinar, ubicada en la región Puno. El estudio propuso el uso de carbón activado elaborado a partir de hueso de alpaca, el cual fue previamente tratado con ácido fosfórico y posteriormente carbonizado a una temperatura de 800 °C. Se evaluó su capacidad de adsorción frente al plomo (Pb) y cadmio (Cd), obteniéndose reducciones significativas del 84 % y 87 %, respectivamente. Los resultados indicaron que el proceso de adsorción se ajustó adecuadamente al modelo cinético de Elovich, demostrando la eficiencia del material desarrollado como alternativa económica y viable para el tratamiento de aguas contaminadas.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Contaminación del agua

Triveño (2016) describe la contaminación hídrica consiste en cambios en las condiciones naturales del agua, ya sean de tipo físico, químico o microbiológico, que limitan su aprovechamiento original. Esta modificación es provocada por la presencia de contaminantes principales como los desechos industriales, domésticos, comerciales, hospitalarios y aguas residuales.

En las zonas de explotación minera, el agua se utiliza de forma intensiva para la extracción y procesamiento de minerales, lo cual genera efluentes ricos en contaminantes. Rojas et al. (2021) destacan la intensificación de la presencia de metales pesados en el medio ambiente debido a los efluentes mineros. Por su parte, Prasad et al. (2021), subrayan la urgencia de implementar controles rigurosos y procesos de remediación efectivos para mitigar estos impactos.

Finalmente, la calidad del agua es fundamental para mantener el equilibrio ecológico, proteger la salud humana y preservar los ecosistemas acuáticos. Reconociendo esta importancia, los investigadores han mejorado constantemente las técnicas para evaluar este recurso vital, como lo indican Teh & Pauly (2018), quienes destacan los avances en los métodos de análisis de la calidad del agua.

2.2.2. Efluentes mineros

Los efluentes mineros son subproductos líquidos generados durante la extracción y procesamiento de minerales. Estas aguas residuales suelen contener altas concentraciones de metales pesados, como cadmio y plomo, debido a la lixiviación de minerales y los procesos de beneficio minero (Acheampong & Lens, 2014). La gestión inadecuada de estos efluentes puede causar impactos ambientales graves, como la contaminación de cuerpos de agua y la afectación de la biodiversidad acuática (Coudert et al., 2020). La liberación de efluentes mineros sin un tratamiento adecuado puede llevar a la acumulación de metales tóxicos en los sedimentos y en la cadena trófica, comprometiendo la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos (Vendrell et al., 2024). Esta preocupación ha impulsado la búsqueda de tecnologías más eficientes para el tratamiento de efluentes mineros (Moreira et al., 2021).

2.2.3. Calidad del agua

El concepto de calidad de agua se refiere a los parámetros cualitativos o cuantitativos que definen las condiciones óptimas del agua y su valor de uso (Díaz, 2021). Según la norma OS. 010 (MVCS 2006), la calidad de agua abarca las condiciones físicas, químicas y bacteriológicas que la hacen segura para el consumo humano, sin representar ningún riesgo para la salud (Peña, 2019).

Para garantizar que el agua sea apta tanto para el consumo humano como para la vida acuática, es fundamental controlar diversos parámetros de calidad (Gholizadeh et al., 2016). Estos parámetros se dividen principalmente en tres categorías: físicos, químicos y biológicos. Los parámetros físicos incluyen factores como la temperatura, turbidez, color, sabor, olor, conductividad eléctrica, salinidad y sólidos disueltos totales, que afectan directamente las características sensoriales del agua (Sakthivadivel et al., 2020).

La presencia de contaminantes, patógenos y otros microorganismos, así como la composición química del agua, puede determinarse evaluando estos parámetros (Soeprbowati et al., 2021). Comprender estos indicadores es crucial para implementar tratamientos eficaces y mejorar la calidad del agua, lo que protege tanto la salud pública como los ecosistemas acuáticos (Chundu et al., 2024).

2.2.4. Metales pesados

Los metales son componentes naturales de la corteza terrestre, aunque también existen metales de origen antropogénico debido a actividades industriales, agrícolas, mineras y ganaderas (Ouyang et al., 2006). Según Abidin et al. (2025), estos elementos se definen por tener densidades superiores a 5 g/cm³ y un número atómico mayor a 20. Asimismo, su ingestión puede resultar en efectos tóxicos.

Algunos metales, como el cobre, manganeso y zinc, son oligoelementos esenciales para las funciones bioquímicas y fisiológicas de los organismos vivos, siendo fundamentales en el metabolismo (Briffa et al., 2020). En contraste, los metales como el cadmio, plomo y mercurio son no esenciales y son conocidos por causar diversos daños en organismos incluso en bajas concentraciones (ATSDR, 2001).

a. Cadmio

El cadmio es un metal presente en la corteza terrestre y suele encontrarse vinculado a minerales de zinc, plomo y cobre. Este metal, blando y de color plateado. Tiene compuestos como el cloruro de cadmio y el sulfato de cadmio, que son solubles en agua (Fan et al., 2020).

La actividad humana contribuye significativamente a la liberación de cadmio al medio ambiente, a través de procesos como la extracción y refinación de metales no ferrosos, la producción y aplicación de fertilizantes fosfatados, la combustión de combustibles fósiles y el manejo de desechos. Una vez liberado, el cadmio se acumula en organismos acuáticos y en cultivos agrícolas, lo que puede afectar a la biodiversidad y la salud humana (ATSDR, 2001).

Este metal persiste en los ecosistemas acuáticos, donde tiende a acumularse en los sedimentos. Además, la USEPA clasifica al cadmio como un probable carcinógeno humano (Grupo B1) desde 2006. Su toxicidad fue especialmente preocupante durante la década de 1960, cuando se utilizó en la industria agrícola. Hoy se reconoce que el cadmio representa una amenaza continua, proveniente tanto de fuentes antropogénicas como naturales, para la salud y el medio ambiente (Zhao et al., 2022).

A nivel orgánico, el cadmio en su forma de ion (Cd^{2+}) es altamente peligroso. Su infiltración en órganos vitales como el hígado, los riñones y el páncreas puede causar daños graves, como disfunción renal y pulmonar (Duan et al., 2025). Además, una exposición prolongada al Cd^{2+} puede provocar una pérdida de calcio en los huesos, lo que lleva a condiciones como osteomalacia y dolor óseo, lo que resalta la necesidad de monitorear y limitar la exposición a este metal pesado (Pu et al., 2024).

b. Plomo

El plomo, un metal pesado ampliamente reconocido por su prevalencia como contaminante ambiental, es liberado predominantemente por actividades industriales y mineras (Rocha et al., 2018). Se encuentra en formas orgánicas, como el estearato de plomo y el acetato de plomo, así como en formas inorgánicas, como el óxido de plomo rojo y el dióxido de plomo (Carrion, 2019). Aunque raramente se presenta en su forma natural, el plomo suele encontrarse como sulfuros en la naturaleza (Kou et al., 2023).

Una vez absorbido por el cuerpo humano, el ion plomo (Pb^{2+}) se deposita en varios órganos, como la sangre, piel, huesos, riñones, hígado y cerebro, ejerciendo efectos tóxicos significativos (Pu et al., 2024). Además de su acumulación, el Pb^{2+} interfiere con una variedad de enzimas, afectando adversamente el sistema nervioso central, el sistema hematopoyético y el sistema reproductivo (Duan et al., 2025).

Las actividades mineras, metalúrgicas, los procesos industriales y el empleo de pinturas o combustibles con plomo constituyen las principales fuentes de contaminación por este metal. También puede contaminar el agua potable si se transporta a través de tuberías de plomo o conexiones soldadas con este material. Actualmente, una gran parte del plomo que se comercializa globalmente se obtiene mediante el reciclaje, lo que refleja un esfuerzo por mitigar su impacto ambiental (Kou et al., 2025).

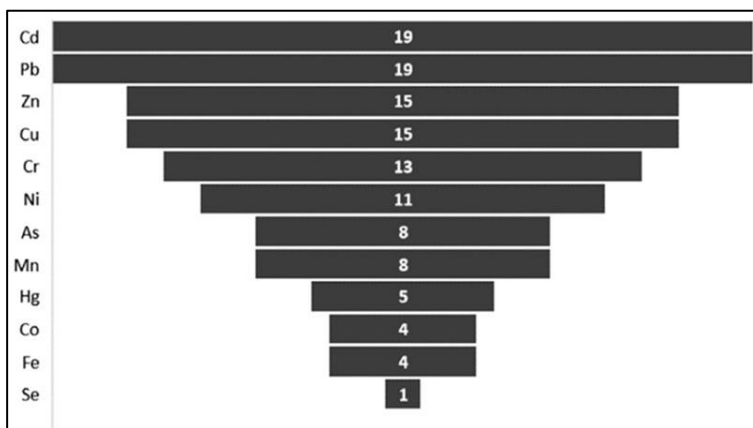
2.2.5. Toxicidad de elementos metálicos

La toxicidad se define como la capacidad de un compuesto químico o físico para causar daños a un ser vivo. La severidad de una lesión producida por un tóxico está generalmente relacionada con las características físico-químicas del compuesto, la vía de entrada en el organismo, la cantidad absorbida (dosis) y el tiempo que este permanece en el organismo (Kou et al., 2023).

Los metales pesados representan un serio riesgo de contaminación ambiental, ya que no desempeñan funciones biológicas en los organismos vegetales ni animales. Además, tienden a acumularse en los tejidos y a biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica. En este marco, se aborda la teoría de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP), los cuales establecen los niveles aceptables de contaminantes en distintas matrices del entorno. Es importante señalar que el ECA regula metales como arsénico, plomo, mercurio, cadmio, bario y cromo debido a su alta toxicidad (Yaulimango & Tarazona, 2018). Estos contaminantes afectan significativamente varios componentes del medio ambiente, como el suelo (figura 1).

Figura 1.

Numero de estudio realizados en suelo



Nota: La figura muestra el Número de estudios según metal pesado analizado en suelos de cultivo para hortalizas, tomada de Anaya et al. (2022).

2.2.6. Tratamiento de efluentes mineros

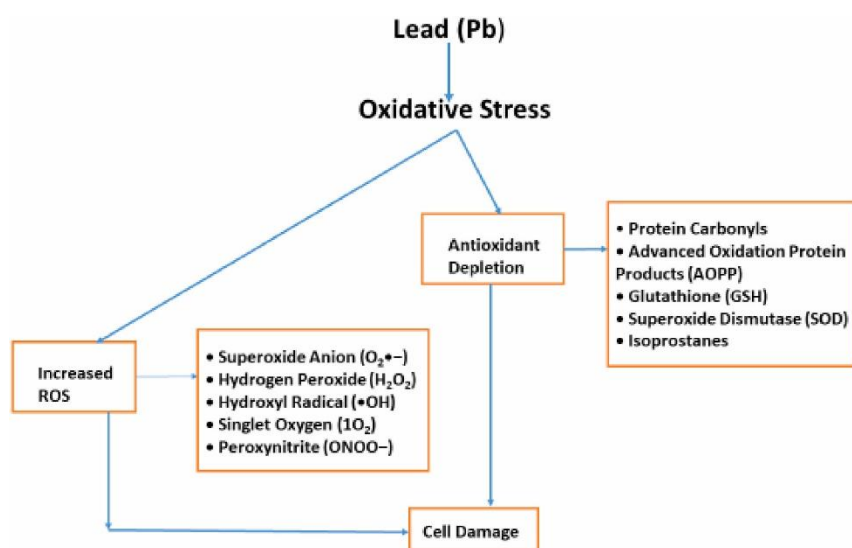
Los efluentes provenientes de la actividad minera, especialmente aquellos generados por el drenaje ácido, se caracterizan por su bajo pH y por contener elevadas concentraciones de metales pesados y sulfatos, representando un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Este tipo de aguas se genera principalmente por la oxidación de sulfuros metálicos, como la pirita, en contacto con el oxígeno, el agua y la acción de microorganismos, produciendo corrientes con elevada acidez y fuerte capacidad corrosiva (Oladimeji et al., 2024). Para mitigar sus efectos se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento, que se clasifican en pasivas, activas e integradas. Los sistemas pasivos, como humedales artificiales o drenes anóxicos de caliza, recurren a procesos naturales que permiten neutralizar la acidez y retener metales con costos relativamente bajos, aunque su efectividad disminuye frente a caudales elevados o condiciones climáticas adversas (Shrestha et al., 2021).

En contraste, los tratamientos activos se basan en la aplicación de reactivos químicos y equipos especializados, entre los que destacan la neutralización con cal, la coagulación-floculación, la electrocoagulación y las tecnologías de membrana. Estos métodos ofrecen altos niveles de eficiencia en la remoción de contaminantes, aunque implican mayores gastos operativos y la generación de residuos adicionales. En los últimos años se han impulsado alternativas innovadoras,

como el uso de materiales adsorbentes y sistemas de separación avanzada, que además de tratar las aguas permiten recuperar recursos, contribuyendo así a un enfoque de economía circular (Sharma et al., 2022). En este escenario, los sistemas integrados, que combinan procesos pasivos y activos, se consolidan como una opción viable para optimizar la eficiencia del tratamiento, asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental y reducir los impactos negativos de la minería sobre los cuerpos de agua receptores (Fan et al., 2020).

Figura 2.

Mecanismo del efecto tóxico de la exposición al plomo



Nota: La figura muestra los efectos a la exposición de plomo, tomada de Oladimeji et al. (2024).

2.2.7. Tecnologías de remoción

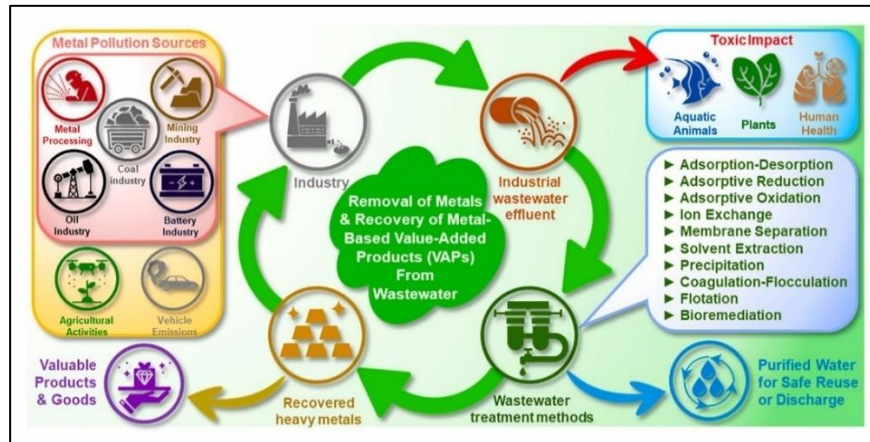
Los contaminantes presentes en los efluentes se dividen en compuestos orgánicos e inorgánicos; no obstante, su tratamiento no puede abordarse de la misma manera. Mientras que los contaminantes orgánicos cuentan con tratamientos físicos, biológicos y químicos bien establecidos, estos métodos no son los más adecuados para tratar contaminantes inorgánicos como los metales pesados. Esto se debe a que los metales pesados presentan características adicionales, como la solubilidad, sus características de óxido-reducción y su capacidad para formar complejos, lo que hace que su degradación represente una mayor preocupación (Liu et al., 2025)

Por ello se han desarrollado técnicas especialmente para el tratamiento y remoción de estos contaminantes inorgánicos del medio acuoso. Las técnicas convencionales (figura 3) incluyen

filtración por membrana, intercambio iónico, adsorción, precipitación química, electrocoagulación, coagulación-floculación, entre otras. Además, existen técnicas no convencionales, que se refieren a procesos innovadores para la remoción de metales pesados en cuerpos de agua (Xiong et al., 2025).

Figura 3.

Diagrama de flujo entre la contaminación y las tecnologías de remoción.



Nota: La figura muestra el flujo entre la contaminación ambiental y las tecnologías de remoción, tomada de Abidli et al. (2022).

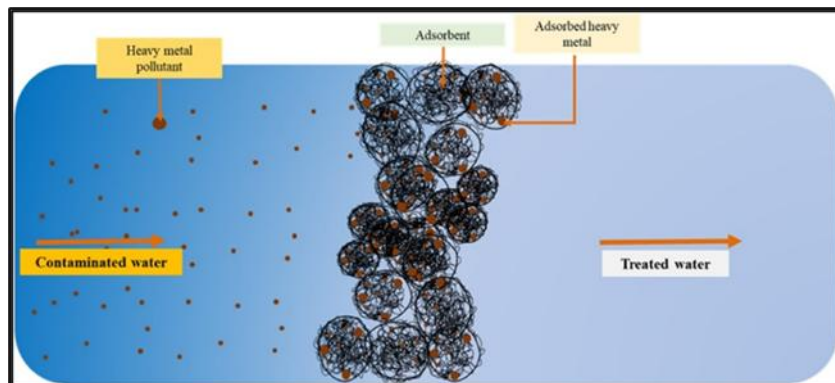
2.2.8. Adsorción

La adsorción es un método eficaz, donde una superficie sólida se expone a un gas o líquido. Este fenómeno superficial es un proceso de transferencia de masa, donde una sustancia pasa de la fase líquida a la superficie del sólido (Khedr et al., 2024). Según Rezvani et al. (2025), la adsorción

constituye un método eficiente para la eliminación de diversos tipos de contaminantes, destacando por su elevada capacidad y velocidad en el proceso de adsorción. Además, dependiendo del tipo de adsorbente utilizado, puede mostrar selectividad, aunque su rendimiento también se verá influenciado por su estructura física (figura 4).

Figura 4.

Proceso de adsorción de contaminantes metálicos.



Nota: La figura muestra el mecanismo de adsorción de iones metálicos en una solución acuosa, tomada de Oladimeji et al. (2024).

La remoción de metales pesados en las aguas residuales se lleva a cabo a través de la adsorción sobre la superficie de materiales adsorbentes, proceso que puede originarse por interacciones físicas como las fuerzas de Van der Waals o por mecanismos químicos que involucran la formación de enlaces covalentes. Los adsorbentes seleccionados deben contar con paredes porosas que poseen grupos funcionales específicos capaces de adsorber metales pesados de forma selectiva, además de tener una elevada capacidad de adsorción y la posibilidad de regenerarse y reutilizarse (Fei & Hu, 2021).

2.2.9. Mecanismos de adsorción

El óxido de grafeno (OG) adsorbe contaminantes principalmente a través de adsorción física (fuerzas de Van der Waals) y adsorción química (enlaces covalentes). La adsorción física es reversible, donde las moléculas se adhieren débilmente a la superficie del OG (Zhang et al., 2019). En la adsorción química, los grupos funcionales oxigenados del OG forman enlaces fuertes con metales pesados, como plomo y cadmio, proporcionando una adsorción eficiente. Además, las interacciones π - π y la coordinación con iones metálicos aumentan la capacidad del OG para adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos (Chen & Chen, 2019).

2.2.10. Cinéticas de adsorción

El estudio de la cinética de adsorción resulta esencial para comprender el mecanismo por el cual un adsorbato, como los metales pesados, se transfiere desde la fase líquida hacia la superficie del material adsorbente. El estudio de estos modelos permite no solo evaluar la eficiencia del proceso, sino también predecir su comportamiento a escala industrial (Kale et al., 2021). Existen diversos modelos cinéticos, entre los cuales destacan el de pseudo-primer orden y el de pseudo-segundo orden, ambos ampliamente utilizados para describir procesos de adsorción en medios acuosos (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

a) Modelo de pseudo-primer orden

El modelo cinético de pseudo-primer orden fue propuesto por Lagergren y se basa en la suposición de que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia entre la cantidad de adsorbato en equilibrio y la adsorbida en un tiempo determinado (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Este modelo es comúnmente aplicado cuando la etapa limitante del proceso de adsorción es la difusión externa del adsorbato hacia la superficie del adsorbente (Guo et al., 2020). Su ecuación lineal se expresa como:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

donde q_e y q_t son las cantidades adsorbidas en equilibrio en el tiempo t , respectivamente; k_1 es la constante de velocidad de pseudo-primer orden. Aunque este modelo puede ajustarse adecuadamente en etapas iniciales del proceso, no siempre describe bien la cinética total cuando el tiempo es prolongado (Guo et al., 2020).

b) Modelo de pseudo-segundo orden

El modelo cinético de pseudo-segundo orden plantea que la adsorción se rige por un mecanismo de naturaleza química (quimiosorción), donde la velocidad del proceso depende de la interacción entre los sitios activos del adsorbente y las moléculas del adsorbato. Su expresión matemática es:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

Donde k_2 es la constante de velocidad del modelo de pseudo-segundo orden. Este modelo suele ajustarse mejor que el de primer orden, especialmente en procesos donde la adsorción implica transferencia de electrones o enlaces químicos específicos. Además, proporciona una mejor estimación del equilibrio, siendo ampliamente utilizado en la remoción de metales pesados como Pb(II) y Cd(II) con materiales avanzados como óxido de grafeno (Kale et al., 2021).

2.2.11. Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción representa la relación entre la cantidad de adsorbato retenida en la superficie de un adsorbente y su concentración en la fase líquida o gaseosa, manteniendo constante la temperatura. Estos modelos son cruciales para comprender los procesos de adsorción y para el diseño de tecnologías como el tratamiento de aguas, purificación de gases y almacenamiento de energía; las isotermas de adsorción son fundamentales para evaluar la capacidad de adsorción de diferentes materiales y prever cómo se comportan bajo condiciones de equilibrio (Bıyıkoğlu, 2025). En la misma línea, Hadianono et al. (2025) destacan la relevancia de escoger el modelo adecuado, ya sea Langmuir o Freundlich, de acuerdo con las características tanto del adsorbente como del adsorbato, y enfatizan que tales modelos permiten una interpretación detallada de los procesos de adsorción. Asimismo, Suwannahong et al. (2024) afirman que el uso de modelos isotérmicos puede mejorar la eficiencia de los procesos industriales, favoreciendo un diseño más optimizado de aplicaciones a gran escala para la adsorción.

a) Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir describe el proceso en el cual las moléculas se adhieren a una superficie sólida ocupando sitios específicos, sin que haya interacción entre ellas. Este modelo postula que los sitios de adsorción son uniformes y que cada uno puede ser ocupado solo por una molécula, sin que exista una ocupación múltiple en un mismo sitio. Además, supone que las moléculas adsorbidas no interactúan entre sí (Vigdorowitsch et al., 2021).

Por otro lado, Murphy et al. (2023) indican que este modelo es adecuado para describir la adsorción cuando los sitios de adsorción no presentan interacciones entre sí, ofreciendo una manera efectiva de estudiar los procesos de adsorción en sistemas ideales.

La ecuación de Langmuir se expresa como:

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Donde:

q_e representa la cantidad de adsorbato absorbida en equilibrio (mg/g).

q_{max} es la capacidad máxima de adsorción (mg/g).

K_L es la constante de Langmuir (L/mg), la cual refleja la afinidad existente entre el adsorbente y el adsorbato.

C_e indica la concentración del adsorbato en la solución cuando se alcanza el equilibrio (mg/L).

b) Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que se utiliza para describir la adsorción en superficies que presentan heterogeneidad, es decir, donde los sitios de adsorción tienen diferentes niveles de energía. Este modelo no establece una capacidad máxima de adsorción, lo que lo hace más adecuado para describir superficies con una distribución diversa de sitios activos. De manera similar, este modelo se emplea para estudiar materiales que tienen propiedades complejas y superficies microporosas (Yaffar et al., 2025).

La fórmula que describe la isoterma de Freundlich es:

$$q = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

Donde:

q_e representa la cantidad de adsorbato absorbida en equilibrio (mg/g).

K_F es la constante de Freundlich (L/mg), la cual expresa la capacidad de adsorción del material.

n corresponde a un parámetro que describe la intensidad o favorabilidad del proceso de adsorción.

C_e representa la concentración del adsorbato en equilibrio dentro de la solución (mg/L).

Así mismo, Suwannahong et al. (2024) explican que la isoterma de Freundlich es particularmente útil para describir la adsorción en superficies heterogéneas, especialmente cuando los sitios de

adsorción no se saturan completamente. Este modelo es ideal cuando los sitios de adsorción presentan diferentes energías, lo que permite una representación más precisa de los procesos de adsorción en materiales con superficies complejas.

2.2.12. Tipos de adsorbentes

Un adsorbente es un material sólido capaz de capturar componentes presentes en corrientes líquidas o gaseosas en su superficie. Estos materiales, tanto naturales como sintéticos, suelen tener una estructura amorfa y microcristalina. Entre los adsorbentes más comúnmente utilizados a gran escala se encuentran el carbón activado, nanotubos de carbono, grafeno y varias arcillas. Se han desarrollado diversos adsorbentes para adaptarse a diferentes procesos de separación (W. Huang et al., 2023).

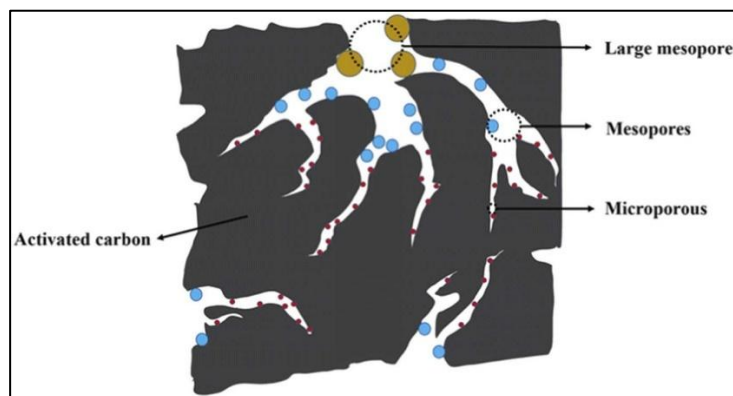
a. Carbón activado

El carbón activado, empleado de forma habitual como adsorbente, se caracteriza por presentarse en partículas porosas y de estructura suelta, con una elevada superficie específica y un gran volumen de poros (figura 5). Destaca por su alta capacidad de adsorción de compuestos orgánicos volátiles (COV), siendo especialmente efectivo para la eliminación de COV de moléculas grandes como el benceno (Jia et al., 2024).

El carbón activado, que es el adsorbente más común en la industria, se produce principalmente a partir de carbón mineral, un recurso no renovable. Esto no solo contribuye al aumento de su precio, sino que también plantea problemas de sostenibilidad. En contraste, los materiales lignocelulósicos, como los residuos agrícolas, representan una alternativa renovable, abundante y de bajo costo para la fabricación de carbón activado (Siragi et al., 2025).

Figura 5.

Estructura del carbón activado.



Nota: La figura muestra la estructura del carbón activado, usado como material adsorbente, tomada de Karungamye (2024).

b. Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono son estructuras tubulares constituidas por láminas de grafito enrolladas en forma cilíndrica. Se dividen en dos categorías: los nanotubos de pared simple (SWCNT), compuestos por una sola capa de grafito, y los nanotubos de paredes múltiples (MWCNT), conformados por varias capas concéntricas de este material. Gracias a sus sobresalientes características mecánicas y magnéticas, así como a su notable estabilidad química y térmica, se destacan como uno de los adsorbentes más eficaces en el tratamiento de aguas residuales (Aliana et al., 2025).

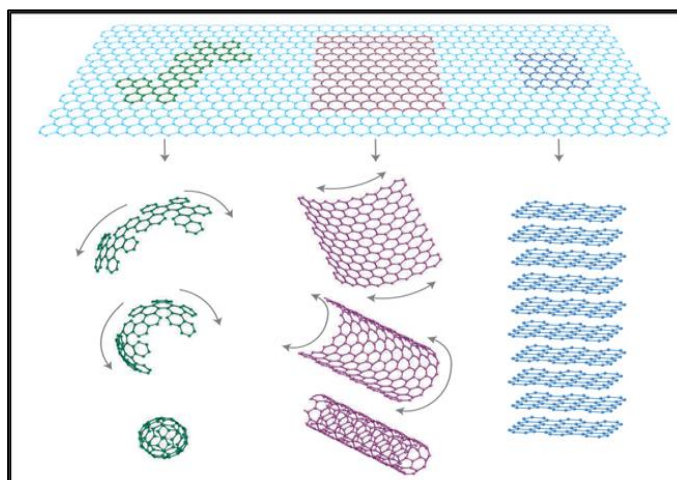
c. Grafeno

El grafeno es la unidad básica estructural de algunas alotropías del carbono (figura 6), entre las que se incluyen el grafito, nanotubos de carbono (CNT) y fullerenos. La estructura del grafeno es un material bidimensional de un átomo de espesor, carbono hibridado sp^2 en una estructura hexagonal de panal de abeja (Smith et al., 2019). Teóricamente, su superficie específica es enorme ($2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$), teniendo una buena transmitancia óptica ($\sim 97.7 \%$), movilidad intrínseca ($200,000 \text{ cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$) (Kashani et al., 2021), módulo de Young ($\sim 1,0 \text{ Tpa}$) (Zuo et al., 2022) y conductividad térmica ($\sim 5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) (Yang et al., 2020). Además, que el grafeno prístino es hidrófobo; por tanto, su síntesis es una tarea difícil. También, es poco soluble en agua y forma fácilmente aglomerados irreversibles para crear grafeno en condiciones acuosas. Esto supone una gran

dificultad, por lo que el OG (óxido de grafeno) y el OGr (óxido de grafeno reducido) se están explorando en diversas aplicaciones (Cao et al., 2019).

Figura 6.

Estructuras alótropas a partir de grafeno.



Nota: La figura muestra las estructuras alótropas del carbono de izquierda a derecha : Fullerenos, CNT y grafito, tomada de Wang et al. (2022)

En consecuencia, se sintetizan derivados del grafeno que conservan algunas de las propiedades de este y además superan ciertas deficiencias, por ejemplo, la de los volúmenes de producción (Wang et al., 2022).

2.2.13. Óxido de grafeno (OG)

El óxido de grafeno posee una red de carbono con disposición hexagonal, análoga a la estructura característica del grafeno. Además, el OG puede decorarse con diversos grupos funcionales como alcoxi, epóxido, fenólico, carbonilo, hidroxilo, ácido carboxílico y otros grupos funcionales que contienen oxígeno. La naturaleza polar de los grupos carboxílicos actúa como una poderosa fuerza de repulsión electrostática, superando así la desventaja del apilamiento observada en el caso del grafeno (He et al., 2020). En su superficie y bordes, el OG está adornado covalentemente con oxígeno, conjugación de electrones con enlace π y tiene número de anillos aromáticos fusionados. El óxido de grafeno es una forma altamente oxidada de grafeno con dominios de carbono sp^2

(aromático) y sp^3 (alifático), lo que amplía aún más la gama de interacciones posibles con su superficie. Puede prepararse fácilmente mediante un enfoque descendente (Z. Liu et al., 2018).

Hasta ahora, se han descrito principalmente tres métodos para sintetizar OG a partir de grafito: Brodie, Staudenmaier y Hummers, que han utilizado diferentes oxidantes, como se indica en la Tabla 1. Actualmente, el OG se produce a partir de grafito utilizando el método de Hummers (el grafito se trata con una solución de H_2SO_4 concentrado y $KMnO_4$). Además, el óxido de grafito producido puede convertirse en OG mediante exfoliación mecánica o térmica (Huang et al., 2020).

Tabla 1.

Diversos métodos de síntesis del óxido de grafeno.

Método	Oxidante	Método comunicado
Método Brodie	$KClO_3$, HNO_3	12 de mayo de 1859
Método Staudenmaier	$KClO_3$ o $NaClO_3$, HNO_3 , H_2SO_4	23 de mayo de 1898
Método Hummers	$KMnO_4$, H_2SO_4 , $NaNO_3$	20 de marzo de 1958
Método Hummers modificado	$KMnO_4$, H_2SO_4 , $NaNO_3$	22 de octubre de 2008
Método Hummers mejorado	$KMnO_4$, H_2SO_4 , H_3PO_4	22 de julio de 2010

Nota: Esta tabla muestra los métodos de síntesis de óxido de grafeno, según lo indicado por Huang et al. (2020).

Así, la introducción de grupos que contienen oxígeno proporciona al óxido de grafeno (OG) propiedades y capacidades significativas sobre el grafeno, como una mejor solubilidad, dispersión y la formación de nanocompuestos para diversas aplicaciones (Smith et al., 2019). El óxido de grafeno es significativamente más fácil de sintetizar, funcionalizar y ensamblar químicamente que el grafeno, manteniendo las propiedades superiores de estructura bidimensional, plano aromático y enorme área superficial (Yang et al., 2015).

2.2.14. Aplicación del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de metales pesados (Pb y Cd)

El óxido de grafeno (OG) presenta una capacidad de adsorción sobresaliente hacia iones de metales pesados, debido a sus notables características físicas, como su gran área superficial, alto módulo de Young y excelentes propiedades termodinámicas. Además, la superficie del OG cuenta con grupos funcionales ricos en oxígeno, como grupos hidroxilo, epóxidos, carbonilos y ácidos carboxílicos, que ofrecen condiciones propicias para la coordinación y el acoplamiento, lo que resulta en una efectiva adsorción de los metales pesados (Pabón et al., 2020).

Debido a la toxicidad y al comportamiento bioacumulativo de los iones metálicos, se han realizado importantes esfuerzos para eliminar eficazmente estos metales nocivos de las aguas contaminadas (Caviedes et al., 2015).

2.2.15. Método Hummers

El método de Hummers se considera uno de los procedimientos más empleados y eficaces para la síntesis de óxido de grafeno (OG), ya que permite la oxidación del grafito bajo condiciones controladas. El proceso consiste en la adición progresiva de permanganato de potasio (KMnO_4) a una mezcla de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y nitrato de sodio (NaNO_3), lo que genera un entorno fuertemente oxidante que permite transformar el grafito en óxido de grafito (Zhu et al., 2022).

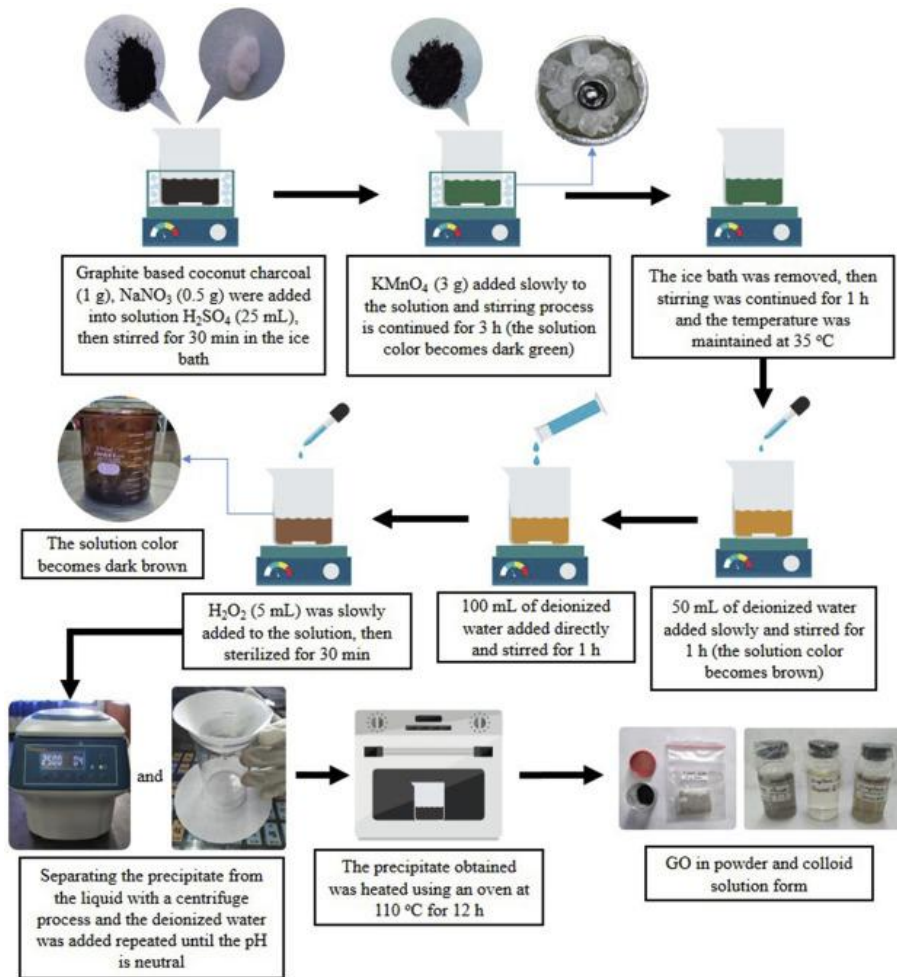
En este método, los reactivos ácidos penetran entre las capas del grafito facilitando su expansión, y posteriormente se genera óxido de manganeso (Mn_2O_7), un agente oxidante altamente reactivo. Este compuesto tiene la capacidad de atacar los dobles enlaces en las estructuras aromáticas del grafito, generando así grupos funcionales oxigenados sobre las capas de carbono, lo cual da lugar al óxido de grafeno (Méndez et al., 2022).

A lo largo del tiempo, se han propuesto varias modificaciones del método original con el fin de reducir el impacto ambiental y aumentar la seguridad del proceso. Algunas de estas incluyen la eliminación del NaNO_3 o la adición de ácido fosfórico (H_3PO_4) como reemplazo parcial del H_2SO_4 .

Sin embargo, la esencia del método se mantiene, por lo que estas adaptaciones continúan siendo conocidas como variantes del método de Hummers (Chen et al., 2022).

Figura 7.

Representación del proceso de síntesis del óxido de grafeno.



Nota: La figura presenta el proceso de síntesis del óxido de grafeno mediante el método de Hummers, tomada de Sujiono et al. (2020)

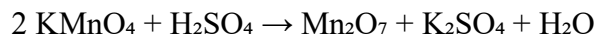
2.2.16. Interacciones químicas durante la síntesis del óxido de grafeno

Cada reactivo utilizado en la síntesis del óxido de grafeno influye de manera directa en su estructura y en las propiedades finales del material, determinando su calidad, funcionalidad y rendimiento en aplicaciones específicas. El NaNO₃ estabiliza la mezcla ácida y facilita la

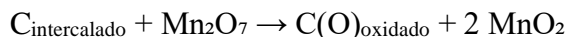
intercalación del permanganato entre las capas de grafito, promoviendo la oxidación (Vazquez et al., 2020). El ácido sulfúrico (H₂SO₄) permite la exfoliación del grafito, aumentando la superficie reactiva y favoreciendo el proceso de la oxidación (Zaaba et al., 2017). El permanganato de potasio (KMnO₄) actúa como el principal agente oxidante, introduciendo grupos oxigenados en la superficie del grafeno y mejorando su dispersión (Sujiono et al., 2020). La adición de agua ionizada favorece la formación de una suspensión estable, mientras que el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) controla el grado de oxidación y reduce los subproductos metálicos, asegurando una estructura controlada (Riahi et al., 2020). Nikam et al. (2025) describe detalladamente los pasos de la síntesis del óxido de grafeno por medio del método de Hummers, así como las reacciones químicas que ocurren en cada etapa, tal como se presenta a continuación.

Método de Hummers modificado

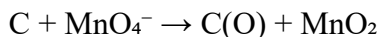
Paso I: Oxidación con KMnO₄



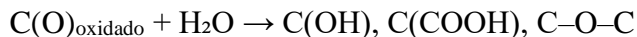
Paso II: Oxidación del grafito



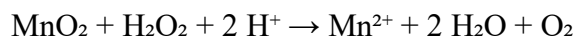
Paso III: Oxidación adicional de MnO₄⁻



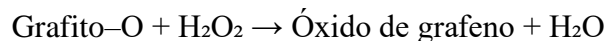
Paso IV: Apagado con agua



Paso V: Reducción del MnO₂



Paso VI: Estabilización del óxido de grafeno



2.2.17. Normativa peruana en efluentes mineros

En el contexto peruano, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP) son los principales marcos normativos que regulan la gestión ambiental de los efluentes provenientes de la actividad minero-metalúrgica. Los LMP establecen las

concentraciones máximas de contaminantes que pueden descargar directamente las operaciones mineras, siendo de cumplimiento obligatorio y fiscalizable por OEFA. Por su parte, los ECA fijan los niveles aceptables de contaminantes en cuerpos receptores de agua, con el fin de proteger la salud humana, la vida acuática y los ecosistemas (MINAM, 2017).

Tabla 2.

Límites Máximos Permisibles (LMP) en efluentes minero-metalúrgicos.

Parámetro	Límite Máximo Permissible (mg/L)
Cadmio (Cd)	0.05
Plomo (Pb)	0.20

Nota: Esta tabla muestra los límites máximos permisibles en efluentes mineros.

Tabla 3.

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categorías 3 y 4.

Parámetro	Agua para riego de vegetales (mg/L)	Agua para bebida de animales (mg/L)	Conservación del ambiente acuático (mg/L)
Cadmio (Cd)	0.01	0.05	0.001
Plomo (Pb)	0.10	0.20	0.0025

Nota: Esta tabla muestra los Estándares de calidad ambiental para agua (ECA).

CAPÍTULO III

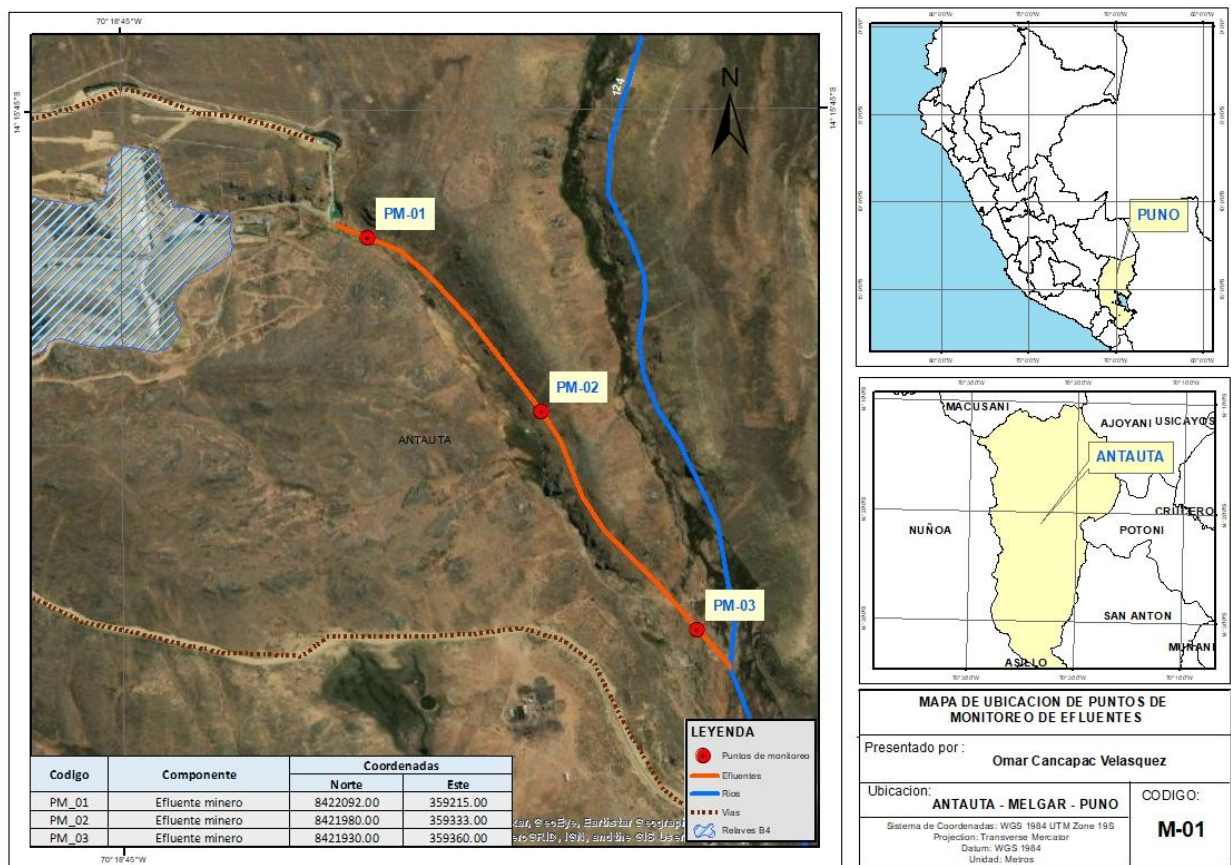
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio

La investigación se llevó a cabo utilizando muestras procedentes del efluente minero de la Unidad Minera San Rafael, situada en el paraje de Quenamari, distrito de Antauta, provincia de Melgar, región Puno. La unidad se encuentra en la Cordillera Oriental de los Andes, con coordenadas UTM del punto central 357 613 E y 8 425 192 N (WGS84), situada entre los 4,500 y 5,200 metros sobre el nivel del mar. Esta ubicación es estratégica, dado su entorno y las condiciones particulares de efluentes mineros que presenta, tal como se observa en la figura 8.

Figura 8.

Localización de los puntos de muestreo.



Nota: La figura muestra la localización de los puntos de muestreo (PM-01, PM-02, PM-03), elaboración propia, tomada de Google Earth (2024).

3.2. Materiales, equipos y reactivos

3.2.1. Materiales

Grafito en polvo, matraces Erlenmeyer, vasos precipitados, probetas, pipetas, buretas, tubos de ensayo, vidrio de reloj, pera de succión, mortero, espátulas, papel filtro Whatman N.º 42, recipiente de vidrio, recipientes de plástico, soportes universales, embudos, hielo, tamices, varilla, bolsas con cierre hermético, etiquetas autoadhesivas, cinta masking, marcador permanente, cinta embalaje, lapiceros, guantes y bata de laboratorio.

3.2.2. Equipos

Difractor de rayos X, espectroscopio infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), espectrofotómetro de absorción atómica (AAS), espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), campana de extracción de gases, agitador magnético, agitador orbital, balanza analítica, pHmetro, estufa, termómetro, cronómetro, cámara fotográfica.

3.3. Tipo y diseño de investigación

3.3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica como aplicada y de carácter experimental, dado que se controlan variables independientes como la cantidad de óxido de grafeno y el tiempo de contacto con el propósito de evaluar su influencia sobre la variable dependiente, correspondiente a la eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II). Esto permite establecer relaciones de causa y efecto en condiciones controladas.

El estudio se enmarca en un nivel descriptivo, pues tiene como objetivo caracterizar el proceso de adsorción de metales pesados presentes en el efluente minero, detallando sus principales características y comportamientos observados durante los ensayos experimentales.

3.3.2. Diseño de investigación

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, conformado por un grupo de tratamiento y un grupo de control. Se aplicaron distintas combinaciones de dosis y tiempos en soluciones de efluente minero para evaluar su efecto sobre la eficiencia de adsorción. Se utilizó un diseño factorial 3^2 , donde se evaluaron tres niveles de dosis (10, 20 y 30 mg) y tres tiempos de contacto (30, 60 y 90 min), con dos réplicas por combinación.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por el efluente proveniente de la Unidad Minera San Rafael. Se seleccionaron tres puntos de monitoreo claves: PM-01 (coordenadas 8422092 N, 359215 E), PM-02 (8421980 N, 359333 E) y PM-03 (8421930 N, 359360 E), los cuales representan zonas de descarga del efluente proveniente del proceso minero metalúrgico. Las muestras se obtuvieron de un punto central de la corriente, asegurando que el flujo fuera homogéneo; las coordenadas se observan en la tabla 4.

Tabla 4.
Puntos de monitoreo del efluente de la U. M. San Rafael.

Código	Componente	Coordenadas		Descripción
		Norte	Este	
PM-01	Efluente minero	8422092	359215	Quebrada Chogñacota. aguas debajo de relaves B4
PM-02	Efluente minero	8421980	359333	Quebrada Chogñacota. aguas abajo de relaves B4
PM-03	Efluente minero	8421930	359360	Quebrada Chogñacota. aguas abajo de relaves B4

Nota: Esta tabla muestra los puntos de monitoreo de la muestra obtenida.

3.4.2. Muestra

La muestra corresponde a un efluente minero recolectado en la quebrada Chogñacota, ubicada en el distrito de Antauta. La recolección se realizó mediante un muestreo no probabilístico por criterio del investigador, el cual no se basó en fórmulas estadísticas, sino en consideraciones técnicas, logísticas y de seguridad. Se priorizó la accesibilidad operativa y la integridad física del investigador, ya que algunas zonas del efluente presentaban riesgos por lodo, humedad y difícil acceso.

Para asegurar la representatividad del cuerpo de agua, se seleccionaron tres puntos estratégicos de muestreo (PM-01, PM-02 y PM-03), en los que se recolectaron volúmenes proporcionales para formar una muestra compuesta de 20 litros. Esta estrategia permitió obtener una muestra representativa y homogénea del efluente.

El proceso de muestreo se realizó conforme al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016). Una vez conformada la muestra compuesta, esta fue remitida a Laboratorios Analíticos del Sur (LAS) para la determinación de las concentraciones iniciales de cadmio (Cd) y plomo (Pb), utilizando la técnica de espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

3.5. Variable de estudio

Variable independiente: Dosis de óxido de grafeno (mg) y tiempo de contacto (min).

Variable dependiente: Eficiencia de adsorción (%) de Cd(II) y Pb(II).

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

Ensayos de laboratorio: Se llevaron a cabo pruebas controladas con el fin de evaluar la eficiencia del óxido de grafeno en la eliminación de metales pesados. Estos experimentos involucran la adición controlada de óxido de grafeno a muestras del efluente minero.

Muestreo del efluente: Se recolectó una muestra integral del efluente minero en 3 puntos del efluente de la U. M. San Rafael para analizar la concentración inicial de metales pesados.

Técnicas instrumentales: Se utilizaron diversas técnicas instrumentales para determinar la concentración de cadmio y plomo antes y después del tratamiento para caracterizar el óxido de grafeno.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Espectroscopia de absorción atómica (AAS) y espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP - OES): Se empleó para determinar con alta precisión y sensibilidad la concentración de Cd y Pb en la muestra del efluente, tanto en el estado inicial como después de la aplicación del óxido de grafeno.

Difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR): Estos instrumentos serán fundamentales para caracterizar el óxido de grafeno, proporcionando información detallada sobre su estructura, composición y propiedades físico-químicas.

3.7. Procedimiento experimental

3.7.1. Procedimiento experimental N.º 01: Síntesis y caracterización del óxido de grafeno

a. Síntesis del óxido de grafeno (OG) por el método modificado de Hummers

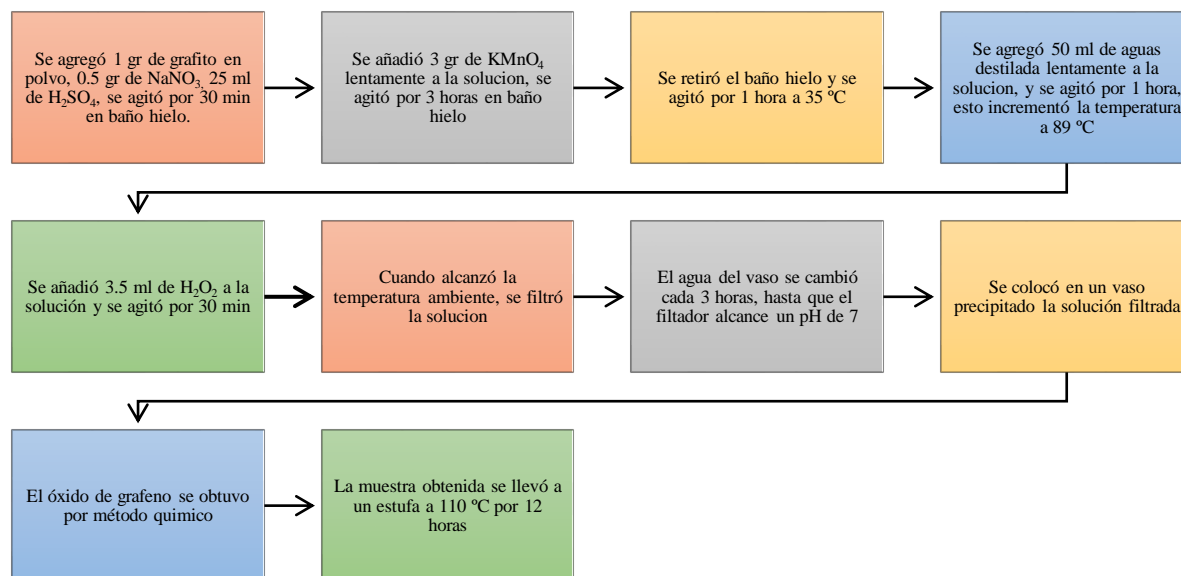
La síntesis de óxido de grafeno siguió la metodología propuesta por Sujiono et al. (2020) el cual se describe a continuación:

Se agregó en un vaso precipitado 1g de grafito, 0.5 g de nitrato de sodio (NaNO_3) a una solución de 25 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 98%; se agitó durante 30 min en un baño de hielo. Se adicionó lentamente 3 g de permanganato de potasio (KMnO_4) en agitador vortex por 3 h; al terminar, se retiró el sistema del baño de hielo y la mezcla se mantuvo en agitación durante una hora a una temperatura de 35 °C. A continuación, se agregó lentamente 50 ml de agua ionizada en campana extractora, lo cual incrementó la temperatura a 89 °C. Luego, se sometió a agitación magnética durante 1 hora. Posteriormente, se adicionaron lentamente 3.5 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% y se mezcló por 30 minutos. Cuando la solución alcanzó la temperatura

ambiente, se filtró usando papel filtro Whatman 42. La muestra obtenida se llevó a una estufa a 110 °C por 12 horas. En la figura 9 se muestra el flujograma del procedimiento experimental.

Figura 9.

Flujograma para la síntesis de óxido de grafeno.



Nota: La figura presenta el flujo para la síntesis de óxido de grafeno por el método Hummers, elaboración propia.

La síntesis de óxido de grafeno se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional de Juliaca, sede Ayabacas. En este laboratorio, se disponía de los equipos y materiales necesarios para realizar el proceso de síntesis de manera efectiva y segura. Sin embargo, la adquisición de los reactivos requeridos para la síntesis fue responsabilidad del investigador.

b. Caracterización del óxido de grafeno

Difracción de rayos X

El análisis fue llevado a cabo en los laboratorios de la Universidad Nacional de San Agustín; se siguieron los lineamientos establecidos en la norma ASTM D3906 (2017). Se utilizó un difractómetro de rayos X Miniflex 600 Rigaku, equipado con un tubo de cobre de 40 kV, 15 mA (radiación Cu K α) y un detector de estado sólido. La muestra de óxido de grafeno se colocó sobre

un portamuestras y se sometió a un barrido angular en el rango de 2θ de 3° a 90° , con una velocidad de barrido de 2° por minuto y un paso de 0.02° .

Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Para la caracterización del óxido de grafeno se utilizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). El análisis se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional de San Agustín; se siguieron los lineamientos establecidos en la norma ASTM E1252-98 (2021). La muestra fue analizada utilizando un espectrómetro FTIR de la marca Perkin Elmer, modelo Frontier FT-IR/NIR, con un rango de barrido de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} , para registrar los espectros. Se analizaron picos característicos, como los grupos carboxilo, hidroxilo y epoxi, en un rango de 950 cm^{-1} a 3400 cm^{-1} . Estos resultados fueron fundamentales para evaluar la funcionalización del material y su aplicabilidad en procesos de adsorción.

3.7.2. Procedimiento experimental N.º 02: Eficiencia de adsorción de Cd(II) y

Pb(II)

a) Muestreo

Se tomaron muestras en los siguientes puntos de monitoreo, con sus respectivas coordenadas: PM-01 (8422092 N , 359215 E), PM-02 (8421980 N , 359333 E) y PM-03 (8421930 N , 359360 E), correspondientes al efluente minero de la Unidad Minera San Rafael.

El proceso de muestreo se realizó conforme al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016), así como a los protocolos de monitoreo establecidos por los Laboratorios Analíticos del Sur (LAS). Las muestras integradas fueron recolectadas durante la época de estiaje, específicamente a las 10:00 horas del 26 de octubre del 2024, obteniéndose un volumen total de 20 litros en recipientes adecuados.

b) Determinación de metales pesados

Las muestras del efluente minero fueron enviadas al laboratorio Analíticos del Sur (LAS) a fin de determinar los niveles de cadmio y plomo presentes. El análisis se efectuó utilizando ICP-OES,

siguiendo los lineamientos de la norma EPA 200.7, garantizando la precisión y confiabilidad de los resultados.

c) Determinación de la eficiencia y capacidad de adsorción

Se siguió la metodología propuesta por Joya et al. (2024), utilizando concentraciones de 10, 20 y 30 mg de óxido de grafeno, preparadas en 100 ml del efluente minero. Cada muestra se agitó durante diferentes tiempos de 30, 60 y 90 minutos a 250 rpm. Posteriormente, las soluciones fueron filtradas y enviadas para su respectivo análisis. La eficiencia de adsorción se determinó mediante la ecuación correspondiente.

$$A_e = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100$$

Donde:

A_e es la eficiencia de adsorción de cada ion (%), C_o corresponde a la concentración inicial de los iones presentes en el efluente (mg/L), C_e es la concentración de los iones en el efluente en equilibrio después de la adsorción (mg/L). La capacidad de adsorción Q , se determina mediante la ecuación:

$$Q = \frac{(C_o - C_e)}{m} \times V$$

Donde:

V representa el volumen de la solución expresado en litros (L), mientras que “ m ” corresponde a la masa del adsorbente (óxido de grafeno) empleada durante el proceso de adsorción (g).

Tabla 5.
Estructura de registro de datos para Cd y Pb.

Dosis	Tiempo de agitación			C_o	C_e	A_e %	Q
	30 min	60 min	90 min				
OG							
10 mg	-	-	-	---	---	---	---
20 mg	-	-	-	---	---	---	---
30 mg	-	-	-	---	---	---	---

Nota: Esta tabla muestra la estructura de registros cadmio y plomo.

3.7.3. Procedimiento experimental N.º 03: Cinéticas e isotermas de adsorción

a. Cinéticas de adsorción

Se siguió la metodología propuesta por Sadeghi et al. (2020), utilizando 100 mg de óxido de grafeno en 100 ml de una solución estándar de 100 mg/L de cadmio y plomo. La agitación se llevó a cabo a 250 rpm y 25 °C, evaluando las muestras en intervalos de tiempo de 10, 30, 50, 70, 90, 110 y 130 minutos. Una vez completada la agitación de las muestras, estas se filtraron para separar la fase sólida del óxido de grafeno de la fase líquida. Para determinar las concentraciones residuales de Cd(II) y Pb(II) se utilizó espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Los datos experimentales fueron analizados considerando dos modelos cinéticos: el modelo de pseudo-primer orden propuesto por Lagergren y el modelo de pseudo-segundo orden, también denominado modelo de Elovich. La tabla 6 presenta los parámetros obtenidos para los modelos cinéticos de adsorción, los cuales permiten describir e interpretar el comportamiento del adsorbente durante el proceso de adsorción.

Tabla 6.

Parámetros para cinética.

Tiempo (minutos)	C_0 (mg)	C_e (mg)	q_t	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t
10					
30					
50					
70					
90					
110					
130					

Nota. Se presenta la estructura de los parámetros del modelo cinético.

Para analizar las cinéticas de adsorción, los datos recopilados se representaron en dos gráficos principales: el gráfico de $\log(q_e - q_t)$ vs. el tiempo para el modelo cinético de pseudo-primer orden y el gráfico de t/q_t vs. el tiempo para el modelo cinético de pseudo-segundo orden. Estos gráficos ayudan a determinar cuál de los modelos describe mejor el proceso de adsorción del óxido de grafeno para Cd(II) y Pb(II). Se busca una relación lineal en ambos gráficos, donde la pendiente y la intersección de las líneas rectas proporcionaron las constantes de velocidad y la capacidad de adsorción en equilibrio. Finalmente, se evaluaron los coeficientes de determinación (R^2) con el fin

de identificar cuál de los modelos presentó un mejor ajuste a los datos experimentales y describió con mayor exactitud la cinética de adsorción.

b. Isotermas de adsorción

Se siguió la metodología de Sadeghi et al. (2020), donde se emplearon concentraciones estandarizadas de Cd(II) y Pb(II) de 25, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 mg/L, con 100 mg de adsorbente en 100 ml de solución, sometidos a 15 minutos de agitación. Los experimentos se realizaron a 25°C y 250 rpm. Una vez finalizada la agitación de las muestras, estas se filtraron para separar la fase sólida del óxido de grafeno de la fase líquida. Las concentraciones remanentes de Cd(II) y Pb(II) fueron cuantificadas mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (AAS). La elaboración de las isotermas de adsorción hizo posible estimar la capacidad máxima de adsorción y la afinidad existente entre el adsorbente y los adsorbatos.

Los valores de los parámetros correspondientes a los modelos de Langmuir y Freundlich, presentados en la tabla 7, se obtendrán ajustando los datos experimentales a sus respectivas ecuaciones. La comparación de los ajustes de los modelos permitirá determinar cuál describe mejor el comportamiento de adsorción del óxido de grafeno en la remoción de cadmio y plomo del efluente.

Tabla 7.
Datos para el modelo de Langmuir y Freundlich.

N.º Exp.	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e	Log (C _e)	Log (q _e)
1	25				
2	50				
3	100				
4	150				
5	200				
6	250				
7	300				

Nota: Se presenta la estructura para los datos del modelo de isotermas.

Para evaluar las isotermas de adsorción, se elaboraron gráficos según los modelos de Langmuir y Freundlich a partir de los datos obtenidos para distintas concentraciones de cadmio y plomo. El modelo de Langmuir se representó graficando q_e vs. C_e, mientras que el modelo de Freundlich se

graficó como $\log(q_e)$ vs. $\log(C_e)$. Estos gráficos permitieron determinar cuál modelo se ajustó mejor a los datos, proporcionando una interpretación clara de la capacidad máxima de adsorción y la afinidad del óxido de grafeno hacia los adsorbatos. Las pendientes y las intersecciones en estos gráficos proporcionaron las constantes características de cada modelo, lo que facilitó la comparación y selección del modelo que mejor describió el comportamiento de adsorción del material.

3.7.4. Análisis estadístico

Diseño factorial 3^2

El estudio utilizó un diseño factorial 3^2 , compuesto por dos factores (dosis y tiempo), cada uno con tres niveles (bajo, medio y alto), lo que permitió generar 9 tratamientos distintos. Estos tratamientos se replicarán 2 veces; por lo tanto, se realizarán un total de 18 tratamientos de unidades experimentales para cada metal (Cd(II) y Pb(II)). Asimismo, los datos estadísticos serán procesados con el programa Minitab V. 0.3.1.

El modelo estadístico para el diseño factorial 3^2 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

con $i, j = 0, 1, 2$ y $k = 1, \dots, r$, donde α_i es el efecto del factor A, β_j representa el efecto del factor B y $(\alpha\beta)_{ij}$ representa el efecto de la interacción entre los dos factores.

En la tabla 8 se observan las 9 combinaciones de niveles de cada factor, de las cuales se realizarán 2 réplicas, lo que da un total de 18 unidades experimentales por cada metal pesado.

Tabla 8.

Estructura de combinaciones del diseño experimental.

		Factor B (tiempo)			N.º réplicas
		Bajo (0)	Medio (1)	Alto (2)	
Factor A (adsorbente)	Niveles				
	Bajo (0)	00	01	02	2 réplicas
	Medio (1)	10	11	12	
Alto (2)	20	21	22		

Nota: Esta tabla muestra los 3 niveles por cada factor.

Análisis de varianza

Considera los efectos A, B y AB de manera global, es decir, sin especificar si influye de manera lineal, cuadrática o de ambas formas; la varianza se muestra en la tabla 9.

Tabla 9.
Esquema de organización para el análisis de varianza.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor- p
A	SC_A	2	CM_A	$\frac{CM_A}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
B	SC_B	2	CM_B	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
AB	SC_{AB}	4	CM_{AB}	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	$3^2(n - 1)$	CM_E		
TOTAL	SC_T	$n3^k - 1$			

Nota. Esta tabla muestra el esquema de organización para el ANOVA, tomado de Gutierrez & de la Varga (2016).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Síntesis y caracterización del óxido de grafeno (OG)

4.1.1. Síntesis del óxido de grafeno (OG) por el método modificado de Hummers

Tabla 10.

Rendimiento de la eficiencia de síntesis del óxido de grafeno.

Descripción	Condición inicial	Condición final	Rendimiento
Grafito	1 gr	2.6 gr	160%

Nota: Esta tabla presenta el rendimiento obtenido por el método Hummers.

En la tabla 10 se muestra como el óxido de grafeno (OG) obtenido mediante el método de Hummers alcanzó un rendimiento de 2,6 g a partir de 1 g de grafito, equivalente a un incremento de masa de 160 % respecto al material inicial, estos resultados podrían ser debido al grado de oxidación y las condiciones de secado empleadas. Tal es el caso de Rahman & Raheem (2024), reportaron la obtención de una cantidad similar o ligeramente superior de OG en relación al grafito inicial ($\approx 110\%$), lo cual es atribuible a una oxidación parcial y a un menor contenido de agua en el producto final. De manera semejante, Benzait et al. (2021) describieron rendimientos cercanos al 100–120 %, utilizando cantidades de grafito entre 1–2 g. En contraste, revisiones recientes Nishina (2024) mencionan que los incrementos de masa pueden alcanzar valores superiores al 150–180 %, dependiendo del grado de oxidación alcanzado y de la humedad residual en el material.

En ese sentido, el rendimiento obtenido en este estudio (160 %) es relativamente alto de lo reportado en la literatura, lo cual sugiere que el proceso de oxidación fue eficiente y que el producto conserva una cantidad significativa de oxígeno y posiblemente de agua interlaminar. Estas condiciones podrían favorecer ciertas aplicaciones que requieren alta funcionalización superficial, aunque también implican la necesidad de controles adicionales en la etapa de secado para obtener un material con composición más estable (Zhan et al., 2025).

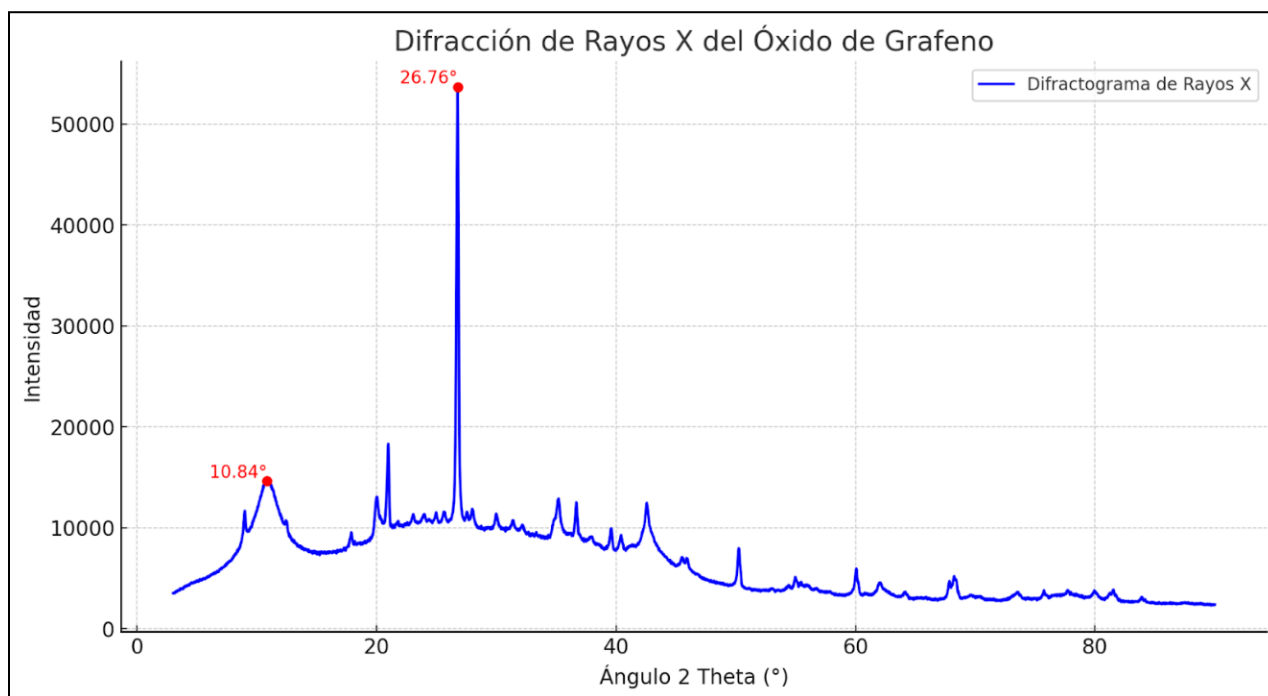
Adicionalmente, debe considerarse que las diferencias en el rendimiento no solo se deben a la eficiencia química del método, sino también a factores experimentales como la pureza del grafito inicial, la intensidad del lavado y la técnica de secado utilizada (Zhu et al., 2022). Un secado incompleto o la presencia de grupos oxigenados altamente hidratados pueden incrementar la masa final, elevando el porcentaje de rendimiento reportado (Méndez et al., 2022). Este aspecto explica por qué algunos autores, al trabajar con condiciones estrictas de secado al vacío, informan valores más bajos en comparación con los obtenidos en este estudio (Chen et al., 2022).

4.1.2. Caracterización del óxido de grafeno

a. Análisis de Difracción de rayos X

Figura 10.

Difracción de rayos X del óxido de grafeno sintetizado.



Nota: La grafica muestra los resultados de la difracción de rayos X.

En la figura 10 y en la tabla 11, correspondientes al difractograma de rayos X del óxido de grafeno (OG), se identifican dos picos significativos en los ángulos de difracción 2θ de 10.84° y 26.76° . Estos picos corresponden a distancias interplanares de 8.16 \AA y 3.33 \AA , respectivamente.

Los ángulos de difracción de las señales de las muestras analizadas, junto con las distancias interplanares calculadas, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 11.

Parámetros de la ley de Bragg para los picos definitorios de OG en DRX.

Muestra	2θ (°)	θ (°)	λ (nm)	d(nm)
OG Pico A	10.84	5.42	0.15418	0.816
OG Pico B	26.76	13.38	0.15418	0.333

Nota: En esta tabla se presenta; θ - Ángulo de dispersión, λ - Longitud de onda de los rayos X, d - Espaciamiento entre capas.

El aumento de la distancia interplanar de 10.84° a 26.76°, indica la presencia de grupos funcionales oxigenados, generando una estructura más flexible y expandida. Este fenómeno está directamente relacionado con la oxidación del grafeno, que facilita la separación entre las capas debido a la incorporación de oxígeno y otros grupos funcionales (Lin et al., 2023). Los estudios previos realizados por Mokoena & Mofokeng (2024) identificaron un aumento en el espaciado interlaminar de 3.43 Å en grafito expandible, alcanzando hasta 12.13 Å en óxido de grafeno. Este incremento se atribuye a la intercalación de moléculas oxigenadas, lo cual es comparable con los resultados obtenidos en este estudio, donde el pico a 10.84° (8.16 Å) también refleja una apertura significativa de las capas de grafeno debido a su funcionalización con oxígeno. Además, los autores mencionados reportaron un aumento en el tamaño de los cristalitas del óxido de grafeno, lo cual mejora sus propiedades adsorbentes. Este hallazgo es confirmado por Bhardwaj et al. (2024), quienes reportaron un pico a $2\theta = 11.465^\circ$ en óxido de grafeno modificado, asociado con la incorporación de grupos funcionales oxigenados y una distancia interlaminar de 17.61 Å.

Aunque esta distancia es mayor que la observada en este estudio, ambos trabajos coinciden en que el incremento en el espaciado entre las capas es un efecto directo de la oxidación y la presencia de moléculas oxigenadas en el plano basal del óxido de grafeno. Asimismo, Nikam et al. (2025) respaldan estos resultados, señalando que el grado de oxidación está directamente relacionado con el espaciamiento entre las capas, ya que un mayor grado de oxidación tiende a aumentar esta separación.

El incremento en el espaciado interlaminar se debe a la presencia de grupos funcionales en el material, tal como lo reporta Sikri et al. (2025). Este aumento no solo mejora la dispersión del

material en solventes, sino que también optimiza sus propiedades estructurales, como la cristalinidad. El aumento en la cristalinidad es especialmente relevante para aplicaciones que requieren materiales con alta estabilidad y capacidad de adsorción. Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los informes de otros autores que señalan que la oxidación del grafeno provoca un aumento en el espaciado interlamilar, lo que facilita la formación de una estructura más expandida y flexible. Además, el crecimiento en el tamaño de los cristalitos y la mejora en las propiedades adsorbentes del óxido de grafeno sugieren que la funcionalización con oxígeno juega un papel crucial en la optimización de las aplicaciones de este material en la adsorción de contaminantes.

En la Tabla 11 se observa una distancia interplanar de 3.33 Å, lo que indica una estructura más compacta y ordenada, característica de las zonas menos oxidadas del grafeno. En estas áreas, las capas de grafeno se mantienen más cercanas, lo que resulta en una estructura más pura, con un empaquetamiento denso y un alto nivel de cristalinidad. Según Zhang et al. (2025), las zonas menos oxidadas conservan una organización estructural debido a que los grupos oxigenados no interfieren de manera significativa, lo que permite que las capas de grafeno se mantengan compactas y con mayor estabilidad. Brusko et al. (2024) coinciden en que estas áreas presentan un empaquetamiento más cerrado, similar al grafeno no modificado, favoreciendo una mejor disposición de las capas y reduciendo el número de defectos. Asimismo, Zhu et al. (2022) destacan que, debido a la menor oxidación, las zonas menos oxidadas contribuyen de manera significativa a la estabilidad estructural, lo que a su vez mejora las propiedades electrónicas del material. Esta observación también es respaldada por Sujiono et al. (2020), quienes concluyen que las zonas menos oxidadas poseen una alta cristalinidad, lo que las hace especialmente adecuadas para aplicaciones en procesos de adsorción. Así, las zonas menos oxidadas del óxido de grafeno conservan propiedades estructurales similares a las del grafeno puro, como una mayor organización y estabilidad, lo que las hace más aptas para aplicaciones que requieren materiales con alta eficiencia y rendimiento.

La diferencia observada en los picos de DRX, como el pico a 10.84° (con una distancia interplanar de 8.16 Å) y el pico a 26.76° , puede explicarse por la presencia de zonas menos oxidadas y más oxidadas en el óxido de grafeno (OG). Según Silva et al. (2024), las zonas menos oxidadas mantienen una estructura más densa y ordenada, lo que se traduce en un mayor grado de

cristalinidad y un empaquetamiento más compacto de las capas de grafeno. Este comportamiento mejora las propiedades electrónicas del material, como la conductividad, ya que en estas zonas la separación entre las capas es menor y la organización estructural es más similar a la del grafeno puro.

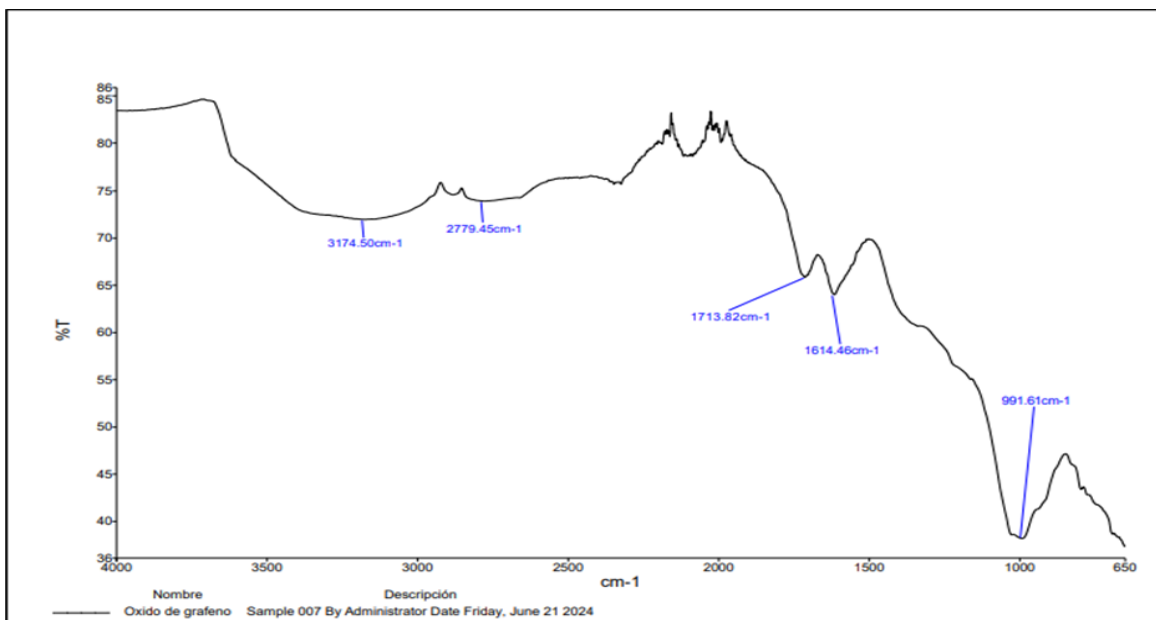
El aumento del espaciado interlaminar confirma la incorporación de grupos oxigenados en la estructura del óxido de grafeno, generando una disposición más expandida y flexible. La presencia de picos a 10.84° y 26.76° evidencia la coexistencia de zonas oxidadas y menos oxidadas. Estas variaciones estructurales reflejan un equilibrio entre la funcionalización y la cristalinidad del material. En conjunto, los resultados demuestran que la oxidación influye directamente en la estructura y las propiedades adsorbentes del óxido de grafeno.

b. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier - FTIR

El análisis por FTIR del óxido de grafeno sintetizado se llevó a cabo en un equipo Perkin Elmer, empleando el accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) con cristal de diamante y un rango de escaneo de 4000 cm^{-1} hasta 650 cm^{-1} . La figura 11 muestra el espectro FTIR correspondiente al óxido de grafeno analizado.

Figura 11.

Espectros del análisis por FTIR del óxido de grafeno sintetizado.

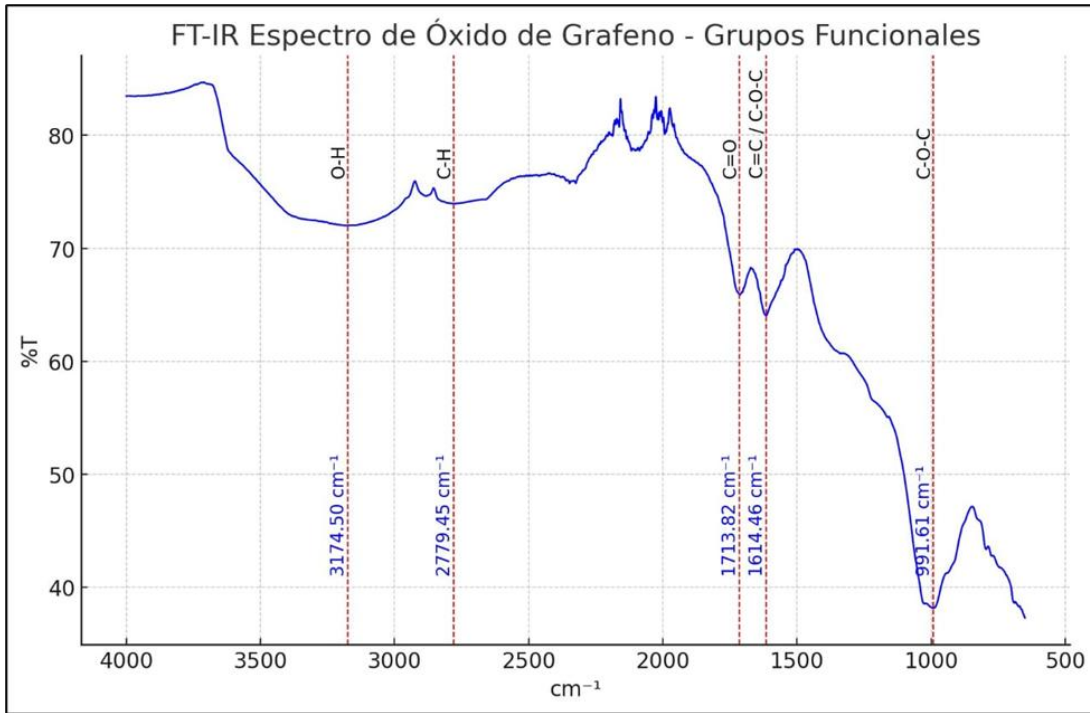


Nota: La grafica presenta los resultados del análisis de FTIR , donde se identifican diversos picos.

Se identificaron varios picos característicos (Figura 12) que permiten determinar la presencia de grupos funcionales en la muestra.

Figura 12.

Interpretación del análisis por FTIR.



Nota: En la gráfica se puede observar los grupos funcionales identificados resultado del análisis de FTIR.

La interpretación se realizó conforme a Gao (2015), el cual se detalla a continuación:

- Pico a 3174.50 cm^{-1} : Este pico se asocia con la vibración de estiramiento de los enlaces O–H, lo que evidencia la presencia de grupos hidroxilo. Estos son comunes en el óxido de grafeno, derivados de la oxidación y capaces de formar enlaces de hidrógeno.
- Pico a 2779.45 cm^{-1} : Este pico se atribuye a los enlaces C-H, típicos de grupos metilo o metileno presentes en la estructura. Estos enlaces pueden estar asociados con grupos funcionales que contribuyen a interacciones específicas con otros compuestos, facilitando, por ejemplo, la adsorción o funcionalización del óxido de grafeno.

- Pico a 1713.82 cm^{-1} : Este valor es característico del estiramiento de enlaces C=O, típicos de los grupos carboxilos y otros grupos carbonílicos. Estos grupos, ubicados generalmente en los bordes del óxido de grafeno, contribuyen a la solubilidad del material en medios polares y le confieren una elevada capacidad de interacción con otros compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Pico a 1614.46 cm^{-1} : Este pico puede asociarse a las vibraciones de enlaces C=C en el esqueleto de carbono del grafeno o a deformaciones en grupos epóxidos (-C-O-C-), presentes en la superficie del óxido de grafeno. Los grupos epóxidos son características importantes en este material, ya que afectan su estabilidad y propiedades mecánicas.
- Pico a 991.61 cm^{-1} : Corresponde a los enlaces C-O-C, vinculados a los grupos epóxidos y ésteres cíclicos que se forman debido a la oxidación del grafeno. Estos grupos funcionales contribuyen a la funcionalización del material, modificando sus propiedades estructurales y químicas.

Huang et al. (2020) identificó, en su estudio sobre la síntesis de óxido de grafeno, una variedad de grupos funcionales que contienen oxígeno, hidroxilos, carboxilos, epóxidos y carbonilos, los cuales son características distintivas del óxido de grafeno, de manera similar, Mokoena & Mofokeng (2024), a través de análisis FTIR, detectaron la presencia de estos grupos funcionales en la estructura del óxido de grafeno. En su investigación, las bandas de absorción a 3369 cm^{-1} (hidroxilos), 1724 cm^{-1} (carboxilos), 1166 cm^{-1} y 1040 cm^{-1} (ésteres) confirmaron la adición exitosa de grupos oxigenados, validando la efectividad de la síntesis del óxido de grafeno.

El análisis FTIR permitió identificar claramente la presencia de distintos grupos funcionales en el óxido de grafeno sintetizado, confirmando el éxito del proceso de oxidación. La banda en 3174.50 cm^{-1} está asociada a enlaces O-H, lo que evidencia la existencia de grupos hidroxilo en la superficie del material, tal como reportan Farghaly & Shenouda (2021), quienes destacan que estos grupos, observados en el rango de $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$, son cruciales para mejorar la afinidad con medios acuosos. Asimismo, (Zhang et al., 2025) reportan que los grupos hidroxilos también aparecen en el rango de $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$, los cuales favorecen la dispersión del óxido de grafeno en soluciones, reforzando así su versatilidad.

Por otro lado, la señal registrada a 2779.45 cm^{-1} se vincula con enlaces C-H, sugiriendo la incorporación de fragmentos metilo o metileno en la estructura, en línea con lo observado por Sim et al. (2022), quienes destacan su incidencia sobre ciertas propiedades fisicoquímicas. En su estudio, Khine et al. (2022) identifican los enlaces C-H en el rango de $2700\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$, lo que confirma la presencia de grupos metilo y metileno en el óxido de grafeno, influenciando así las propiedades hidrofóbicas e interacciones con otros compuestos. Del mismo modo, Lima (2021), afirma que estos grupos pueden impactar la compatibilidad del óxido de grafeno con polímeros en materiales compuestos, mejorando su estabilidad mecánica y resistencia térmica.

El pico a 1713.82 cm^{-1} es indicativo de la presencia de grupos carbonilo (C=O), típicos de carboxilos o carbonilos localizados en los bordes del óxido de grafeno. Por su parte, Sardinha (2019) señala que estos grupos, que se encuentran en el rango de $1700\text{-}1725\text{ cm}^{-1}$, son responsables de la polaridad del material. Así como afirma, Boulanger et al. (2020), quienes observan que los grupos carboxilo en el óxido de grafeno se localizan en zonas de bordes o en defectos estructurales, lo que influye en la intensidad de la banda y la capacidad de adsorción del material, especialmente en aplicaciones de remoción de contaminantes.

Asimismo, la banda a 1614.46 cm^{-1} refleja contribuciones tanto del esqueleto C=C remanente como de deformaciones debido a la presencia de grupos epóxidos. En este sentido, Abou et al. (2025) resaltan que esta coexistencia de dominios sp^2 con oxígenos intercalados es característica del óxido de grafeno parcialmente reducido. De manera complementaria, Gul et al. (2023) identifican la banda de epóxidos en el rango de $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$, lo que es consistente con la presencia de estos grupos en el óxido de grafeno parcialmente reducido. Finalmente, el pico a 991.61 cm^{-1} está relacionado con enlaces C-O-C, confirmando la presencia de epóxidos y ésteres cíclicos; esto coincide con lo reportado por Brusko et al. (2024), quienes identifican esta banda en el rango de $950\text{-}1050\text{ cm}^{-1}$ en sus estudios sobre la funcionalización del grafeno.

Se ha observado que los picos obtenidos mediante espectroscopía FTIR varían en función del grado de oxidación y las condiciones de síntesis del óxido de grafeno (OG). En particular, la coexistencia de dominios sp^2 con oxígenos intercalados en el óxido de grafeno parcialmente reducido genera modificaciones en los picos espectrales, como el observado a 1614.46 cm^{-1} , el cual refleja tanto el esqueleto C=C remanente como las deformaciones provocadas por los grupos epóxidos. Asimismo, la intensidad de dichos picos está influenciada por el grado de reducción y la

distribución de los grupos oxigenados en la superficie del material. En esta línea, Brusko et al. (2024) confirman que las condiciones de reducción influyen directamente en la intensidad de las bandas asociadas a epóxidos y carboxilos, lo que repercute en la estructura final del óxido de grafeno.

El tiempo de oxidación y la concentración de los reactivos también desempeñan un papel clave en la distribución de los grupos funcionales en el óxido de grafeno. De acuerdo con Gao (2015), un mayor tiempo de oxidación tiende a incrementar la presencia de grupos epóxidos, mientras que una oxidación parcial favorece la formación de carboxilos. Por otro lado, Nikam et al. (2025) señalan que el tipo de reactivo empleado influye no solo en el tipo de funcionalización, sino también en el espaciado interlaminar, lo cual contribuye a la variabilidad de los picos observados en los espectros FTIR.

En conjunto, la presencia de estos picos confirma la funcionalización del óxido de grafeno con diversos grupos característicos, como hidroxilos, ésteres cíclicos (Bashiri & Hosseini, 2024). Estos grupos funcionales no solo aportan propiedades hidrofílicas y mejoran su capacidad de dispersión, sino que también lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones como la adsorción de metales pesados (McLaren et al., 2021). En este sentido, las investigaciones revisadas confirman que la presencia de grupos oxigenados en el óxido de grafeno evidencia el éxito de su síntesis, sino que también potencia sus propiedades químicas y estructurales, consolidándolo como un material versátil con un amplio potencial en aplicaciones ambientales y tecnológicas.

4.2. Eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II) mediante óxido de grafeno

Las concentraciones iniciales determinadas por el laboratorio fueron 0,052 mg/L para Cd(II) y 0,065 mg/L para Pb(II), como se indica en la tabla 12.

Tabla 12.

Reporte de las concentraciones iniciales de Cd y Pb.

Análisis	Unidad	Muestra	Resultado
Cd	mg/L	M-10	0.052
Pb	mg/L	M-10	0.065

Nota: Esta tabla muestra el reporte de la concentración para el cadmio y plomo.

Los parámetros óptimos de dosis de OG y tiempo de contacto fueron de 30 mg con 90 minutos, logrando una eficiencia de adsorción del 60.19% para el Cd(II) y de 10 mg con 90 minutos, alcanzando una eficiencia del 92.31% para el Pb(II). Estos resultados fueron validados mediante ANOVA. Asimismo, las capacidades de adsorción fueron de 0.27 mg/g y 0.42 mg/g para el Cd(II) y Pb(II), respectivamente, tal como se presenta en la tabla 12. Es importante señalar que los resultados obtenidos corresponden a las condiciones establecidas en esta investigación.

Tabla 13.
Eficiencia y capacidad de adsorción de Cd(II) y Pb(II).

Dosis OG (mg) x Tiempo (min)	Cadmio (II)				Plomo (II)			
	C _o	C _e	A (%)	Q (mg/g)	C _o	C _e	A (%)	Q (mg/g)
10 x 30	0.052	0.0342	34.23%	0.18	0.065	0.043	33.85%	0.22
10 x 60	0.052	0.0278	46.54%	0.12	0.065	0.028	56.17%	0.18
10 x 90	0.052	0.0261	49.81%	0.09	0.065	0.005	92.31%	0.20
20 x 30	0.052	0.0301	42.12%	0.22	0.065	0.023	64.62%	0.42
20 x 60	0.052	0.0304	41.54%	0.11	0.065	0.023	64.62%	0.21
20 x 90	0.052	0.0237	54.42%	0.09	0.065	0.031	52.31%	0.11
30 x 30	0.052	0.0251	51.73%	0.27	0.065	0.035	46.15%	0.30
30 x 60	0.052	0.0241	53.65%	0.14	0.065	0.036	44.62%	0.15
30 x 90	0.052	0.0207	60.19%	0.10	0.065	0.018	73.07%	0.16

Nota: Esta tabla presenta la eficiencia de adsorción (%A) y la capacidad de adsorción (Q) de Pb(II) y Cd(II) para distintos tiempos de agitación y concentraciones de óxido de grafeno.

Estas eficiencias coinciden con los valores reportados por Lima (2021a), quien obtuvo porcentajes de adsorción superiores al 90 % para Cd(II) y Pb(II), lo que resalta la capacidad de esta metodología en la remoción de contaminantes en comparación con otros métodos. Por otra parte Bhardwaj et al. (2024a) observaron eficiencias de adsorción para Pb(II) y Cd(II) de 52% y 51%, respectivamente, con una dosis de óxido de grafeno de 10 mg. En comparación, nuestros resultados demuestran una mayor eficiencia, especialmente en la adsorción de plomo, donde se alcanzó un 92.31%, lo que resalta la eficacia de nuestra metodología en comparación con otros estudios.

Además, la alta eficiencia alcanzada en este estudio se debe a la calidad del óxido de grafeno sintetizado, el cual presentó propiedades favorables para la adsorción de metales pesados. Según Guo (2023), el rendimiento del proceso de adsorción está estrechamente relacionado con el método de síntesis, ya que este influye en la cantidad y tipo de sitios activos disponibles en la superficie del material. En ese sentido, los resultados obtenidos confirman que una síntesis adecuada puede mejorar significativamente la capacidad adsorbente del óxido de grafeno.

4.2.1. Efecto de la presencia de iones en la adsorción de cadmio y plomo

Los resultados reportados por el laboratorio evidencian la presencia de iones de calcio (Ca^+), sodio (Na^+), sílice (SiO_2), aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}), los cuales se detallan en la tabla 14.

Tabla 14.

Reporte de la concentración de iones en el efluente minero.

Análisis	Unidad	Muestra	Resultado
Ca^+	mg/L	M-10	>250.0
Na^+	mg/L	M-10	44.0
SiO_2	mg/L	M-10	7.29
Mn^{+2}	mg/L	M-10	0.048

Nota: Esta tabla presenta el resultado del reporte de análisis de laboratorio.

La eficiencia de adsorción de Cd(II) fue de 60.19 %, mínima en comparación con Pb(II) , lo cual podría deberse a la presencia de otros iones en el entorno, tales como Ca^+ , Na^+ , SiO_2 , Al^{+3} y Mn^{+2} . Estos iones podrían competir con el Cd(II) por los sitios activos disponibles en el adsorbente, lo que reduciría en gran medida la capacidad de adsorción de Cd(II) del efluente (Tapia, 2022).

Según Rodríguez (2024), los cationes tienden a mostrar una mayor afinidad por la superficie del óxido de grafeno en comparación con los aniones. Esta interacción podría disminuir la eficiencia de adsorción, ya que los cationes compiten por los sitios activos del adsorbente, afectando la efectividad del proceso. Asimismo, Elgoud & Aly (2022) evaluaron la selectividad hacia Pb^{2+} en presencia de Cd^{2+} y Zn^{2+} . Los resultados indicaron una mayor afinidad por Pb^{2+} , lo que sugiere que la competencia entre iones puede afectar la eficiencia de adsorción.

Además, Lima (2021), sostiene que los metales con mayor electronegatividad, como el Pb(II) , tienen una mayor afinidad hacia la superficie del adsorbente, lo que explica por qué la capacidad de adsorción de Pb(II) fue superior en comparación con otros metales como el Cd(II) .

En conjunto, estos resultados sugieren que la menor eficiencia en la adsorción de Cd(II) podría estar influenciada por la presencia de iones interferentes en la matriz del efluente, así como por la menor afinidad del cadmio hacia el óxido de grafeno en comparación con el Pb(II).

4.2.2. Diferencia de la eficiencia de adsorción de cadmio y plomo

Se observa una diferencia considerable en la eficiencia de adsorción entre el Cd(II) y el Pb(II), con valores de 60.19% y 92.31%, respectivamente; esta diferencia podría atribuirse no solo a la presencia de cationes competidores en el entorno, sino también a la mayor electronegatividad del Pb(II) en comparación con el Cd(II) (Kale et al., 2021). La afinidad del plomo por los sitios activos del óxido de grafeno podría estar favorecida por esta propiedad, incrementando su capacidad de adsorción en comparación con el Cd(II) (Fu & Huang, 2018). Asimismo, Khomyakov et al. (2009) señalan que metales como el plomo interactúan con mayor intensidad con el grafeno, debido a su mayor electronegatividad, lo que explicaría la alta eficiencia de adsorción del Pb(II) observada en los ensayos. Esta afinidad con los sitios activos del óxido de grafeno favorecería su retención frente al Cd(II), cuya adsorción fue menor también atribuyen esta diferencia a factores como la competencia iónica y la naturaleza química de los metales.

Además, la menor eficiencia de adsorción del Cd(II) podría deberse a su menor capacidad de interacción con los grupos funcionales del adsorbente, influenciada tanto por su menor electronegatividad como por la competencia iónica. Estos factores en conjunto refuerzan la selectividad del óxido de grafeno hacia Pb(II), evidenciando su potencial como adsorbente preferente en matrices complejas.

4.2.3. Efecto de la dosis de óxido de grafeno en la adsorción de cadmio y plomo

Los resultados muestran que, aunque se esperaría que un aumento en la dosis de óxido de grafeno (OG) incremente la disponibilidad de sitios activos para la adsorción de Pb(II), la eficiencia disminuyó; este comportamiento puede explicarse por diversos mecanismos interrelacionados. En primer lugar, la mayor concentración de OG favorece la competencia entre cationes, lo que hace que otros iones presentes se adsorban más rápido en los grupos funcionales del material, limitando el acceso del plomo (Vasanthi & Mandal, 2022).

En segundo lugar, estudios recientes indican que los mecanismos de adsorción del Pb(II) implican interacciones físico-químicas complejas como electrostáticas, químicas y de intercambio iónico que pueden saturarse rápidamente aun cuando se añada más adsorbente (Melchor et al., 2024). Finalmente, con cargas funcionales como carboxilos e hidroxilos, el óxido de grafeno muestra una alta afinidad por el Pb(II), pero la saturación superficial puede impedir una adsorción significativa adicional cuando aumenta la dosis (Java et al., 2023). Por tanto, la disminución de la eficiencia observada a mayores dosis de OG no se debe a una menor cantidad de sitios, sino a la competencia iónica, la saturación rápida y las limitaciones en la distribución efectiva de los sitios activos.

4.3. Cinética e isothermas de adsorción

4.3.1. Cinéticas de adsorción

El análisis del tiempo de contacto en los procesos de adsorción es clave para comprender la evolución del proceso y determinar su viabilidad. Además, permite identificar el intervalo de tiempo más corto en el que se alcanza la máxima adsorción de solutos. La cinética de adsorción puede representarse mediante una curva que refleja cómo varía la capacidad de adsorción de metales a lo largo del tiempo. Este comportamiento depende de diversos factores, como las propiedades del adsorbente y el adsorbato, así como las interacciones entre ambos. En este sentido, Einollahi et al. (2018) destacan que las curvas cinéticas se ven influenciadas por estos elementos.

- Modelo cinético de pseudo-primer orden

La tabla 15 muestra los resultados experimentales obtenidos del modelo cinético de pseudo-primer orden aplicado a la adsorción de Cd(II) y Pb(II). Esta tabla detalla los tiempos de contacto, las concentraciones iniciales (C_0) y los valores calculados de $\ln(q_e - q_t)$; la dosis de óxido de grafeno utilizada en los experimentos fue de 100 mg. Estos datos sirvieron para elaborar las gráficas correspondientes al modelo de pseudo-primer orden, mostradas en la figura 13, donde se utilizó el tiempo en el eje “X” y el $\ln(q_e - q_t)$ en el eje “Y”.

Tabla 15.

Resultados para el modelo de pseudo-primer orden para el Cd(II) y Pb(II).

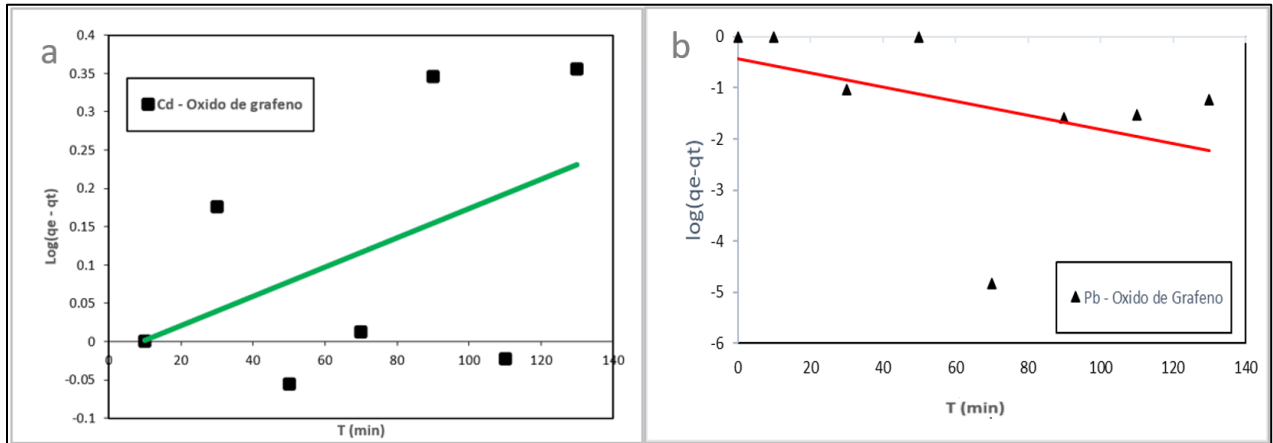
Tiempo (min)	C _o (mg/L)	Cd (II)		Pb (II)	
		C _e (mg/L)	Ln (q _e - q _t)	C _e (mg/L)	Ln (q _e - q _t)
10	100	55.90	*	8.05	*
30	100	57.40	0.17	9.31	-1.02
50	100	56.78	-0.05	8.78	*
70	100	56.93	0.01	8.96	-4.82
90	100	58.12	0.34	9.16	-1.59
110	100	56.85	-0.02	9.17	-1.52
130	100	58.17	0.35	9.25	-1.22

Nota: La tabla presenta los resultados para el modelo cinético de pseudo primer orden y segundo orden, (*) Esto demuestra que el cálculo del logaritmo no puede efectuarse, ya que dicho valor no está definido para números negativos en el conjunto de los reales.

Los resultados experimentales se analizaron mediante el modelo cinético de pseudo-primer orden, como se ilustra en la figura 13. Los parámetros correspondientes a este modelo están detallados en la tabla 16, donde se observa que para el Cd(II) y Pb(II) el ajuste del modelo de pseudo-primer orden no fue satisfactorio, reflejado en los valores de R² de 0.22 y 0.17, respectivamente. Esto indica que el modelo no se ajusta adecuadamente a los datos experimentales, debido a la elevada disponibilidad de sitios activos en la superficie del adsorbente (T. Gao et al., 2017). Además, la baja correlación sugiere que este modelo no describe correctamente el mecanismo de adsorción predominante en el sistema (Azam et al., 2024). Esto podría deberse a que las interacciones químicas entre el adsorbente y el adsorbato son significativas, mientras que el modelo de pseudo-primer orden se basa más en procesos controlados por interacciones físicas débiles (Ramón et al., 2019).

Figura 13.

Representación del modelo cinético de pseudo-primer orden.



Nota: La figura muestra: (a) representación del modelo cinético de pseudo-primer orden para cadmio (II); b) representación del modelo cinético de pseudo-primer orden para plomo (II).

Tabla 16.

Resultados de los parámetros de los modelos cinéticos pseudo-primer orden.

Modelo cinético	Parámetros	Metales	
		Cadmio (II)	Plomo (II)
Pseudo-primer orden	q_c (mg/g)	0.9822	91.043
	K_1	0.0019	0.014
	R^2	0.2201	0.17

Nota: La tabla presenta los resultados de los parámetros del modelo cinético de pseudo-primer orden para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en Oxido de grafeno.

- Modelo cinético de pseudo-segundo orden

La tabla 17 muestra los resultados experimentales del modelo cinético de pseudo-segundo orden aplicado a la adsorción de Cd(II) y Pb(II), los cuales se emplearon para la elaboración de las gráficas correspondientes, presentadas en la figura 14, donde se utilizó el tiempo en el eje “X” y t/q_t en el eje “Y”.

Tabla 17.*Resultados para el modelo de pseudo-segundo orden.*

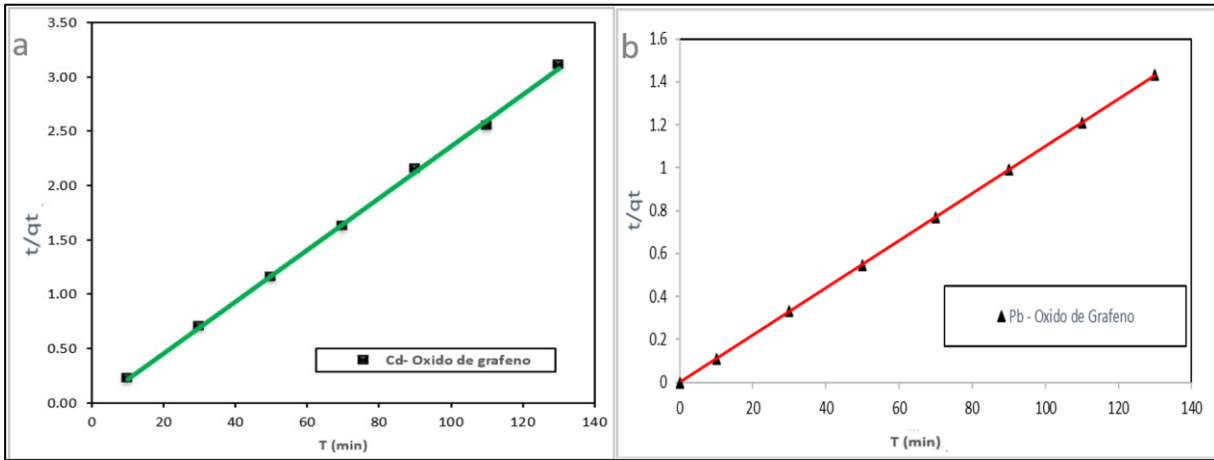
Tiempo (min)	C _o (mg/L)	Cd (II)		Pb (II)	
		C _e (mg/L)	t/q _t	C _e (mg/L)	t/q _t
10	100	55.90	0.22	8.05	0.11
30	100	57.40	0.70	9.31	0.33
50	100	56.78	1.15	8.78	0.55
70	100	56.93	1.62	8.96	0.77
90	100	58.12	2.14	9.16	0.99
110	100	56.85	2.54	9.17	1.21
130	100	58.17	3.10	9.25	1.43

Nota: La tabla presenta los resultados de los parámetros del modelo cinético de pseudo-segundo orden para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en Oxido de grafeno.

Los resultados experimentales fueron interpretados utilizando el modelo cinético de pseudo-segundo orden, tal como se muestra en la figura 14; los parámetros correspondientes a este modelo están detallados en la tabla 18. El valor R² de 0.999 para ambos metales, indica que el modelo describe con precisión la cinética del proceso. Así mismo, se reportó constantes de adsorción k₂ para Cd(II) y Pb(II) de 0.03 y 0.11 g.mg⁻¹.min⁻¹ respectivamente, lo que sugiere que el proceso de adsorción está controlado predominantemente por la cantidad de sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente y la alta afinidad química entre el adsorbato y el adsorbente (Peng et al., 2017). Este modelo considera que los sitios activos son abundantes y participan de manera eficiente en la captura del contaminante. Asimismo, la naturaleza de las interacciones químicas, como la formación de enlaces específicos entre los grupos funcionales del óxido de grafeno y las moléculas adsorbidas, refuerza el buen ajuste del modelo (Kong et al., 2020). Estos valores son consistentes con los reportados en estudios previos, lo que indica que la adsorción de Cd(II) y Pb(II) se ajusta mejor al modelo de pseudo-segundo orden (Musielak et al., 2019). Del mismo modo, el óxido de grafeno mostró una mayor afinidad por los iones Pb(II), lo que concuerda con otros trabajos (Bao et al., 2020).

Figura 14.

Modelo cinético de pseudo-segundo orden para Cd y Pb.



Nota: La figura presenta: a) *Modelo cinético de pseudo-segundo orden para Cd(II)*, b) *Modelo cinético de pseudo-segundo orden para Pb(II)*.

Tabla 18.

Resultados de los parámetros de los modelos cinéticos pseudo-primer orden.

Modelo cinético	Parámetros	Metales	
		Cd (II)	Pb (II)
pseudo segundo orden	q_e (mg/g)	42.02	90.90
	K_2	0.03	0.11
	R^2	0.999	0.999

Nota: Esta tabla muestra los resultados de los parámetros de los modelos cinéticos pseudo-primer orden para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en Oxido de grafeno.

- Capacidad de adsorción respecto al tiempo

La tabla 19 y la figura 15 muestran la relación entre el tiempo y la capacidad de adsorción. Se alcanzó una capacidad de 44,10 mg/g para Cd(II) y de 91,95 mg/g para Pb(II). En comparación, Contreras (2015) reportó capacidades de adsorción de 49.92 mg/g para el Pb(II) y 49.95 mg/g para el Cd(II) utilizando concentraciones menores de óxido de grafeno. Estas diferencias podrían atribuirse a las variaciones en las condiciones experimentales, particularmente en la cantidad de óxido de grafeno empleada, lo que resalta la importancia de optimizar esta variable en futuros estudios.

Ambos metales presentan una adsorción rápida durante los primeros minutos del experimento, estabilizándose entre los 50 y 70 minutos. Este comportamiento es característico de los sistemas en los que el proceso de adsorción está influenciado por interacciones electrostáticas y químicas entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, facilitadas por la abundancia de sitios activos disponibles debido a la alta hidrofiliicidad del óxido de grafeno (Solic et al., 2021). Mahmoudi et al. (2020) señalan que la adsorción de metales como Cd(II) y Pb(II) sobre el óxido de grafeno ocurre rápidamente, alcanzando el equilibrio en los primeros 50 minutos del proceso.

Tabla 19.

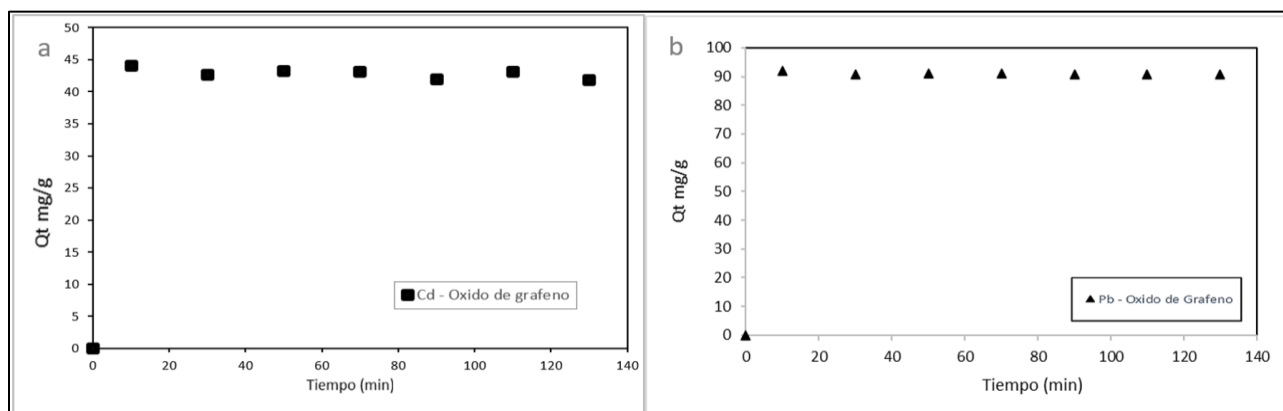
Resultado de capacidades de adsorción (Q_t) para Cd(II) y Pb(II)

Tiempo (min)	Cd (II)	Pb (II)
	Q_t (mg/g)	Q_t (mg/g)
10	44.10	91.95
30	42.60	90.69
50	43.22	91.22
70	43.07	91.04
90	41.88	90.84
110	43.15	90.83
130	41.83	90.75

Nota: Esta tabla muestra las capacidades de adsorción para el cadmio y plomo en diferentes tiempos de contacto.

Figura 15.

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción.



Nota: La figura presenta: a) *Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción del OG para Cd(II); b) Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción del OG para Pb(II).*

4.3.2. Isotermas de adsorción

Para intentar determinar la manera en que el adsorbente (OG) interactuaba con el adsorbato, se implementó el modelado de isotermas, utilizando los modelos de Langmuir y Freundlich. La elección de estas isotermas se debió a que son las más utilizadas y relevantes para describir la adsorción de iones metálicos sobre adsorbentes carbonosos.

- Isoterma de Langmuir

La tabla 20 muestra los resultados experimentales obtenidos para la isoterma de Langmuir, aplicada a la adsorción de Cd(II) y Pb(II). Esta tabla incluye las concentraciones iniciales de las soluciones para ambos metales (C_0), las concentraciones en equilibrio (C_e), la capacidad de adsorción (q_e), los valores calculados de $1/C_e$ y $1/q_e$, que se emplearon para construir las gráficas correspondientes a la isoterma de Langmuir, mostradas en la figura 16, donde $1/q_e$ se muestra en el eje “Y” y $1/C_e$ en el eje “X”.

Tabla 20.

Resultados para el modelo de Langmuir de metales Cd(II) y Pb(II).

C_0 (mg/L)	Cd (II)				Pb (II)			
	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$
25	14.27	10.73	0.070	0.093	1.27	23.74	0.791	0.042
50	28.68	21.32	0.035	0.047	4.03	45.97	0.248	0.022
100	57.13	42.87	0.018	0.023	8.97	91.03	0.112	0.011
150	82.56	67.44	0.012	0.015	14.46	135.54	0.069	0.007
200	108.8	91.2	0.009	0.011	20.52	179.48	0.049	0.006
250	128.6	121.4	0.008	0.008	22.44	227.56	0.045	0.004
300	148.1	151.9	0.007	0.007	26.25	273.75	0.038	0.004

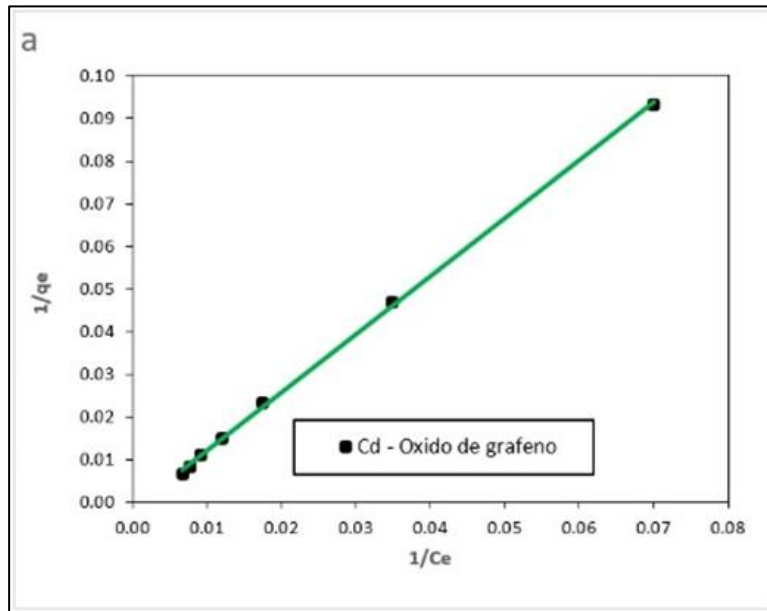
Nota: Esta tabla presenta los resultados obtenidos para la isoterma de Langmuir de cadmio y plomo, usando como material adsorbente oxido de grafeno.

Los parámetros para el Cd(II) mostraron valores negativos, tal como se observa en la tabla 20; esto sugiere que la adsorción no sigue las premisas fundamentales del modelo de Langmuir (Mokoena & Mofokeng, 2024). En primer lugar, la adsorción podría no haberse producido en una monocapa,

dado que la superficie del adsorbente no presenta una estructura homogénea ni ejerce fuerzas uniformes sobre el adsorbato. Los grupos funcionales oxigenados del óxido de grafeno (OG) presentan un carácter dipolar fuerte, lo que atrae a los iones de cadmio inicialmente por afinidad química, seguido de atracción electrostática. Además, la presencia de diversos grupos funcionales implica fuerzas de atracción de diferente intensidad. Asimismo, las interacciones laterales entre moléculas adsorbidas podrían deberse a la formación de distintos compuestos (Ahmed et al., 2022).

Figura 16.

Isotermas de Langmuir para Cd(II)



Nota: En la figura se observa una alta evaluación lineal; sin embargo, como se explicó previamente, los datos obtenidos pueden ser cuestionables.

Tabla 21.

Parámetros para la isoterma de Langmuir para el Cd(II).

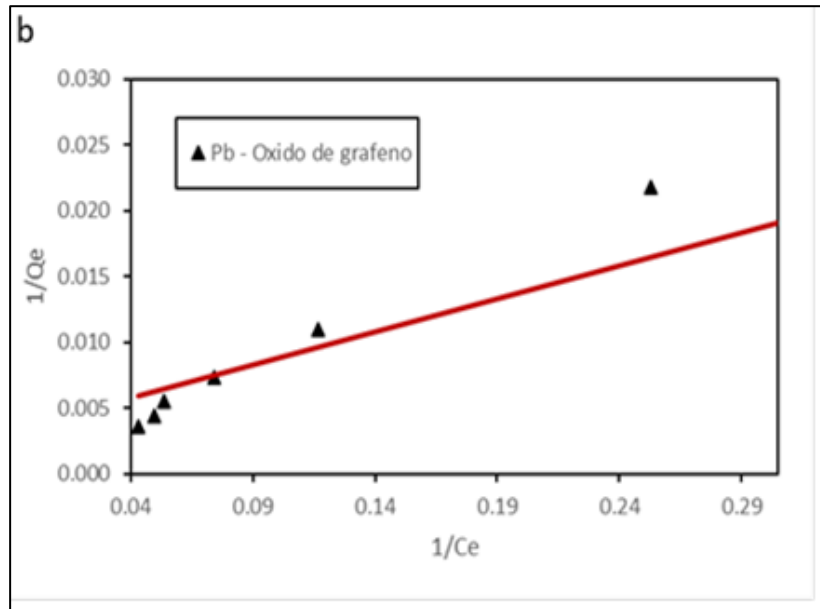
Adsorbente	Isoterma de Langmuir Cadmio (II)			
	Q_{\max} (mg/g)	KL	R^2	RL
Óxido de grafeno	- 588.24	-801.82	0.99	-1.23×10^5

Nota: Esta tabla presenta los parámetros obtenidos para la isoterma de Langmuir para el cadmio.

Para el Pb(II), los parámetros obtenidos en la tabla 21 y figura 17 reportan que q_{\max} (mg/g) indica la cantidad máxima de Pb(II) que puede ser adsorbida por unidad de masa de óxido de grafeno. Por otro lado, KL (L/mg) representa la constante de equilibrio de Langmuir. En este caso, el valor de q_{\max} para el Pb(II) fue de 19.92 mg/g, lo cual destaca la alta capacidad de adsorción del óxido de grafeno para los iones de Pb(II). Además, el parámetro de separación RL indica la favorabilidad del proceso de adsorción (Robati et al., 2016). Se observa que el valor de RL se encuentra entre 0 y 1, lo que indica que la adsorción de Pb(II) resulta favorable.

Figura 17.

Isotermas de Langmuir para Pb(II).



Nota: En la figura se presenta la isoterma de Langmuir para el plomo en la adsorción con óxido de grafeno.

Con el propósito de evaluar las características de equilibrio en la adsorción de Cd(II) y Pb(II) sobre la superficie del óxido de grafeno (OG), se empleó el modelo de Langmuir, cuyos resultados se presentan en la tabla 22.

Tabla 22.

Parámetros obtenidos de Langmuir para Pb(II).

Adsorbente	Isoterma de Langmuir Plomo(II)			
	Q_{max} (mg/g)	KL	R ²	RL
Óxido de grafeno	19.92	12.55	0.96	0.001

Nota: Esta tabla presenta los parámetros obtenidos para la isoterma de Langmuir para el plomo.

En el estudio de Chen et al. (2020), obtuvieron resultados similares para la adsorción de Pb(II) y Cd(II) con R² de 0.97 y 0.99, respectivamente; esto podría deberse a que las condiciones experimentales, como la concentración inicial de los iones metálicos y la cantidad de adsorbente, favorecieron un proceso de adsorción homogéneo con saturación en sitios específicos, características propias del modelo de Langmuir. Sin embargo, en nuestro caso, aunque las correlaciones R² son altas y cercanas a 1, nuestros parámetros adicionales presentan valores negativos, lo que sugiere que el proceso de adsorción no sigue un patrón homogéneo, sino uno más complejo que involucra interacciones químicas y físicas heterogéneas.

- Isoterma de Freundlich

En la tabla 23 se presentan los resultados experimentales obtenidos para la isoterma de Freundlich, aplicada a la adsorción de Cd(II) y Pb(II). Esta tabla incluye las concentraciones iniciales de las soluciones para ambos metales (C₀), las concentraciones en equilibrio (C_e), la capacidad de adsorción (q_e); los valores calculados de 1/C_e y 1/Q_e se emplearon para construir las gráficas correspondientes a la isoterma de Langmuir, mostradas en la figura 18, donde Ln C_e se muestra en el eje “Y” y Ln q_e en el eje “X”.

Tabla 23.

Resultados para el modelo de Freundlich de metales Cd(II) y Pb(II).

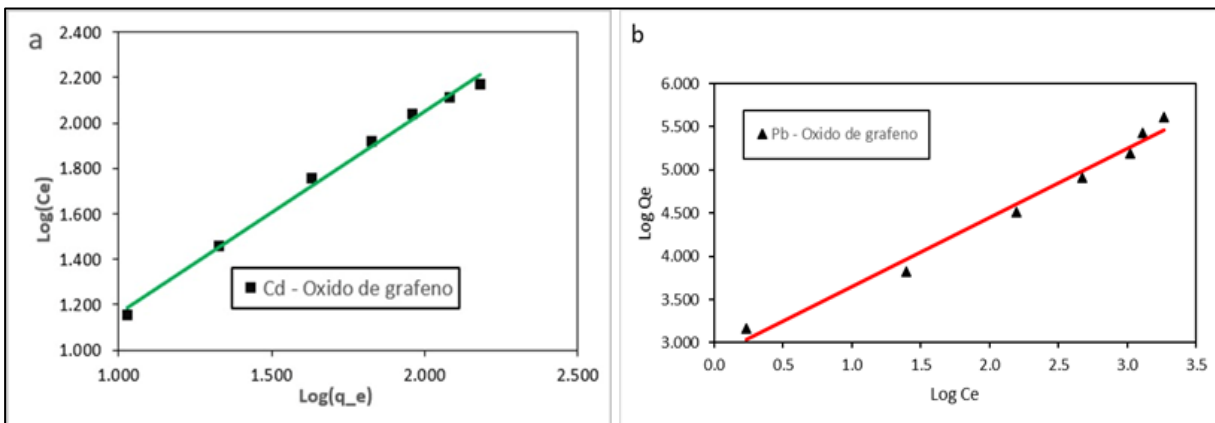
C_o (mg/L)	Cd (II)				Pb (II)			
	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\ln q_e$	$\ln C_e$	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\ln q_e$	$\ln C_e$
25	14.27	10.73	1.031	1.154	1.27	23.74	3.167	0.235
50	28.68	21.32	1.329	1.458	4.03	45.97	3.828	1.395
100	57.13	42.87	1.632	1.757	8.97	91.03	4.511	2.193
150	82.56	67.44	1.829	1.917	14.46	135.54	4.909	2.671
200	108.8	91.2	1.960	2.037	20.52	179.48	5.190	3.021
250	128.6	121.4	2.084	2.109	22.44	227.56	5.427	3.111
300	148.1	151.9	2.182	2.171	26.25	273.75	5.612	3.268

Nota: Esta tabla presenta los resultados obtenidos para la isoterma de Freundlich para cadmio y plomo.

Para evaluar las características de equilibrio en la adsorción de Cd(II) y Pb(II) sobre la superficie del óxido de grafeno (OG), se aplicó el modelo de Freundlich, cuyos resultados se ilustran en la figura 18.

Figura 18.

Isotermas de Freundlich para Cd y Pb.



Nota: En la figura se presenta: a) Isotermas de Freundlich para Cd(II), b) Isotermas de Freundlich para Pb(II).

En la tabla 24 se presentan los resultados obtenidos del análisis. El ajuste al modelo de Freundlich fue altamente satisfactorio, con un gradiente positivo y valores de correlación R^2 de 0.994 para el Cd(II) y 0.982 para el Pb(II). Estos valores indican que el modelo describe con precisión la adsorción de estos iones sobre la superficie del óxido de grafeno (OG). A partir de estos datos, se confirma que el proceso de adsorción involucra tanto mecanismos químicos como físicos. Los grupos funcionales oxigenados en el OG podrían atraer iones de cadmio y plomo mediante enlaces químicos, mientras que la superficie del OG facilita una atracción electrostática hacia el adsorbato (Gao, 2015). Estas áreas de adsorción física y química, conocidas como sitios de adsorción, representan zonas de capacidad óptima sobre la superficie del OG. Además, esta isoterma confirma que la adsorción ocurrió en una superficie heterogénea de OG, con un mecanismo multicapa (Saberri et al., 2018).

En cuanto a los parámetros obtenidos de “n”, fue de 0.895 para el Cd(II) y de 1.250 para el Pb(II), ambos cercanos al rango de 1 a 10, lo que sugiere que el tipo dominante de adsorción fue la quimisorción. Esto concuerda con la alta reactividad de los grupos funcionales oxigenados, atribuida a la elevada electronegatividad del oxígeno. En conclusión, la isoterma de Freundlich logró describir con claridad el proceso de adsorción de iones Cd(II) y Pb(II) en el adsorbente OG (Bian et al., 2015).

Tabla 24.

Parámetros de Freundlich para Cd(II) y Pb(II).

Adsorbente	Isoterma de Freundlich Cadmio(II)			Isoterma de Freundlich Plomo(II)		
	KF (mg/g)	n	R^2	KF (mg/g)	n	R^2
Óxido de grafeno	0.216	0.895	0.99	17.24	1.250	0.98

Nota: Esta tabla presenta los resultados obtenidos para la isoterma de Freundlich para el cadmio y plomo.

De manera similar, Shakil et al. (2024) reportó valores de R^2 de 0.99 para el Pb(II) y 0.98 para el Cd(II). Estos resultados coinciden con los obtenidos y confirman que el modelo de Freundlich describe con mayor eficacia la adsorción en estos casos. Además, los resultados destacan que este modelo es especialmente adecuado para procesos de quimisorción y adsorción heterogénea, lo

que refuerza su aplicabilidad en sistemas donde las interacciones químicas y las superficies heterogéneas desempeñan un papel predominante.

4.4. Análisis estadístico

La investigación empleó un diseño factorial 3^2 , que considera dos factores: dosis de óxido de grafeno (OG) y tiempo de contacto, cada uno con tres niveles (bajo, medio y alto). Esto genera un total de nueve combinaciones o tratamientos experimentales (tabla 25). Cada tratamiento se replicó dos veces, obteniéndose así 18 tratamientos por metal (Cd(II) y Pb(II)), lo que da un total de 36 tratamientos en el estudio. Los datos fueron procesados y analizados utilizando el software estadístico Minitab, versión 0.3.1.

Tabla 25.

Variables independientes y variable dependiente.

Factores	Niveles	Valores	Variable de respuesta
Dosis de OG (mg)	3	10, 20, 30	Eficiencia % adsorción de iones de Cd (II) – Pb (II)
Tiempo contacto (min)	3	30, 60, 90	

Nota: La tabla presenta los factores de dosis y tiempo de contacto, así como la variable respuesta.

El modelo estadístico para el diseño factorial 3^2 se muestra en la ecuación (6).

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk} \dots (6)$$

Donde: y_{ijk} es la eficiencia (%) de adsorción de iones de Cd(II) y Pb(II), μ es la media global, α_i es el efecto principal del factor dosis de óxido de grafeno (OG), que indica cómo los niveles de dosis (10, 20, 30 mg) afectan la eficiencia de adsorción, independientemente del tiempo de contacto. β_j representa el efecto principal del factor tiempo de contacto, que muestra cómo los niveles de tiempo (30, 60, 90 minutos) influyen en la eficiencia de adsorción, independientemente de la dosis de OG. $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de interacción entre los factores dosis y tiempo, que refleja cómo la combinación de diferentes niveles de ambos factores afecta la eficiencia de adsorción. Finalmente, e_{ijk} es el término de error aleatorio, que representa las desviaciones no explicadas por el modelo.

En la tabla 26 se observan las 9 combinaciones de niveles de cada factor y de estas combinaciones se realizarán 2 réplicas, que nos dan un total de 18 tratamientos para cada metal.

Tabla 26.

Estructura de combinaciones.

	Niveles	Factor B (tiempo)			N.º réplicas
		Bajo (0)	Medio (1)	Alto (2)	
Factor A (Adsorbente)	Bajo (0)	00	01	02	2 réplicas
	Medio (1)	10	11	12	
	Alto (2)	20	21	22	

Nota: Esta tabla presenta la estructura de combinación del diseño experimental

4.4.1. Prueba de normalidad

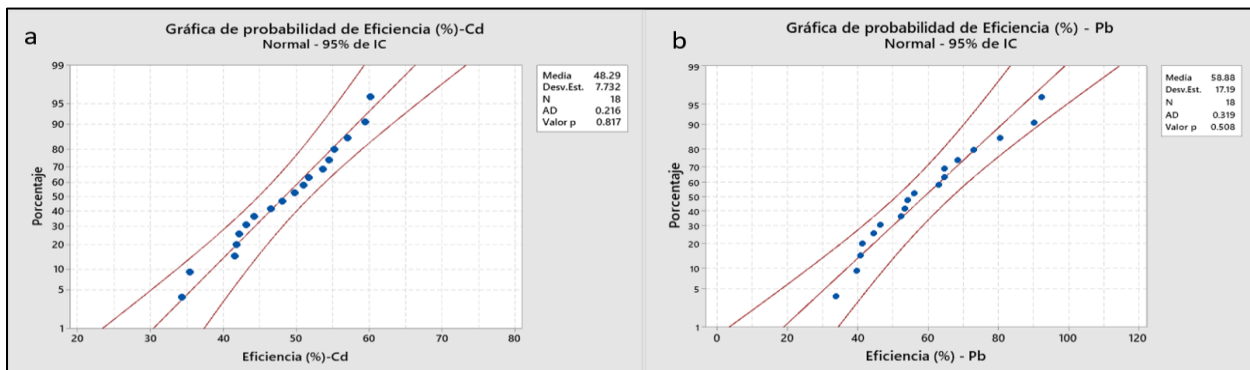
Se planteó una hipótesis para determinar si los resultados de la tabla 13 son normales

- Hipótesis alterna (H_1): Los datos NO presentan una distribución normal.
- Hipótesis nula (H_0): Los datos presentan una distribución normal.

Para la figura 19 a y b, al analizar los gráficos de distribución normal ajustada, se observó que los datos están relativamente cerca de la línea de ajuste para ambos metales. Los valores p obtenidos fueron 0.817 para Cd(II) y 0.508 para Pb(II), ambos superiores al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$). No se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que sugiere que los datos son normales.

Figura 19.

Distribución normal para datos de Cd y Pb.



Nota: En la figura se muestra: a) *Distribución normal para datos para Cd(II)*, b) *Distribución normal para datos para Pb(II)*.

4.4.2. Varianza constante

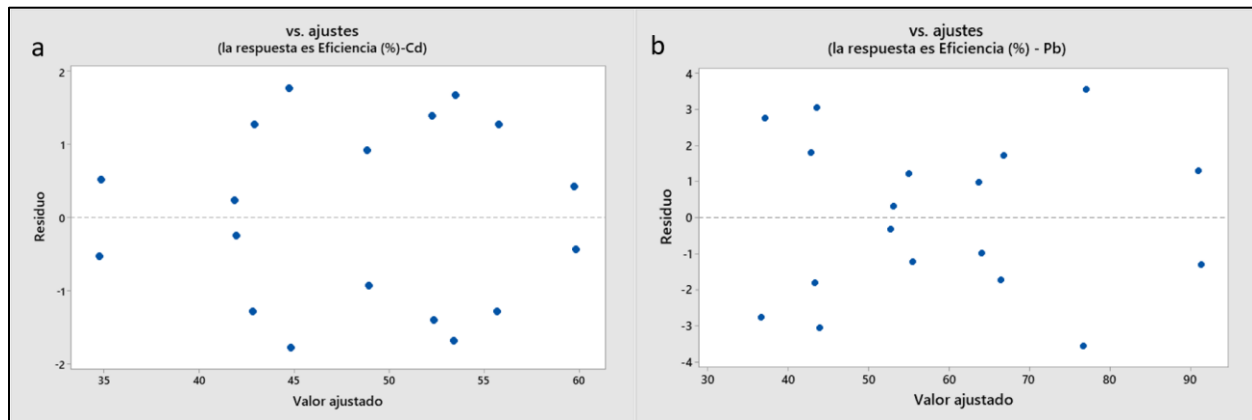
En ambos casos, se establecieron las siguientes hipótesis con el propósito de verificar la homogeneidad de varianzas:

- Hipótesis nula (H_0): Las varianzas de los residuos son homogéneas.
- Hipótesis alterna (H_1): Las varianzas de los residuos no son homogéneas.

En la figura 20, a y b respaldan la aceptación de la hipótesis nula (H_0), indicando que las varianzas son constantes para ambos metales. Este resultado valida el uso del análisis de varianza (ANOVA) y garantiza que las conclusiones obtenidas del modelo estadístico son confiables.

Figura 20.

Varianza constante para Cd y Pb.



Nota: En la figura se presenta: a) Varianza constante para Cd(II), b) Varianza constante para Pb(II).

4.4.3. Prueba de independencia

En el supuesto de independencia se tiene dos hipótesis:

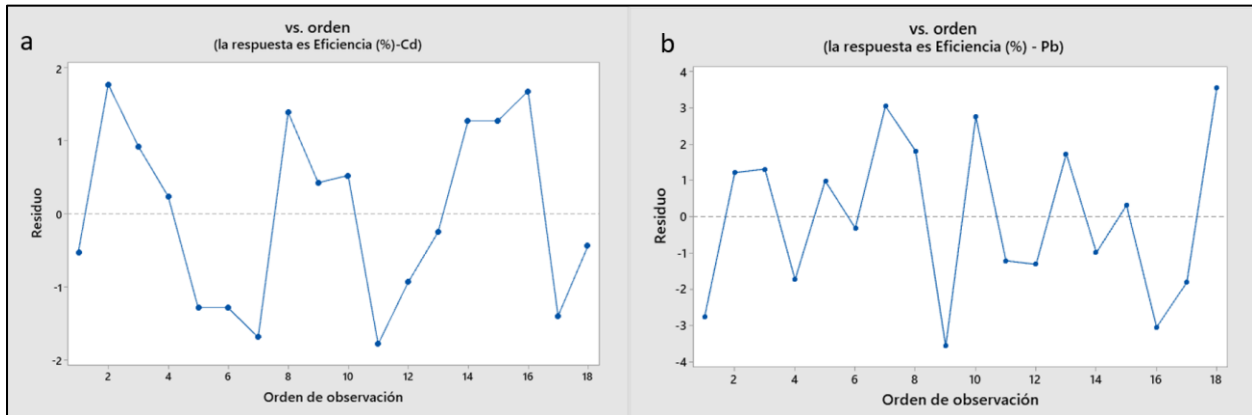
- Hipótesis nula (H_0): = los datos son independientes.
- Hipótesis alterna (H_1): = los datos no son independientes.

En la figura 21 a y b, los residuos analizados no muestran tendencias ni patrones en el orden cronológico, lo que indica que son independientes. No se observan evidencias de correlación ni patrones sistemáticos en los datos. Los puntos se distribuyen de manera aleatoria alrededor de la línea central en la gráfica de residuos. Esto confirma que el modelo satisface el supuesto de independencia de los errores.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0), indicando que los datos son independientes con un nivel de confianza del 95 %. Este resultado respalda la validez del modelo estadístico y asegura que los análisis posteriores no están sesgados por dependencias entre observaciones.

Figura 21.

Distribución normal para datos de Cd y Pb.



Nota: En la figura se presenta: a) Distribución normal para datos para Cd(II); b) Distribución normal para datos para Pb(II).

4.4.4. Análisis de varianza

Después de realizar la comprobación de los supuestos, se continúa con los análisis de diseño experimental. Se presentan las hipótesis para probar que los diferentes tiempos de contacto y las dosis del óxido de grafeno afectan la eficiencia de adsorción de iones de Cd(II) y Pb(II); se muestran en las tablas 27 y 28, respectivamente.

Las hipótesis son:

- Hipótesis nula H_0 : $\tau_1=\tau_2=\tau_3=\tau_4$
- Hipótesis alterna H_1 : $\tau_i \neq 0$, por lo menos una media es diferente.

$\alpha = 0.05$, nivel de significancia

Tabla 27.*Análisis de varianza para Cd(II)*

Fuente	GL	SC Ajuste.	CM Ajuste.	Valor F	Valor p
Modelo	9	991.08	110.120	34.94	0.000
Bloques	1	0.04	0.039	0.01	0.914
Lineal	4	892.24	223.060	70.77	0.000
Dosis de OG	2	476.20	238.099	75.54	0.000
Tiempo contacto	2	416.04	208.020	66.00	0.000
Interacciones de 2 términos	4	98.80	24.700	7.84	0.007
Dosis de OG*Tiempo contacto	4	98.80	24.700	7.84	0.007
Error	8	25.21	3.152		
Total	17	1016.29			
$R^2 = 97.52\%$		R^2 (aj) =94.73%			

Nota: Esta tabla muestra el análisis de varianza para el cadmio.

En el análisis de varianza para Cd(II) (Tabla 27), los valores p tanto del modelo lineal como de las interacciones de dos términos son menores que 0.05, lo que indica que estos efectos son estadísticamente significativos al nivel de significancia (α) de 0.05. Esto permite concluir que existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, lo que indica que tanto los tres tiempos de contacto como las dosis del adsorbente influyen de manera significativa en la eficiencia de adsorción de los iones Cd(II). Además, el coeficiente de determinación ($R^2= 97.52\%$) y el R^2 ajustado (94.73%) indican que el modelo explica un alto porcentaje de la variabilidad observada en los datos.

De manera similar, en el análisis de varianza para Pb(II) (Tabla 28), los valores p del modelo lineal y las interacciones de dos términos también son menores que 0.05. Esto confirma que los tiempos de contacto y las dosis del adsorbente influyen de manera significativa en la adsorción de los iones Pb(II). El coeficiente de determinación ($R^2=99.05\%$) y el R^2 ajustado (97.98%) reflejan que el modelo describe con gran precisión la variabilidad en los datos.

Tabla 28.*Análisis de varianza para Pb(II).*

Fuente	GL	SC Ajuste.	MC Ajuste.	Valor F	Valor p
Modelo	9	4945.35	549.48	54.89	0.000
Bloques	1	0.76	0.76	0.08	0.789
Lineal	4	2204.66	551.16	55.06	0.000
Dosis de OG	2	172.22	86.11	8.60	0.010
Tiempo contacto	2	2032.44	1016.22	101.52	0.000
Interacciones de 2 términos	4	2739.92	684.98	68.43	0.000
Dosis de OG*Tiempo contacto	4	2739.92	684.98	68.43	0.000
Error	8	80.08	10.01		
Total	17	5025.42			
$R^2= 98.41\%$		$R^2 (aj) =96.61\%$			

Nota: Esta tabla muestra el análisis de varianza para el plomo.

Previo al ANOVA, se evaluaron los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia, confirmándose que todos fueron satisfechos adecuadamente. Esto permitió aplicar un diseño factorial 3^2 , correspondiente a un ANOVA de dos vías con interacción, para evaluar simultáneamente el efecto de la dosis de óxido de grafeno (OG) y el tiempo de contacto sobre la eficiencia de adsorción de los iones Cd(II) y Pb(II). Este modelo estadístico permite identificar no solo los efectos principales de cada factor, sino también la posible interacción dosis por tiempo, que indica si los factores actúan de forma combinada o independiente.

El análisis mostró que ambos factores ejercen un efecto significativo sobre la eficiencia de adsorción ($p < 0.05$), evidenciando que tanto la dosis de OG como el tiempo de contacto influyen directamente en la remoción de los metales. De igual modo, la interacción entre el tiempo y la dosis resultó estadísticamente significativa, lo que demuestra que la influencia del tiempo está condicionada por el nivel de dosis, reflejando un comportamiento no aditivo entre los factores.

En el caso del Cd(II), el ANOVA reveló valores F de 75.54 para la dosis y 66.00 para el tiempo, demostrando que la dosis es el factor más influyente en la eficiencia de adsorción, aunque el tiempo también tiene un efecto considerable. La interacción dosis por tiempo ($F = 7.84$, $p = 0.007$) sugiere que la combinación de ambos factores mejora la capacidad adsorbente del material. Esto se explica porque al aumentar la dosis de OG, se incrementa la cantidad de sitios activos disponibles para fijar iones Cd(II), mientras que un mayor tiempo de contacto permite alcanzar un equilibrio de adsorción más completo.

En el caso del Pb(II), los resultados del ANOVA mostraron que el tiempo de contacto fue el factor con mayor influencia ($F = 101.52$), seguido por la dosis ($F = 8.60$) y la interacción ($F = 68.43$). Este comportamiento indica que la eficiencia de adsorción del Pb(II) depende en mayor medida del tiempo de exposición entre el adsorbente y el efluente, lo que evidencia un proceso de adsorción controlado cinéticamente. A diferencia del Cd(II), el Pb(II) mostró un efecto más marcado de la interacción, lo que sugiere que los tiempos prolongados favorecen su remoción solo bajo combinaciones específicas de dosis.

Los coeficientes de determinación ($R^2 = 97.52\%$ para Cd(II) y $R^2 = 98.41\%$ para Pb(II)) demuestran el excelente ajuste del modelo, indicando que las variables dosis y tiempo explican más del 97% de la variabilidad total observada. En términos de contribución relativa, para el Cd(II) la dosis explica aproximadamente el 47% de la variación total, el tiempo un 43%, y la interacción el 10% restante. En el Pb(II), el tiempo explica alrededor del 60% de la variación, la interacción un 35%, y la dosis el 5% restante. Estas proporciones evidencian la influencia diferencial de los factores según el tipo de metal.

Finalmente, las pruebas post hoc de comparación múltiple (Tukey HSD, $\alpha = 0.05$) confirmaron diferencias significativas entre los niveles de dosis y tiempo. En Cd(II), las diferencias más notorias se observaron entre las dosis de 10 mg y 30 mg, mientras que en Pb(II) se presentaron entre los tiempos de 30 min y 90 min, reforzando las tendencias detectadas en el ANOVA.

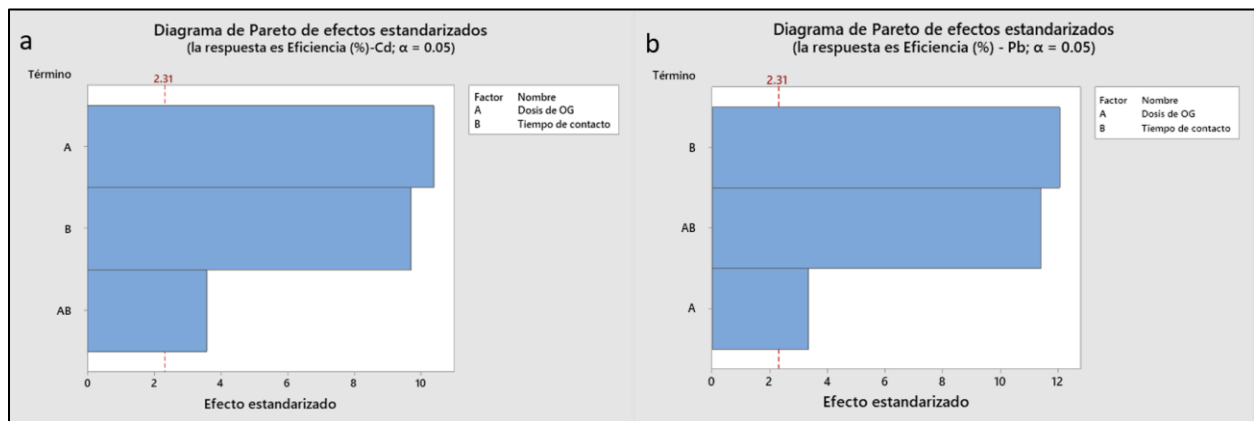
En conjunto, los resultados del ANOVA factorial 3^2 confirman que tanto la dosis como el tiempo de contacto tienen efectos significativos e interdependientes sobre la eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II). El óxido de grafeno demostró ser un material altamente eficiente y estadísticamente confiable para la remoción de estos metales pesados, validando su potencial aplicación en el tratamiento de efluentes contaminados. La significancia estadística de la interacción entre los factores demuestra que la adsorción no se comporta de manera lineal, sino que está influenciada por la interacción simultánea de los niveles de tiempo y dosis, respaldando la pertinencia del diseño factorial 3^2 empleado en este estudio.

4.4.5. Diagrama de Pareto

En la figura 22 a) para Cd(II), se observa que tanto los efectos principales (dosis y tiempo) como la interacción entre ellos contribuyen significativamente a la variabilidad en la eficiencia de adsorción. La dosis de OG es el factor más relevante. Asimismo, para Pb(II), la interacción entre dosis y tiempo tiene el mayor efecto, lo que indica que optimizar ambos factores simultáneamente es esencial para maximizar la eficiencia de adsorción de iones, como se representa en la figura 22 b).

Figura 22.

Diagrama de Pareto para Cd y Pb.



Nota: En la figura se presenta: a) Diagrama de Pareto para Cd(II), b). Diagrama de Pareto para Pb(II).

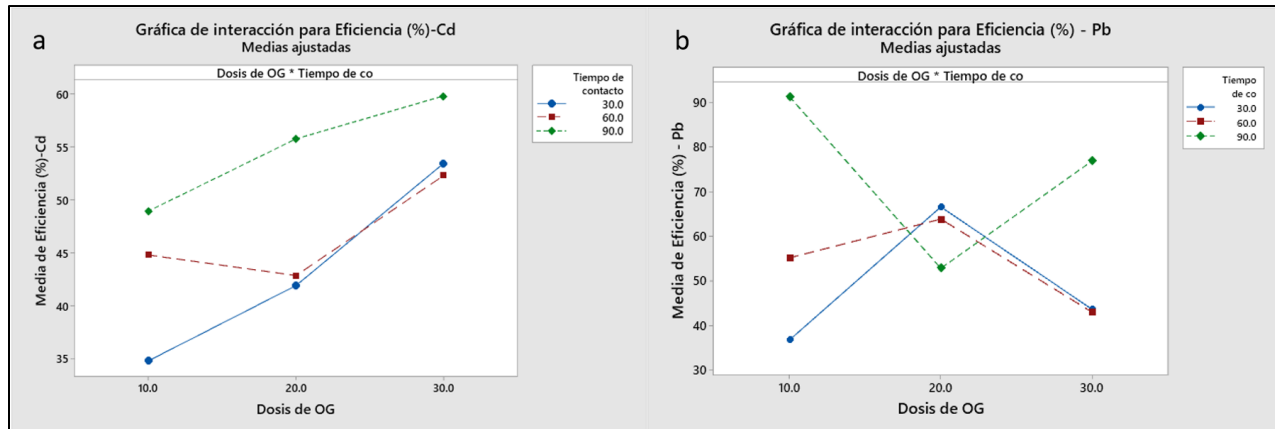
4.4.6. Análisis de la interacción para la eficiencia de adsorción de iones Cd(II) y Pb(II)

La figura 23 a) muestra cómo las variables independientes (dosis de óxido de grafeno y tiempo de contacto) influyen en la eficiencia de adsorción de iones de Cd(II). Los resultados indican que las dosis de 30 mg de óxido de grafeno, combinadas con un tiempo de contacto de 90 minutos, generan las mayores eficiencias de adsorción máxima, alcanzando valores del 60.19 %. Asimismo, para la interacción entre 30 mg y 30 minutos, alcanza una eficiencia de 51.73 %.

Por otro lado, en la figura 23 b), se observa que para el proceso de adsorción de iones de Pb(II), una dosis de 10 mg de óxido de grafeno, con tiempos de contacto de 90 minutos, logra una eficiencia de adsorción máxima del 92.31 %. Además, la combinación de 30 mg de óxido de grafeno y 90 minutos de contacto resulta en la máxima eficiencia de adsorción, alcanzando un 73.07 %.

Figura 23.

Interacción de dosis y tiempo para Cd y Pb.



Nota: La figura presenta: a) Interacción de dosis y tiempo para Cd(II); b) Interacción de dosis y tiempo para Pb(II).

Los resultados reflejan una interacción significativa entre las dosis de óxido de grafeno y el tiempo de contacto, ya que los niveles óptimos de ambos factores varían según el metal objetivo (Cd(II) o Pb(II)).

4.4.7. Gráfica de superficie 3D

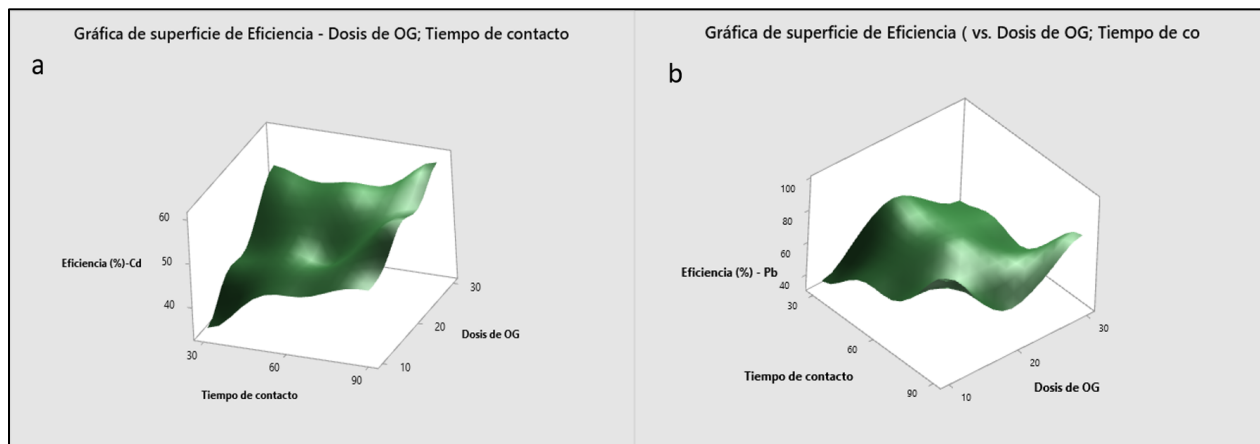
Las representaciones tridimensionales mostradas en las figuras 24a y 24b ilustran la interacción entre las variables independientes dosis de óxido de grafeno y tiempo de contacto y su efecto conjunto en la eficiencia de adsorción de los iones Cd(II) y Pb(II). La gráfica para Cd(II) (figura 24 a) evidencia la máxima eficiencia de adsorción de 60.19 %, que se logra con una dosis de 30 mg de óxido de grafeno y un tiempo de contacto de 90 minutos. La tendencia ascendente hacia este máximo sugiere que tanto el aumento de dosis como el tiempo contribuyen positivamente a la adsorción de Cd(II).

En la gráfica para Pb(II) (Figura 24 b), el punto más alto de eficiencia de 92.31 % ocurre con 10 mg de óxido de grafeno y 90 minutos de contacto. Un segundo pico significativo se observa con 30 mg de óxido de grafeno y tiempo de contacto de 90 minutos, logrando eficiencias de 73.07 %. Este comportamiento sugiere que dosis moderadas también pueden ser efectivas en ciertas condiciones.

Las gráficas permiten identificar zonas de eficiencia subóptima (valles) y cómo estas podrían estar relacionadas con combinaciones de bajo tiempo de contacto y dosis insuficientes de óxido de grafeno. Estas gráficas son herramientas clave para determinar las condiciones operativas ideales en aplicaciones industriales. Por ejemplo, si los recursos son limitados, una combinación con dosis de 20 mg y tiempo de 30 minutos podría ser más rentable para la adsorción de Pb(II), sacrificando ligeramente la eficiencia máxima; lo mismo para 10 mg y 90 minutos.

Figura 24.

Gráfica de superficie 3D para Cd y Pb.



Nota: La figura presenta: a) Gráfica de superficie 3D para Cd(II); b) Gráfica de superficie 3D para Pb(II).

Los resultados obtenidos son coherentes con investigaciones que evaluaron la adsorción de metales pesados mediante el uso de óxido de grafeno.

Lima (2021) obtuvo remociones superiores al 90 % de Cd(II) y Pb(II) empleando dosis de 0.5 a 2 g de óxido de grafeno y tiempos de contacto de 30 a 180 minutos. De igual forma, Bhardwaj et al. (2024) alcanzaron 51 % de remoción de Cd(II) y 52 % de Pb(II) en los primeros 10 minutos utilizando un óxido de grafeno funcionalizado con grupos tiol (OG-MBT).

De manera similar, Rahman y Raheem (2024) registraron una eficiencia del 95 % en la remoción de Cd(II) utilizando óxido de grafeno magnético modificado con β -ciclodextrina. Asimismo, Guo et al. (2021) reportaron la eliminación casi completa de Cd(II) en 5 minutos al aplicar un óxido de grafeno magnético (FLMOG). Por su parte, Lin et al. (2023) sintetizó óxido de grafeno reducido biofuncional (B-rOG) con el que alcanzó una eficiencia del 99.2 % de remoción de Cd(II).

En comparación, en la presente investigación se obtuvieron eficiencias máximas de 60.19 % para Cd(II) y 92.31 % para Pb(II), valores que se encuentran dentro del rango reportado por los estudios anteriores. En conjunto, los resultados experimentales coinciden con la tendencia observada en estudios previos, que evidencian la elevada eficiencia del óxido de grafeno en la adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en soluciones acuosas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El análisis de difracción de rayos X (DRX), presentó una estructura laminada con distancias interplanares de 8.16 Å y 3.33 Å. El espectro FTIR confirmó la presencia de grupos funcionales como hidroxilos (3174.50 cm^{-1}), carboxilos (1713.82 cm^{-1}), epóxidos (1614.46 cm^{-1}) y ésteres cíclicos (991.61 cm^{-1}).

La dosis óptima de óxido de grafeno y el tiempo ideal para maximizar la adsorción de los iones Cd(II) y Pb(II) fueron 30 mg y 90 minutos para Cd(II), y 10 mg y 90 minutos para Pb(II). Asimismo, se alcanzaron eficiencias máximas del 60.19% para Cd(II) y del 92.31% para Pb(II). En el caso de Pb(II), una dosis moderada de 30 mg, combinada con un tiempo de contacto de 90 minutos, también logró una eficiencia significativa del 73.07%.

El análisis cinético de la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en óxido de grafeno (OG) reveló que el modelo de pseudo-segundo orden presentó el mejor ajuste a los datos experimentales, con valores de R^2 de 0.998 para Cd(II) y 0.995 para Pb(II). Este modelo estimó capacidades máximas de adsorción de 42.02 mg/g para Cd(II) y 90.90 mg/g para Pb(II). Asimismo, el modelo de Freundlich describió con mayor precisión la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en óxido de grafeno (OG), con valores de R^2 de 0.994 para Cd(II) y 0.982 para Pb(II).

5.2. Recomendaciones

Realizar estudios adicionales sobre el óxido de grafeno utilizando técnicas como espectroscopia Raman, análisis termogravimétrico (TGA) y microscopía electrónica de barrido (SEM), para obtener un mayor detalle sobre su estructura, estabilidad térmica y morfología, lo que permitirá fortalecer los datos obtenidos.

El análisis de la influencia del pH y la temperatura en la eficiencia de adsorción de Cd(II) y Pb(II) es esencial para identificar las condiciones experimentales óptimas que permitan maximizar la remoción de estos iones metálicos.

Evaluar la capacidad del óxido de grafeno para adsorber otros contaminantes presentes en los efluentes, tales como sulfatos, carbonatos, grasas y aceites, que pertenecen a grupos orgánicos e inorgánicos, para determinar su versatilidad frente a diferentes tipos de compuestos.

Investigar metodologías alternativas al método de Hummers para la síntesis del óxido de grafeno, enfocándose en opciones que sean económicas, eficientes y adaptables a escalas mayores.

Funcionalizar el óxido de grafeno con moléculas orgánicas específicas o especies catiónicas, con el objetivo de potenciar su capacidad de adsorción y selectividad frente a iones metálicos como Cd(II) y Pb(II), incrementando la eficiencia del material en los procesos de eliminación de contaminantes.

Ampliar la evaluación a un rango más amplio de dosis y tiempos de contacto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abidin, A., Maziya, F., Susetyo, S. H., Sulistiyani, A. T., Yoneda, M., Nagaya, T., & Matsui, Y. (2025). Environmental pollution and health risks to informal workers: Exposure to heavy metals in human hair at Indonesian landfills. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2025.104685>
- Abidli, A., Huang, Y., Ben Rejeb, Z., Zaoui, A., & Park, C. B. (2022). Sustainable and efficient technologies for removal and recovery of toxic and valuable metals from wastewater: Recent progress, challenges, and future perspectives. *En Chemosphere (Vol. 292)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133102>
- Abo Markeb, A., Moral-Vico, J., Sánchez, A., & Font, X. (2023). Optimization of lead (II) removal from water and wastewater using a novel magnetic nanocomposite of aminopropyl triethoxysilane coated with carboxymethyl cellulose cross-linked with chitosan nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105022>
- Abou, S., Hu, L., Ghasemi, R., Gervais, M., Randhawa, J. K., Siril, P. F., & Remita, S. (2025). Gamma-induced one-step synthesis of reduced graphene oxide-silver nanoparticles with enhanced properties. *Materials Chemistry Frontiers*, 9(6), 976-1001. <https://doi.org/10.1039/d4qm01057d>
- Acheampong, M. A., & Lens, P. N. L. (2014). Treatment of gold mining effluent in pilot fixed bed sorption system. *Hydrometallurgy*, 141, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.10.013>
- Adel, M., Ahmed, A., Elabiad, A., & Mohamed, A. (2022). Removal of heavy metals and dyes from wastewater using graphene oxide-based nanomaterials: A critical review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100719>
- Ahmed, M. A., Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2022). Facile adsorptive removal of dyes and heavy metals from wastewaters using magnetic nanocomposite of zinc ferrite@reduced graphene oxide. *Inorganic Chemistry Communications*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109912>
- Ajith, M. P., Priyadarshini, E., & Rajamani, P. (2020). Effective and selective removal of heavy metals from industrial effluents using sustainable Si-CD conjugate based column chromatography. *Bioresource Technology*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123786>
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *En Journal of Hazardous Materials (Vol. 393)*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Aliana, G., Mattia, D., Pasquino, C., Veness, R., & Lunt, A. J. G. (2025). Carbon nanotube wires for accelerator applications. *En Materials and Design (Vol. 258)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114606>

- Alias, M., Ang, W., & Mohammad, A. (2025). Water security through next-generation surface-engineered membrane technologies for heavy metal removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 117641. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117641>
- Alvares, R. (2018). Evaluación de metales pesados en agua del río Ramis sector Crucero - San Antón y su interpretación en software. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/8864>
- Anaya, M., Morales, F., Iannacone, J., & Romero, L. (2022). Metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales: una revisión sistemática (Vol. 40).
- Apaza, E. (2018). Adsorción de plomo y cadmio con carbón activado de hueso de alpaca en aguas residuales de la laguna Espinar – Puno. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/20430/Apaza_Cruz_Eva_Roxana.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ATSDR. (2001). Resumen de Salud Pública. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. www.atsdr.cdc.gov/es
- Azam, F., Ali, S., Ahmad, F., Ahmad, S., Rasheed, A., Nawab, Y., Zafar, M., Fareed, M., & Shahwan, M. (2024). Novel waste wool fabric reinforced alginate-gum hydrogel composites for rapid and selective Pb (II) adsorption. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100601>
- Banihashemi, F., Mollakhalili-Meybodi, N., Akrami Mohajeri, F., Moshtaghi, H., Mohebat, R., Fallahzadeh, H., & Khalili Sadrabad, E. (2025). Removal of cadmium and lead from doogh and mineral water by *Lactobacillus acidophilus* and *Bacillus coagulans*. *Applied Food Research*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100874>
- Bao, S., Yang, W., Wang, Y., Yu, Y., & Sun, Y. (2020). One-pot synthesis of magnetic graphene oxide composites as an efficient and recoverable adsorbent for Cd(II) and Pb(II) removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120914>
- Bashiri, M., & Hosseini, M. (2024). Electronic Supplementary Information (ESI) A comprehensive investigation into the synthesis, characterization, and photocatalytic performance of modified graphene oxide via imino bond with ferrocene as a novel photocatalyst for thioamide synthesis.
- Bhardwaj, M., Tewari, S., Kumari, N., Bhardwaj, A., Misra, N., Shukla, S., Dwivedi, J., & Sharma, S. (2024a). Adsorption of Pb(II) and Cd(II) by functionalized graphene oxide (GO-MBT): Mechanisms, antibacterial activity, and DFT studies. *Inorganic Chemistry Communications*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112464>
- Bian, Y., Bian, Z. Y., Zhang, J. X., Ding, A. Z., Liu, S. L., & Wang, H. (2015). Effect of the oxygen-containing functional group of graphene oxide on the aqueous cadmium ions removal. *Applied Surface Science*, 329, 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.12.090>

- Bıyıkoglu, M. (2025). Innovative approaches in wastewater treatment: kinetic and isotherm investigation of dye adsorption on sulfur-modified PET fibers. *Research on Chemical Intermediates*, 51(6), 3281-3299. <https://doi.org/10.1007/s11164-025-05599-0>
- Boulanger, N., Kuzenkova, A., Iakunkov, A., Romanchuk, A., Trigub, A., Egorov, A., Bauters, S., Amidani, L., Retegan, M., Kvashnina, K., Kalmykov, S., & Talyzin, A. (2020). Enhanced Sorption of Radionuclides by Defect-Rich Graphene Oxide. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(40), 45122-45135. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c11122>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. En *Heliyon* (Vol. 6, Número 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Brousett, Magaly., Rondan, Gerby., Chirinos, Maritza., & Biamont, Ivan. (2021). Impacto de la minería en aguas superficiales de la región Puno-Perú impact of mining on surface waters of the region Puno-Perú. *Fides Et Ratio*, 21(21), 187.
- Brusko, V., Khannanov, A., Rakhmatullin, A., & Dimiev, A. (2024a). Unraveling the infrared spectrum of graphene oxide. *Carbon*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119507>
- Cano, L. E., & Flores, M. F. (2020). Determinación de los metales pesados en sedimentos del río Ramis procedentes de efluentes mineros informales, Puno. *Universidad Andina del Cusco*, 1, 1-118. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72533>
- Cao, M., Xiong, D., Yang, L., Li, S., Xie, Y., Guo, Q., Li, Z., Adams, H., Gu, J., Fan, T., Zhang, X., & Zhang, D. (2019). Ultrahigh Electrical Conductivity of Graphene Embedded in Metals. *Advanced Functional Materials*, 29(17). <https://doi.org/10.1002/adfm.201806792>
- Carolin, C., Kumar, P., Saravanan, A., Joshiba, G., & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2782-2799. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2017.05.029>
- Carrasco, J. (2025). Percepción de la contaminación por metales pesados y riesgos en la salud en la población de dos distritos en Cerro de Pasco. www.researchgate.net
- Carrion, V. (2019). Revisión sistemática de las tesis relacionadas con la determinación de metales pesados en la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos 2008-2018 (Tesis Postgrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos .
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90.
- Ccapa, L. C. (2022). Determinación de los niveles de concentración de material particulado en el área de influencia del proyecto minero Jesús 2004 tres, distrito de Ananea-2022. *Universidad Privada San Carlos*, 1, 1-142. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/443>

- Chegeni, M., Shahedi, A., Darban, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Homaei, M. (2021). Simultaneous removal of lead and cyanide from the synthetic solution and effluents of gold processing plants using electrochemical method. *Journal of Water Process Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102284>
- Chen, C., & Chen, B. (2019). Graphene oxide coated meshes with stable underwater superoleophobicity and anti-oil-fouling property for highly efficient oil/water separation. *Science of the Total Environment*, 696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133777>
- Chen, H., Meng, Y., Jia, S., Hua, W., Cheng, Y., Lu, J., & Wang, H. (2020). Graphene oxide modified waste newspaper for removal of heavy metal ions and its application in industrial wastewater. *Materials Chemistry and Physics*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122692>
- Chen, X., Qu, Z., Liu, Z., & Ren, G. (2022). Mechanism of Oxidization of Graphite to Graphene Oxide by the Hummers Method. *ACS Omega*, 7(27), 23503-23510. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01963>
- Chundu, M., Banda, K., Lyoba, C., Tembo, G., Sichingabula, H., & Nyambe, I. (2024). Modeling land use/land cover changes using quad hybrid machine learning model in Bangweulu wetland and surrounding areas, Zambia. *Environmental Challenges*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100866>
- Condori, L. (2024). Isotermas de adsorción y su aplicación en la remoción del ion zinc de las aguas residuales de la ciudad de Puno, utilizando carbón activado del eucalipto. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/21893/Condori_Gomero_Lu_yyi_Asdruval.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Contreras, A. (2015). Removal of cadmium (II), lead (II) and chromium (VI) in water with nanomaterials (Tesis Doctoral). Universidad Autonoma de Barcelona.
- Correa, O. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray -Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26-38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Coudert, L., Bondu, R., Rakotonimaro, T. V., Rosa, E., Guittonny, M., & Neculita, C. M. (2020). Treatment of As-rich mine effluents and produced residues stability: Current knowledge and research priorities for gold mining. En *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 386). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121920>
- Culque, N., & Leno, B. (2021). Reducción de metales pesados y grasas presente en la cuenca media de las aguas del río Rímac utilizando el filtro de grafeno – Lima 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/93648>
- Delgado, X., & Mendoza, R. (2020). Eficiencia del óxido de grafeno para la remoción de Pb y Cu presentes en aguas del río Huarmey, 2020. Universidad César Vallejo.

- Díaz, L. (2021). Indicadores de calidad de agua salada: Revisión sistemática. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71524>
- Duan, Z., Zheng, Y., Chen, H., Liu, S., Xie, Y., Liu, H., Hu, Y., & Li, Y. (2025). Variations in cadmium and lead bioaccessibility and human health risk assessment from ingestion of leafy vegetables: Focus on the involvement of gut microbiota. *Journal of Food Composition and Analysis*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107353>
- Einollahi, F., Bahramifar, N., & Younesi, H. (2018). Removal of Cd (II), Pb (II) and Cu (II) ions from aqueous solution by polyamidoamine dendrimer grafted magnetic graphene oxide nanosheets. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 87, 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.03.039>
- Elgoud, E., & Aly, H. (2022). Alginate modified graphene oxide for rapid and effective sorption of some heavy metal ions from an aqueous solution. *Cellulose*, 29(11), 6231-6245. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04656-w>
- Fan, M., Margenot, A., Zhang, H., Lal, R., Wu, J., Wu, P., Chen, F., & Gao, C. (2020). Distribution and source identification of potentially toxic elements in agricultural soils through high-resolution sampling☆. *Environmental Pollution*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114527>
- Farghaly, F. E., & Shenouda, A. Y. (2021). Electrochemical behavior of negative electrode from Co(OH)₂ and graphene for lithium batteries. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 16139-16152. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06162-4>
- Fei, Y., & Hu, Y. H. (2021). Design, Synthesis, and Performance of Adsorbents for Heavy Metal Removal from Wastewater: A Review. *Journal: Journal of Materials Chemistry A*.
- Ferro, P., Farfan, R., Blanco, D., Ferró, A., & Ferro, P. (2023). Determination of inorganic chemical parameters in drinking water in districts of the province of Puno in the region Puno-Peru. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15624>
- Fu, W., & Huang, Z. (2018). Magnetic dithiocarbamate functionalized reduced graphene oxide for the removal of Cu(II), Cd(II), Pb(II), and Hg(II) ions from aqueous solution: Synthesis, adsorption, and regeneration. *Chemosphere*, 209, 449-456. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.087>
- Gao, T., Yu, J., Zhou, Y., & Jiang, X. (2017). The synthesis of graphene oxide functionalized with dithiocarbamate group and its prominent performance on adsorption of lead ions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.11.033>
- Gao, W. (2015). *Graphene Oxide Reduction Recipes, Spectroscopy, and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15500-5>

- Gholizadeh, M., Melesse, A., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. En *Sensors (Switzerland)* (Vol. 16, Número 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s16081298>
- Giraldo, U. (2017). Minería informal en la cuenca alta del Ramis impactos en el paisaje y evolución del conflicto socio ambiental. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9613>
- Guevara, D. (2020). Adsorción de arsénico del agua del río Constanca mediante el óxido de grafeno, La Libertad 2020. Universidad César Vallejo.
- Gul, W., Akbar Shah, S. R., Khan, A., Ahmad, N., Ahmed, S., Ain, N., Mehmood, A., Salah, B., Ullah, S. S., & Khan, R. (2023). Synthesis of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO) and their application as nano-fillers to improve the physical and mechanical properties of medium density fiberboard. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1206918>
- Guo, L., Xu, X., Niu, C., Wang, Q., Park, J., Zhou, L., Lei, H., Wang, X., & Yuan, X. (2024). Machine learning-based prediction and experimental validation of heavy metal adsorption capacity of bentonite. *Science of the Total Environment*, 926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171986>
- Guo, T. (2023). Application of Graphene Technology in the Removal of Heavy Metal Ions in Wastewater. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 73, 464-470. <https://doi.org/10.54097/hset.v73i.14053>
- Guo, T., Bulin, C., Ma, Z., Li, B., Zhang, Y., Zhang, B., Xing, R., & Ge, X. (2021). Mechanism of Cd(II) and Cu(II) Adsorption onto Few-Layered Magnetic Graphene Oxide as an Efficient Adsorbent. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01770>
- Guo, X., Liu, A., Lu, J., Niu, X., Jiang, M., Ma, Y., Liu, X., & Li, M. (2020). Adsorption mechanism of hexavalent chromium on biochar: Kinetic, thermodynamic, and characterization studies. *ACS Omega*, 5(42), 27323-27331. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03652>
- Gutierrez, H., & de la Varga, R. (2016). Análisis y diseño de experimentos. En *Turkish Journal of Medical Sciences* (Vol. 46, Número 5). <https://doi.org/10.3906/sag-1507-147>
- Hadiantono, H., Djaeni, M., & Sasongko, S. (2025). Comparison of Moisture Sorption Isotherm Models and Desorption Kinetics of Silica-Impregnated Biochar Composite Desiccant. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, 8(1), 72-81. <https://doi.org/10.54565/jphcfum.1695876>
- He, Y., Liu, Y., Guo, F., Pang, K., Fang, B., Wang, Y., Chang, D., Xu, Z., & Gao, Ch. (2020). Dynamic dispersion stability of graphene oxide with metal ions. *Chinese Chemical Letters*, 31(6), 1625-1629. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.10.010>
- Hokonya, N., Mahamadi, C., Mukaratirwa-Muchanyereyi, N., Gutu, T., & Zvinowanda, C. (2022). Enrichment of lead and cadmium from water using P-ZrO₂CeO₂ZnO nanoparticles/alginate

- beads: Optimization and determination of significant factors and interaction using response surface methodologies. *Scientific African*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01340>
- Huang, W., Chang, Y., Wu, R. M., Chang, J. S., Chuang, X. Y., & Lee, D. J. (2023). Type-wide biochars loaded with Mg/Al layered double hydroxide as adsorbent for phosphate and mixed heavy metal ions in water. *Environmental Research*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115520>
- Huang, X., Liu, L., Zhou, S., & Zhao, J. (2020). Physical properties and device applications of graphene oxide.
- Java, Z., Zamani, F., Robati, M., & Taghavi, L. (2023). Removal of lead (II) from aqueous solutions using β -cyclodextrin functionalized magnetic graphene oxide nanocomposite, performance, and optimization with response surface methodology. *Journal of Nanoparticle Research*, 25(7). <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05778-3>
- Jia, Y., Chen, D., Li, Y., Li, E., Zhao, L., & Guo, L. (2024). Study on the adsorption mechanism of polar and non-polar VOCs by the activated carbon with surface oxygen. *Chemical Engineering Journal*, 490. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151907>
- Joya, D., Rodríguez, J., Corona, M., Saldaña, N., Damián, C., & Saldaña, A. (2024). Removal of As(V) in the presence of Cr(VI) in contaminated water from the Bajío region of Mexico using ferrihydrite-functionalized graphene oxide (GOFH): A case study. *Emerging Contaminants*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100312>
- Kadari, M., Makhoulouf, M., Khaoua, O. O., Kesraoui, M., Bouriche, S., & Benmaamar, Z. (2023). The Removal Efficiency of Cadmium (Cd²⁺) and Lead (Pb²⁺) from Aqueous Solution by Graphene Oxide (GO) and Magnetic Graphene Oxide (α -Fe₂O₃/GO). *Chemistry Africa*, 6(3), 1515-1528. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00586-7>
- Kale, A., Mandake, M., & Chitodkar, V. (2021). Removal of Heavy Metals using Adsorption Process-A Review. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4. <https://www.researchgate.net/publication/374755606>
- Karungamye, P. (2024). The incorporation of activated carbon as a substrate in a constructed wetland. A review. *Cleaner Water*, 2, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100053>
- Kashani, H., Kim, C., Rudolf, C., Perkins, F., Cleveland, E., & Kang, W. (2021). An Axially Continuous Graphene–Copper Wire for High-Power Transmission: Thermoelectrical Characterization and Mechanisms. *Advanced Materials*, 33(51). <https://doi.org/10.1002/adma.202104208>
- Khedr, A., Fawzy, M., Ahmed, H., Alshammari, S., & El-Khateeb, M. (2024). Treatment of heavy metal ions from simulated water using adsorption process via modified iron magnetic nanocomposite. *Desalination and Water Treatment*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100071>

- Khine, Y., Wen, X., Jin, X., Foller, T., & Joshi, R. (2022). Functional groups in graphene oxide. En *Physical Chemistry Chemical Physics* (Vol. 9). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2cp04082d>
- Khomyakov, P., Giovannetti, G., Rusu, P. C., Brocks, G., Van Den Brink, J., & Kelly, P. J. (2009). First-principles study of the interaction and charge transfer between graphene and metals. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 79(19). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.195425>
- Kong, Q., Preis, S., Li, L., Luo, P., Wei, C., Li, Z., Hu, Y., & Wei, C. (2020). Relations between metal ion characteristics and adsorption performance of graphene oxide: A comprehensive experimental and theoretical study. *Separation and Purification Technology*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115956>
- Kou, M., Hou, J., Chen, C., Xiong, J., Wei, R., Wang, M., & Tan, W. (2023). Quantitative analysis of dose interval effect of Pb-Cd interaction on *Oryza sativa* L. root. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114622>
- Kou, M., Wang, Z., Wang, M., Benedetti, M. F., Avena, M. J., Fang, L., & Tan, W. (2025). Cadmium and lead ions interaction: A model for assessing combined heavy metal contamination in soils for food safety risk evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118324>
- Laqui, Y. (2019). Contaminación por tipo de usos de suelos y deterioro en la calidad de agua en la cuenca del lago Titicaca.
- Li, Y., Dong, X., & Zhao, L. (2021). Application of magnetic chitosan nanocomposites modified by graphene oxide and polyethyleneimine for removal of toxic heavy metals and dyes from water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.202>
- Lima, B. (2021a). Aplicación del nanomaterial de óxido de grafeno como adsorbente para la eliminación de metales pesados en soluciones acuosas. <http://tede2.ufrpe.br:8080/tede/handle/tede2/9138#preview-link0>
- Lima, B. (2021b). Synthesis and application of graphene oxide as a nanoadsorbent to remove Cd (II) and Pb (II) from water: adsorption equilibrium, kinetics, and regeneration.
- Lin, X., Gan, L., Owens, G., & Chen, Z. (2023). Removal of cadmium from wastewater using biofunctional reduced graphene oxide synthesized by *Lysinibacillus sphaericus*. *Journal of Cleaner Production*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135369>
- Liu, Y., Xu, X., Sun, X., Li, W., & Duan, J. (2025). Recent research progress of photoelectrocatalysis technology in the removal of organic pollutants from water. En *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 75). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107911>

- Liu, Z., Nørgaard, K., Overgaard, M., Ceccato, M., Mackenzie, D., Stenger, N., Stipp, S., & Hassenkam, T. (2018). Direct observation of oxygen configuration on individual graphene oxide sheets. *Carbon*, 127, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.100>
- Lizarraga, D., & Portillo, N. (2022). *Los pasivos ambientales y las actividades mineras, Puno 2022*. Universidad César Vallejo.
- Luo, D., & Zhang, X. (2018). The effect of oxygen-containing functional groups on the H₂ adsorption of graphene-based nanomaterials: experiment and theory. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5668-5679. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.01.164>
- Mahmoudi, E., Azizkhani, S., Mohammad, A. W., Ng, L. Y., Benamor, A., Ang, W. L., & Ba-Abbad, M. (2020). Simultaneous removal of Congo red and cadmium (II) from aqueous solutions using graphene oxide-silica composite as a multifunctional adsorbent. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 98, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.05.013>
- Mantari, A. E., & Pinchi, W. (2021). Influence of artisanal and informal mining on the quality of the water resource of Parcoy, La Libertad. *Revista Ciencia y Tecnología*, 17(2), 11-27. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2021.02.01>
- Manzoor, Q., Farrukh, M. A., & Sajid, A. (2024). Optimization of lead (II) and chromium (VI) adsorption using graphene oxide/ZnO/chitosan nanocomposite by response surface methodology. *Applied Surface Science*, 655. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159544>
- McLaren, R., Laycock, C., Brousseau, E., & Owen, G. (2021). Examining slit pore widths within plasma-exfoliated graphitic material utilising Barrett-Joyner-Halenda analysis. *New Journal of Chemistry*, 45(27), 12071-12080. <https://doi.org/10.1039/d1nj01702k>
- Melchor, A. P., Moreno, M. R., Bonilla, A., Reynel, H. E., Lucio, E., & González, O. F. (2024). Heavy Metal Removal from Water Using Graphene Oxide in Magnetic-Assisted Adsorption Systems: Characterization, Adsorption Properties, and Modelling. *Separations*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/separations11100294>
- Méndez, N., Pérez, F., & González, C. (2022). Eco-Friendly Approach for Graphene Oxide Synthesis by Modified Hummers Method. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207228>
- MINAM. (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua. Ministerio del Ambiente, Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-004-2017-minam>
- Mokoena, L., & Mofokeng, J. (2024). Synthesis and characterization of graphene oxide (GO) for the removal of lead ions in water. *Carbon Trends*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100339>
- Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Foureaux, A. F. S., Santos, L. V. D. S., & Amaral, M. C. S. (2021). Acid and metal reclamation from mining effluents: Current practices and future

- perspectives towards sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105169>
- Muleta, W. S., Denboba, S. M., & Bayu, A. B. (2024). Corncob-supported calcium oxide nanoparticles from hen eggshells for cadmium (Cd-II) removal from aqueous solutions; Synthesis and characterization. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27767>
- Murphy, O., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. (2023). A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. En *ACS Omega* (Vol. 8, Número 20, pp. 17407-17430). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>
- Musielak, M., Gagor, A., Zawisza, B., Talik, E., & Sitko, R. (2019). Graphene Oxide/Carbon Nanotube Membranes for Highly Efficient Removal of Metal Ions from Water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(31), 28582-28590. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b11214>
- Nikam, R., Mukhamale, S., Khirade, P. P., Rindhe, P. S., & Devade, S. K. (2025). Facile synthesis of graphene oxide via equivalent Hummers' method: Comprehensive characterizations and analysis. *Next Materials*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100626>
- Nyaba, L., & Nomngongo, P. (2020). Determination of trace metals in vegetables and water samples using dispersive ultrasound-assisted cloud point-dispersive μ -solid phase extraction coupled with inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Food Chemistry*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126749>
- Oladimeji, T., Oyedemi, M., Emetere, M. E., Agboola, O., Adeoye, J. B., & Odunlami, O. A. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. En *Heliyon* (Vol. 10, Número 23). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Ouyang, T. P., Zhu, Z. Y., Kuang, Y. Q., Huang, N. S., Tan, J. J., Guo, G. Z., Gu, L. S., & Sun, B. (2006). Dissolved trace elements in river water: Spatial distribution and the influencing factor, a study for the Pearl River Delta Economic Zone, China. *Environmental Geology*, 49(5), 733-742. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0118-8>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, A., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14, 9-18.
- Paredes, O., Jiménez, L., Dávila, J., & Apaza, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 56-66. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.594>
- Peng, W., Li, H., Liu, Y., & Song, S. (2017). A review on heavy metal ions adsorption from water by graphene oxide and its composites. En *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 230, pp. 496-504). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.01.064>

- Peña, D. (2019). Efectos de la contaminación de aguas residuales del lago de Morona Cocha en la salud de la población ribereña-Iquitos.
- Prasad, S., Yadav, K., Kumar, S., Gupta, N., Cabral, M., Rezanía, S., Radwan, N., & Alam, J. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. En *Journal of Environmental Management* (Vol. 285). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>
- Pu, S., Shen, Z., Duan, W., Lang, L., Liu, Y., Xu, B., Yao, H., & Mei, G. (2024). Discussion on the applicability and mechanism of phosphate-based geopolymers used for cadmium and cadmium-lead heavy metals solidification/stabilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113846>
- Rahman, N., & Raheem, A. (2024). Adsorption of Cd(II) ions on magnetic graphene oxide/cellulose modified with β -cyclodextrin: Analytical interpretation via statistical physics modeling and fractal like kinetic approach. *Environmental Research*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117868>
- Ramón, C., Barajas, J., Pérez, G., Hernández, M., & Díaz, L. (2019). Adsorption of copper (II) and cadmium (II) in aqueous suspensions of biogenic nanostructured CaCO₃. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(1), 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>
- Rezvani, H., Costantino, J., Kapadia, M., Majooni, Y., Abioye, S. O., Moayedi, M., & Yousefi, N. (2025). Bio-inspired graphene oxide sponges for enhanced adsorption of legacy and emerging contaminants from water. *Journal of Water Process Engineering*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108329>
- Riahi, K. Z., Sdiri, N., Ennigrou, D., & Horchani, K. (2020). Investigations on electrical conductivity and dielectric properties of graphene oxide nanosheets synthesized from modified Hummer's method. *Journal of Molecular Structure*, 1216. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128304>
- Robati, D., Mirza, B., Rajabi, M., Moradi, O., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. (2016). Removal of hazardous dyes-BR 12 and methyl orange using graphene oxide as an adsorbent from aqueous phase. *Chemical Engineering Journal*, 284, 687-697. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.131>
- Rocha, L., Olivero, J., & Caballero, K. (2018, mayo). Impacto de la minería del oro asociado con la contaminación por mercurio en suelo superficial de San Martín de Loba, sur de Bolívar (Colombia). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 93-102. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.08>
- Rodríguez, S. (2024). Evaluación mediante dinámica molecular de las interacciones óxido de grafeno-salmuera-arenisca. Universidad Industrial de Santander.

- Rojas, D., & Sanchez, K. (2020). Capacidad de adsorción de un material compuesto a base de bentonita y óxido de grafeno para remover arsénico en agua contaminada (Tesis de Postgrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Rojas, J., Picado, F., Suárez, A., Van Gestel, C., Golcher, C., & Durán, G. (2021). Mining environmental liabilities: a potential source of metal contamination for freshwater ecosystems in Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(68), 333-356. <https://doi.org/10.15359/rgac.68-1.12>
- Sabando, C., Corral, M., Lostado, R., & Gallarta, F. (2024). Applying circular economy principles and life cycle assessment: A novel approach using vine shoots waste for cadmium removal from water. *Science of the Total Environment*, 926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171947>
- Saberi, N., Aghababaei, M., Ostovar, M., & Mehrnahad, H. (2018). Simultaneous removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and heavy metals from an artificial clayey soil by enhanced electrokinetic method. *Journal of Environmental Management*, 217, 897-905. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.125>
- Sadeghi, M., Tofighy, M., & Mohammadi, T. (2020). One-dimensional graphene for efficient aqueous heavy metal adsorption: Rapid removal of arsenic and mercury ions by graphene oxide nanoribbons (GONRs). *Chemosphere*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126647>
- Saha, S., Mishra, D., & De, S. (2025). Synthesis of sulfonated metal-substituted hydroxyapatite and its polymeric composite for sequestration of lead and cadmium from water: Batch and column study. *Separation and Purification Technology*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131822>
- Sakthivadivel, M., Nirmala, A., Sakthivadivel, J., Mukhilan, R., & Tennyson, S. (2020). Physicochemical and biological parameters of water at industrial sites of metropolitan city of Chennai, Tamil Nadu, India. *Water Conservation and Management*, 4(2), 90-98. <https://doi.org/10.26480/WCM.02.2020.90.98>
- Salas, P. (2022). Optimización del tratamiento de efluentes en la minera Santa Luisa - Huanzalá. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14879>
- Salcedo, S. (2022). Niveles de contaminación de plomo en sangre y su influencia en el rendimiento escolar, en niños menores de 12 años. C.S. Colquijirca. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Sardinha, A. (2019). Espectros FTIR de óxido de grafeno.
- Shakil, M., Aktar, M., Hossain, M., & Ahmed, S. (2024). Synthesis and application of carboxymethyl cellulose-graphene oxide composite for the mitigation of Pb²⁺ and Cd²⁺ from aqueous solution. *Cleaner Engineering and Technology*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100724>

- Sharma, P., Iqbal, H. M. N., & Chandra, R. (2022). Evaluation of pollution parameters and toxic elements in wastewater of pulp and paper industries in India: A case study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100163>
- Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A. P., Kim, H. Y., & Joshi, M. K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *En Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 9, Número 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105688>
- Sikri, N., Kumar, S., Behera, B., & Mehta, J. (2025). Graphene oxide/layered double hydroxide composite as highly efficient and recyclable adsorbent for removal of ciprofloxacin from aqueous phase. *Frontiers in Nanotechnology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnano.2025.1578620>
- Sim, H. J., Li, Z., Xiao, P., & Lu, H. (2022). The Influence of Lateral Size and Oxidation of Graphene Oxide on Its Chemical Reduction and Electrical Conductivity of Reduced Graphene Oxide. *Molecules*, 27(22). <https://doi.org/10.3390/molecules27227840>
- Siragi, M., Hima, H., Natatou, I., & Dubois, V. (2025). A comparative study of the adsorption kinetics of AuCN₂⁻ and AuS₂O₃²⁻ by prepared activated carbon. *Results in Chemistry*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102641>
- Smith, A., LaChance, A., Zeng, S., Liu, B., & Sun, L. (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 1(1), 31-47. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>
- Soeprbowati, T. R., Addadiyah, N. L., Hariyati, R., & Jumari, J. (2021). Physico-chemical and biological water quality of Warna and Pengilon Lakes, Dieng, Central Java. *Journal of Water and Land Development*, 51, 38-49. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139013>
- Solic, M., Maletic, S., Isakovski, M. K., Nikic, J., Watson, M., Konya, Z., & Roncevic, S. D. S. (2021). Removing low levels of Cd(II) and Pb(II) by adsorption on two types of oxidized multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105402>
- Sujiono, E., Zurnansyah, Zabrian, D., Dahlan, M., Amin, B., Samnur, & Agus, J. (2020). Graphene oxide based coconut shell waste: synthesis by modified Hummers method and characterization. *Heliyon*, 6(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04568>
- Suwannahong, K., Wongcharee, S., Kreetachat, T., Imman, S., Suriyachai, N., Hongthong, S., Rioyo, J., Dechapanya, W., & Noiwiwimol, P. (2024). Comprehensive Cost-Benefit and Statistical Analysis of Isotherm and Kinetic Models for Heavy Metal Removal in Acidic Solutions Using Weakly Base Polymeric Chelating Resin as Adsorbent. *Water* (Switzerland), 16(17). <https://doi.org/10.3390/w16172384>
- Tapia, C. (2022). Remoción de metales pesados desde aguas ácidas usando óxido de grafeno funcionalizado con nanopartículas de óxido de zinc. *Universidad de Chile*.

- Teh, L., & Pauly, D. (2018). Who brings in the fish? The relative contribution of small-scale and industrial fisheries to food security in Southeast Asia. *Frontiers in Marine Science*, 4(FEB). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00044>
- Triveño, D. (2016). Influencia del agua del río Mariño en la calidad del agua del río Pachachaca, Abancay 2016. (Tesis de Postgrado). Universidad Tecnológica los Andes.
- Vasanthi, N., & Mandal, B. (2022). Simultaneous Quantitation of Lead and Cadmium on an EDTA-Reduced Graphene Oxide-Modified Glassy Carbon Electrode. *ACS Omega*, 7(49), 45469-45480. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06080>
- Vazquez, M., Arcibar, J., Damian, C., Saldaña, A., Martínez, M., Saldaña, A., & Cano, S. (2020). Effective removal of arsenic from an aqueous solution by ferrihydrite/goethite graphene oxide composites using the modified Hummers method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104416>
- Vendrell-Puigmitja, L., Bertrans-Tubau, L., Roca-Ayats, M., Llenas, L., Proia, L., & Abril, M. (2024). Exposure and recovery: The effect of different dilution factors of treated and untreated metal mining effluent on freshwater biofilm function and structure. *Aquatic Toxicology*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.106843>
- Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., & Tsygankova, L. (2021). Analytical continuation within the freundlich adsorption model. Comment on edet, u.a.; ifelebuegu, a.o. kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. *processes* 2020, 8, 665. En *Processes* (Vol. 9, Número 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr9071251>
- Vilela, D., Parmar, J., Zeng, Y., Zhao, Y., & Sánchez, S. (2016). Graphene-Based Microbots for Toxic Heavy Metal Removal and Recovery from Water. *Nano Letters*, 16(4), 2860-2866. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00768>
- Wang, M., Sheng, J., Wang, L., Wang, G., & Fei, W.-D. (2022). Achieving high strength and electrical properties in drawn fine Cu matrix composite wire reinforced by in-situ grown graphene. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3205-3210. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.069>
- Wu, L., Garg, S., & Waite, T. D. (2024). Progress and challenges in the use of electrochemical oxidation and reduction processes for heavy metals removal and recovery from wastewaters. En *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 479). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135581>
- Xiong, Y., Zhao, Z., Peng, K., Zhai, G., Huang, X., & Zeng, H. (2025). Microplastic interactions with co-existing pollutants in water environments: Synergistic or antagonistic roles on their removal through current remediation technologies. En *Journal of Environmental Management* (Vol. 376). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124355>
- Yaffar, D., Brenner, J., Walker, A., Craig, M., Vaughan, E., Marín-Spiotta, E., Matos, M., Rios, S., & Mayes, M. (2025). The Freundlich isotherm equation best represents phosphate sorption

- across soil orders and land use types in tropical soils of Puerto Rico. *Biogeochemistry*, 168(2). <https://doi.org/10.1007/s10533-025-01218-7>
- Yan, Q., Zhu, Y., Feng, G., Zhu, Z., Zhang, L., Liu, J., & He, H. (2020). Characterization, dissolution and solubility of lead fluorapatite at 25-45 °C. *Applied Geochemistry*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104659>
- Yang, K., Ma, Y., Zhang, Z., Zhu, J., Sun, Z., Chen, J., Zhao, H., Song, J., Li, Q., Chen, N. Q., Ma, H. Y., Zhou, J., Liu, Y., & Fan, T. X. (2020). Anisotropic thermal conductivity and associated heat transport mechanism in roll-to-roll graphene reinforced copper matrix composites. *Acta Materialia*, 197, 342-354. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.021>
- Yang, M., Geng, X., Xi, Y., & Zhang, F. (2025). Synthesis and adsorption properties of sulfydryl-functionalized graphene oxide composite. *Desalination and Water Treatment*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101271>
- Yang, Z., Zheng, Q., Qiu, H., Li, J., & Yang, J. (2015). A simple method for the reduction of graphene oxide by sodium borohydride with CaCl₂ as a catalyst. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, 30(1), 41-47. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60174-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60174-3)
- Yaulimango, R., & Tarazona, S. (2018). Niveles de metales pesados en *Sarda chiliensis chiliensis* (bonito) como factor de riesgo para la salud del consumidor, Huacho - 2017. Universidad Nacional de José Faustino Sánchez Cárion.
- Zaaba, N. I., Foo, K. L., Hashim, U., Tan, S. J., Liu, Wei., & Voon, C. H. (2017). Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence. *Procedia Engineering*, 184, 469-477. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.118>
- Zeng, T., Wang, L., Ren, X., Al-Dhabi, N. A., Sha, H., Fu, Y., Tang, W., & Zhang, J. (2024). The effect of quorum sensing on cadmium- and lead-containing wastewater treatment using activated sludge: Removal efficiency, enzyme activity, and microbial community. *Environmental Research*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118835>
- Zevallos, M. (2019). Sistema de tratamiento de lixiviados procedentes del relleno sanitario de Zapallal utilizando nanofiltros de grafeno con hierro, 2019. Universidad Cesar Vallejo.
- Zhang, D., Wu, B., Wang, T., Yılmaz, M., Sharma, G., Kumar, A., & Shi, H. (2025). Multi-mechanism synergistic adsorption of lead and cadmium in water by structure-functionally adapted modified biochar: A review. En *Desalination and Water Treatment* (Vol. 322). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101156>
- Zhang, N., Qi, W., Huang, L., Jiang, E., Bao, J., Zhang, X., An, B., & He, G. (2019). Review on structural control and modification of graphene oxide-based membranes in water treatment: From separation performance to robust operation. En *Chinese Journal of Chemical Engineering* (Vol. 27, Número 6, pp. 1348-1360). Materials China. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.001>

- Zhao, F., Tang, Z., Song, J. J., Huang, X. Y., & Wang, P. (2022). Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. *En Molecular Plant* (Vol. 15, Número 1, pp. 27-44). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.09.016>
- Zhu, Y. anbin, Kong, G., Pan, Y., Liu, L., Yang, B., Zhang, S., Lai, D., & Che, C. (2022). An improved Hummers method to synthesize graphene oxide using much less concentrated sulfuric acid. *Chinese Chemical Letters*, 33(10), 4541-4544. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2022.01.060>
- Zuo, T., Wang, M., Xue, J., Ru, Y., Zhang, L., Da, B., Wu, Y., Xu, Z., Gao, Z., Liaw, P., Han, L., & Xiao, L. (2022). Superior electrical conductivity-strength combination of an in-situ fabricated La₂O₃-doped copper/graphene composite conductor. *Carbon*, 197, 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.086>

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico de ejecución del trabajo de investigación.



Foto 01 . a) Rotulado de envases para muestras de agua, b) Toma de muestra del punto PM-01.



Foto 02. a) Toma de muestra del punto PM-02, b) Toma de muestra del punto PM-03.



Foto 03. a) Llenado de cadena de custodia, b) Muestra de tipo integral para las 3 muestras.

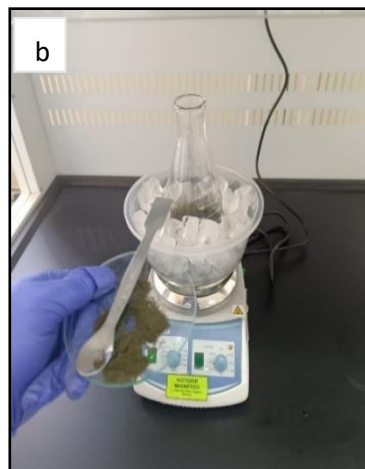
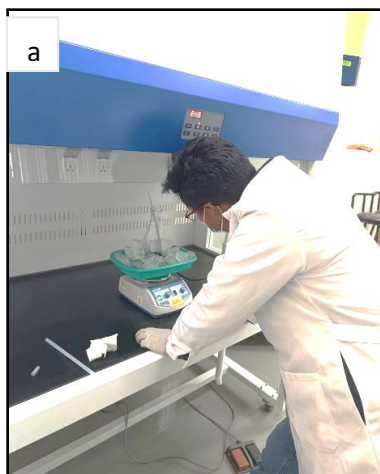


Foto 04. a) Síntesis del óxido de grafeno, b) Control de temperatura y adición del KMnO_4 .

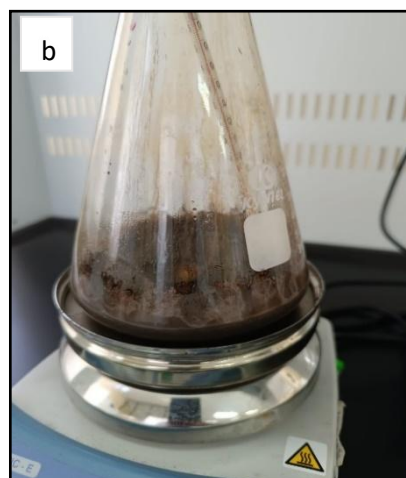
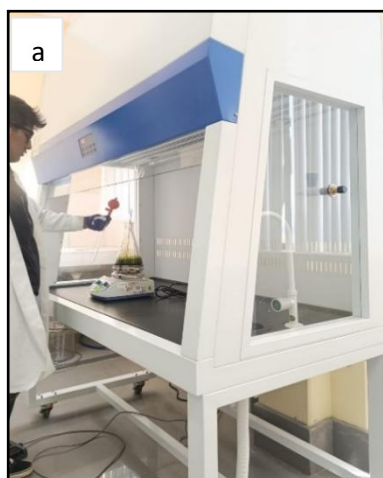


Foto 05. a) Adición de H_2O y H_2SO_4 , b) Oxidación de grafito luego de la adición de KMnO_4

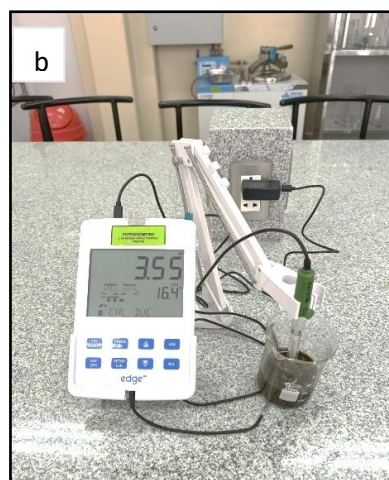
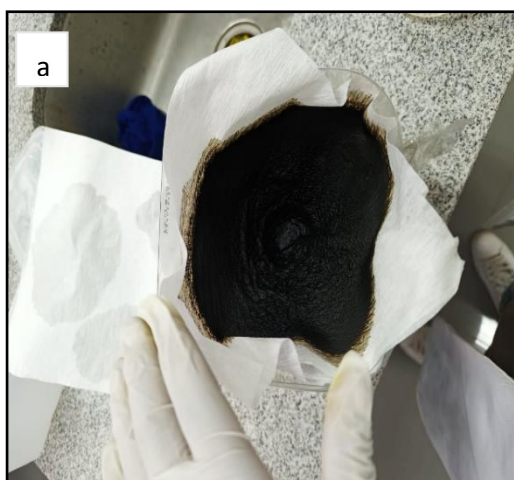


Foto 06. a) Lavado y filtrado del óxido de grafeno, b) Medición de pH del óxido de grafeno

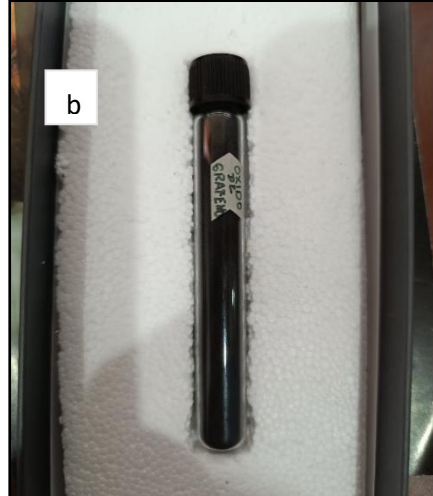
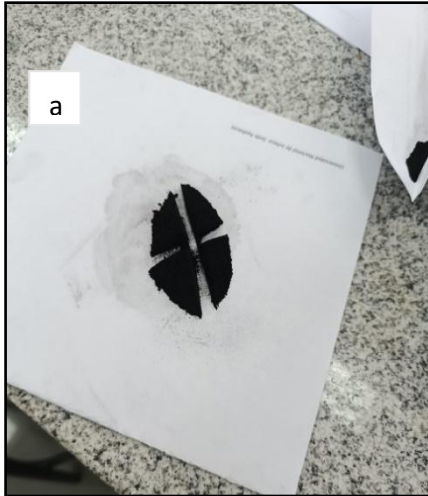


Foto 07. a) Cuarteo y tamizado de OG, b) óxido obtenido por método Hummers.

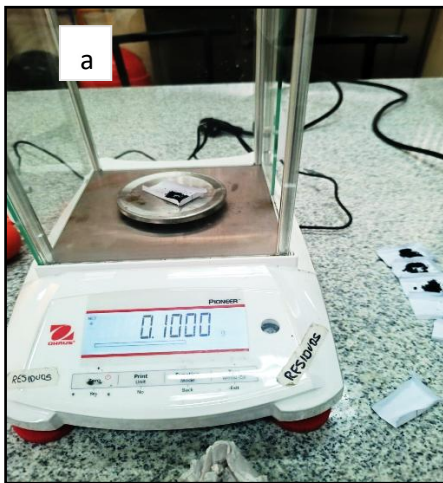


Foto 08. a) Pesaje de OG para cinética e isothermas, b) Pruebas de adsorción cinética.

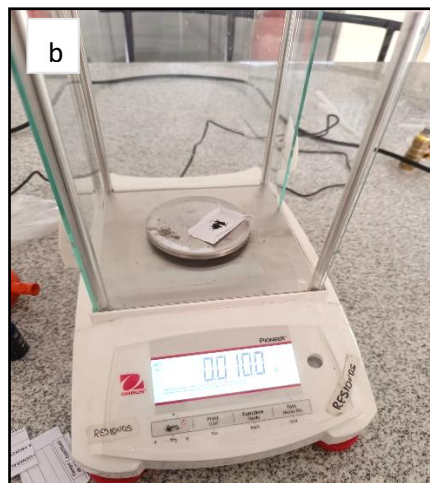


Foto 09. a) Pruebas de adsorción isoterma, b) Pesaje de OG para efluente dosis 10mg.

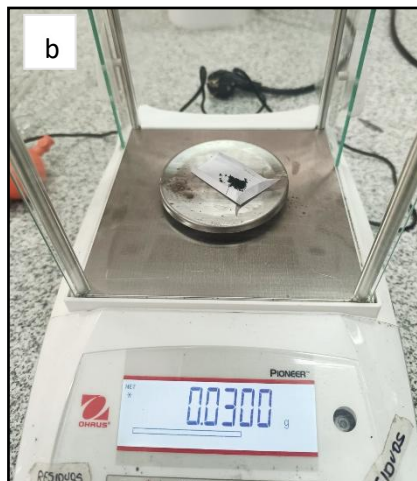
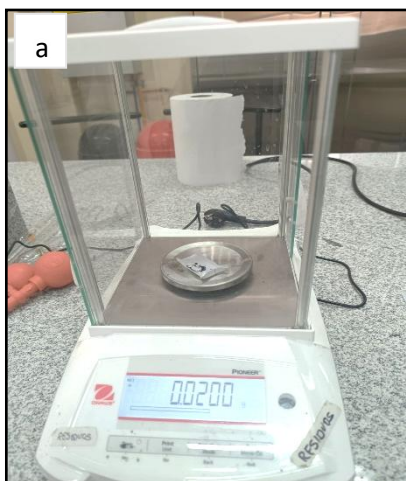


Foto 10. a) Pesaje de OG para efluente dosis 20mg, b) Pesaje de OG para efluente dosis 30mg.

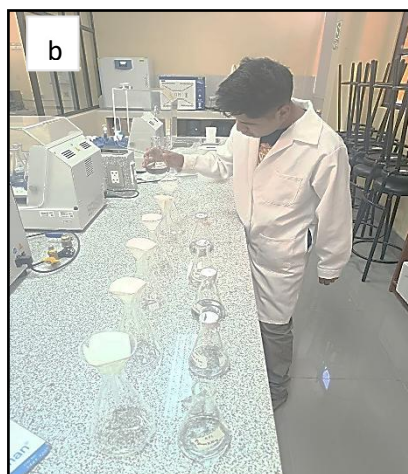


Foto 11. a) Prueba de adsorción - efluente, b) Filtrado después de las pruebas de adsorción.

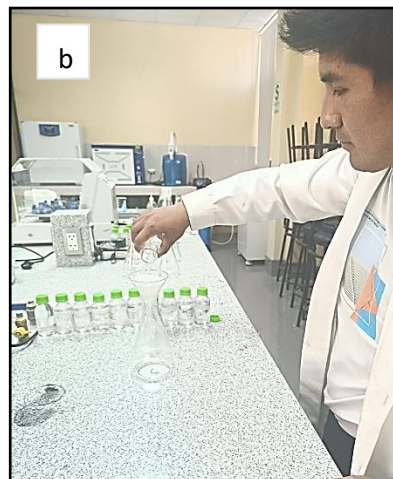


Foto 12. a) Rotulado de muestras, b) Acondicionamiento de muestras filtradas.



Foto 13. a) Preparación de las muestras para análisis, b) Preparación de curva de calibración.



Foto 14. a) Rotulado de los tubos falcón, b) Montaje de muestras en el equipo para lectura.

Anexo 2. Análisis de difracción de rayos X.



**LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS CON
EQUIPOS ESPECTROSCÓPICOS PARA LA DETERMINACIÓN
DE ESTRUCTURAS QUÍMICAS
(EC-0005-2017-UNSA)**

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Para: Yoni Alex Mamani Mamani / Omar Cancapac Velasquez

Aprobado por: Dra. Adriana Edith Larrea Valdivia (N° CQP 479)

Analista: Mag. Carlos Javier Valenzuela Huillca

Informe de ensayo No: 252-24			
VERSIÓN	RECEPCIÓN DE MUESTRA	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	EMISIÓN DE INFORME
1	31-Jul-2024	02-Ago-2024	06-Ago-2024
Descargo de Responsabilidad: Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.			

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	3
2. Identificación del investigador	3
3. Condiciones de análisis	3
4. Observaciones	3
5. Análisis.....	4
6. Difractogramas.....	5

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de Yoni Alex Mamani Mamani y Omar Cancapac Velasquez, se ha realizado el análisis por difracción de rayos X de una muestra.

La muestra fue identificada como:

Grafeno oxido

La muestra se recibió en consistencia fina y en cantidad suficiente para el análisis.

2. IDENTIFICACIÓN DEL INVESTIGADOR

Nombre	Yoni Alex Mamani Mamani / Omar Cancapac Velasquez
Contacto	Teléfono
	Correo electrónico

3. CONDICIONES DEL ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

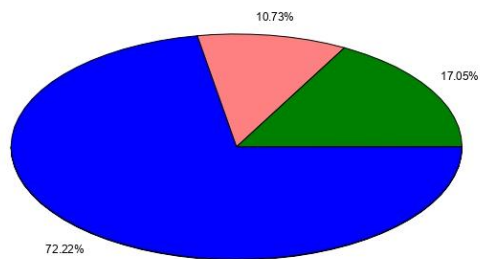
Equipo	Difractómetro de rayos X Miniflex 600, Rigaku
Tubo Cu	40 kV, 15 mA
Detector	D/teX Ultra2
Rango de medida 2θ	3.00 - 90.00 deg
Identificación	Crystallography Open Database (COD)

4. OBSERVACIONES

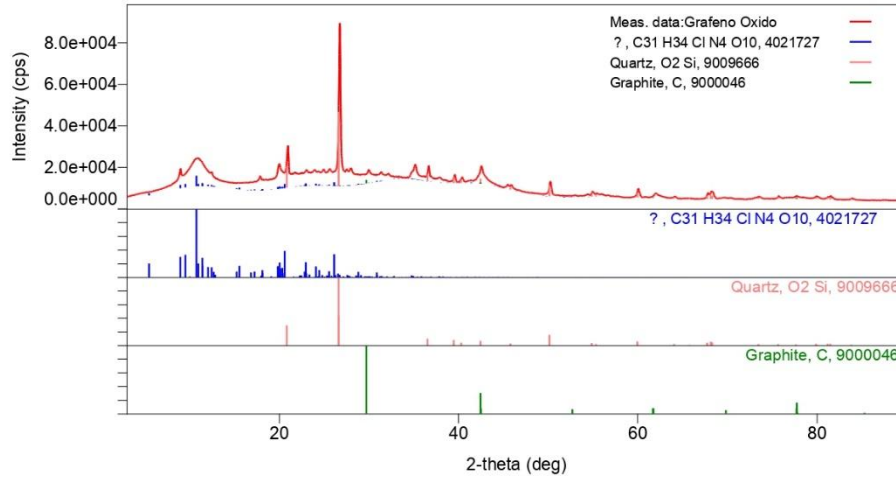
- ✓ Los resultados corresponden a las muestras proporcionadas por el investigador, las cuales han sido entregadas en las instalaciones del laboratorio.

5. ANÁLISIS**Muestra: Muestra #2**

Phase name	Content (%)
C31 H34 Cl N4 O10 (%)	72.22
Graphite(%)	17.05
Quartz(%)	10.73



6. DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA



Anexo 3. Análisis de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).



**LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS CON
EQUIPOS ESPECTROSCÓPICOS PARA LA DETERMINACIÓN
DE ESTRUCTURAS QUÍMICAS
(EC-0005-2017-UNSA)**

**INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR
TRANSFORMADA DE FOURIER**

Para: Yoni Alex Mamani Mamani / Omar Cancapac Velasquez

Aprobado por: Dra. Adriana Edith Larrea Valdivia (N° CQP 479)

Analista: Mag. Carlos Javier Valenzuela Huillca

Informe de ensayo No: 242-24			
VERSIÓN	RECEPCIÓN DE MUESTRA	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	EMISIÓN DE INFORME
1	20-Jun-2024	21-Jun-2024	27-Jun-2024
Descargo de Responsabilidad: Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización del LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS CON EQUIPOS ESPECTROSCÓPICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS QUÍMICAS (EC-0005-2017-UNSA). Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.			

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	3
2. Identificación del cliente.....	3
3. Método utilizado.....	3
4. Condiciones de análisis.....	3
5. Observaciones.....	4
6. Espectros.....	4

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de Yoni Alex Mamani Mamani y Omar Cancapac Velasquez, se ha realizado el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, rango medio (MIR), de la siguiente muestra:

Oxido de grafeno

Se recibió en consistencia sólida, fina, y en cantidad apropiada para el análisis a realizar. La lectura de la muestra fue directamente analizada sobre el accesorio de reflectancia total atenuada UATR.

2. IDENTIFICACIÓN DEL INVESTIGADOR

Nombre	Yoni Alex Mamani Mamani / Omar Cancapac Velasquez
Contacto	Teléfono
	Correo electrónico

3. MÉTODO UTILIZADO

Para la realización del análisis se siguió los lineamientos de la norma ASTM E1252-98 (2021) "Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis", con un rango de número de onda desde 650 cm^{-1} hasta 4000 cm^{-1} y accesorio de reflectancia total atenuada universal.

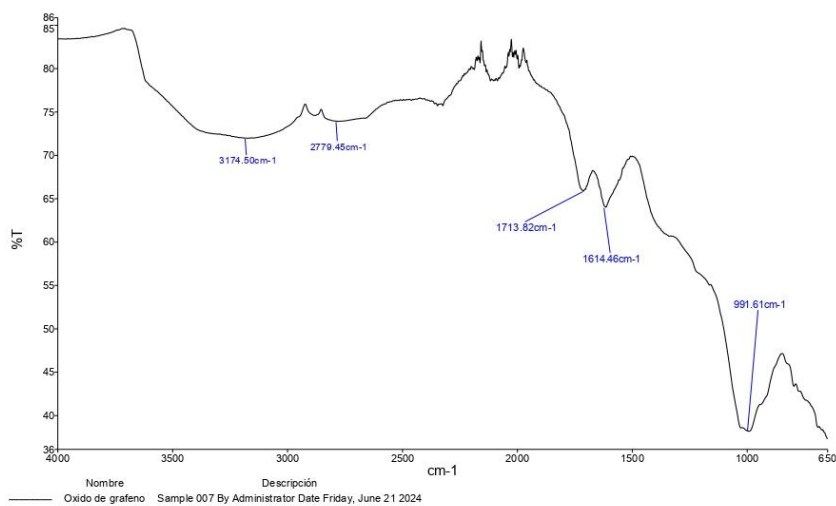
4. CONDICIONES DEL ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER FT-IR

Equipo	Marca Perkin Elmer, modelo Frontier FT-IR/NIR
Rango de barrido	4000 cm^{-1} - 650 cm^{-1}
Tipo de accesorio	Universal ATR
Cristal UATR	Diamante/ZnSe
Saltos UATR	3

5. OBSERVACIONES

- ✓ Los resultados corresponden a la muestra proporcionada por el investigador, las cuales han sido entregadas en las instalaciones del laboratorio.
- ✓ La zona del espectro desde 1900 cm^{-1} hasta 2250 cm^{-1} corresponde al ruido generado por el accesorio, por lo que no debe ser tomada en cuenta para la identificación de grupos funcionales.
- ✓ Este documento va acompañado con la data del equipo, que consta del archivo .SP y archivo .CSV, que pueden ser manejados en Origin o Microsoft Excel, respectivamente.

6. ESPECTROS



Anexo 4. Informe de ensayo fisicoquímico efluente mineros para Cd y Pb.



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC - 050

Clave generada : FC7F3045

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00388

Fecha de emisión:13/11/2024

Página 1 de 3

Señores : OMAR CANCAPAC VELASQUEZ
Dirección : JULIACA - SAN ROMAN - PUNO
Atención : OMAR CANCAPAC VELASQUEZ
Proyecto : EFICIENCIA DEL OXIDO DE GRAFENO EN LA ADSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : YONI ALEX MAMANI MAMANI
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 237-24
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 05/11/2024
Fecha de ensayo : 05/11/2024
Nro de muestras : 9

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG24000689	M1	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000690	M2	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000691	M3	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000692	M4	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000693	M5	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000694	M6	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000695	M7	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000696	M8	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00
AG24000697	M9	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/11/2024	10:00

Condiciones de recepción de la muestra
Contenedor no refrigerado
Observación
-

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico QP 114426, Emisor de certificado, LLAMA PE, 13/11/2024 11:30:14 a.m.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)





Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC - 050

Clave generada : FC7F3045

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00388

Fecha de emisión: 13/11/2024

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802	
		Cd mg/L	Pb mg/L
AG24000689	M1	0,054	0,028
AG24000690	M2	0,049	0,045
AG24000691	M3	0,047	b<0,005
AG24000692	M4	0,057	0,023
AG24000693	M5	0,059	0,023
AG24000694	M6	0,050	0,031
AG24000695	M7	0,051	0,035
AG24000696	M8	0,049	0,036
AG24000697	M9	0,053	0,017

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES, M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA.PE. 13/11/2024 11:30:14 a.m.


Laboratorios Analíticos del Sur
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) **Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA**

"a<Valor numérico"=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico"=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía Web



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC - 050

Clave generada : FC7F3045

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00388

Fecha de emisión:13/11/2024

Página 3 de 3

MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
802	EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP -OES, Revisión 4.4. Metales Totales (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) - Cd	[- 0.00011 - 50] mg/L
802	EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP -OES, Revisión 4.4. Metales Totales (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) - Pb	[- 0.005 - 100] mg/L

^a : Límite detección ^b : Límite de cuantificación

----- Fin del informe -----

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico QIP 114426, Emisor de certificado, LAMA, PE, 13/11/2024 11:30:14 a.m.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

^a-<Valor numérico>=Límite de detección del método, ^b-<Valor Numérico>=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.


Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Rio Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe
vía web




Anexo 5. Informe de ensayo fisicoquímico efluente minero – metales totales.



LAS
Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Calibración
Acreditado
Registro N° LC - 050

Clave generada : 8B7800D3

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00389

Fecha de emisión: 13/11/2024 Página 1 de 3

Señores : OMAR CANCAPAC VELASQUEZ
Dirección : JULIACA - SAN ROMAN - PUNO
Atención : OMAR CANCAPAC VELASQUEZ
Proyecto : EFICIENCIA DEL OXIDO DE GRAFENO EN LA ADSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : YONI ALEX MAMANI MAMANI	Fecha de recepción : 05/11/2024
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 238-24	Fecha de ensayo : 05/11/2024
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente	
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente	Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG24000698	M10	Agua Residual - Agua Residual Industrial	EFLUENTE MINERO / ANTAUTA / MELGAR / PUNO	19L 359299 E, 8422001 N	26/10/2024	10:00
Condiciones de recepción de la muestra						
Contenedor no refrigerado						
Observación						
-						

Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA


"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)



Validar el informe
vía web

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA PE, 13/11/2024 11:29:12 a.m.



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00389

Fecha de emisión: 13/11/2024

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802													
		Ag	Al	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG24000698	M10	≤0,005	0,088	1,28	0,016	≤0,006	>250,0	0,052	≤0,005	≤0,004	≤0,01	≤0,08	27,6	0,268	6,23

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802													
		Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb	Se	SiO ₂	Sn	Sr	Ti	Tl	V
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG24000698	M10	0,048	0,0079	44,0	≤0,005	≤0,03	0,065	≤0,01	≤0,02	7,29	≤0,008	0,498	≤0,02	≤0,01	≤0,005

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802
		Zn
		mg/L
AG24000698	M10	≤0,05

Firmado por: JUÁREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAWA PE 13/11/2024 11:28:12 a.m.


 Laboratorios Analíticos del Sur
 S. R. L.
Omar A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.





Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro N° LC - 050

Clave generada : 8B7800D3

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00389

Fecha de emisión: 13/11/2024

Página 2 de 3


RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802													
		Ag	Al	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG24000698	M10	b<0,005	0,088	1,28	0,016	b<0,006	>250,0	0,052	b<0,005	b<0,004	b<0,01	b<0,08	27,6	0,268	6,23

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802													
		Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb	Se	SiO ₂	Sn	Sr	Ti	Tl	V
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG24000698	M10	0,048	0,0079	44,0	b<0,005	b<0,03	0,065	b<0,01	b<0,02	7,29	b<0,008	0,498	b<0,02	b<0,01	b<0,005

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	802
		Zn
		mg/L
AG24000698	M10	b<0,05

Firmado por: JUÁREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: L.LAMA, PE. 13/11/2024 11:29:12 a.m.


 Laboratorios Analíticos del Sur
Omar A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) **Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA**

"a<Valor numérico"=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico"=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



CUADRO DE AYUDA PARA CLASIFICAR LA MATRIZ DE UNA MUESTRA DE AGUA

Indice		Matriz	Siglas	Matriz	Descripción	
1	AN	Agua Natural Subterránea	Agua de Manantial	AMt	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Agua que emerge de la tierra o entre las rocas
2			Agua Termal	AT	Agua Natural - Subterránea - Agua Termal	Agua que surgen de la tierra de modo espontaneo y que poseen un alto nivel de mineralización y temperaturas >5°C del agua superficial.
3		Agua Natural Superficial	Agua de Río	ARío	Agua Natural - Superficial - Agua de Río	Son las corrientes de agua que fluyen sobre sus cauces. Pueden ser según su estacionalidad: Perennes o Intermitentes.
4			Agua de Laguna / lago	AL	Agua Natural - Superficial - Agua de Laguna / lago	Cuerpo de agua Alimentado por una fuente de agua natural.
5			Agua de Deposición Atmosférica	AD	Agua Natural - Superficial - Agua de Deposición Atmosférica	Son aquellas procedentes directamente de la atmosfera, en forma de precipitaciones liquidas, nieve o granizo y se captan antes que lleguen a la superficie terrestre.
6	AR	Agua Residual	Agua Residual Domestica	RD	Agua Residual - Agua Residual Domestica	Aguas residuales de origen residencial, comercial e institucional que contienen desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana (preparación de alimentos y aseo personal).
7			Agua Residual Industrial	RI	Agua Residual - Agua Residual Industrial	Aguas residuales originadas como consecuencia del desarrollo de un proceso productivo. Incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial entre otras.
8			Agua Residual Municipal	RM	Agua Residual - Agua Residual Municipal	Aguas residuales domesticas que pueden incluir la mezcla con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial.
9	ACH	Agua para Uso y Consumo Humano	Agua de Bebida	APb	Agua para Uso y Consumo Humano Agua de Bebida- Agua Potable	Agua que puede ser consumida debido a que no representa un riesgo para la salud. (Agua Potable)
10				AMesa	Agua para Uso y Consumo Humano Agua de Bebida - Agua de Mesa	Agua que puede ser consumida debido a que no representa un riesgo para la salud. (Agua mesa)
11			APs	Agua para Uso y Consumo Humano Agua de Piscina	Agua que para ser apta para el uso humano debe ser sometida a diferentes tratamientos con la finalidad de evitar la presencia de bacterias, virus, hongos entre otros.	
12			ALA	Agua para Uso y Consumo Humano Agua de Laguna Artificial	Es el agua empleada para uso recreativo.	
13	AS	Agua Salina	Agua de Mar	AM	Agua Salina - Agua de Mar	Es el agua costera y de mar abierto cuya salinidad alcanza como valor máximo aproximado de 35 partes por mil.
14			Agua Salobre	ASb	Agua Salina - Agua Salobre	Se considera agua salobre la que posee altas concentraciones de sales minerales disueltas y la proporción de sal es mayor que el agua dulce y menor que el agua de mar.
15			Salmueras	ASm	Agua Salina - Salmueras	Se considera agua salmuera la que posee una concentración mayor de 40 gramos de sal por litro.
16	Apr	Agua de Proceso	Agua de Circulación o Enfriamiento	AE	Agua de Proceso - Agua de Circulación o Enfriamiento	Es el agua que se desplaza o recircula para absorber y remover el calor.
17			Agua de Alimentación para Calderas	AAC	Agua de Proceso - Agua de Alimentación para Calderas	Son aquellas aguas acondicionadas para alimentar las calderas y producir vapor
18			Agua de Calderas	AC	Agua de Proceso - Agua de Calderas	Son las aguas contenidas en las calderas, como mezcla de liquido y vapor
19			Agua de Lixiviación	ALx	Agua de Proceso - Agua de Lixiviación	Es el agua que pasa a través de un sólido para que se produzca la disolución de uno o más componentes solubles del mismo para los ensayos requeridos.
20			Agua Purificada	AP	Agua de Proceso - Agua Purificada	Es el agua a la cual se le han quitado los iones e impurezas mediante diferentes procesos: térmico (hervido y condensado) para agua destilada; por intercambio iónico para agua desionizada; por membranas de osmosis inversa para agua osmotizada; y otros
21			Agua de Inyección y Reinyección	AIR	Agua de Proceso - Agua de Inyección y Reinyección	Aguas provenientes de la actividad d extracción de hidrocarburos, cuya disposición final se realiza en pozos de origen.

NOTA:

La Clasificación presentada es una recopilación de lo que se indica en la Norma Técnica Peruana NTP 214.042:2012 "CALIDAD DE AGUA. Clasificación de la matriz agua para ensayos de laboratorio".