



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



**"NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO SINTETIZADAS CON
HOJAS DE *Eucalyptus globulus* EN LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN
AGUAS SUBTERRÁNEAS - JULIACA"**

**Bach. Fiorella Dayli Huamaliano León
Bach. Jimena Massiely Jove Laruta**

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

**Asesora: M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras
Co - asesor: Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo**



Juliaca, 2024



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



**"NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO SINTETIZADAS CON
HOJAS DE *Eucalyptus globulus* EN LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN
AGUAS SUBTERRÁNEAS - JULIACA"**

**Bach. Fiorella Dayli Huamaliano León
Bach. Jimena Massiely Jove Laruta**

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

**Asesora: M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras
Co - asesor: Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo**



Juliaca, 2024

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



**“NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO SINTETIZADAS CON
HOJAS DE *Eucalyptus globulus* EN LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN
AGUAS SUBTERRÁNEAS - JULIACA”**

Bach. Fiorella Dayli Huamaliano León

Bach. Jimena Massiely Jove Laruta

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

Asesora: M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras

Co - asesor: Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo

Juliaca, 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Huamaliano, F., & Jove, J. (2024). *Nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con hojas de Eucalyptus globulus en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas - Juliaca*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR	: Fiorella Dayli Huamaliano León Jimena Massiely Jove Laruta
TÍTULO	: Nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas - Juliaca
PUBLICACIÓN	: Juliaca, 2024
DESCRIPCIÓN	: Cantidad de páginas (139 páginas)
NOTA	: Tesis - Escuela profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal - Universidad Nacional de Juliaca
CÓDIGO	: 01-000041-01/H83
NOTA	: Incluye bibliografía
ASESOR	: M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras
CO – ASESOR	: Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo
PALABRAS CLAVE :	Adsorción, agua subterránea, arsénico, hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> , nanopartículas de óxido de hierro.

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

**“NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO
SINTETIZADAS CON HOJAS DE *Eucalyptus globulus* EN LA
ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS
- JULIACA”**

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

Presentada por:

Bach. Fiorella Dayli Huamaliano León
Bach. Jimena Massiely Jove Laruta

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo
PRESIDENTE

:



M.Sc. Jael Calla Calla
JURADO (Secretario)

:



2° MIEMBRO


M.Sc. Ebed David Paredes Rodríguez
JURADO (Vocal)

:



3° MIEMBRO



M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras
ASESOR

Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo
CO - ASESOR

NOMBRE DEL TRABAJO

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERR
O SINTETIZADAS CON HOJAS DE Eucal
yptus globulus EN LA ADSORCIÓN DE

AUTOR

IORELLA DAYLI HUAMALIANO LEON JI
MENA MASSIELY JOVE LARUTA

RECUENTO DE PALABRAS

24703 Words

RECUENTO DE CARACTERES

143191 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

138 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.3MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 7, 2024 9:56 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 7, 2024 9:57 AM GMT-5

● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



DEDICATORIA

A mi padre, en reconocimiento a su apoyo e influencia en mi educación. En mi búsqueda de conocimiento, su amor y consejos han sido fundamentales. Cada sacrificio hecho en aras de mi educación no tiene precio. Y a mi madre, quien me acompaña en cada paso de mi vida con su fortaleza y amor. Sé que este logro es importante para ti también.

Fiorella Dayli Huamaliano León

A Dios y a mi querida familia, quienes han sido mi roca y mi inspiración a lo largo de este viaje académico. A mis padres, por su amor y respaldo incondicional. A mi tía, por creer y confiar en mí. A mis hermanos, por su constante aliento y ser mis compañeros de aventuras. ¡Gracias por todo!

Jimena Massiely Jove Laruta

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Juliaca, expresamos nuestra gratitud por abrirnos las puertas y brindarnos una formación integral.

A nuestros docentes de la EPIAF, agradecemos que estuvieran prestos a compartir sus conocimientos contribuyendo a nuestra formación profesional.

A nuestra asesora, M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras, con quien estaremos en deuda por la confianza depositada al proporcionarnos este interesante y bonito tema de investigación. Así como por la paciencia y el apoyo continuo en todo el desarrollo de la misma.

A nuestro co-asesor, Dr. Mario Martín Hurtado Cotillo, por las recomendaciones y facilidades que nos otorgó a lo largo del desarrollo de esta investigación.

Al personal de los laboratorios generales, Ing. Rolando, Lic. Eliana, Ing. Abdías, Lic. Howard, Ing. Praxides e Ing. Germán, por la atención en el proceso de experimentación.

A los miembros del jurado, Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo, M. Sc. Ebed David Paredes Rodríguez y M. Sc. Jael Calla Calla, por las correcciones y sugerencias, las cuales han enriquecido considerablemente esta investigación.

Nuestro sincero agradecimiento,

Fiorella Dayli Huamaliano León

Jimena Massiely Jove Laruta

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	xix

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática.....	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3 Objetivo de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis de la investigación.....	4
1.4.1 Hipótesis general.....	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	5
1.5 Justificación.....	5
1.5.1 Justificación social	5
1.5.2 Justificación ambiental.....	6
1.5.3 Justificación económica	6
1.5.4 Justificación tecnológica.....	7

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	Antecedentes de la investigación	8
2.1.1	Antecedentes internacionales.....	8
2.1.2	Antecedentes nacionales	9
2.2	Marco teórico	11
2.2.1	El agua	11
2.2.2	Aguas subterráneas	11
2.2.3	Arsénico (As).....	11
2.2.4	Fuentes de arsénico	12
2.2.5	Propiedades fisicoquímicas del arsénico en el agua	13
2.2.6	Distribución del As(III) y el As(V) en el agua	13
2.2.7	Toxicidad del As	15
2.2.8	Métodos convencionales de eliminación de As	16
2.2.9	Nanotecnología	19
2.2.10	Nanopartículas (NPs).....	19
2.2.11	Nanopartículas metálicas (NPMs)	20
2.2.12	Métodos de síntesis de obtención de nanopartículas	20
2.2.13	Nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO).....	22
2.2.14	Óxido de hierro (FeO).....	23
2.2.15	Estructura y propiedades de los óxidos de hierro	24
2.2.16	Biosíntesis de nanopartículas	25
2.2.17	Extracto de <i>Eucalyptus globulus</i>	29
2.2.18	Nanopartículas biosintetizadas con diferentes especies de Eucalipto.....	34
2.2.19	Métodos de extracción Soxhlet.....	35

2.2.20	Técnicas de caracterización de nanopartículas	37
2.2.21	Rol de NPs-FeO para la remediación de contaminantes en el ambiente	41
2.2.22	Efecto del pH	42
2.2.23	Efecto del nanoadsorbente	42
2.2.24	Efecto del tiempo contacto.....	43
2.3	Normativa.....	43

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Ámbito de estudio	46
3.2	Tipo de la investigación	46
3.3	Diseño de la investigación.....	46
3.4	Población y muestra de estudio.....	46
3.4.1	Población.....	46
3.4.2	Muestra	46
3.5	Operacionalización de variables.....	47
3.6	Materiales, equipos y reactivos	48
3.6.1	Materiales.....	48
3.6.2	Equipos	48
3.6.3	Reactivos e insumos.....	48
3.7	Procedimiento metodológico.....	49
3.7.1	Síntesis de nanopartículas de óxido de hierro por el método de biosíntesis utilizando los polifenoles extraídos de las hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca	49
3.7.2	Caracterización de nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca	52

3.7.3	Determinación del efecto del pH, dosis de nanopartículas y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	53
-------	---	----

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Síntesis de nanopartículas de óxido de hierro por el método de biosíntesis utilizando los polifenoles extraídos de las hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca.....	60
4.1.1	Polifenoles totales del extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	60
4.1.2	Grupos funcionales del extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	61
4.2	Caracterización las nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca.....	62
4.2.1	Grupos funcionales de las NPs-FeO con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	62
4.2.2	Tamaño hidrodinámico de las NPs-FeO con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	64
4.2.3	Tamaño morfológico de las NPs-FeO con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	66
4.3	Determinación el efecto del pH, dosis de nanopartículas y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	68
4.3.1	Contenido de arsénico del agua subterránea de Juliaca.....	68
4.3.2	Prueba de adsorción por lotes.....	70
4.4	Análisis estadístico.....	73
4.4.1	Análisis de varianza.....	73

4.4.2	Diagrama de Pareto.....	75
4.4.3	Estimación efectos e interacciones	75
4.4.4	Diagrama de superficie de respuesta.....	80
4.4.5	Gráficos de contorno.....	81

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	82
5.2	Recomendaciones.....	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	ANEXOS	98

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Evaluación comparativa de diferentes técnicas de eliminación de As	16
Tabla 2: Desempeño de nanopartículas para la adsorción de As en el agua.....	21
Tabla 3: Óxidos e hidróxidos de hierro más utilizados en la adsorción de As	24
Tabla 4: Metabolitos secundarios presentes en <i>Eucalyptus globulus</i>	32
Tabla 5: Biosíntesis de diferentes nanopartículas a partir de <i>Eucalytus sp.</i>	34
Tabla 6: Biosíntesis de diferentes NPs-FeO y su aplicación	41
Tabla 7: LMP del As en agua según estándares internacionales y nacional.....	43
Tabla 8: Concentración del As en aguas subterráneas según algunos países	44
Tabla 9: Concentración del As en aguas subterráneas según las normas holandesas...	44
Tabla 10: ECAs para As en agua y disposiciones complementarias del MINAM	45
Tabla 11: Operacionalización de variables	47
Tabla 12: Condiciones del análisis por FTIR	52
Tabla 13: Condiciones del análisis por DLS.....	53
Tabla 14: Condiciones del análisis por MEB	53
Tabla 15: Coordenadas UTM de los puntos de muestreo de agua subterránea	54
Tabla 16: Niveles de las variables independientes para la adsorción de As	57
Tabla 17: Cálculo de efectos principales y de interacción del modelo 2 ³	58
Tabla 18: Diseño factorial con tres factores	59
Tabla 19: Contenido de polifenoles totales del extracto.....	60
Tabla 20: La actividad antioxidante del extracto de hojas de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill, utilizando como solvente agua analizados por los métodos Folin-Ciocalteu, ABTS ⁺ y DPPH.....	60
Tabla 21: Resultados de los puntos de muestreo de agua subterránea en Juliaca.....	69
Tabla 22: Concentración de As inicial en el punto de muestreo P-04 Juliaca.....	69

Tabla 23: Parámetros físico-químicos in situ del agua subterránea P-04 Juliaca	70
Tabla 24: Adsorción de arsénico.....	71
Tabla 25: ANOVA de la capacidad de adsorción de As con NPs-FeO	73
Tabla 26: Cálculo de efectos principales y de interacción del modelo 2^3	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de disolución del As en las aguas subterráneas	12
Figura 2. Diagrama Eh-pH que representa las especies acuosas	14
Figura 3. Estructuras de diferentes especies del arsenito y del arseniato en función del pH del agua	14
Figura 4. Micrografías MET de nanopartículas de Fe ₃ O ₄	20
Figura 5. Diferentes enfoques de síntesis disponibles para la preparación de nanopartículas metálicas	21
Figura 6. Estructura de los óxidos de hierro.	24
Figura 7. Representación gráfica sobre la biosíntesis de nanopartículas.....	26
Figura 8. Tipos de estabilización: (a) electrostática, (b) estérica.....	27
Figura 9. Posible estructura del complejo de NPs-Polifenol	28
Figura 10. Proceso de biosíntesis de NPs con extractos de plantas	29
Figura 11. Árbol de <i>Eucalyptus globulus</i>	30
Figura 12. Extractor Soxhlet convencional.....	35
Figura 13. Espectrómetro infrarojo con transformada de Fourier	37
Figura 14. Microscopio electrónico de barrido.....	38
Figura 15. Microscopio electrónico de transmisión.....	39
Figura 16. Dispersor dinámico de luz.....	40
Figura 17. Diagrama de bloques de la etapas generales involucradas en la obtención del extracto de <i>Eucalyptus globulus</i>	49
Figura 18. Diagrama de bloques de las etapas generales involucradas en la biosíntesis de NPs-FeO con hojas de <i>Eucalyptus globulus</i>	50
Figura 19. Sistema de síntesis de NPs-FeO	51
Figura 20. Diagrama de bloques de las técnicas de caracterización de NPs-FeO	52

Figura 21. Mapa de ubicación.....	55
Figura 22. Proceso de adsorción de As.....	56
Figura 23. FTIR del extracto de <i>Eucalyptus globulus</i>	61
Figura 24. FTIR de la biosíntesis de NPs-FeO antes de la adsorción de As	62
Figura 25. FTIR de la biosíntesis de NPs-FeO después de la adsorción de As	63
Figura 26. Informe de calidad de NPs-FeO	64
Figura 27. Distribución de numérica de NPs-FeO.....	65
Figura 28. Micrografía MEB de NPs-FeO (a) 400x y (b) 6000x	66
Figura 29. Micrografía MEB de NPs-FeO (a) 12000x y (b) 24000x	67
Figura 30. Efecto del pH en el porcentaje de adsorción del As.....	71
Figura 31. Efecto de la dosis de NPs-FeO en el porcentaje de adsorción de As	72
Figura 32. Efecto del tiempo de contacto en el porcentaje de adsorción de As	72
Figura 33. Diagrama de Pareto	75
Figura 34. Gráfica de efectos principales del porcentaje de adsorción	77
Figura 35. Gráfico de cubos del porcentaje de adsorción.....	78
Figura 36. Gráfica de efectos de interacciones del porcentaje de adsorción	79
Figura 37. Gráfica de superficie del % de adsorción versus la dosis y el pH.....	80
Figura 38. Gráfica de contorno del % de adsorción versus la dosis y el pH	81

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Constancia de identificación botánica del eucalipto	98
Anexo 2. Informe del extracto para la determinación de polifenoles totales	99
Anexo 3. Informe del extracto y NPs-FeO análisis por FTIR	100
Anexo 4. Informe de NPs-FeO analizadas por MEB.....	104
Anexo 5. Informe de muestras de agua subterránea para la determinación de As	105
Anexo 6. Informe de muestra de agua subterránea para la determinación de As.....	107
Anexo 7. Informe de ensayo de muestras tratadas de agua subterránea.....	111
Anexo 8. Toma de muestra de agua subterránea	115
Anexo 9. Etiquetado y preservación de muestra de agua subterránea.....	115
Anexo 10. Traslado de muestra del punto de muestreo al laboratorio UNAJ	115
Anexo 11. Insumos y reactivos para el desarrollo experimental	116
Anexo 12. Obtención del agua ultrapura	116
Anexo 13. Secado de las hojas de <i>Eucalyptus Globulus</i> A 60° durante 24 horas	116
Anexo 14. Preparación del extracto utilizando el Soxhlet.....	117
Anexo 15. Biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro.....	117
Anexo 16. Centrifugación, lavado y purificación de nanopartículas.....	117
Anexo 17. Secado de nanopartículas a 70° durante 24 horas	118
Anexo 18. Ajuste del pH y pesado de NPs-FeO para la adsorción	118
Anexo 19. Prueba de adsorción por lotes utilizando la prueba de jarras	118
Anexo 20. Filtración y decantación magnética de las NPs-FeO.....	119
Anexo 21. Prueba magnética de las NPs-FeO	119

RESUMEN

La contaminación geogénica de aguas subterráneas por arsénico representa un riesgo significativo en la región de Puno; dada su toxicidad para el ser vivo. Esta investigación evaluó la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*. La metodología incluyó la síntesis de nanopartículas mediante el uso del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* e hidróxido de sodio como agentes reductores y estabilizadores del pH, respectivamente. El extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* se preparó en una relación de 1:5 (peso/volumen) utilizando agua ultra pura como solvente. Posteriormente, las nanopartículas se caracterizaron en cuanto a grupos funcionales, tamaño hidrodinámico y morfología, mediante FTIR, DLS y SEM. Los experimentos de adsorción se realizaron bajo diferentes condiciones de pH, dosis de nanoadsorbente y tiempo de contacto, siguiendo un diseño factorial 2³. Los resultados de FTIR confirmaron la presencia de fases como Fe₃O₄ y γ -Fe₂O₃, mientras que DLS reportó tamaños en el rango de 66.36 nm a 83.23 nm y el SEM reveló formas cuasi esféricas, con tamaños que oscilan entre 182.1 nm y 206.4 nm. Se evaluó la eficiencia de adsorción de las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de *Eucalyptus globulus* en 300 ml de agua subterránea, con una concentración inicial de arsénico de 171.7 μ g/L, logrando un porcentaje de adsorción del 99.30%. En conclusión, estas nanopartículas demostraron ser una solución para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas bajo condiciones de pH 7, con una dosis de 260 mg y un tiempo de 15 minutos.

Palabras clave: adsorción, agua subterránea, arsénico, extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*, nanopartículas de óxido de hierro.

ABSTRACT

The geogenic contamination of groundwater by arsenic represents a significant risk in the region of Puno; given its toxicity to living beings. This research evaluated the arsenic adsorption efficiency in groundwater of Juliaca using iron oxide nanoparticles synthesized with *Eucalyptus globulus* leaf extract. The methodology included the synthesis of nanoparticles using *Eucalyptus globulus* leaf extract and sodium hydroxide as reducing and pH stabilizing agents, respectively. *Eucalyptus globulus* leaf extract was prepared in a 1:5 (wt/volume) ratio using ultrapure water as solvent. Subsequently, the nanoparticles were characterized in terms of functional groups, hydrodynamic size and morphology by FTIR, DLS and SEM. Adsorption experiments were performed under different pH conditions, nanoadsorbent dosage and contact time, following a factorial design 2^3 . FTIR results confirmed of phases such as Fe_3O_4 and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, while DLS reported sizes in the range of 66.36 nm to 83.23 nm and SEM revealed quasi-spherical shapes, with sizes ranging from 182.1 nm to 206.4 nm. The adsorption efficiency of iron oxide nanoparticles synthesized with *Eucalyptus globulus* extract was evaluated in 300 ml of groundwater, with an initial arsenic concentration of 171.7 $\mu\text{g/L}$, achieving an adsorption percentage of 99.30%. In conclusion, these nanoparticles proved to be a solution for the adsorption of arsenic in groundwater under pH 7 conditions, with a dose of 260 mg and a time of 15 minutes.

Key words: adsorption, groundwater, arsenic, *Eucalyptus globulus* leaves extract, iron oxide nanoparticles.

INTRODUCCIÓN

Según monitoreos realizados en el sector de salida Puno y salida Cusco del distrito de Juliaca, indican que la concentración de arsénico en aguas subterráneas es superior a 50 µg/L (George et al., 2014; Huaracha & Quispe, 2020; Huilca & Apaza, 2019; Mamani, 2019). Esto obliga a buscar diversos tratamientos con el fin de reducir la concentración de arsénico por debajo de los LMP, en vista de que muchos pobladores consumen estas aguas. Existen diferentes tecnologías convencionales para la eliminación de arsénico que comprenden oxidación, coagulación, adsorción, intercambio iónico, filtración por membranas, entre otras (Abidli et al., 2022; Siddiqui et al., 2019; Sinha et al., 2023; Water, 2019).

La adsorción es una tecnología que posee una alta eficiencia de remoción de arsénico (Siddiqui et al., 2019). El uso de nanopartículas (NPs) para la adsorción del As es un área emergente, debido a las características únicas como una elevada área superficial, alta especificidad, alta reactividad, sensibilidad óptica y propiedades catalíticas (Basu et al., 2021; Marimon, 2018; Seynnaeve et al., 2021). Diversos estudios prestan especial interés a las nanopartículas magnéticas (NPsM), por sus propiedades supermagnéticas que permiten su recuperación de la fase acuosa en la que se dispersan mediante la aplicación de campos magnéticos externos (Saiz, 2015). Por lo tanto, el uso de nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO) ha tenido un impacto científico en sus investigaciones para eliminar contaminantes del agua (Sharma et al., 2022). Las nanopartículas de magnetita y manghemita presentan una eficiente adsorción de As (Macías, 2022).

En los últimos años, se vienen desarrollando nanopartículas utilizando la biosíntesis para evitar el uso de métodos y reactivos que producen subproductos peligrosos y crear procesos respetuosos con el ambiente (Martínez, 2017). Los extractos vegetales se utilizan con mayor frecuencia para obtener nanopartículas a través de la reducción de sales metálicas (Singh et al., 2018). Según Shafey (2020), este proceso es simple, económico, ecológico, reutilizable y adecuado para la producción a gran escala. Estas características hacen de esta tecnología una alternativa novedosa a los métodos tradicionales en la eliminación de arsénico. La presente investigación tuvo por objetivo evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La contaminación de aguas subterráneas por arsénico (As) trae cada vez más consecuencias a la salud de millones de personas en todo el mundo (Cao et al., 2022), se estima que 140 millones de personas están expuestas a concentraciones de arsénico que superan los 10 $\mu\text{g/L}$ recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Pál et al., 2022). El uso de aguas subterráneas se debe a la falta de abastecimiento de agua potable en diversos países debido al incremento demográfico (Gastañaga, 2018). El arsénico, al no tener sabor ni olor, puede consumirse dañando el sistema digestivo, inmunitario, nervioso, hepático, renal y respiratorio del hombre. La exposición al arsénico puede provocar un hidroarsenicismo agudo o crónico (Rodríguez, 2021), y este metaloide no puede ser degradado en componentes menos perjudiciales, sino que tienden a acumularse en el organismo (Marimon, 2018).

En Perú, el 9.2 % de la población no tiene acceso a sistemas de suministro de agua potable y recurre a fuentes alternativas como aguas subterráneas, lo que aumenta el riesgo de exposición al arsénico (INEI, 2020). La contaminación por arsénico en el país afecta a muchas regiones del norte y sur, siendo el arsénico en estas áreas tanto de origen natural como resultado de actividades mineras en áreas volcánicas de la Cordillera Occidental de los Andes (Apaza & Calcina, 2014; De Meyer et al., 2023). En el norte del Perú, regiones como Lambayeque, Mórrope y Pacora presentan concentraciones de arsénico que varían de 30 $\mu\text{g/L}$ a 160 $\mu\text{g/L}$ (COEN, 2019; MCLCP, 2019), Amazonas y Lima también superan el límite permisible y como tal representan un peligro inminente para la salud de las personas (López, 2019; Márquez, 2022). En el sur del Perú, en regiones como Arequipa y Puno se encuentran altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea (Apaza & Calcina, 2014), entre ellas el distrito de Tiabaya se detectó un contenido de arsénico de 40 $\mu\text{g/L}$ tres veces superior a lo permitido (Mamani, 2023) y en Desaguadero, se han encontrado elevadas concentraciones de arsénico en agua, en el sector Huanucollo de hasta 446 $\mu\text{g/L}$ (Calcina

et al., 2022), y otros distritos como Caracoto 67 $\mu\text{g/L}$, San Antón 52.5 $\mu\text{g/L}$ y Taraco 29.6 $\mu\text{g/L}$ (George et al., 2014).

En la ciudad de Juliaca, aproximadamente 230 mil habitantes de 300 urbanizaciones periféricas no cuentan con agua potable, recurriendo al agua subterránea sin tratamiento (Fernández, 2021); debido a la falta de saneamiento básico, se tienen personas contaminadas con arsénico poniendo en grave riesgo su salud (SPDA, 2020). Diversos estudios muestran altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas: Mamani (2019) reportó una concentración media de 73.5 $\mu\text{g/L}$ en las zonas urbanas marginales; Huillca & Apaza (2019) encontraron dos muestras con niveles de arsénico de 106 $\mu\text{g/L}$ y 108 $\mu\text{g/L}$ superando los límites máximos permisibles; Huaracha & Quispe (2020) encontraron en la salida Puno 68 $\mu\text{g/L}$, 81 $\mu\text{g/L}$ y 82 $\mu\text{g/L}$ de As, y en la salida Lampa concentraciones de 46 $\mu\text{g/L}$ a 69 $\mu\text{g/L}$ de As, y Apaza (2020) constató que todas las muestras de agua subterránea en las urbanizaciones Santa Adriana y Niño San Salvador exceden los límites permisibles.

Los métodos convencionales tales como intercambio iónico, electrocoagulación, ósmosis inversa, tecnologías de membrana tiene una alta eficiencia en la remoción de arsénico en el agua, sin embargo, estos métodos tienen impactos significativos, como elevados costos operativos y la generación de lodos (Abidli et al., 2022; Siddiqui et al., 2019; Sinha et al., 2023; Water, 2019). En respuesta a estas limitaciones, se buscan alternativas tecnológicas como la adsorción, la cual ofrece una alta eficiencia y resulta ser económicamente más viable (Siddiqui et al., 2019). No obstante, dentro de la adsorción, diferentes tipos de adsorbentes presentan deficiencias en presencia de iones competidores en el agua (López, 2019). Algunos de estos adsorbentes tienen una carga superficial negativa, lo que puede inducir repulsiones electrostáticas hacia el arseniato y el arsenito. Además, la capacidad de adsorción puede verse significativamente afectada por el pH del agua, así como por la presencia de iones de fosfato y sílice, que pueden inhibir la adsorción del arsénico (Borjon et al., 2022).

Ante esta problemática, el método de biosíntesis no sólo responde a la necesidad de remover eficazmente la contaminación del arsénico, sino que también fomenta un enfoque sostenible (Sharma et al., 2022). La disponibilidad de *Eucalyptus globulus* en la región y la presencia de compuestos bioactivos en las hojas sugieren su viabilidad como materia prima para la síntesis de nanopartículas de manera económica. Estas nanopartículas son biodegradables y tienden a ser menos propensas a generar residuos tóxicos, lo que simplifica su manejo y disposición. En este contexto, la presente investigación evaluó la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de Juliaca al utilizar nanopartículas de óxido de hierro, que han sido sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Son eficaces las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas mediante biosíntesis utilizando los polifenoles extraídos de las hojas de *Eucalyptus globulus* en la adsorción de arsénico en las aguas subterráneas de Juliaca?
- ¿Cuáles son las características de las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* en relación con la adsorción de arsénico en las aguas subterráneas de Juliaca?
- ¿Qué efecto tienen el pH, la dosis de nanoadsorbente y el tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en las aguas subterráneas de Juliaca, utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*?

1.3 Objetivo de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca, utilizando nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*.

1.3.2 Objetivos específicos

- Sintetizar nanopartículas de óxido de hierro mediante el método de biosíntesis utilizando los polifenoles extraídos de las hojas de *Eucalyptus globulus*, para su aplicación en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca.
- Caracterizar las nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca.
- Determinar el efecto del pH, dosis de nanopartículas y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*.

1.4 Hipótesis de la investigación

1.4.1 Hipótesis general

Las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* mejorarán significativamente la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca, demostrando una capacidad superior para la adsorción de este contaminante en comparación con métodos convencionales.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La incorporación de extracto de las hojas de *Eucalyptus globulus* en la biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro aumentará la capacidad de adsorción de arsénico en aguas subterráneas, debido a las propiedades químicas y funcionales del extracto que facilitan la formación de sitios activos de adsorción en las nanopartículas.
- Las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* producirán nanoestructuras más pequeñas y con gran superficie/volumen, que mejorarán la capacidad de adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca.
- El pH, la dosis de nanoadsorbente de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* y el tiempo de contacto, así como sus posibles interacciones, tienen una incidencia en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas de Juliaca. Se espera que condiciones óptimas de estas variables maximicen la capacidad de adsorción de arsénico del agua y estén por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la OMS y la normativa peruana.

1.5 Justificación

1.5.1 Justificación social

El arsénico en aguas subterráneas, representa un problema significativo en la región de Puno, porque el arsénico del suelo se lixivia hacia los acuíferos. Las urbanizaciones periféricas de la ciudad de Juliaca que dependen de fuentes de agua subterránea (Fernández, 2021) están expuestas al arsénico por medio de la ingestión del agua y consumo de alimentos (Celebi et al., 2021). Y a través de la cadena trófica existe una alta probabilidad de bioacumulación y transmisión a la pirámide ecológica (Chandan et al., 2023). La toxicidad por arsénico tiene serias implicaciones en la salud; por lo tanto, hace necesaria la búsqueda de alternativas que no deterioren el ambiente y sean factibles de una u otra forma (Anjum et al., 2019), como el uso de nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas jóvenes de *Eucalyptus globulus* puede mejorar la calidad de vida de la población juliaqueña.

1.5.2 Justificación ambiental

Las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extractos vegetales han demostrado ser una alternativa sostenible a los métodos existentes para la adsorción del arsénico en aguas subterráneas (Sharma et al., 2022) porque al tener una síntesis biológica no contaminarán el agua. Estudios como el de Dzimitrowicz et al. (2019) a menudo utilizan extractos vegetales porque producen nanoestructuras más pequeñas que cuando se usan aceites esenciales, debido a la nucleación y el crecimiento. El extracto de hojas jóvenes de *Eucalyptus globulus* contiene una gran variedad de compuestos orgánicos, entre los cuales resaltan los fenólicos; el alto contenido de estos da como resultado una gran capacidad antioxidante y tiene el doble propósito de ser un agente reductor en la síntesis y un agente estabilizador para prevenir la aglomeración (Gullón et al., 2019). Así mismo, tienen la capacidad de modular potencialmente el estrés oxidativo, el cual ayuda a que se realice una donación de electrones de manera segura (Asmat et al., 2021).

1.5.3 Justificación económica

Los métodos convencionales para producir nanopartículas requieren productos químicos costosos y peligrosos (Abed et al., 2023). Sin embargo, el “método de biosíntesis” es una alternativa sostenible y accesible desde el punto de vista local gracias a la disponibilidad de *Eucalyptus globulus* en la región, que reduce los costos asociados con reactivos químicos, además de minimizar la necesidad de infraestructuras complejas para su implementación (Kumar et al., 2022). Garantizar la calidad del agua subterránea para la población juliaqueña puede reducir costos indirectos como tratamientos médicos, pérdida de productividad laboral, cuidados a largo plazo, costos de mitigación e impactos ambientales ya que las NPs-FeO son biodegradables.

1.5.4 Justificación tecnológica

Con los resultados de esta investigación, se espera brindar una alternativa novedosa a los métodos convencionales en la adsorción de arsénico en agua subterránea con el uso de nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas con extracto de hojas jóvenes de *Eucalyptus globulus*, recurso natural que se encuentra distribuido en toda la región de Puno y reactivos no tóxicos como el $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y el NaOH . Asimismo, el procedimiento experimental no requiere de equipos sofisticados ni personal especializado para sintetizar NPs-FeO aplicando el “método de biosíntesis” conforme a bibliografía.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Pabón et al. (2021), sintetizaron y evaluaron nanopartículas de FeO utilizando extracto acuoso de *Eucalyptus grandis*. Para ello, usaron el método de coprecipitación con $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; se caracterizó mediante FTIR, MET y BET. Los resultados mostraron nanopartículas de 9 nm con área superficial de $131.90 \text{ m}^2/\text{g}$. Estos hallazgos sugieren que estas nanopartículas podrían ser eficaces en el tratamiento de contaminantes ambientales como adsorbentes.

Rahmayanti et al. (2022), sintetizaron nanopartículas de magnetita utilizando 5 ml de extracto de cáscara de *Archidendron pauciflorum* por el método de coprecipitación inversa para la adsorción de azul de metileno, se caracterizaron las NPs mediante FTIR, XRD, PSA y VSM. Los resultados indicaron que las nanopartículas tenían un tamaño en el rango de 250 a 450 nm. La adsorción de azul de metileno se llevó a cabo a un pH de 8, durante 90 minutos, alcanzando un porcentaje de adsorción del 92%.

Karthik et al. (2023), prepararon nanopartículas de óxido de zinc para la remoción de arsénico y utilizaron las hojas del árbol *Acacia catechu* porque estas contienen flavonoides y fenoles. Las nanopartículas se caracterizaron mediante espectroscopia UV-VIS, XRD, FT-IR, MEB, DLS y MET. Se observó que la máxima adsorción se alcanzó a un pH de 7, una dosis de 2 g/L, con 30 mg/L en 40 minutos. Utilizando nanopartículas de ZnO, se logró un porcentaje de eliminación de arsénico del 90.3%.

Macías (2022), sintetizó nanopartículas magnéticas de hierro (NPMs) para la adsorción de arsénico (As), usó el método de coprecipitación química, se caracterizó el tamaño mediante MEB y AFM, y la composición mediante espectroscopia infrarroja, obteniéndose un tamaño promedio de 36 nm y enlaces (Fe-O) respectivamente. Para la determinación del nivel de adsorción de As que tienen las NPMs, se realizaron tres tratamientos al agua con diferentes cantidades de ferrofluido (0.5 ml/L, 1 ml/L y 2 ml/L) en diferentes tiempos mediante el análisis de espectrofotometría de adsorción atómica al inicio y fin de los tratamientos. Los resultados determinaron que la cantidad de NPMs influye en la adsorción de As, el mejor tratamiento logró un porcentaje de 36%, en un tiempo de 15 min con 0.5 ml/L de magnetita.

Torres et al. (2022), sintetizaron nanopartículas de dióxido de plata-titanio (Ag-TiO₂) con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* para la desinfección bacteriana de agua. Para determinar los polifenoles utilizaron el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, obteniendo concentraciones oscilantes entre 15000 ppm a 54000 ppm. Las nanopartículas fueron evaluadas mediante MET, obteniéndose formas esféricas en la mayoría de los casos aglomeradas con un rango de tamaño de 11-14 nm. Los resultados de inhibición bacteriana en el agua fueron cercanos al 100%.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Cañazaca & Ccama (2017), llevaron a cabo la biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro cero valente empleando hojas de *Eucalyptus globulus*, con el propósito de remover Cr(VI). Para la extracción de polifenoles, utilizaron el método de extracción asistida por microondas con disolventes de agua/etanol y únicamente agua, logrando concentraciones de 2557.88 ppm y 2392.53 ppm, respectivamente. La caracterización de las nanopartículas se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y dispersión dinámica de luz (DLS), resultando en partículas con morfología granular y esférica, con tamaños que oscilan entre 150 y 200 nm. Se llevaron a cabo ensayos de remoción utilizando soluciones sintéticas de cromo VI, variando el pH entre 3 y 5, y alcanzando una eficiencia de remoción del 92.6%.

Peréz y Villalva (2021), evaluaron el efecto del volumen del extracto de las hojas de *Eucalyptus globulus* (5 ml-15 ml) y la concentración de FeCl₃ (0.1 M-0.6 M) en la biosíntesis y caracterización de nanopartículas de hierro (NPs-Fe) utilizando técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB), dispersión de energía de rayos X (EDX) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La combinación óptima fue un volumen de 15 ml de *Eucalyptus globulus* con 0.1 M de FeCl₃, lo que favoreció un incremento en la cantidad de nanopartículas formadas. Los resultados del análisis mediante MEB indican la formación de nanopartículas con morfología esférica y un diámetro promedio de 93.1 nm. El análisis de EDX reveló que las NPs-Fe estaban compuestas por un 86.2% de hierro, 6.2% de oro, 1% de cloro, 6.1% de oxígeno y 0.5% de carbono. Por otro lado, el análisis de FTIR identificó la presencia de grupos funcionales como ácido carboxílico, alcoholes y fenoles en las NPs-Fe. En cuanto a la remoción del colorante utilizado en tintorería, se evaluó el efecto de 2 ml de NPs-Fe en 1 L de solución colorante, logrando una disminución de la concentración del colorante hasta 50.71 mg/L.

Asmat et al., (2022), llevaron a cabo la biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro usando como reductor orgánico el extracto de *Eucalyptus globulus*, se caracterizó NPs-FeO mediante UV/VIS, FTIR, DRX, EDS y STEM. Los resultados obtenidos de UV/VIS revelaron una notable capacidad reductora y estabilizante del extracto, mostrando una morfología esférica con un tamaño promedio de 3 nm. La caracterización estructural mediante FTIR identificó la presencia de grupos funcionales OH en modo de flexión y grupos funcionales alcohólicos. El análisis de DRX confirmó la presencia de magnetita. El análisis elemental por EDS determinó las proporciones de hierro y oxígeno, que fueron de 66.4% y 33.6%, respectivamente. Por último, el análisis por STEM corroboró la formación de nanopartículas esféricas uniformes, sin evidencias de materia orgánica proveniente del extracto.

Andrade et al. (2022), sintetizaron nanopartículas FeO utilizando extracto de *Eucalyptus globulus* como agente reductor orgánico para evaluar la influencia del tipo de disolvente (el alcohol al 96% o etanol absoluto). Según la caracterización, FT-IR sugirió que los grupos C=C y C=O actúan como agentes reductores, debido a la presencia de terpenoides

y flavonoides. Las nanoestructuras obtenidas mostraron geometría esférica en ambos casos, con tamaños de 2,34 y 4,17 nm para disolventes de alcohol al 96% y etanol absoluto, respectivamente. Además, se identificaron fases magnéticas de magnetita y maghemita. Finalmente, se utilizaron las NPs-FeO para la remediación de suelos contaminados con cromo y cadmio, logrando una eficiencia del 100% en la remoción de ambos metales.

Gamarra et al. (2022), evaluaron las propiedades estructurales, ópticas y eliminación de As(V) de NPs-TiO₂ dopado con Fe sintetizadas por sol-gel y se caracterizaron por DRX, espectroscopia Raman, BET, UV-VIS y MEB. Los resultados mostraron dependencia entre el tamaño de los cristalitas y la cantidad de dopante, que disminuyó de 13.02 a 12.81 nm. Así también observaron que las propiedades ópticas de la banda prohibida disminuyeron de 3,2 a 2,86 eV y la mayor remoción de As(V) alcanzaron un 94% a pH 5.

2.2 Marco teórico

2.2.1 El agua

Es un recurso natural renovable esencial para la vida, vulnerable y estratégicamente importante para el desarrollo sostenible, la preservación de los ciclos y sistemas naturales que la sustentan y la seguridad nacional (ANA, 2019).

2.2.2 Aguas subterráneas

Se sitúan por debajo del nivel freático y emergen a la superficie de forma natural mediante los cauces fluviales (Collazo & Montaña, 2012). En ángulos inclinados, el agua subterránea se desplaza gradualmente hacia zonas de menor elevación, donde finalmente alimenta a los arroyos, ríos, lagunas, lagos y océanos (Anónimo, 2015).

2.2.3 Arsénico (As)

Por ser un elemento ubicuo, el arsénico aparece naturalmente en la corteza terrestre, así como en el agua, aire, suelo, los sedimentos y los organismos vivos (Martínez, 2017). A

través de la cadena trófica existe una alta probabilidad de bioacumulación y transmisión a la pirámide ecológica (Chandan et al., 2023).

2.2.4 Fuentes de arsénico

Las principales fuentes de arsénico en el agua se originan tanto de procesos naturales como de actividades antropogénicas (Figura 1):

a. Fuentes naturales

El As puede contaminar el sistema de agua por varios procesos naturales, como la deposición de minerales, el vulcanismo, la erosión/abrasión de los materiales originales del suelo y las rocas, y la deposición de la atmósfera (Abidli et al., 2022).

b. Fuentes antropogénicas

Las actividades humanas como la minería, la fundición, la quema de combustibles fósiles, los pesticidas, los fertilizantes, los plaguicidas arsenicales y la eliminación de residuos industriales son las principales causas de la contaminación por As en el agua (Jha & Tripathi, 2021; Siddiqui et al., 2019).

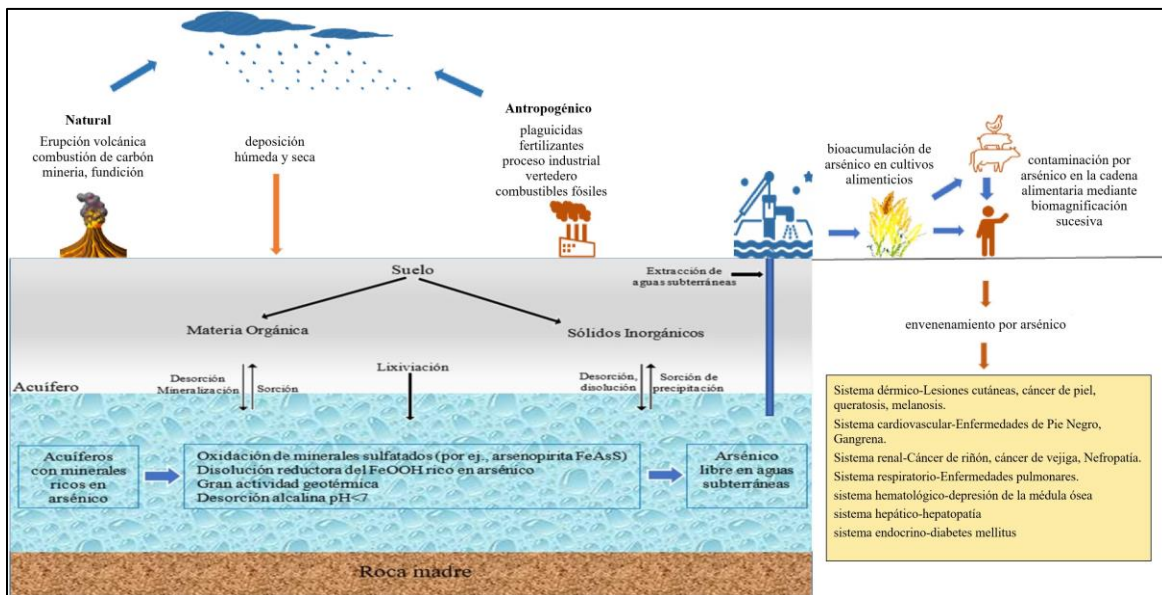


Figura 1. Mecanismo de disolución del arsénico en las aguas subterráneas y su ciclo

Fuente: Jha & Tripathi (2021).

2.2.5 Propiedades fisicoquímicas del arsénico en el agua

El As aparece principalmente en cuatro estados de oxidación -3 , 0 , $+3$ y $+5$, donde $+3$ y $+5$ son los más prevalentes en medios acuosos (Liu et al., 2020; Yadav et al., 2021). El As existe en su forma orgánica e inorgánica (Horst et al., 2015). En su forma orgánica, predomina como ácido monometilarsénico, ácido dimetilarsénico y arsenoazúcar (Sinha et al., 2023). Y en su forma inorgánica, se encuentra disuelta en el agua como arsenito As(III) en forma de H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} , AsO_3^{3-} y arseniato As(V) en forma de H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} (Lillo, 2007; Sarkar et al., 2022). Sus estructuras se representan en la figura 3.

2.2.6 Distribución del As(III) y el As(V) en el agua

Puede estar presente en formas oxianiónicas según el Eh y el pH del agua subterránea (Sarkar et al., 2022). La distribución del As(III) y el As(V) en el agua depende del pH, es decir, en su forma H_3AsO_3 tiene sensibilidad a la movilización a valores de pH entre 2 a 9 y a pH superior a 9 se presenta como H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} , AsO_3^{3-} (Sinha et al., 2023). En su forma H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} tiene sensibilidad a la movilización a valores de pH entre 3 a 6 y de 8 a 10.5, respectivamente, mientras que cada una de las dos especies coexiste a valores de pH entre 6 y 8 tanto en condiciones oxidantes y reductoras (Smedley & Kinniburgh, 2002). Las especies prevalentes por debajo de pH 2 y más allá de pH 12 son H_3AsO_4 y AsO_4^{3-} , respectivamente (Sinha et al., 2023). La distribución del arsenito y del arseniato en función del pH, se ilustra en la figura 2.

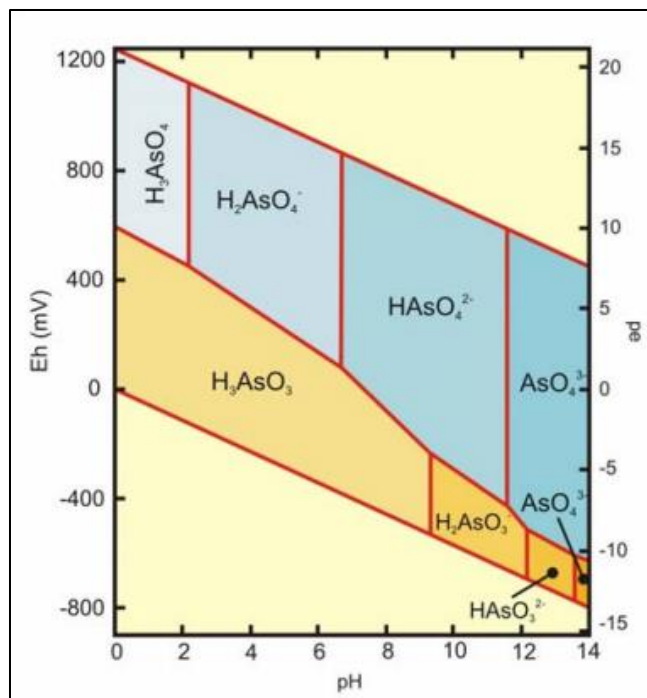


Figura 2. Diagrama Eh-pH que representa las especies acuosas de arsénico en el sistema As-O₂-H₂O a 25 °C y 1 bar de presión total. Fuente: Lillo (2007).

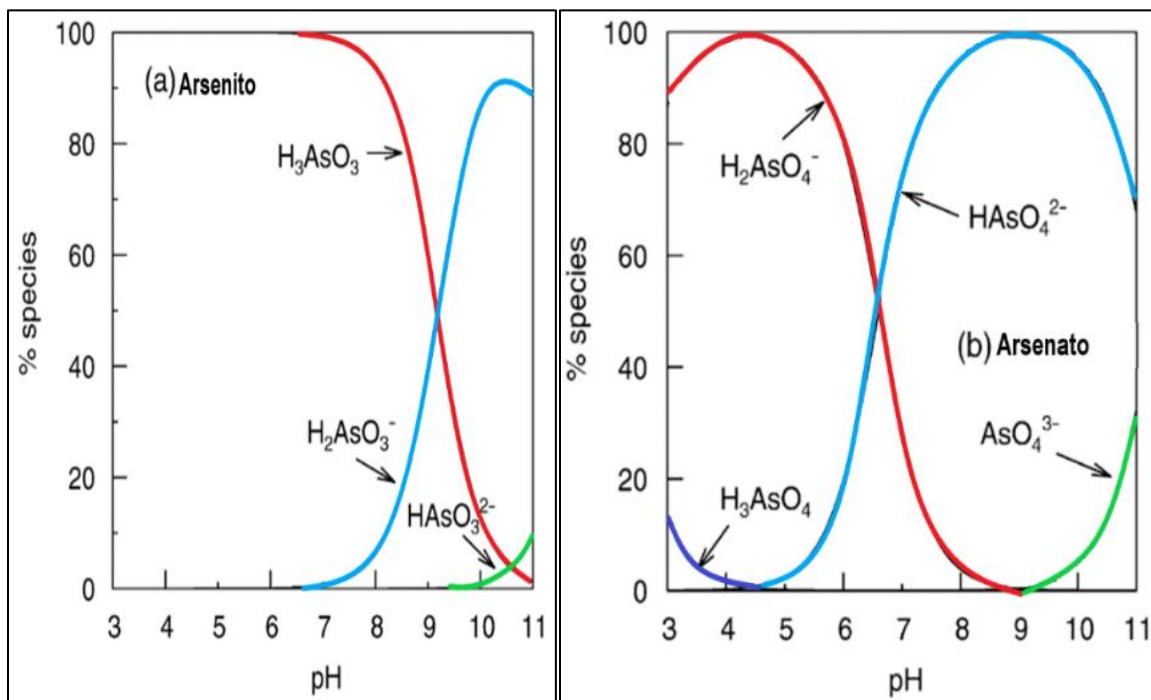


Figura 3. Estructuras de diferentes especies del arsenito y del arseniato en función del pH del agua. Fuente: Smedley & Kinniburgh (2002).

2.2.7 Toxicidad del As

El As tiene un alto nivel de toxicidad incluso en concentraciones bajas y puede permanecer durante mucho tiempo en el agua subterránea. La ingestión a través del agua y los alimentos es la mayor vía de exposición al arsénico, mientras que la inhalación y la absorción a través de la piel se consideran vías menores (Celebi et al., 2021). El consumo prolongado de agua contaminada con As causa envenenamiento crónico en los seres humanos (Feng et al., 2023). La arsenicosis es el término que agrupa los efectos en la salud por el envenenamiento por arsénico (Sarkar et al., 2022), así como el Parkinson, melanosis, leucomelanosis, queratosis, gangrena, irritación dérmica y una variedad de cánceres (de piel, pulmón, hígado y riñón). Además, el arsénico tiende a bioacumularse, biotransformarse y biomagnificarse a lo largo de la cadena alimenticia (Kumar et al., 2022). La OMS clasifica al arsénico como una de las 10 sustancias químicas de mayor preocupación para la salud humana y otros organismos vivos.

2.2.8 Métodos convencionales de eliminación de As

Tabla 1

Evaluación comparativa de diferentes técnicas de eliminación de arsénico

Técnica	Ventajas	Desventajas	Dependencia del pH	Remoción eficiente		Referencia
				As(III)	As(V)	
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil de usar 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación parcial de arsénico • Proceso lento • Gran producción de lodos 	No	Menos eficaz	Menos eficaz pero más que As(III)	Siddiqui et al. (2019)
Coagulación	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil de usar • Utiliza productos químicos simples • No se requiere monitoreo 	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos tóxicos • Se requiere capacitación • La eficiencia se reduce en presencia de iones competitivos • Requiere preoxidación de As (III) 	Si	Menos eficaz	Extremadamente eficaz	Abidli et al., (2022); Siddiqui et al., (2019)
Electrocoagulación	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de usar y mantener • Materiales de fácil acceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos con altos requerimientos energéticos • La eficiencia se reduce por la forma, la dosis del coagulante y la presencia de iones competitivos 	Si	Menos eficaz	Extremadamente eficaz	Sinha et al., (2023); Water, (2019)

Tabla 1 (Continuación)

Evaluación comparativa de diferentes técnicas de eliminación de arsénico (Parte 2)

Técnica	Ventajas	Desventajas	Dependencia del pH	Remoción eficiente		Referencia
				As(III)	As(V)	
Filtración por membranas	<ul style="list-style-type: none"> • Respetuoso con el ambiente • Operaciones sencillas • Menor consumo de productos químicos • Alta selectividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo operativo y mantenimiento • Problemas de ensuciamiento de la membrana • Se aplica a flujos de bajo tamaño • Produce aguas residuales altamente contaminadas • Afectado en gran medida por los iones competitivos • Bajas tasas de recuperación de agua 	No	Menos eficaz	Más del 80%	Abidli et al., (2022); Siddiqui et al., (2019); Sinha et al., (2023)
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> • Respetuoso con el ambiente • Alto caudal de agua tratada • Resina exclusiva específica de iones • Se utiliza para aguas industriales 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de operación • Se requiere capacitación • Baja vida útil de las resinas • La resina en sí misma a veces puede convertirse en la fuente de contaminación orgánica • Problema de eliminación de lodos • Eficiencia reducida por iones interferentes • Requiere preoxidación de As(III) 	Si	Menos eficaz	Altamente efectivo más del 90%	Abidli et al., (2022); Siddiqui et al., (2019)

Tabla 1 (Continuación)

Evaluación comparativa de diferentes técnicas de eliminación de arsénico (Parte 3)

Técnica	Ventajas	Desventajas	Dependencia del pH	Remoción eficiente		Referencia
				As(III)	As(V)	
Ósmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> Fácil monitoreo No se utiliza producto químico Sin residuos tóxicos Respetuoso con el ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> Costo muy alto Cambia el sabor del agua Requiere preoxidación de As(III) 	No	Más del 60%	Altamente efectivo más del 90%	Siddiqui et al., (2019); Water, (2019)
Biorremediación	<ul style="list-style-type: none"> Operaciones sencillas Crecimiento rápido (microorganismos) Método rentable 	<ul style="list-style-type: none"> Largo proceso de eliminación Mecanismos de eliminación ambiguos No se trata de un método completamente establecido, por lo que se necesita más investigación Crecimiento lento (fitorremediación) Escalabilidad desafiante 	No	Altamente efectivo pero inferior a la eliminación de As(V)	Altamente efectivo más del 90%	Abidli et al., (2022); Choque, (2019)
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> Menor costo Alta eficiencia Implementado a nivel doméstico 	<ul style="list-style-type: none"> Produce residuos sólidos tóxicos Regeneración y separación del adsorbente Los sólidos en suspensión y otras sales afectan la eficiencia de adsorción 	Si	Altamente efectivo pero inferior a la eliminación de As(V)	Altamente efectivo más del 90%	Abidli et al., (2022); Siddiqui et al., (2019); Sinha et al., (2023)

2.2.9 Nanotecnología

La nanotecnología es una ciencia multidisciplinaria que relaciona la física, química, biología y ciencia de los materiales para la creación y construcción de nanomateriales. Esta ciencia consta del entendimiento, manipulación y control de la materia (Valenzuela et al., 2023).

Los avances de la nanotecnología en la remediación ambiental ofrecen nuevas soluciones para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, ya que estos nanomateriales expresan propiedades como una elevada área superficial específica, alta reactividad, sensibilidad óptica respecto a cambios en tamaño y forma, etc. Algunos nanomateriales que se han usado en la remediación de aguas residuales son: la nanofiltración, los nanotubos de carbono, nanopartículas de oro, nanopartículas de hierro cero valente, nanopartículas de dióxido de titanio, entre otros, y los óxidos metálicos son los más utilizados para la remoción de metales pesados, ya que presentan una afinidad específica hacia este tipo de contaminantes en términos de alta capacidad y selectividad (Marimon, 2018).

2.2.10 Nanopartículas (NPs)

Se denomina nanopartículas a las estructuras compuestas por unos átomos o moléculas dentro de la nanoescala (Hernández, 2021) cuyo tamaño está dentro de 1 y 100 nanómetros (nm) (Kumar et al., 2022; Macías, 2022), debido al tamaño aparecen propiedades ópticas, eléctricas, electrónicas, magnéticas y mecánicas nuevas o diferentes dependiendo de la forma (esféricas, triangulares, hexagonales e irregulares) y el tamaño (Marimon, 2018). En la nanoescala, existe un incremento en la relación superficie-volumen de cualquier material (Palomares, 2022).

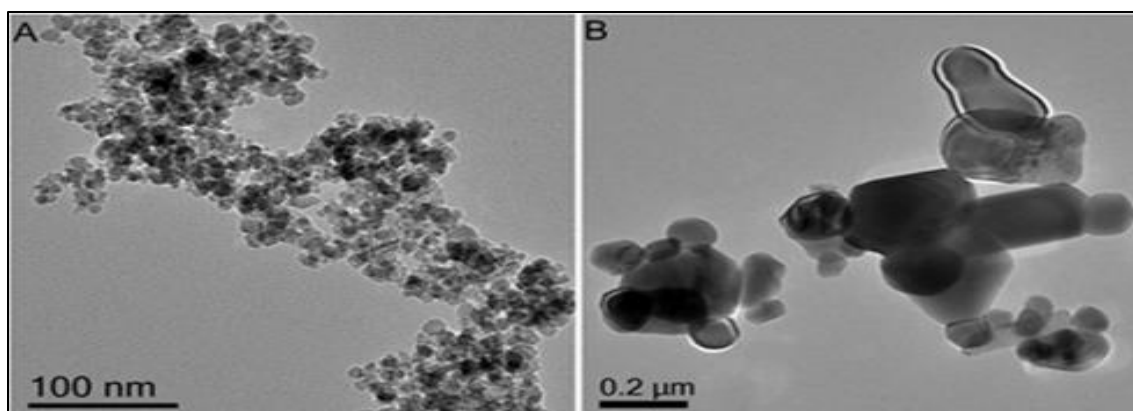


Figura 4. Micrografías MET de nanopartículas de Fe_3O_4

Fuente: Iconaru et al. (2016).

2.2.11 Nanopartículas metálicas (NPMs)

Las NPMs son las más estudiadas por sus propiedades físicas, químicas y biológicas que son intrínsecas a su tamaño nanométrico. Son fáciles de sintetizar, controlar su tamaño y forma (Palomares, 2022). Para la eliminación del arsénico, se usan estas NPMs por su alta capacidad de adsorción, alta durabilidad física o química y una alta capacidad de reutilización. Se tienen diferentes tipos de óxidos metálicos de tamaño nanométrico como adsorbentes. Entre ellos, el óxido de hierro, el óxido de titanio, el óxido de aluminio, el óxido de circonio y el dióxido de manganeso son las principales NP de óxido metálico (Siddiqui et al., 2019).

2.2.12 Métodos de síntesis de obtención de nanopartículas

Para obtener nanomateriales de los tamaños, formas y funcionalidades deseados, existen dos principios fundamentales de síntesis, el Top-Down (de arriba hacia abajo) y Bottom-Up (de abajo hacia arriba) (Figura 5) (Singh et al., 2018). El primero consiste en moler un material; los nanomateriales/nanopartículas se preparan a través de una amplia gama de enfoques de síntesis, como técnicas litográficas, molienda con bolas, grabado y pulverización catódica. El segundo, consiste en formar estructuras moleculares y atómicas; incluye diversos métodos como la deposición química de vapor, los procesos sol-gel, la pirólisis por aspersión, la pirólisis por láser y la condensación atómica/molecular (Hernández, 2021; Singh et al., 2018).

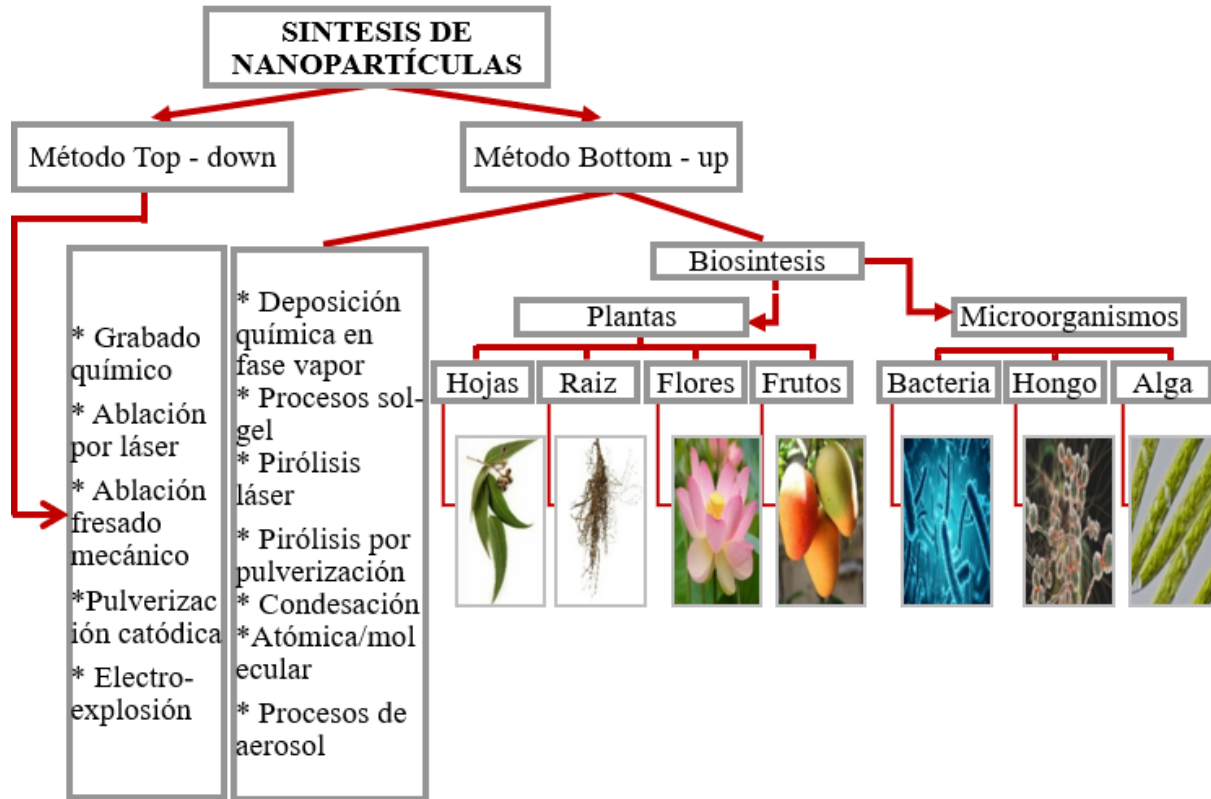


Figura 5. Diferentes enfoques de síntesis disponibles para la preparación de nanopartículas metálicas
Fuente: Singh et al. (2018).

Tabla 2

Desempeño de nanopartículas en la adsorción de As en el agua

Nº	Nanopartícula	Método de síntesis	Tamaño (nm)	Eficiencia de remediación (%)	Autor
1	ZnO	Biosíntesis	3.3	As total 91%	Chandan et al. (2023)
2	Hierro cero valente (Fe ⁰)	Biosíntesis	30 - 80	As total 61% - 99%	Ferro (2020)
3	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Coprecipitación	11 - 69	As total 19.52% - 36.41%	Macías (2022)
4	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Coprecipitación	0.3- 14.2	Capacidad de adsorción 66,53 mg.g ⁻¹ As(V)	Iconaru et al. (2016)

Tabla 2 (Continuación)*Desempeño de nanopartículas en la adsorción de As en el agua (Parte2)*

N°	Nanopartícula	Método de síntesis	Tamaño (nm)	Eficiencia de remediación (%)	Autor
5	Maghemita (γ - Fe_2O_3) funcionalizadas con almidón	Coprecipitación	5 - 20	As(III) 95% - 99%	Siddiqui et al. (2019)
6	FeO soportadas en Zeolita	Coprecipitación	11 - 13	As(V) 97%	Tapia & Huanca (2019)
7	FeO enmendadas con cascara de arroz	Coprecipitación	12	As total 95%	Pillai et al. (2020)
8	TiO ₂ dopado con hierro	Sol-Gel	13.21 – 14.69	As(V) 88% - 94%	Gamarra et al. (2022)
9	ZrO ₂ amorfo ricas en oxígeno	Ionotérmica	-	As(III) y As(V) Adsorción completa (>99%)	Seynnaeve et al. (2021)

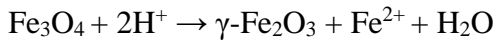
2.2.13 Nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO)

Las NPs-FeO presentan características supermagnéticas, lo que evitan la aglomeración de los metales cuando se encuentran dispersos. Los óxidos de hierro se encuentran entre los oxidantes metálicos más aplicables para la adsorción de metales pesados (Marimon, 2018). Como resultado, es más fácil eliminarlos del medio acuoso. Hay dos combinaciones atómicas conocidas como maghemita (γ - Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4) que se consideran nanopartículas de hierro (Méndez et al., 2020).

La siguiente reacción química ocurre durante la síntesis de nanopartículas de Fe_3O_4 , que requiere la adición de una base para coprecipitar las sales acuosas de Fe^{2+} y Fe^{3+} :



La Fe_3O_4 es sensible a la oxidación y no muy estable. Por lo tanto, se convierte en maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) en presencia de oxígeno, de acuerdo con la reacción química:



En la síntesis de NPs-FeO, el tamaño se ve restringido por factores cinéticos que controlan el proceso de crecimiento cristalino. Sin embargo, se puede controlar con relativo éxito ajustando correctamente el pH, la fuerza iónica, la temperatura, la naturaleza de las sales, o el coeficiente de concentración $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ (Escobaro et al., 2019).

En la síntesis verde se sintetizan las nanopartículas mezclando el extracto vegetal y la sal de hierro en una proporción específica, calentándolos en un termostato durante un intervalo de tiempo específico a temperatura ambiente. El cambio de color indica la formación de nanopartículas de hierro (tabla 3), la oxidación de la solución precursora se evita manteniendo las nanopartículas de hierro en una atmósfera de nitrógeno (Selvaraj et al., 2022).

2.2.14 Óxido de hierro (FeO)

Los óxidos de hierro se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, siendo el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Están compuestos de hierro junto con oxígeno y/o hidróxidos OH. Pueden estar presentes en sus dos estados de agregación, como Fe^{+2} y Fe^{+3} , formando óxidos u oxihidróxidos. Existen 16 óxidos de hierro, algunos de los más comunes son: goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), magnetita (Fe_3O_4), maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), akaganeita ($\beta\text{-FeOOH}$), entre otros (Gregorio et al., 2018). Estos óxidos muestran un comportamiento magnético y se utilizan eficientemente como adsorbentes para la remediación del agua con arsénico (Siddiqui et al., 2019).

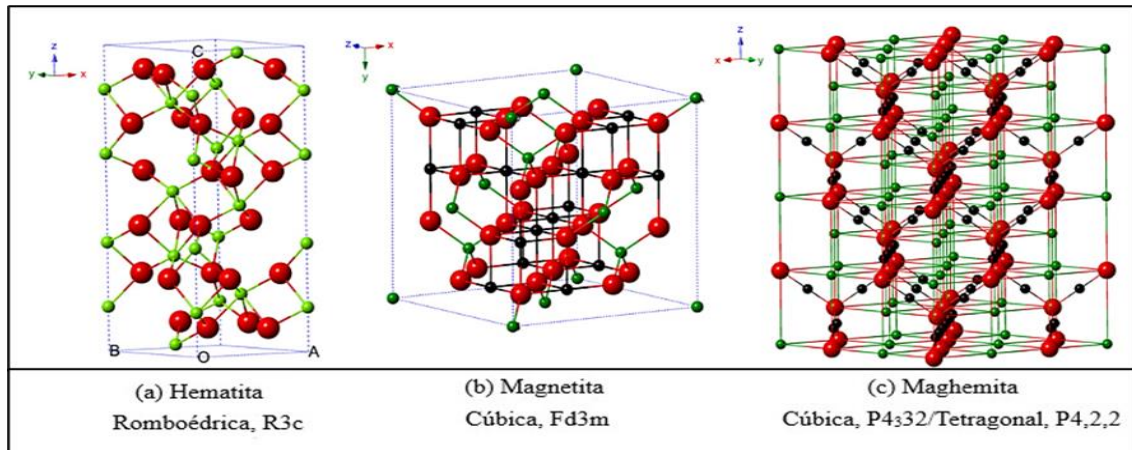
Tabla 3*Principales óxidos e hidróxidos de hierro empleados en la adsorción de As*

Nombre	Fórmula	Color
Magnetita	Fe ₃ O ₄	negro agrisado
Hematita	α - Fe ₂ O ₃	pardo rojizo, gris oscuro, negro
Manghemita	γ - Fe ₂ O ₃	rojo ladrillo, marrón, pardo oscuro
Akaganeita	β - FeOOH	marrón oxidado
Goetita	α - FeOOH	marrón oscuro, amarillento

Fuente: Martínez et al. (2018).

2.2.15 Estructura y propiedades de los óxidos de hierro

Los óxidos de hierro asociados a las nanopartículas metálicas más investigadas se clasifican en tres tipos: hematita [α -Fe₂O₃], magnetita [Fe₃O₄] y maghemita [γ -Fe₂O₃].

**Figura 6.** Estructura de la hematita (a), magnetita (b) y maghemita (c).

Fuente: Wu et al. (2015).

a. Hematita (α -Fe₂O₃)

La hematita es el óxido más estable y se comporta como semiconductor tipo n en factores ambientales. En este contexto, la banda de conducción se forma a partir de los orbitales d de Fe³⁺, mientras que la banda de valencia está compuesta por los orbitales 3d de Fe³⁺, junto con contribuciones de los orbitales 2p de oxígeno no enlazante. Tal como se muestra en la figura 6, la hematita tiene una estructura romboédrica en la que los iones Fe³⁺ llenan dos

tercios de los sitios octaédricos dentro de una red hexagonal. Este material se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones, como catalizadores, pigmentos y sensores de gas, debido a su bajo costo y alta resistencia a la corrosión (Escobaro et al., 2019).

b. Magnetita (Fe_3O_4)

La magnetita es un óxido de hierro mixto que exhibe una estructura de espinela inversa y un sistema cúbico centrado en las caras, con una celda unitaria compuesta por 56 átomos, de los cuales 32 son átomos de oxígeno y 24 son cationes de hierro. Entre estos, 16 se encuentran en estado férrico (Fe^{3+}) y 8 en estado ferroso (Fe^{2+}). En esta disposición, los átomos de oxígeno configuran una celda cúbica centrada en las caras, mientras que los cationes de hierro ocupan los espacios intersticiales; específicamente, los cationes Fe^{3+} ocupan posiciones tetraédricas, y tanto Fe^{3+} como Fe^{2+} están presentes en posiciones octaédricas. Esta organización de los cationes de diferentes valencias confiere al sólido resultante un comportamiento ferromagnético (Tapia & Huanca, 2019).

c. Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

La maghemita tiene la misma estructura que la magnetita, y puede considerarse como una magnetita deficiente en Fe(II) y se forma por la oxidación topotáctica (sin cambio estructural) de la magnetita (Escobaro et al., 2019) con celda unitaria cúbica en la cual cationes trivalentes están distribuidos sobre sitios de redes trioctaedrales y octaedrales (Tapia & Huanca, 2019).

2.2.16 Biosíntesis de nanopartículas

También llamada síntesis verde, es una técnica que evita la producción de subproductos nocivos mediante la creación de procedimientos de síntesis fiables, sostenibles y respetuosos con el ambiente (Singh et al., 2018), una alternativa de bioproducción de nanopartículas mediante un material metálico (oro, plata, hierro, cobre y óxidos metálicos) (Palomares, 2022) y un material biológico (bacterias, hongos, algas y extractos de plantas) como bioreductor ecológico (Figura 7) (Singh et al., 2018).

Los extractos de plantas son mejores para la producción de nanopartículas a gran escala, para la síntesis de nanopartículas de metal/óxido de metal. La biodiversidad vegetal se ha considerado ampliamente debido a la disponibilidad de fitoquímicos efectivos en varios extractos de plantas, especialmente en hojas como las cetonas, aldehídos, flavonas, amidas, terpenoides, ácidos carboxílicos, fenoles y ácidos ascórbicos (Singh et al., 2018).

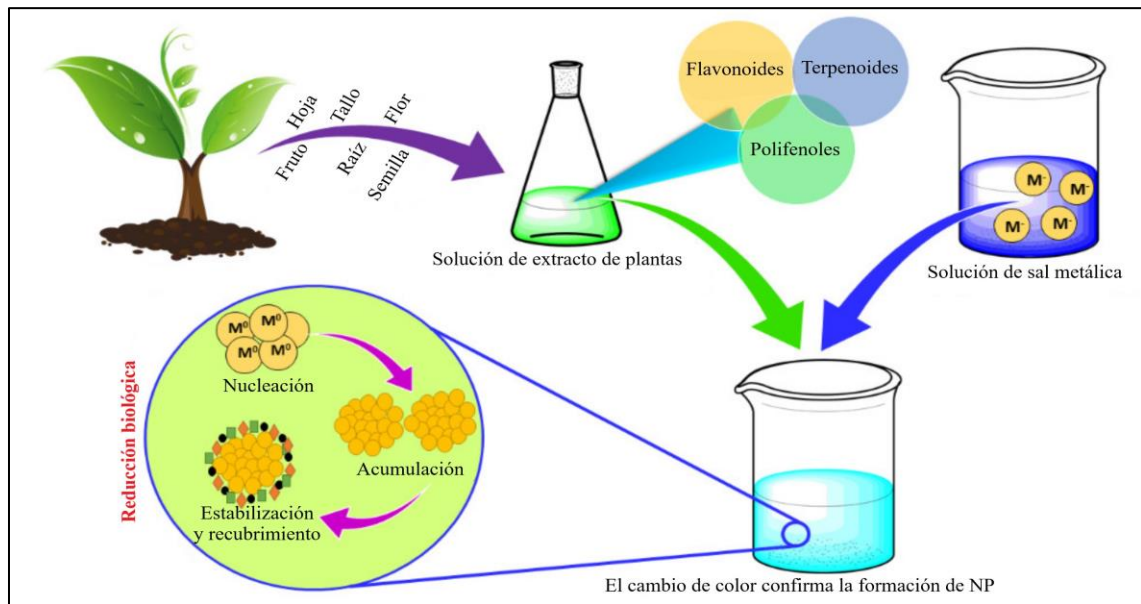


Figura 7. Representación gráfica sobre la biosíntesis de nanopartículas mediante plantas

Fuente: Dikshit et al. (2021).

a. Metabolitos secundarios de las plantas

También llamadas biomoléculas, son componentes clave en la biosíntesis de nanopartículas al jugar estos el papel de agentes reductores y estabilizantes (Singh et al., 2018). Se ha encontrado que las plantas poseen una capacidad para hiperacumular y reducir los iones metálicos inorgánicos presentes en el medio debido a la presencia de biomoléculas que en su mayoría son polifenoles que se encuentran en diferentes partes de la planta (Valenzuela et al., 2023). Los principales fitoquímicos presentes en las plantas son flavonas, terpenoides, azúcares, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y amidas (Singh et al., 2018).

Las biomoléculas se clasifican según su estructura, función y procesos de biosíntesis, las tres grandes clases son: terpenoides (compuestos aromáticos y volátiles que dan aroma y sabor a las plantas), fenólicos (compuestos que tienen función de protección frente a otros organismos, así como de generador de colores atractivos para la polinización de las plantas y dispersión de semillas), y alcaloides (compuestos naturales para alejar a los organismos herbívoros) (García & León, 2021).

b. Influencia de los metabolitos secundarios en la biosíntesis de NPs-Fe₃O₄

El desarrollo de nanopartículas con metabolitos secundarios (MTS) es efectiva. Las interacciones termodinámicas, como las fuerzas de Van der Waals y las atracciones electrostáticas, son repulsivas para las nanopartículas metálicas estables. En la biosíntesis, se suelen dar dos formas de estabilización (Figura 8) formando una estabilización electro-estérica. Esta combinación de los dos genera un tensoactivo iónico con extremos de cadena larga y grupo de cabeza polar, generando una doble capa eléctrica alrededor de las NPs y proporcionando repulsión estérica dentro de las NPs, lo que conduce a un sistema de estabilización mutua (Valenzuela et al., 2023).

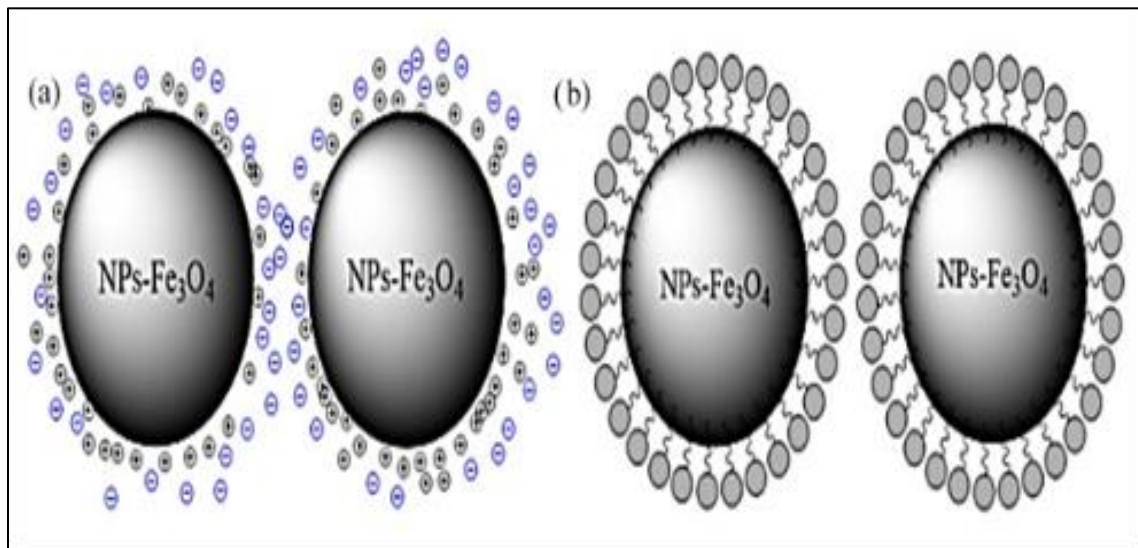


Figura 8. Tipos de estabilización: (a) electrostática, (b) estérica

Fuente: Valenzuela et al. (2023).

La complejidad de la estabilización estérica se debe al fenómeno que ocurre durante la síntesis entre los polifenoles y las sales de hierro. Por ejemplo, Wang et al., (2015) propuso una estructura química de hierro-polifenoles (Figura 10), donde los polifenoles tienen la función de reducir y estabilizar las NPs, es decir, reducen el Fe^{+3} en Fe^{+2} .

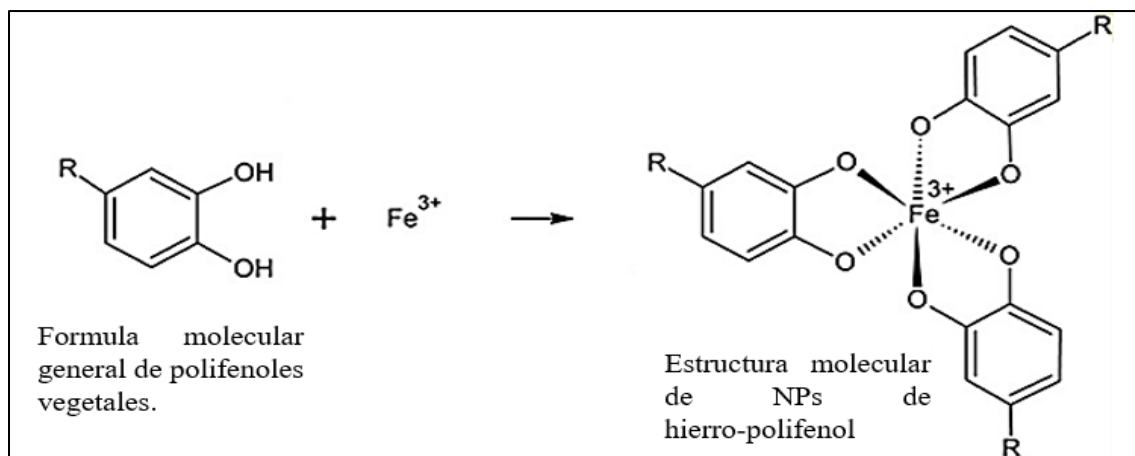


Figura 9. Posible estructura del complejo de NPs-Polifenol

Fuente: Wang (2013).

Los metabolitos secundarios también desempeñan el papel de estabilizantes estéricos y pueden actuar como estabilizadores electrostáticos. No obstante, este complejo de NPs-polifenol se oxida rápidamente con la presencia de O_2 disuelto en la solución de reacción; este proceso es conocido como autooxidación (Valenzuela et al., 2023).

c. Mecanismo de la biosíntesis

El proceso de síntesis de NPs utilizando extractos de plantas se puede resumir de manera teórica en tres etapas de reacción: (1) etapa de activación, (2) etapa de crecimiento y (3) etapa de estabilización y/o terminación (Valenzuela et al., 2023).

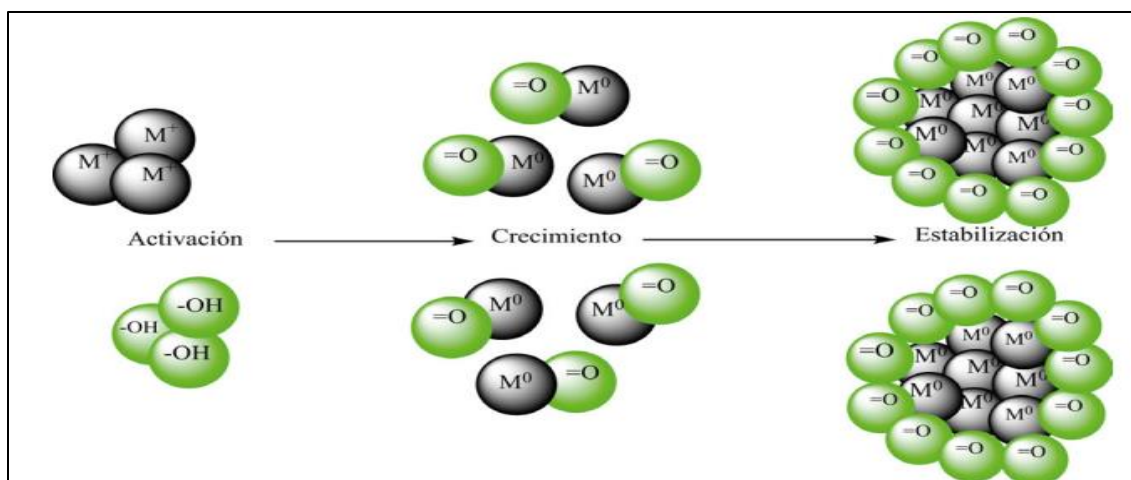


Figura 10. Proceso de biosíntesis de NPs con extractos de plantas

Fuente: Valenzuela et al. (2023).

Primero, etapa de activación que implica la reducción biológica de iones metálicos y sales, así como en el proceso de nucleación de los iones metálicos que han sido reducidos. Durante esta fase, los iones metálicos se extraen de los precursores salinos y son reducidos por los metabolitos secundarios presentes en los extractos vegetales. A continuación, ocurre la nucleación, donde se incrementa la energía de Gibbs, lo que facilita la generación de las nanoparticulas. Segundo, etapa de crecimiento (combinación espontánea de partículas diminutas con otras mayores, se aglomeran entre sí por fuerzas electromagnéticas y de Van der Waals para formar un sinfín de NPs) mediante un proceso conocido como maduración de Ostwald (Singh et al., 2018). Tercero, etapa de terminación o estabilización es donde los metabolitos secundarios presentes en el extracto se encargan de la estabilización de las NPs, reduciendo la energía termodinámica desfavorable en la superficie, impidiendo que estas se aglomeren y crezcan de tal forma que rebasen la escala de los 100 nm, en dicha fase se define la forma y el tamaño de las NPs producidas (Singh et al., 2018; Valenzuela et al., 2023).

2.2.17 Extracto de *Eucalyptus globulus*

El eucalipto es un árbol natural de Australia y Tasmania, que comprende más de 140 géneros y alrededor de 3800 especies y subespecies, distribuidas en áreas tropicales y subtropicales. Son cultivadas extensivamente en diferentes partes del mundo debido a su rápido crecimiento y aumento de la biomasa leñosa, así como en Brasil, África, Sudeste de

Asia y Sur de Europa para la producción de madera, fabricación de pulpa de papel y obtención de aceite esencial (Nolazco et al., 2020). En el Perú, el eucalipto habría llegado en 1862 con un joven francés llamado Francois Lapierre Rousseau, desde entonces se diseminó por varios departamentos como Cerro de Pasco, Junín, Cusco y Áncash (Escobar, 2022).



Figura 11. Árbol de *Eucalyptus globulus*

a. Taxonomía

El *Eucalyptus globulus* Labill presenta la siguiente clasificación taxonómica según el sistema de clasificación filogenético de Adolph Engler:

Reino: Plantae

Sub reino: Phanerogamae

División: Angiosmermae

Clase: Dycotyledoneae

Sub clase: Archychlamydeae

Orden: Myrtales

Familia: Myrtaceae

Género: *Eucalyptus*

Especie: *Eucalyptus globulus* Labill

La especie forestal, *Eucalyptus globulus* Labill, fue descrita por el botánico francés Labillardière en 1799. Su nombre deriva del griego eu (bien), kalyptus (cubierto), y globulus se le dio por el parecido de sus frutos a unos botones que estaban de moda en Francia (Juárez, 2018).

b. Descripción botánica

Los árboles de eucalipto son perennes, caracterizados por un tronco recto y una corteza exterior de color marrón claro, que tiene un aspecto similar a la piel y se desprende en tiras, mientras que la corteza interna es de color verde y lisa. Presentan hojas dimorfas con un distintivo olor a cineol: las hojas jóvenes son glaucas, sésiles, ovaladas y de tonalidad grisácea; en cambio, las hojas adultas presentan un peciolo, son alternas y tienen una forma falcada y acuminada con un nervio central marcado, que oscila entre 10 y 20 cm de longitud. Las flores son blancas y se presentan de manera solitaria, con el cáliz y la corona fusionados mediante una tapa que cubre tanto los estambres como el pistilo. El fruto es una cápsula de 1.5 a 3 cm de diámetro, y las semillas son negras, angulosas y miden entre 2 y 2.5 mm de diámetro (Ayala, 2014; Di Marco, 2015).

c. Composición química

Juárez (2018) realizó una caracterización fitoquímica del *Eucalyptus globulus* Labill a partir del extracto de la planta. Los resultados revelaron la presencia de diversos compuestos, incluyendo aminas y aminoácidos, lactosas, quinonas, saponinas, taninos, triterpenos, azúcares reductores, flavonoides, resinas, catequinas y cumarina cómo se detalla en la tabla 4.

Tabla 4*Metabolitos secundarios presentes en Eucalyptus globulus*

Metabolitos	Identificación	Intensidad
Aminas y aminoácidos	presencia	elevada
Lactosas	ausencia	baja
Quinonas	presencia	elevada
Saponinas	ausencia	baja
Taninos	presencia	elevada
Triterpenos	presencia	elevada
Azúcares reductores	presencia	elevada
Flavonoides	presencia	elevada
Resinas	presencia	elevada
Catequinas	presencia	elevada
Cumarina	ausencia	baja

Fuente: Juárez (2018).

Y los metabolitos secundarios presentes en el extracto acuoso de la hoja de eucalipto con agua fueron: los azúcares reductores, flavonoides y taninos (Juárez, 2018). Se ha demostrado que el extracto hidrofílico de las especies de *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urograndis* y *Eucalyptus maidenii* poseen un alto contenido fenólico (Gullón et al., 2019), la cantidad de fenoles de extracto es proporcional a su capacidad antioxidante (Parada, 2017). Otros componentes activos de los extractos acuosos liofilizados de *Eucalyptus globulus* son los alcaloides, azúcares reductores, saponinas, fenoles y taninos (Villacrés & Barreto, 2022).

d. Extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* como agente reductor

Aunque el mecanismo exacto de la biosíntesis de nanopartículas mediada por plantas aún no se ha explicado con claridad, los extractos de plantas pueden reducir los iones metálicos (Sachin et al., 2023). Este proceso de reducción de iones metálicos a átomos metálicos es rápido incluso a temperatura y presión ambiente (Hu & Xianyu, 2021). Los metabolitos del *Eucalyptus globulus*, como los fenólicos, tienen grupos hidroxilos (-OH) unidos a un anillo aromático (grupo fenol) (Viña, s. f.) que se acoplan con iones metálicos para formar nanopartículas (Sachin et al., 2023). Concretamente, el grupo -OH de los fenoles desempeña un papel vital en la reducción de los iones metálicos en nanopartículas (Sachin et al., 2023). Otra propiedad de los fenoles es que da positiva la reacción de caracterización con FeCl₃, originando coloración verde, azul o negra según el compuesto involucrado (Viña, s. f.).

e. Extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* como agente estabilizador

Los estudios de Gullón et al. (2019); Pabón et al. (2021) han indicado que las biomoléculas del extracto de *Eucalyptus globulus* desempeñan una función crucial en el recubrimiento de las nanopartículas, lo que es importante para la biocompatibilidad y la estabilidad (Sachin et al., 2023). Además de prevenir la aglomeración en la biosíntesis, estas biomoléculas estabilizan las nanopartículas formadas con el tamaño y la forma deseada (Gullón et al., 2019).

2.2.18 Nanopartículas biosintetizadas con diferentes especies de Eucalipto

Tabla 5

Biosíntesis de diferentes nanopartículas a partir de Eucalytus sp.

N°	Especie	Nanopartícula	Parte	Tamaño (nm)	Morfología	Autor
1	<i>Eucalyptus globulus</i>	Óxido de hierro	Hojas	3	Esférica	Asmat et al. (2022)
2	<i>Eucalyptus globulus</i>	Oro	Hojas	6.3 - 12.8	Esférica	Dzimitrowicz et al. (2019)
3	<i>Eucalyptus globulus</i>	Hierro cero valente	Hojas	72.6 – 112	Esférica	Peréz & Villalva (2021)
4	<i>Eucalyptus globulus</i>	Óxido de hierro	Hojas	25.6	Irregulares	Khoshkalam et al. (2023)
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	Óxido de hierro	Hojas	4 - 9	-	Pabón et al. (2021)
6	<i>Eucalyptus grandis</i>	Hierro cero valente	Hojas	8.97 - 25	Semicircular	Pabón et al. (2022)
7	<i>Eucalyptus sp</i>	Óxido de grafeno/hierro	Hojas	20 - 40	Irregulares	Xiao et al. (2019)
8	<i>Eucalyptus sp</i>	Hierro cero valente	Hojas	20 - 80	Esférica	T. Wang et al. (2014)
9	<i>Eucalyptus sp</i>	Hierro cero valente	Hojas	150 - 200	Granular y esférica	Cañazaca & Ccama (2017)

2.2.19 Métodos de extracción Soxhlet

Una de las operaciones básicas para realizar la biosíntesis de nanopartículas es la obtención del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*. Por ello, un método clásico de extracción es por un equipo Soxhlet, que se emplea para la extracción sólido-líquido de los analitos utilizando un disolvente líquido que se evapora y condensa en un ciclo continuo (Piñero et al., 2021). Como se muestra en la figura 12, el equipo está formado por una manta calentadora, un matraz, un cuerpo intermedio con sifón y refrigerante (López & Luque de Castro, 2020).

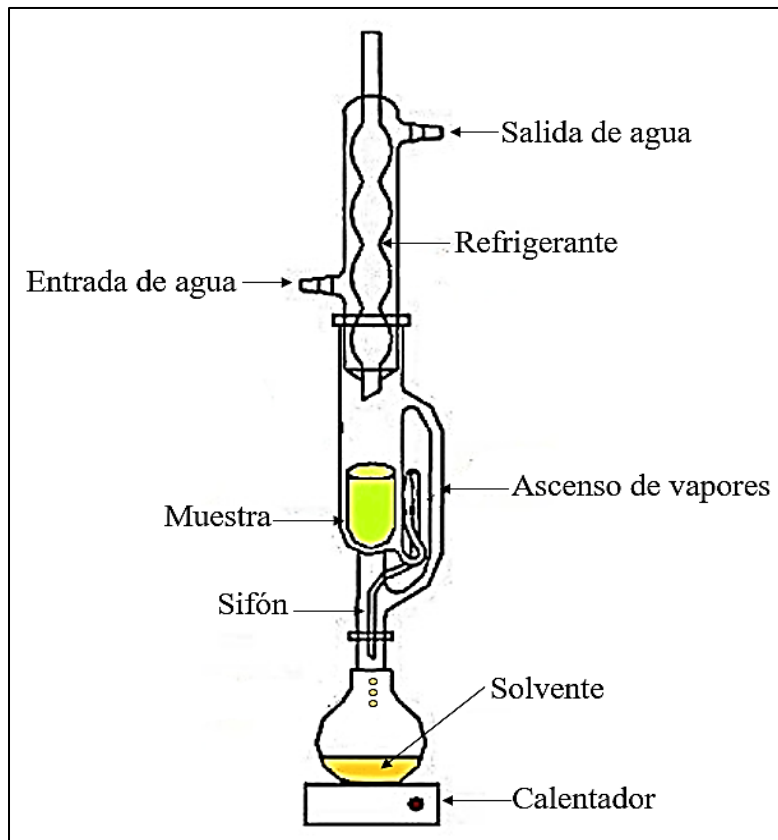


Figura 12. Extractor Soxhlet convencional

Fuente: López & Luque de Castro, (2020).

Según Núñez (2008), describe que el proceso de extracción Soxhlet se basa en lo siguiente:

- Preparación de la muestra.
- Colocación de la muestra (cartucho cilíndrico).

- Colocación del solvente (éter, cloroformo, metanol, etanol, benceno, tolueno, agua, etc.) en el matraz.
- Calentamiento, la temperatura de extracción depende del punto de ebullición del solvente. Ejemplo: 70 °C para el hexano, 35 °C para el éter dietílico, 70 °C para el etanol y 100 °C para el agua (Bontzolis et al., 2024).
- Refrigeración, la disposición de las mangueras de entrada y salida es esencial.
- Operación de extracción, una vez llegada a la temperatura de ebullición comienza a evaporarse y se producen sifonadas.
- Culminación de la operación, se procede a apagar la manta calefactora, cerrar el agua, esperar a que enfríe y envasar.

Es un método que presenta ventajas como la independencia del tipo de matriz y la transferencia múltiple de la muestra con el disolvente limpio. El rendimiento de la muestra se puede aumentar mediante la extracción paralela simultánea porque el equipo básico es económico. Sin embargo, las desventajas son el largo tiempo requerido para la extracción y la gran cantidad de disolvente utilizado y no es fácilmente automatizable (López & Luque de Castro, 2020).

El equipo Soxhlet, según investigaciones que se centran en encontrar antioxidantes naturales, que pueden ser aportados por las plantas, principalmente por sus compuestos fenólicos, son ideales para la obtención de extractos (Alara et al., 2018). Así, se estudió la extracción de compuestos fenólicos de las hojas de *Vernonia cinerea* en un tiempo de dos horas, y dicho extracto mostró presencia de compuestos fenólicos. Y Bontzolis et al. (2024) evaluaron el efecto del tiempo y el solvente sobre el rendimiento de la extracción de la parte aérea del anís mediante métodos Soxhlet y ultrasonido utilizando hexano, éter dietílico, etanol y agua como disolvente, y encontraron que el Soxhlet proporcionó valores más altos en comparación con el ultrasonido, y el agua como disolvente es significativamente mayor a largos períodos de tiempo.

2.2.20 Técnicas de caracterización de nanopartículas

En esta investigación se utilizaron técnicas espectroscópicas y microscópicas para caracterizar la muestra de nanopartícula preparada. Dichas técnicas se fundamentan en la amplificación de oscilación de electrones deslocalizados en respuesta a una onda electromagnética incidente, ya sea luz natural o láser. Esta amplificación da como resultado bandas de resonancia, también llamadas plasmones de superficie, donde se produce la absorción (Cornejo, 2015).

a. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La FTIR caracteriza las posibles biomoléculas existentes en el extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* responsables de la reducción y estabilizar la nanopartícula (Abbasi et al., 2019). Utiliza energía modulada del infrarrojo medio para examinar una muestra; las frecuencias específicas se absorben debido a las energías de enlace vibratorio interatómico de la biomolécula. El enlace puede absorber dicha energía cuando la luz infrarroja media y la energía de enlace vibratorio son equivalentes. La biomolécula vibra en sus diferentes enlaces con energías, esto provoca una absorción de longitudes de onda distintas de la radiación por infrarrojos (IR) (Kaltenbach, 2021). El espectro total se produce a partir de la ubicación (frecuencia) y la magnitud de cada una de estas bandas de absorción, lo que facilita la identificación de las biomoléculas.



Figura 13. Espectrómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier

Fuente: AdLab (2024).

b. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El MEB analiza la forma, topografía, textura y composición de la nanopartícula creando una imagen (Gleichmann, 2020). Cuenta con un filamento que genera un haz de electrones y un sistema de lentes capaz de enfocar el haz electrónico y generar con él un barrido que impacta con la muestra (Atria, 2020). La interacción entre electrones de la muestra y del haz genera distintas señales (detector de electrones secundarios, detector de electrones retrodispersados, detector de rayos EDX, detector de rayos WDS y detector de electrones retrodispersados difractados) proporcionando una imagen tridimensional en blanco y negro (Atria, 2020; OneLab, 2023).

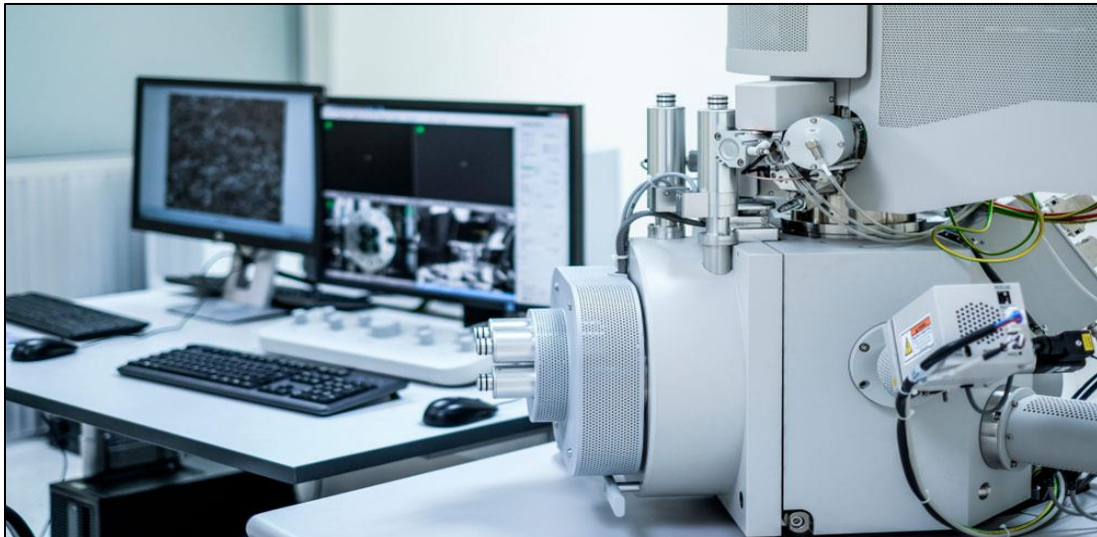


Figura 14. Microscopio electrónico de barrido

Fuente: ANÁHUAC (2024).

c. Microscopía electrónica de transmisión (MET)

El MET analiza el tamaño, la distribución y la forma exacta de la nanopartícula creando una imagen detallada (Selvaraj et al., 2022). Utiliza un haz amplio de electrones para observar la estructura interna de una muestra, por lo que debe prepararse especialmente (Harbor, 2023). A diferencia del MEB, utiliza una preparación de portaobjetos para obtener una vista bidimensional de la muestra, proporcionando así una mayor resolución (Harbor, 2023; OneLab, 2023).



Figura 15. Microscopio electrónico de transmisión

Fuente: Universidad Complutense Madrid (2024).

d. Dispersión dinámica de luz (DLS)

La DLS se basa en el movimiento browniano de las partículas y caracteriza el tamaño de las partículas en suspensiones con tamaños muy pequeños (Líder tecnológico en caracterización de partículas [MICROTRAC], 2024). La muestra es iluminada con un rayo láser y un fotodetector percibe las fluctuaciones de la luz dispersada en un ángulo fijo (MICROTRAC, 2024; Pineda, 2023).

La DLS brinda varias fuentes de información que describen matemáticamente los factores utilizados en dispersión de luz como el tamaño promedio (Z), el índice de polidispersidad con valores adecuados inferiores a 0.7, la intercepta con valores adecuados superiores a 0.6, un informe de calidad de la medición, la distribución de intensidad, volumen y número (GuíaLab, 2019; Pineda, 2023).

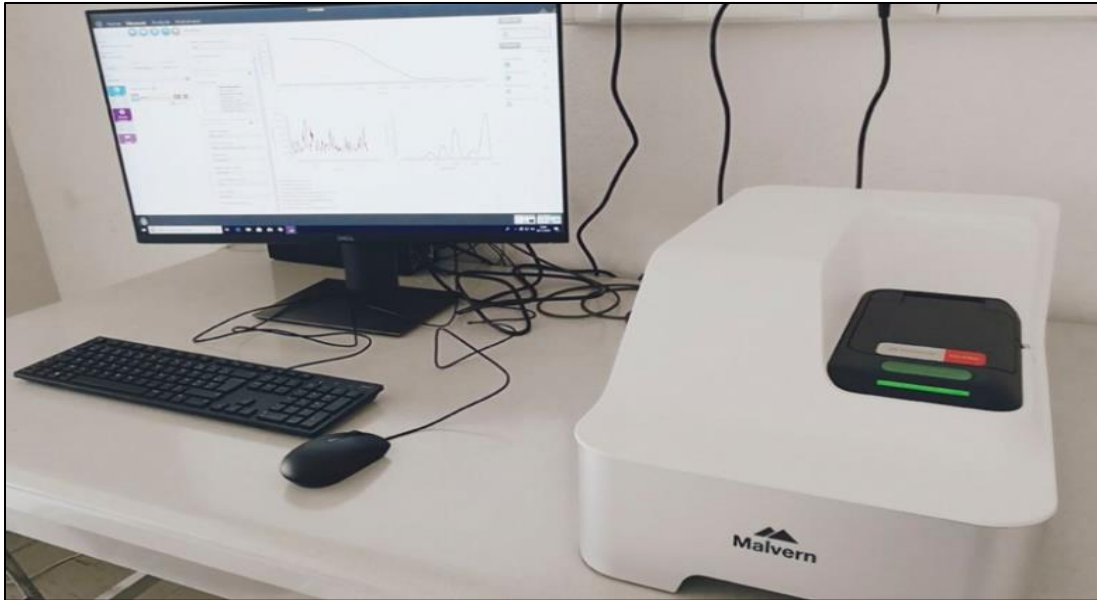


Figura 16. Dispensador dinámico de luz

Fuente: GuíaLab (2019).

2.2.21 Rol de NPs-FeO para la remediación de contaminantes en el ambiente

Tabla 6

Biosíntesis de diferentes nanopartículas de óxido de hierro y su aplicación

N°	Nanopartícula	Especie	Parte	Aplicación	Autor
1		<i>Eucalyptus globulus</i>	Hojas	Adsorción de iones NO ₃ del agua	Khoshkalam et al. (2023)
2		<i>Eucalyptus sp</i>	Hojas	Remediación in situ de aguas residuales eutróficas	Wang et al. (2014)
3		<i>Phyllanthus emblica</i>	Semilla	Eliminación de azul de metileno del agua	Ashraf et al. (2023)
4		<i>Daphne mezereum</i>	Hojas	Eliminación de naranja de metilo del agua	Beheshtkhoo et al. (2018)
5	Óxido de hierro	<i>Cola nitida</i>	Hojas	Adsorción de azul de metileno y naranja de metilo de las aguas textiles	Mbachu et al. (2023)
6		<i>Camellia sinensis</i>	Hojas	Adsorción sinérgica de melanoidina de aguas residuales	Akhtar et al. (2024)
7		<i>Eucalyptus globulus</i>	Hojas	Descontaminación de suelos agrícolas contaminados con Cr, Cd y Pb	Asmat et al. (2021)
8		<i>Mangifera indica</i>	Cáscara	Remediación de Cr(VI), Cd y Pb de suelos agrícolas	Bautista & Gomez (2023)
9		<i>Salvia Hispanica</i>	Semilla	Actividad antibacteriana	Abed et al. (2023)
10		<i>Zingiber officinale</i>	Todo	Actividad antibacteriana	Kirdat et al. (2021)
11		<i>Bombax malabaricum</i>	Goma	Antioxidantes, antimicrobianas y fotocatalíticas	Awais et al. (2023)

2.2.22 Efecto del pH

Uno de los factores operativos clave en la adsorción de arsénico por un adsorbente es el pH del medio acuoso porque las variaciones en el pH de la solución pueden afectar la química de la superficie del adsorbente, el tipo de adsorbato y la ionización en la solución (Sinha et al., 2023).

Según Hokkanen et al. (2015), para la eliminación de As(V) en condiciones ácidas, la carga superficial del adsorbente era positiva, haciéndolo más receptivo al As(V), que se manifiesta como H_2AsO_4 entre pH 2 y 5. Los sitios en la superficie estaban cargados negativamente cuando el valor del $pH > 5.2$ provocaba una acción repulsiva electrostática sobre las especies de As(V), por tanto, la disminución de la eficiencia de adsorción.

2.2.23 Efecto del nanoadsorbente

Otro aspecto importante que tiene un impacto directo en la capacidad del adsorbente para eliminar el arsénico del medio acuoso es la cantidad de adsorbente que se utiliza. Es importante determinar la dosis óptima de adsorbente para maximizar la interacción adsorbente-arsénico (Sinha et al., 2023).

Según Rahman et al. (2021), es preferible aumentar la cantidad de adsorbente para lograr rápidamente el equilibrio de adsorción y alcanzar el punto de saturación. Sin embargo, la eficiencia de la adsorción disminuye proporcionalmente a medida que aumenta el número de sitios de absorción. Como resultado, es esencial lograr un equilibrio entre aumentar la dosis de adsorbente y reducir la eficiencia de adsorción.

2.2.24 Efecto del tiempo contacto

El tiempo de contacto es otro factor que afecta significativamente el proceso de adsorción de arsénico, debido a que la presencia de sitios activos y libres en la superficie del adsorbente pueden unirse con varias especies de arsénico, lo que causa la alta tasa inicial de adsorción de iones metálicos. Sin embargo, después de cierto período de tiempo, todos los puntos de conexión inicialmente disponibles son ocupados por el adsorbato, lo que lleva a la saturación de los sitios de unión (Sinha et al., 2023).

2.3 Normativa

Considerando la toxicidad significativa y su amplia distribución del arsénico, la OMS y otras instituciones gubernamentales, establecieron un límite máximo permisible de arsénico en el agua potable y agua subterránea.

Tabla 7

Límites permisibles ($\mu\text{g/L}$) para arsénico en agua según estándares internacionales y nacional

Agencia	Límites permisibles ($\mu\text{g/L}$)
Organización Mundial de la Salud (OMS)	10
Estándar Alemán de Agua Potable (TVO-D)	10
Estados Unidos Agencia de Protección Ambiental (USEPA)	10
Directrices de Agua Potable de la Unión Europea (EU)	10
Health-Canada “Pautas Para la Calidad del Agua Potable Canadiense” (HC)	10
República Popular de China, Norma Nacional de Seguridad Alimentaria-Agua Natural Mineral (PRC)	10
Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano-Perú	10

Fuente: Abidli et al., (2022); D.S. N° 031-2010-SA. Reglamento de la Calidad del Agua Para Consumo Humano, (2010); Siddiqui et al., (2019).

Tabla 8*Concentración ($\mu\text{g/L}$) para el arsénico en aguas subterráneas naturales según algunos países*

País	Límites permisibles ($\mu\text{g/L}$)
Estados Unidos (California)	50 – 1400
Canada (Ontario)	100 - 410
Chile	800
Argentina	100
Hungría	60 – 4000
Vietnam	10 – 3000
Nueva Zelanda	8500
México	500 - 3700
Taiwan	10 – 1820
Japón	10 – 300
al oeste de Bengala	50 - 550

Fuente: Siddiqui et al. (2019).

Tabla 9*Concentración ($\mu\text{g/L}$) para el arsénico en aguas subterráneas naturales según las normas holandesas*

Agencia	Límites permisibles ($\mu\text{g/L}$)
Normas holandesas para la concentración de aguas subterráneas (NL)	10 - 60

Fuente: Siddiqui et al. (2019).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito de estudio

El estudio de investigación se llevó a cabo en la ciudad de Juliaca, provincia de San Román, región Puno, al sur del Perú (Municipalidad Provincial de San Román, 2017), específicamente en las instalaciones de los laboratorios generales de la Universidad Nacional de Juliaca, sede La Capilla.

3.2 Tipo de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, dado que se realizaron mediciones objetivas para evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico bajo diversas condiciones. Estas condiciones fueron analizadas a través de pruebas químicas, lo que permitió posteriormente llevar a cabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos.

3.3 Diseño de la investigación

El enfoque de investigación fue experimental, pues se manipularon las variables independientes al combinarlas para observar cambios en la variable dependiente bajo condiciones controladas. Se utilizó un diseño factorial 2^3 .

3.4 Población y muestra de la investigación

3.4.1 Población

La población estudiada en este trabajo de investigación estuvo conformada por las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

3.4.2 Muestra

La muestra fue recolectada de la urbanización Casuarinas dado que se registró una mayor concentración de As ($171.7\mu\text{g/L}$) en comparación con los otros puntos de la ciudad de Juliaca.

a. Técnica de muestreo

El tipo de muestreo para las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca utilizó el tipo de muestreo no probabilístico, puesto que la muestra tomada fue por criterio, en esta, la selección de los componentes no depende de la probabilidad, sino de las razones relacionadas con las características de la investigación (Pacori & Pacori, 2019).

b. Unidad de muestreo

Para cada experimento se utilizó 300 ml de agua subterránea distribuidos en 25 unidades experimentales realizándose tres repeticiones por cada una de ellas con ocho tratamientos y una prueba de medias.

3.5 Operacionalización de variables

Tabla 11

Operacionalización de variables

Variable	Indicador	Niveles	Unidad
Variables independientes	A pH	5	-
		6	
		7	
	B Dosis de nanoadsorbente	130	mg
		195	
		260	
	C Tiempo de contacto en la adsorción	30	minutos
		22	
		15	
Variable dependiente	Adsorción de arsénico	-	%
Variables fijas	Concentración de arsénico inicial en el agua contaminada	-	mg/L
	Temperatura ambiente	-	°C
	Velocidad de agitación	-	rpm

3.6 Materiales, equipos y reactivos

3.6.1 Materiales

Matraces Erlenmeyer (250 ml), probetas (50, 100 y 250 ml), vasos de precipitado (250 y 1000 ml), pipetas (10 ml), fioles (50, 100 y 1000 ml), bureta (25 ml), frascos de vidrio tapa azul (250 y 1000 ml), frascos ámbar (20 ml), frascos de vidrio (10 ml), botellas de polietileno (200 y 500 ml), gotero, jeringa (20 ml), soportes universales, luna de reloj, varilla de vidrio, mortero y pilón, espátulas, papel tornasol, papel filtro Whatman N°41, papel aluminio, papel toalla, imán, embudos, cooler, icepack, bolsa hermética, pabito, mandiles, guantes quirúrgicos, mascarillas KN95, cofias, gafas de seguridad, etiquetas autoadhesivas, cinta masking, marcador permanente, lapiceros.

3.6.2 Equipos

Balanza analítica, equipo Soxhlet, tamizador analítico N°325, agitadores magnéticos con calentamiento, prueba de jarras, espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), espectroscopio infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), dispersor de luz dinámica (DLS), microscopio electrónico de barrido (MEB), multiparámetro, potenciómetro, centrifugadora, estufa, GPS, cronómetro, cámara fotográfica.

3.6.3 Reactivos e insumos

Hojas de *Eucalyptus globulus*, cloruro de hierro (III) hexahidratado (97%, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), alcohol etílico (96%, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), ácido nítrico (70%, HNO_3), hidróxido de sodio (98%, NaOH) y agua ultrapura.

b. Biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro

La biosíntesis de NPs-FeO se realizó según el proceso adaptado por Ashraf et al., (2023); Pabón et al., (2021); Patiño et al., (2020) la cual se describen a continuación:

Se prepararon 250 ml de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,26 M) y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,52 M) con agua ultrapura, distribuida en ocho matraces Erlenmeyer de 250 ml. En cada sistema de síntesis, se agitaron 25 ml de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,26 M) a 200 rpm durante 15 minutos para reducir la intrusión de oxígeno. La solución se calentó a 60°C durante 1 hora, tras lo cual se añadió el extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* gota a gota. A continuación, se añadió 25 ml $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,52 M) a la primera solución también gota a gota bajo agitación continua y se aumentó la temperatura a 85°C . La reacción principal se estabilizó con NaOH (1 M) a chorro cada 10 minutos. El precipitado marrón oscuro fue recogido de la solución por centrifugación, lavado varias veces con agua destilada y una vez con alcohol. Finalmente, las NPs-FeO se obtuvieron tras su secado en una estufa a 70°C durante 24 horas.

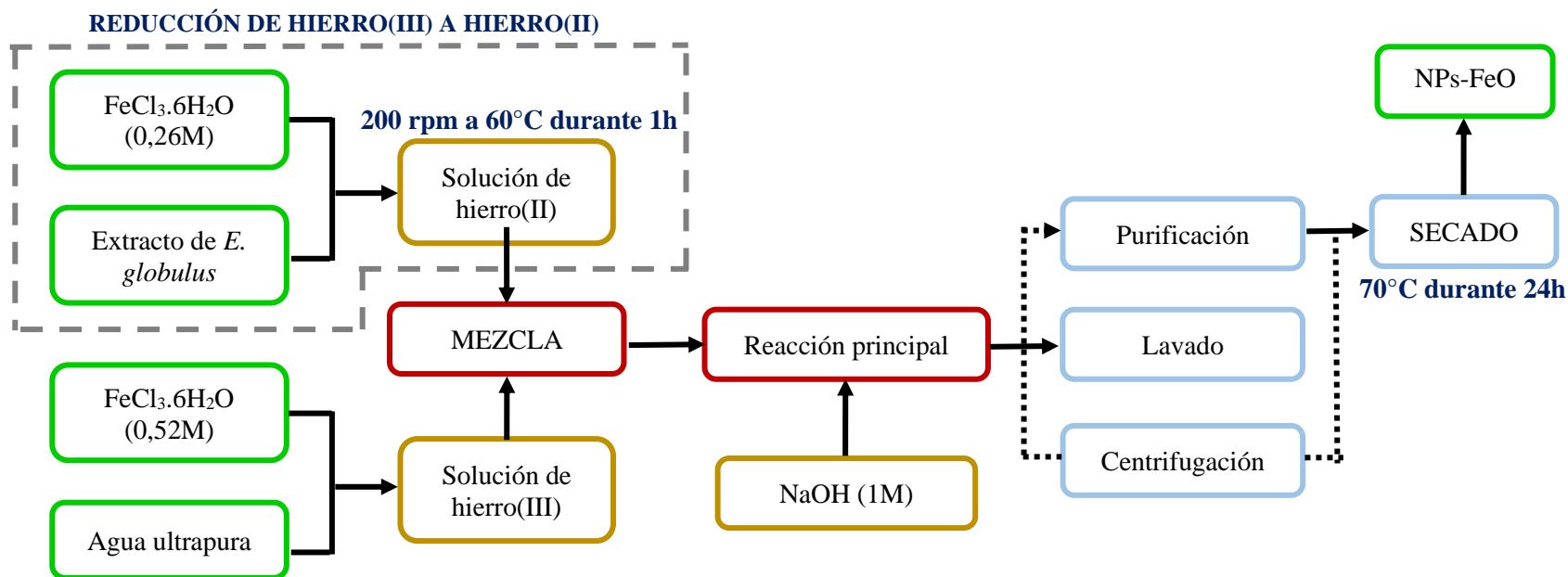


Figura 18. Diagrama de bloques de las etapas generales involucradas en la biosíntesis de NPs-FeO con hojas de *Eucalyptus globulus*



Figura 19. Sistema de síntesis de NPs-FeO

3.7.2 Caracterización de nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca

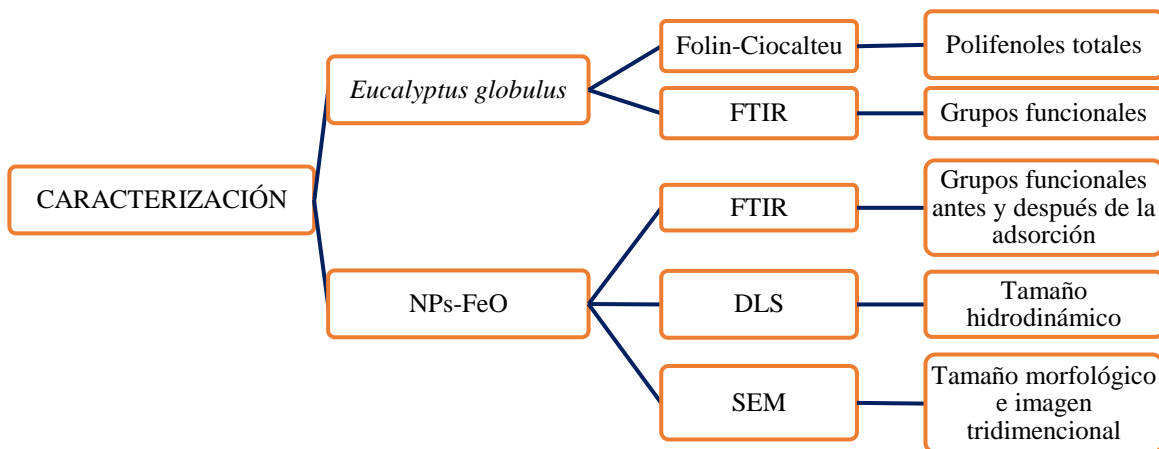


Figura 20. Diagrama de bloques de las técnicas de caracterización de NPs-FeO

En las tablas 12 al 14 se muestra las condiciones operativas y parámetros de análisis de los equipos empleados para la caracterización de NPs-FeO.

Tabla 12

Condiciones del análisis por Espectroscopia Infrarroja por la Transformada de Fourier (FTIR)

Equipo	Perkin Elmer, Frontier FT-IR/NIR
Rango de barrido	4000 cm ⁻¹ – 400 cm ⁻¹
Fuerza aplicada	80
Tipo de accesorio	Universal ATR
Cristal uatr	Diamante/ZnSe
Saltos uatr	3

Tabla 13*Condiciones del análisis por Dispersión de Luz Dinámica (DLS)*

Equipo	The NanoBrook 90Plus
Técnica	Dynamic Light Scattering, DLS
Rango de tamaño	2 nm - 3 μ m
Rango de concentración	2 ppm - 50 mg/ml
Laser	658 nm
Precisión	\pm 1% normalmente
Ángulos de detección	15° & 90°

Tabla 14*Condiciones del análisis por el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)*

Equipo	Marca INSPECT, modelo S50
Rango de magnificación	200 x a 24000 x.
Abertura	1.5 a 5
Distancia	10 mm
Intensidad	6 kV a 20 kV

3.7.3 Determinación del efecto del pH, dosis de nanopartículas y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

a. Muestreo de agua subterránea

Teniendo en cuenta el Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Agua de Recursos Hídricos Superficiales de Perú (ANA, 2016), se establecieron cuatro puntos de muestreo por criterio en la urbanización Taparachi (salida Puno) y la urbanización Casuarinas (salida Cusco) con la intención de obtener una muestra con alta concentración de arsénico para realizar la prueba de adsorción por lote. Esta selección se basa en los estudios realizados por Apaza (2020); Huaracha & Quispe (2020); Huillca & Apaza (2019); Mamani (2019), que detectaron concentraciones de arsénico superiores a 10 μ g/L en el

agua subterránea. Se tomaron muestras simples de 500 ml de agua subterránea en un frasco de polietileno y se preservó con HNO₃ a pH < 2. Las muestras se conservaron en un cooler a 4°C; posteriormente se derivó al laboratorio Analíticos del Sur E.I.R.L para la cuantificación de arsénico realizada por el método EPA 200.7 (ICP-OES). Los parámetros fisicoquímicos que se midieron in-situ fueron el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto del agua utilizando un multiparámetro HI98194 de la marca HANNA (Salas et al., 2021).

Tabla 15

Ubicación UTM de los puntos de muestreo del agua subterránea en Juliaca

Muestra	Zona	Coordenadas UTM	Sector
P-01		378638 8282856	Salida Puno Urb. Taparachi
P-02		379073 8282822	Salida Puno Urb. Taparachi
	19L		
P-03		380456 8283589	Salida Puno Urb. Taparachi
P-04		377235 8289683	Salida Cusco Urb. Casuarinas

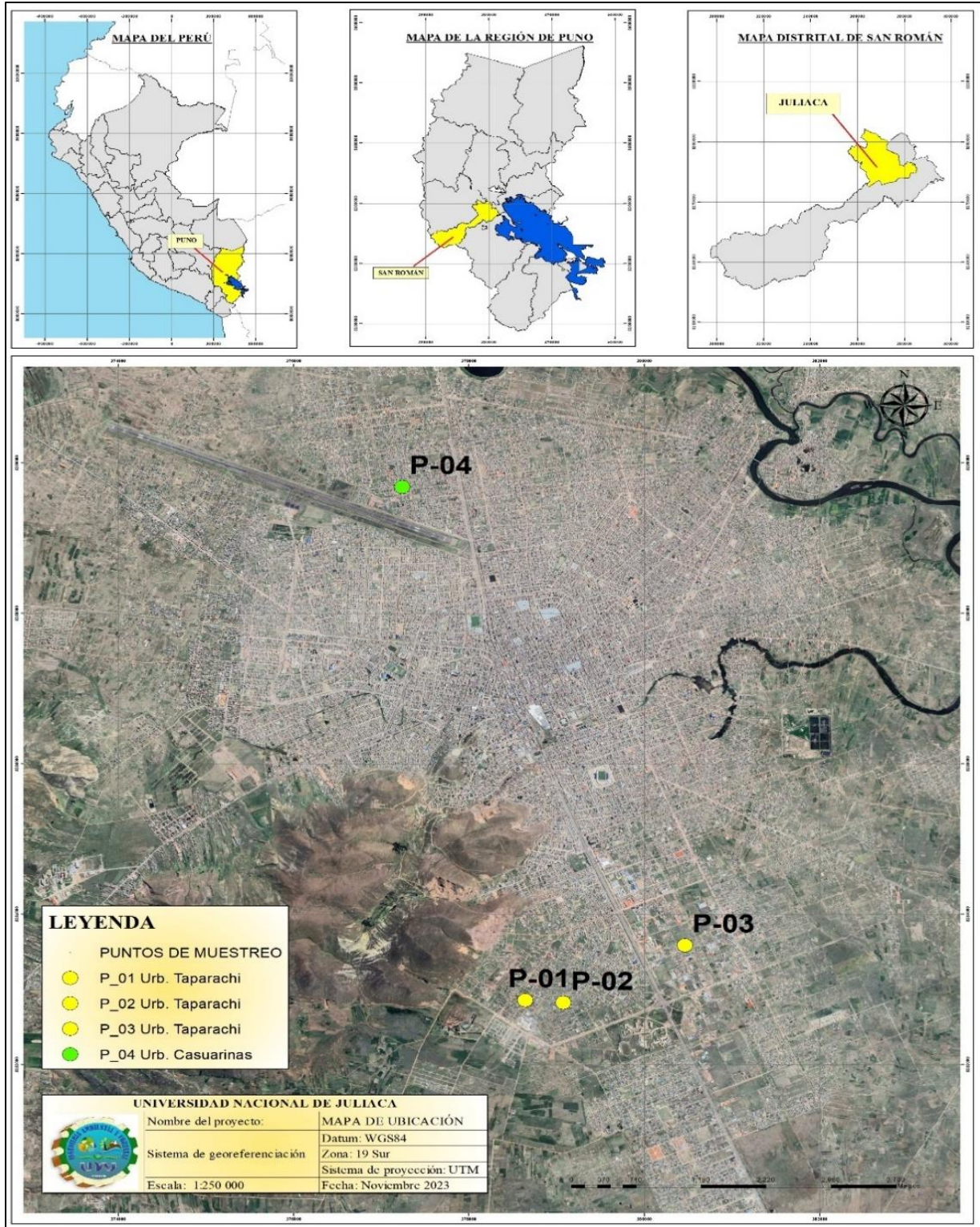


Figura 21. Mapa de ubicación

Fuente: Adaptado de Google Earth Pro (2024).

b. Prueba de adsorción por lotes

La prueba de adsorción por lotes fue adaptada de Pabón et al., (2022); Ramos, (2018) la cual se describe a continuación:

Se pusieron en contacto 300 ml de agua subterránea con concentración inicial de 171.7 µg/L de As a pH 5 y 7 con 0.13 y 0.26 gramos de NPs-FeO para tiempos de 15 y 30 minutos a agitación constante de 200 rpm a temperatura ambiente y su respectiva prueba de media. Inmediatamente después, se filtró tres veces para ayudar en la separación del adsorbente, luego de esto, la solución se decantó mediante el uso un imán por 10 minutos. La prueba preliminar se realizó el 02 de febrero de 2024 y la prueba final se realizó el 08 de marzo de 2024.

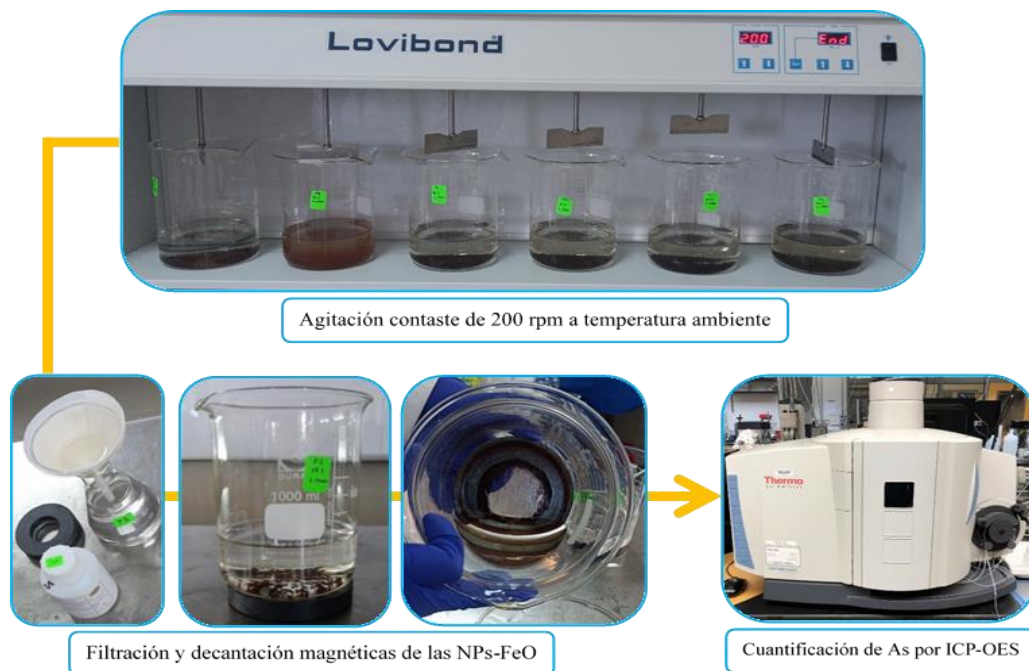


Figura 22. Proceso de adsorción de As

El porcentaje de As adsorbido por las NPs-FeO fue dado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Adsorción} = \frac{(C_1 - C)}{C_1} \times 100$$

Donde:

C_1 (mg/L) : Concentración de As antes de la adsorción.

C (mg/L) : Concentración de As después de la adsorción.

3.8 Estadística

El diseño experimental utilizó el diseño factorial 2^3 para estudiar el cambio de pH, dosis de nanoadsorbente y el tiempo que afectan el proceso de adsorción del As, permitiendo identificar el valor óptimo de la capacidad adsorbente. Para el análisis de datos y la generación de gráficos, se utilizó el software MINITAB, incluyendo análisis de varianza (ANOVA), diagramas de Pareto, estimaciones de efectos e interacciones, así como diagramas de superficie de respuesta y gráficos de contorno.

Tabla 16

Niveles de las variables independientes para la adsorción de As

Variables	Factores	Niveles		
		-	0	+
pH	A	5	6	7
Dosis de NPs-FeO	B	130	195	260
Tiempo	C	15	22	30

a. Modelo estadístico

El modelo estadístico utilizado en este diseño experimental toma en consideración la interacción entre los factores analizados. A continuación, se presenta la ecuación que describe este modelo:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ : es la media general del experimento.

α_i : es el efecto debido al i-ésimo nivel del factor pH.

β_j : es el efecto del j-ésimo nivel del factor dosis de NPs-FeO.

γ_k : es el efecto del k-ésimo nivel del factor Tiempo.

$\alpha\beta_{ij}$: representa el efecto de interacción de la combinación ij.

$\alpha\gamma_{ik}$: representa el efecto de interacción de la combinación ik.

$\beta\gamma_{jk}$: representa el efecto de interacción de la combinación jk.

$\alpha_{\beta\gammaijk}$: representa el efecto de interacción de la combinación ijk

ε_{ijk} : el error aleatorio que, se supone, sigue una distribución normal con $\mu = 0$ y σ_2 :

Constante, además de que son independientes entre sí (Montgomery, 2004).

Con el fin de determinar el efecto de los factores estudiados en la variable dependiente, será fundamental poner a prueba las siguientes hipótesis de la investigación:

- Efectos del factor pH:

$$H_0: \alpha_i = \alpha_j = 0$$

$$H_1: \alpha_i \neq \alpha_j \neq 0$$

- Efectos del factor dosis de nanoadsorbente:

$$H_0: \beta_i = \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_j \neq 0$$

- Efectos del factor tiempo de contacto:

$$H_0: \gamma_i = \gamma_j = 0$$

$$H_1: \gamma_i \neq \gamma_j \neq 0$$

Tabla 17

Cálculo de efectos principales y de interacción del modelo 2^3

Efecto	Ecuación
Promedio	$\frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{8}$
pH	$\frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}$
Dosis de NPs-FeO (DNPs-FeO)	$\frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}$
Tiempo de contacto (TC)	$\frac{-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{4}$

Tabla 17 (Continuación)*Cálculo de efectos principales y de interacción del modelo 2³ (Parte 2)*

Efecto	Ecuación
(pH) x (DNPs-FeO)	$\frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8}{4}$
(pH) x (TC)	$\frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}$
(DNPs-FeO) x (TC)	$\frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}$
(pH) x (DNPs-FeO) x (TC)	$\frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8}{4}$

Tabla 18*Diseño factorial con tres factores*

A	B	C	Combinación de tratamientos	Replicas		
				I	II	III
-	-	-	(1)			
+	-	-	a			
-	+	-	b			
+	+	-	ab			
-	-	+	c			
+	-	+	ac			
-	+	+	bc			
+	+	+	abc			

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Síntesis de nanopartículas de óxido de hierro por el método de biosíntesis utilizando los polifenoles extraídos de las hojas de *Eucalyptus globulus* para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca

4.1.1 Polifenoles totales del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

El método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, mencionado anteriormente, permite cuantificar el contenido total de polifenoles en el extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*, el cual fue realizado en el laboratorio de ensayos y control de calidad de la Universidad Católica de Santa María en Arequipa. Los resultados se presentan en la tabla 19.

Tabla 19

Contenido de polifenoles totales del extracto de hojas de Eucalyptus globulus Labill extraído por el método Folin-Ciocalteu

Análisis	Resultado (mg/100ml)
Determinación de polifenoles totales	48.88

Tabla 20

La actividad antioxidante del extracto de hojas de Eucalyptus globulus Labill, utilizando como solvente agua analizados por los métodos Folin-Ciocalteu, ABTS⁺ y DPPH

Método de extracción	Métodos para determinar la actividad antioxidante (ppm)			Autor
	Folin ciocalteu	ABTS ⁺	DPPH	
Soxhlet	488.80	-	-	Esta investigación
MAE	2392.53	-	-	Cañazaca & Ccama (2017)
Tradicional	2163.71	-	-	
HD	-	100.30 ± 0.05	505.0 ± 0.35	Torrenegra et al.
MWHD	-	96.11 ± 0.03	480.0 ± 0.22	(2019)

La Tabla 20 presenta el contenido de polifenoles totales obtenido mediante el método de extracción Soxhlet, el cual exhibe un alto rendimiento en comparación con el método de hidrodestilación asistida por microondas, aunque es inferior al método de extracción asistida por microondas. En este contexto, se infiere que el método de extracción Soxhlet, aplicado a *Eucalyptus globulus* Labill, resulta ser eficaz. Esta eficacia se debe a su capacidad para extraer compuestos bioactivos significativos de la planta, favorecida por la característica de reflujo que permite una mayor interacción entre el solvente y el material vegetal, optimizando así la extracción de los polifenoles.

4.1.2 Grupos funcionales del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

La técnica FTIR permite identificar los grupos funcionales presentes en el extracto de *Eucalyptus globulus*, análisis que se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional de San Agustín en Arequipa. Los resultados se presentan en la figura 23.

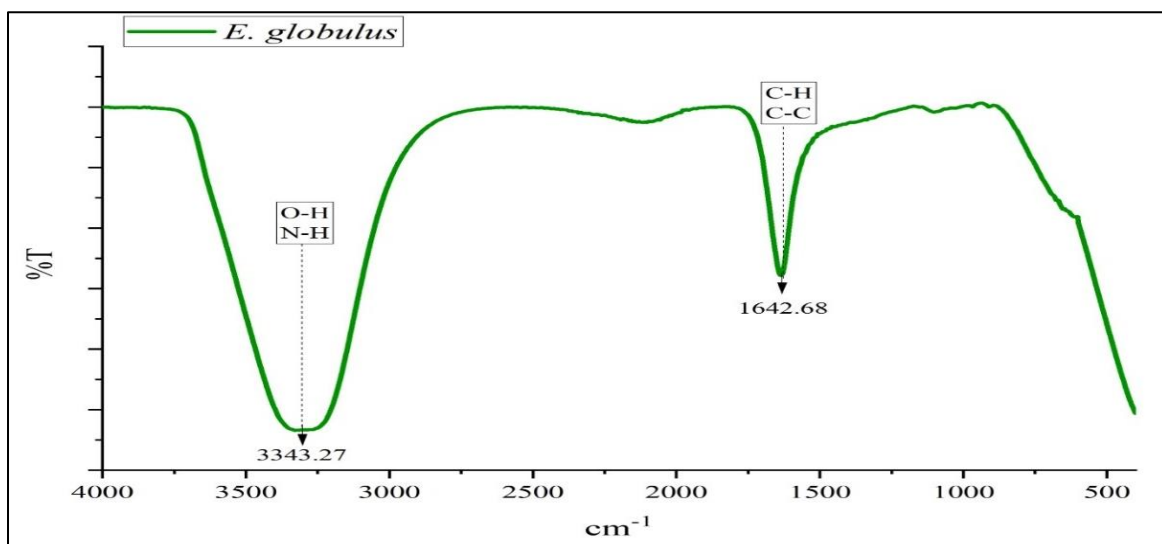


Figura 23. FTIR del extracto de *Eucalyptus globulus*

Se observan dos picos prominentes entre 3343.27 cm^{-1} y 1642.68 cm^{-1} , los cuales son indicativos de grupos hidroxilo, grupo amino y grupo carbonilo, respectivamente. La presencia de ambos grupos mostraría que el extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* presenta al grupo carboxilo en su composición. Los resultados son coincidentes con lo reportado por Khoshkalam et al. (2023) y Dzimitrowicz et al. (2019), quienes asociaron la

vibración de estiramiento O-H al pico de banda de 3406 cm^{-1} y 3325 cm^{-1} , respectivamente, a su vez atribuyeron los grupos carbonilo a un pico de banda de 1713 cm^{-1} y 1607 cm^{-1} , respectivamente. Con base en lo anterior, se confirman diferentes grupos funcionales en el extracto de *Eucalyptus globulus* Labill tales como: fenoles, aminas, carboxilo y carbonilo.

4.2 Caracterización las nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca

4.2.1 Grupos funcionales de las NPs-FeO con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

El FTIR de la muestra de NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* antes de la adsorción se muestran en la figura 24, donde se observa picos entre 402.75 cm^{-1} a 555.72 cm^{-1} denotando estiramiento octaédrico del oxígeno metálico (Fe-O), de la misma forma el pico 654.46 cm^{-1} denotó estiramiento tetraédrico del oxígeno metálico (Fe-O) atribuido a la fase Fe_3O_4 y la fase $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, respectivamente.

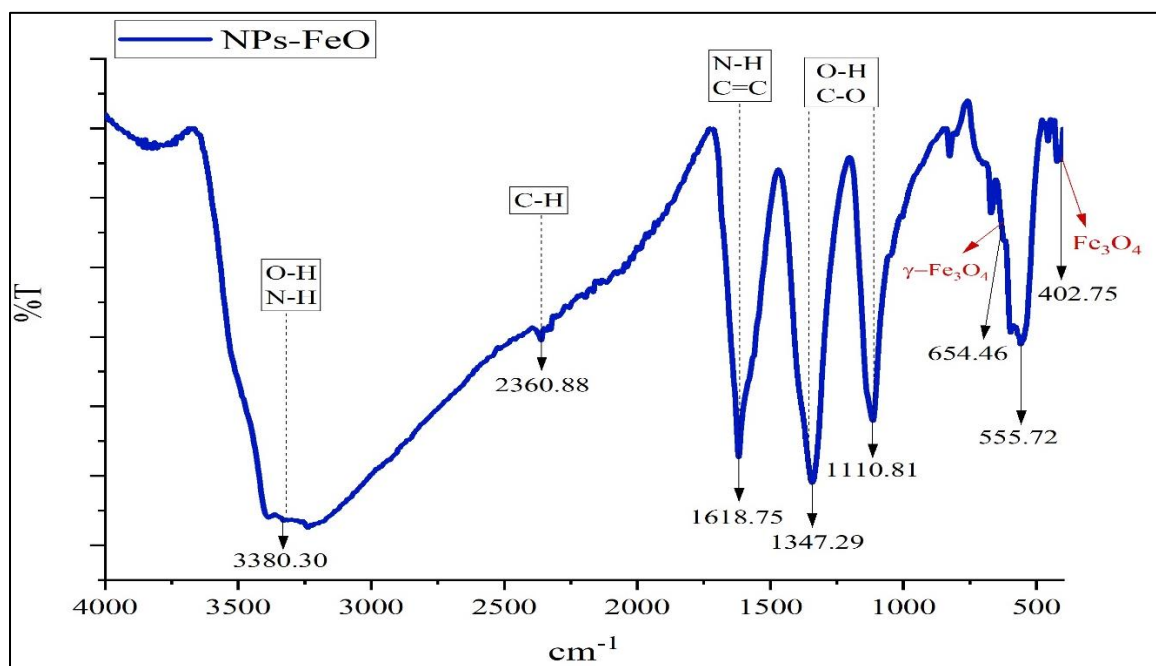


Figura 24. FTIR de la biosíntesis de NPs-FeO antes de la adsorción de As

Los picos 1110.81 cm^{-1} y 1347.29 cm^{-1} representan al ácido carboxílico que evidencia los enlaces (O-H) y (C-O). El pico de 1618.75 cm^{-1} representa al grupo amino (N-H) y grupo carbonilo (C=C) atribuidos a alquenos cíclicos en la estructura de los polifenoles. El pico de 2360.88 cm^{-1} representa el estiramiento de (C-H) atribuido a la presencia de alcanos, aldehídos y flavonoides. El pico de 3380.30 cm^{-1} representa el estiramiento (O-H) y un enlace (N-H) debido a la amina secundaria contenida en los compuestos aromáticos.

Los resultados son coincidentes con los reportados por Asmat et al., (2022); Pabón et al., (2021); Patiño et al., (2020); Swathi et al., (2021); T. Wang et al., (2014). De esto podemos decir que los polifenoles del *Eucalyptus globulus* se unen a las superficies de NPs-FeO actuando como agente reductor y estabilizador mediante la interacción con grupos amino o carboxílicos libres.

El espectro FTIR de la muestra de nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO) sintetizadas con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* después del proceso de adsorción se presenta en la figura 25. Se observa que la mayoría de las bandas en el espectro FTIR de las NPs-FeO se desplazaron, lo que confirma la adsorción de arsénico.

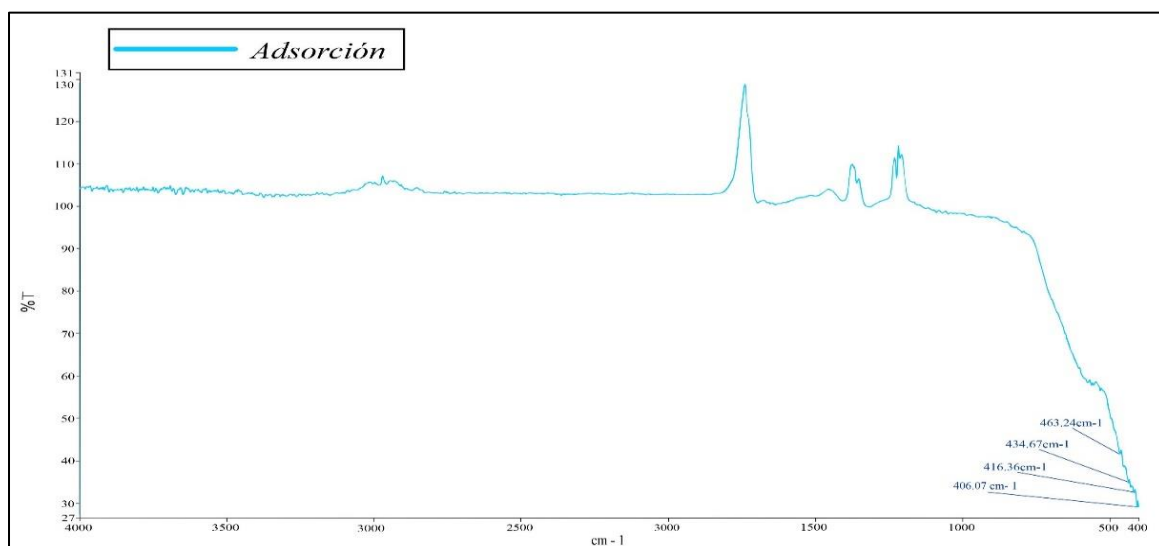


Figura 25. FTIR de la biosíntesis de NPs-FeO después de la adsorción de As

La adsorción de As redujo notablemente la intensidad de los grupos (O-H), lo que demuestra la interacción del As con los grupos funcionales de superficie de NPs-FeO. Los resultados coinciden con Celebi et al. (2021).

4.2.2 Tamaño hidrodinámico de las NPs-FeO con extracto de hojas de *Eucalyptus*

globulus

La técnica DLS se utilizó para evaluar el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO) sintetizadas con *Eucalyptus globulus*, con el propósito de obtener información sobre el comportamiento del sistema al ser colocado en agua. Este análisis se realizó en el laboratorio del grupo de investigación en síntesis de materiales avanzados de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima. Los resultados se presentan en las figuras 26 y 27.

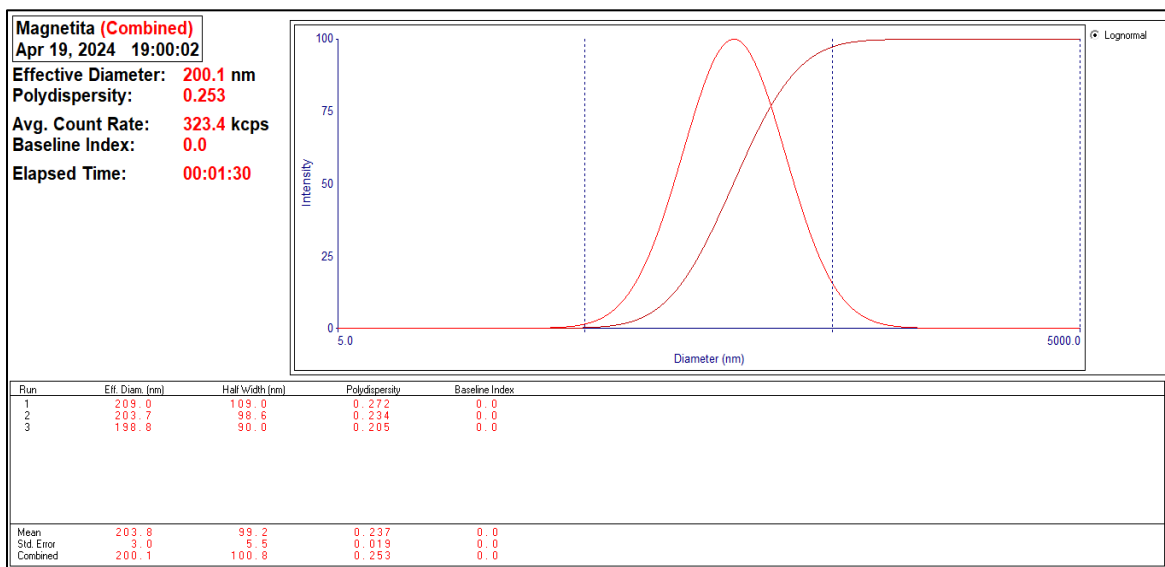


Figura 26. Informe de calidad de NPs-FeO

En la figura 26 se muestra que la polidispersidad es inferior a 0.7, lo cual indica que la muestra posee una distribución nanométrica y es apta para la técnica de dispersión de luz dinámica (DLS).

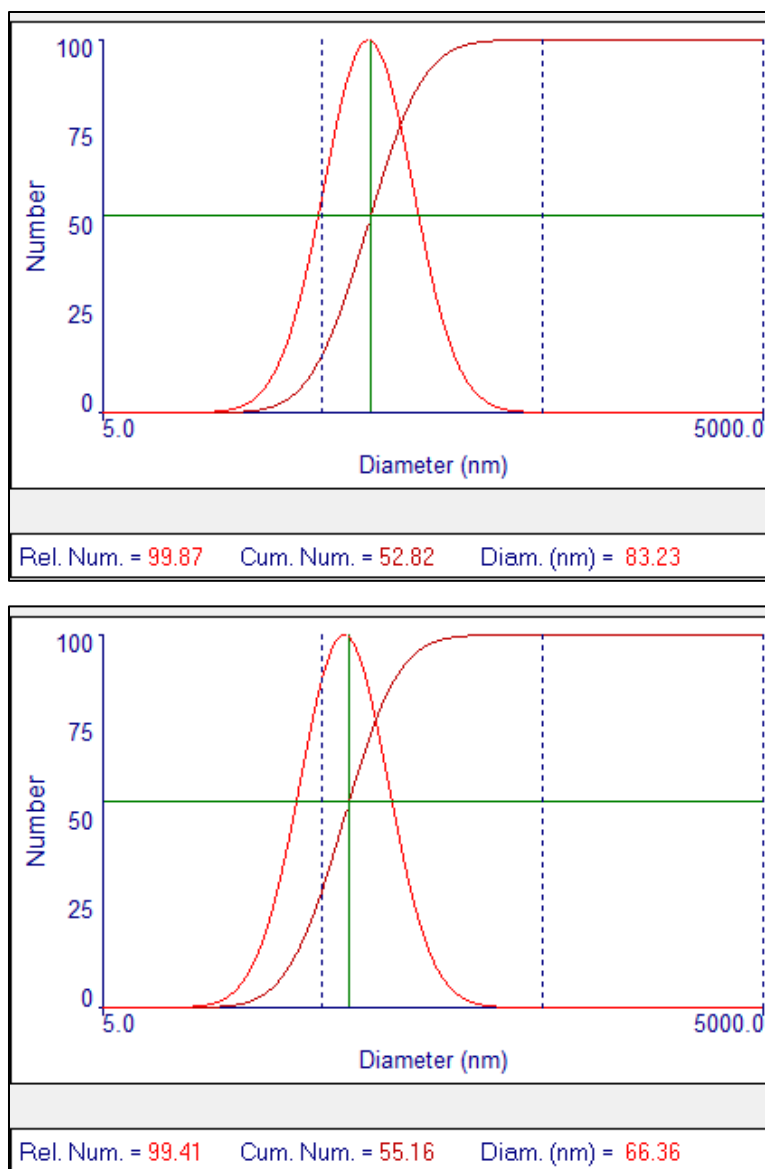


Figura 27. Distribución de numérica de NPs-FeO

En la figura 27 se observan dos lecturas del tamaño hidrodinámico, las cuales están entre 83.23 nm y 66.36 nm. El tamaño hidrodinámico de estas nanopartículas y otras reportadas por el Cañazaca & Ccama, (2017); Katata et al., (2018) se acercan, lo que indica que las nanopartículas de óxidos de hierro con extractos de plantas son similares a las producidas en esta investigación.

4.2.3 Tamaño morfológico de las NPs-FeO con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

La técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) proporcionó micrografías a aumentos de 400x, 600x, 12,000x y 24,000x de las NPs-FeO. Esta caracterización fue realizada en el laboratorio de equipamiento especializado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima, las imágenes obtenidas se presentan en las figuras 28 y 29.

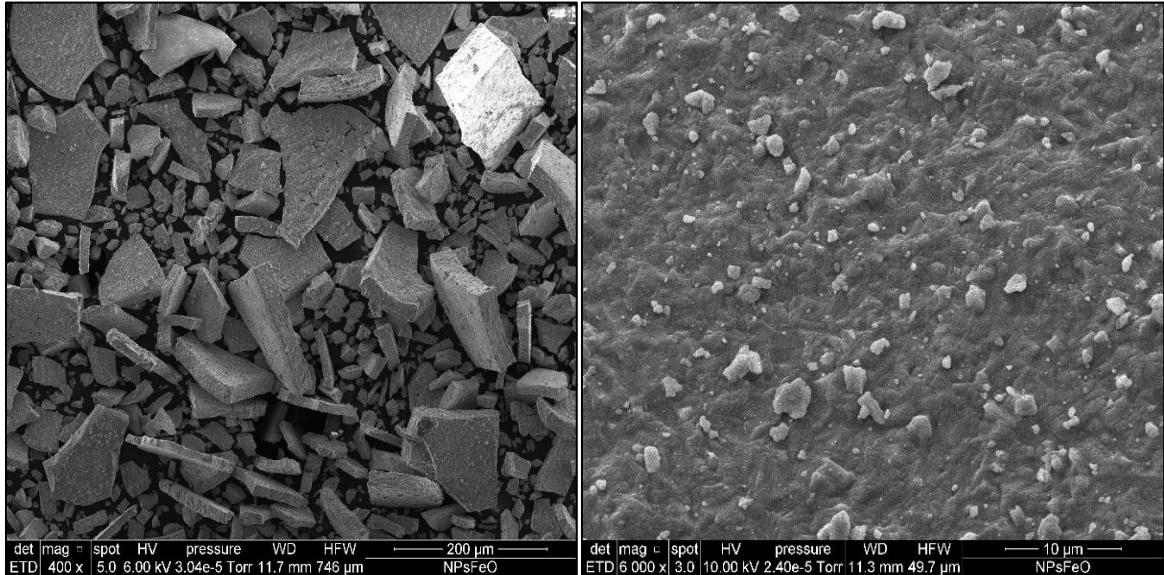


Figura 28. Micrografía MEB de NPs-FeO (a) 400x y (b) 6000x

En micrografía a 400x, se observa una disposición de fragmentos de diferentes tamaños, con una textura notablemente rugosa. Los fragmentos presentan formas angulares y una distribución irregular. Esta observación sugiere una aglomeración significativa de partículas. La estructura fragmentada podría deberse al método de preparación o a las condiciones de biosíntesis. Aunque las partículas individuales no son claramente visibles a esta magnificación, la rugosidad general indica la presencia de nanopartículas dentro de estos fragmentos más grandes.

En la micrografía a 6000x, se observan detalles más finos de la superficie rugosa. Las nanopartículas parecen estar dispersas en la estructura, con tamaños que parecen estar dentro del rango nanométrico. Las partículas muestran formas irregulares, con algunas áreas de agregación. La mayor resolución permite identificar mejor las nanopartículas

individuales. La dispersión de las partículas sugiere que, aunque hay alguna agregación, el extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* ha ayudado a limitarla. Las formas irregulares son típicas en nanopartículas biosintetizadas, donde el control de la morfología puede ser más complicado que en métodos sintéticos puramente químicos.

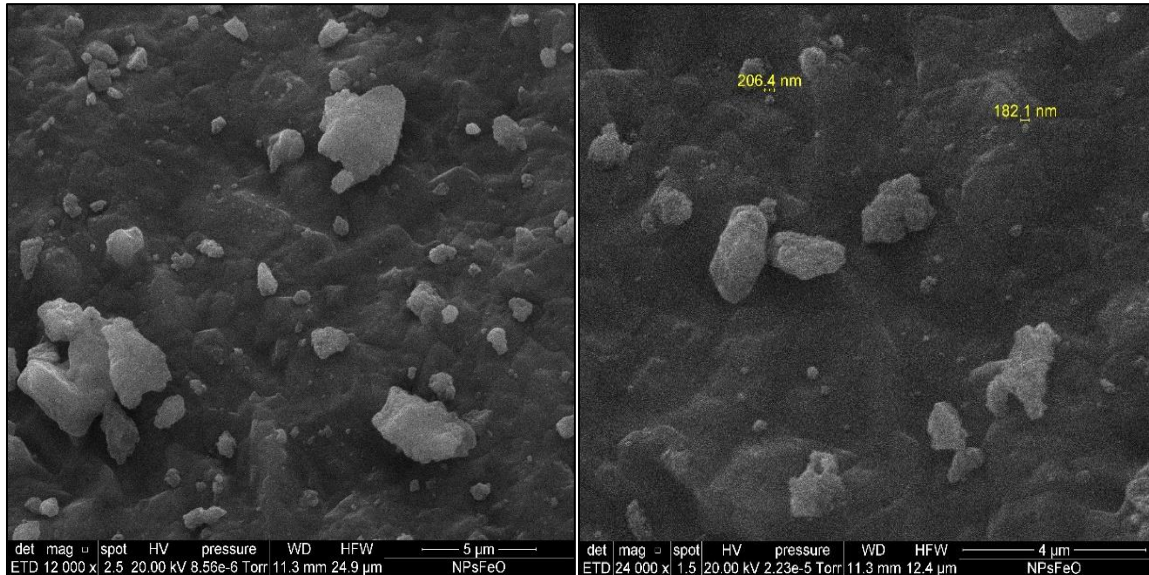


Figura 29. Micrografía MEB de NPs-FeO (a) 12000x y (b) 24000x

En la micrografía a 12000x, se pueden observar detalles más finos de la superficie de las nanopartículas. Las partículas muestran tamaños que van desde unos pocos nanómetros hasta más de 200 nm. La superficie de las partículas sigue siendo rugosa y granular. La rugosidad de la superficie podría aumentar la superficie específica, mejorando la capacidad de adsorción de contaminantes. La presencia de partículas más grandes sugiere una aglomeración parcial, pero el tamaño de las partículas individuales es adecuado para aplicaciones de adsorción.

En la micrografía a 24000x proporciona una vista detallada de nanopartículas individuales. Los tamaños medidos indican que las partículas están en el rango de 182.1 nm a 206.4 nm. La superficie de las partículas sigue mostrando una textura rugosa. Esta magnificación confirma que las nanopartículas de FeO se encuentran en el rango nanométrico, con un tamaño promedio de alrededor de 200 nm. La rugosidad de la superficie podría aumentar

la superficie específica, beneficiando la adsorción de arsénico. Los resultados son coincidentes con los reportados por Cañazaca & Ccama (2017), quienes encontraron nanopartículas granulares y esféricas de tamaño 116.8 - 179.9 nm. Asimismo, diversos autores han reportado formas esféricas y semicirculares en nanopartículas sintetizadas con extracto de eucalipto (Asmat et al., 2022; Pabón et al., 2022; Pérez & Villalva, 2021). Con respecto a la textura rugosa y/o capa superficial gruesa en las NPs, Katata et al. (2018) menciona que se debe al recubrimiento por el extracto de la planta.

De esto podemos decir que la variabilidad en los tamaños y formas observada es común en métodos de biosíntesis, reflejando la naturaleza menos controlada de estos procesos comparados con técnicas sintéticas convencionales.

4.3 Determinación el efecto del pH, dosis de nanopartículas y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas provenientes de la ciudad de Juliaca utilizando nanopartículas de óxido de hierro con extracto de hojas de *Eucalyptus globulus*

4.3.1 Contenido de arsénico del agua subterránea de Juliaca

El análisis en el laboratorio de investigación y servicios, proporcionó los resultados de las concentraciones totales de arsénico, como se muestra en la tabla 21. Los cuatro puntos de muestreo ubicados en Juliaca presentan profundidades que oscilan entre 7 a 15 metros. Por otro lado, se reportaron que la mayor concentración de As fue registrada en el pozo P-04 con 0.099 mg L⁻¹, estos valores coinciden con los reportados por (Mamani, 2019) de 0.1014 mg L⁻¹ en la salida Cusco.

Tabla 21*Resultados de los puntos de muestreo de agua subterránea en Juliaca*

Análisis	Unidad	Muestra	Resultado	Método de ensayo
Arsénico	mg/L	P-01	0.0202	Método de Dietilditiocarbamato de plata.
		P-02	0.0097	
		P-03	0.090	
		P-04	0.099	

Para la prueba de adsorción con nanopartículas, se seleccionó la muestra P-04 debido a que su concentración de arsénico excede el límite establecido por la OMS para el agua. Además, se realizaron pruebas preliminares, de donde se obtuvieron diferentes resultados de As como concentración inicial, como se presenta en la tabla 22.

Tabla 22*Concentración inicial de arsénico total en el punto de muestreo P-04 Juliaca*

Análisis	Unidad	Muestra	Resultado	Método de ensayo	Laboratorio	Fecha	Asunto
Arsénico	mg/L	P-04	0.099	Método de Dietilditiocarbamato de plata.	Laboratorio de Investigación y Servicios (LABINVSERV)	14/11/2023	Prueba para la selección del pozo con mayor concentración de As
			0.1542	EPA 200.7 Método para la determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales mediante ICP-OES, revisión 4.4	Laboratorios Analíticos del Sur (LAS)	05/02/2024	Prueba preliminar
			0.1717	determinación de arsénico total (método de ensayo acreditado) - As		08/03/2024	Prueba final

Tabla 23*Parámetros físico-químicos in situ del agua subterránea P-04 Juliaca*

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	-	8.07
Temperatura	°C	12.74
CE*	μS/cm	1189
OD**	mg L ⁻¹	0.97

*CE: conductividad eléctrica **OD: oxígeno disuelto

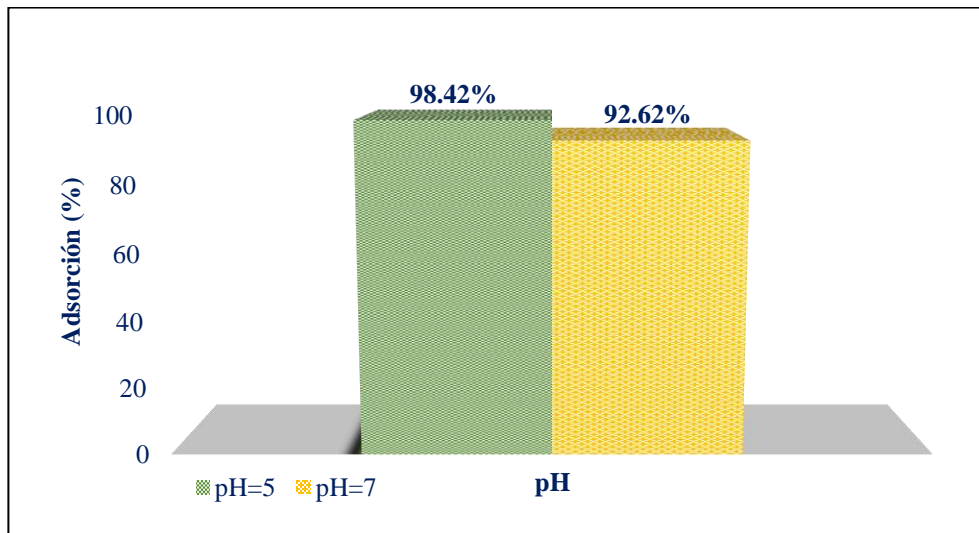
La tabla 23, muestra el valor de pH como alcalino, lo que evidencia concentraciones altas de aniones; además está dentro del rango del límite aceptable de la OMS de 6.5 - 8.5. Por otro lado, la concentración de CE fue de 1189 μS/cm excediendo los límites máximo permisibles, esto por la acumulación de sales. El OD está por debajo de los 4 mg L⁻¹ lo que es relativamente equivalente a la temperatura del agua de pozo encontrado, y no cumple con los LMP. Se sabe que a menos oxígeno disuelto hay mayor probabilidad de encontrar arsenito.

4.3.2 Prueba de adsorción por lotes

Los resultados se presentan en la tabla 24 para mostrar el efecto que tuvieron factores independientes en la adsorción de arsénico; la concentración inicial de As es 171.7 μg/L. Fue realizado en el laboratorio EPIAF de la Universidad Nacional del Juliaca.

Tabla 24*Adsorción de arsénico*

Corrida	Variables			Adsorción de As (%)			
	A	B	C	R ₁	R ₂	R ₃	Promedio Y _(P)
	pH	dosis (mg)	tiempo (min)				
Y ₁	5	130	15	99.30	99.30	99.30	99.30
Y ₂	7	130	15	90.39	84.45	75.19	83.34
Y ₃	5	260	15	99.30	99.30	88.76	95.79
Y ₄	7	260	15	99.30	99.30	99.30	99.30
Y ₅	5	130	30	99.30	99.30	99.30	99.30
Y ₆	7	130	30	88.18	90.45	86.95	88.53
Y ₇	5	260	30	99.30	99.30	99.30	99.30
Y ₈	7	260	30	99.30	99.30	99.30	99.30
Y _M	6	195	22	99.30	99.30	99.30	99.30

**Figura 30.** Efecto del pH en el porcentaje de adsorción del As

La figura 30 muestra el porcentaje de adsorción de arsénico en función del pH, donde se observa que la mayor adsorción se produce a pH 5, alcanzando un 98.42%. En contraste, la menor adsorción se presenta a pH 7, con un 92.62%, lo que evidencia una diferencia del 5.80% entre ambos valores de pH.

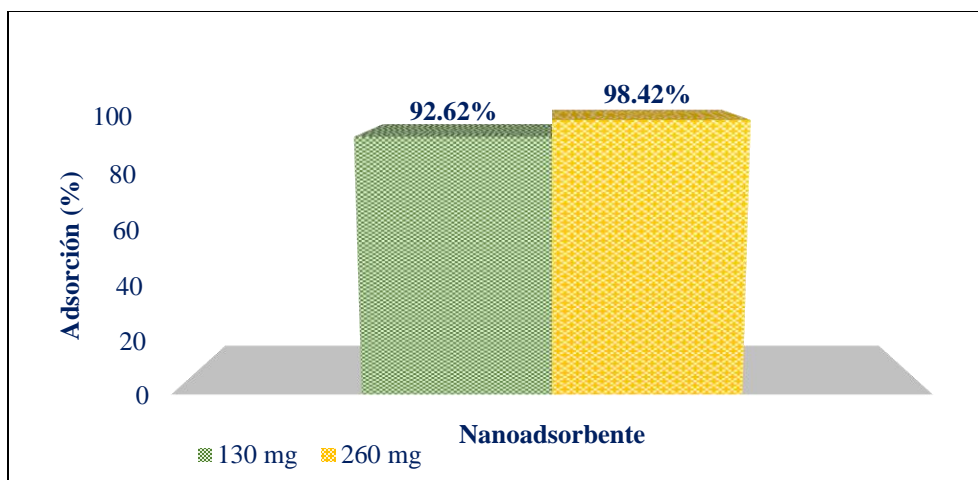


Figura 31. Efecto del nanoadsorbente en el porcentaje de adsorción de As

La figura 31 presenta el porcentaje de adsorción de arsénico en función de las variaciones del nanoadsorbente. Se observa que la mayor adsorción se alcanza con una dosis de 260 mg, logrando un 98.42%, mientras que la menor adsorción ocurre con 130 mg, con un porcentaje de 92.62%. Esto indica una diferencia del 5.80% entre ambas dosis.

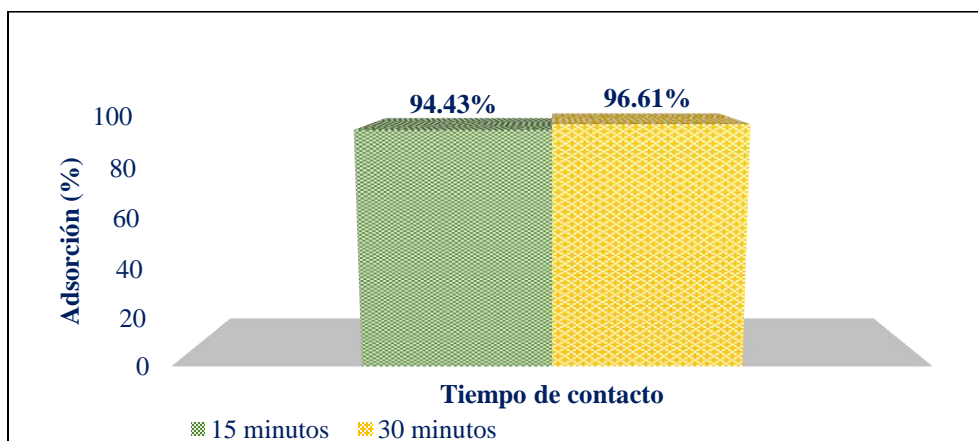


Figura 32. Efecto del tiempo de contacto en el porcentaje de adsorción de As

La figura 32 ilustra el porcentaje de adsorción de arsénico en función de los diferentes tiempos de contacto. Se observa que la mayor adsorción se alcanza a los 30 minutos, con un 96.61%, mientras que la menor se registra a los 15 minutos, con un 94.43%, lo que evidencia una diferencia del 2.18%. Sin embargo, dado que esta diferencia no es significativa, no es necesario aumentar el tiempo de contacto para optimizar el proceso de adsorción.

4.4 Análisis estadístico

4.4.1 Análisis de varianza

Tabla 25

Análisis de varianza de los resultados de la capacidad de adsorción de arsénico con NPs-FeO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	806.23	115.175	9.32	0.000
Lineal	3	432.70	144.234	11.67	0.000
pH	1	202.17	202.167	16.36	0.001
Dosis	1	202.17	202.167	16.36	0.001
Tiempo	1	28.37	28.366	2.30	0.149
Interacciones de 2 términos	3	345.16	115.054	9.31	0.001
pH*Dosis	1	343.07	343.070	27.76	0.000
pH*Tiempo	1	1.05	1.045	0.08	0.775
Dosis*Tiempo	1	1.05	1.045	0.08	0.775
Interacciones de 3 términos	1	28.37	28.366	2.30	0.149
pH*Dosis*Tiempo	1	28.37	28.366	2.30	0.149
Error	16	197.74	12.359		
Total	23	1003.97			

- **Contraste de hipótesis estadística**

Para los efectos del factor pH

H₀: El pH no tiene efecto sobre la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

Ha: El pH influye en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

Para los efectos del factor dosis de nanoadsorbente

Ho: El nanoadsorbente no tiene efecto sobre la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

Ha: El nanoadsorbente influye en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

Para los efectos del factor tiempo de contacto

Ho: El tiempo de contacto no tiene efecto sobre la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

Ha: El tiempo de contacto influye en la adsorción de arsénico en aguas subterráneas utilizando NPs-FeO sintetizadas con extracto de hojas de *E. globulus*.

La tabla 25 presenta el análisis de varianza correspondiente a los experimentos realizados, donde los factores pH y dosis de NPs-FeO muestran un valor-p de 0.001, que es menor que 0.05. Esto indica que dichos factores influyen significativamente en la adsorción de arsénico, lo que lleva a aceptar la hipótesis alternativa y rechazar la hipótesis nula. En cambio, el factor tiempo de contacto presenta un valor-p de 0.149, que es mayor que 0.05, lo que sugiere que no influye de manera significativa en la adsorción de arsénico. Por lo tanto, en este caso, se rechaza la Ha y se acepta la Ho.

4.4.2 Diagrama de Pareto

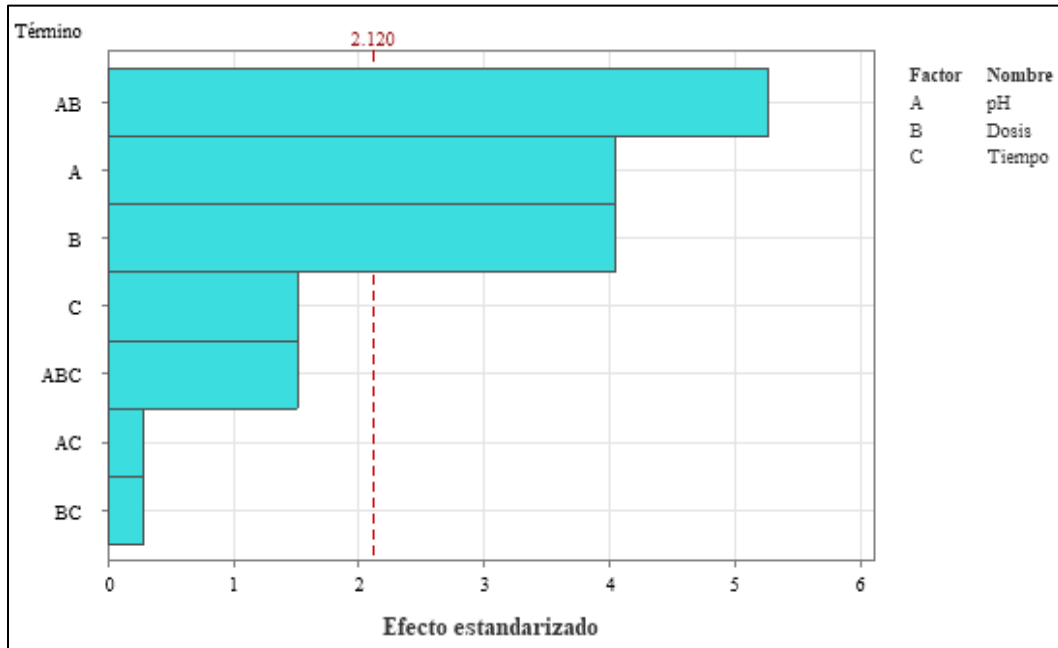


Figura 33. Diagrama de Pareto

En la Figura 33, se muestra el diagrama de Pareto en el cual se representan los efectos estandarizados para un nivel de confianza del 95% ($p = 0.05$). El diagrama de Pareto de los factores muestra que la interacción (pH)(DNPs-FeO), pH y DNPs-FeO son las más significativas.

4.4.3 Estimación efectos e interacciones

Los ocho experimentos se agrupan en efectos principales y efectos de interacción, para lo cual se tomó el promedio (tabla 24), tres efectos principales (pH, DNPs-FeO, TC), tres efectos de interacción de dos factores y el efecto de interacción de tres factores.

Tabla 26*Cálculo de efectos principales y de interacción del modelo 2³*

Efecto	Ecuación	Valor
Promedio	$\frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{8}$	95.52
pH	$\frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}$	-5.80
Dosis de NPs-FeO (DNPs-FeO)	$\frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}$	5.80
Tiempo de contacto (TC)	$\frac{-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{4}$	2.17
Promedio	$\frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{8}$	95.52
pH	$\frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}$	-5.80
Dosis de NPs-FeO (DNPs-FeO)	$\frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}$	5.80
Tiempo de contacto (TC)	$\frac{-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{4}$	2.17
(pH) x (DNPs-FeO)	$\frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8}{4}$	7.56
(pH) x (TC)	$\frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{4}$	0.42
(DNPs-FeO) x (TC)	$\frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8}{4}$	-0.42
(pH) x (DNPs-FeO) x (TC)	$\frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8}{4}$	-2.17

En la tabla 26, se observa que el promedio total de adsorción alcanzó un 95.52% que indica el porcentaje del diseño experimental. El valor del pH = -5.80 indicó el efecto del rango de pH (5-7), donde el rendimiento del porcentaje de adsorción de arsénico fue favorecido con una disminución del pH. La DNPs-FeO = 5.80 indica que el porcentaje de adsorción de arsénico aumenta si la dosis va de 130 mg a 260 mg. El valor del TC = 2.17 indica que al aumentar ligeramente el tiempo de 15 min a 30 min incrementa la cantidad de arsénico adsorbido, pero no es un incremento significativo, por lo tanto, no se requiere incrementar el tiempo para optimizar el proceso de adsorción.

La interacción de los efectos pH, DNPs-FeO, TC midió el efecto que tuvo estas combinaciones en el porcentaje de adsorción de arsénico (variable de respuesta). El valor $(\text{pH})(\text{DNPs-FeO}) = 7.56$ indica que el incremento de ambos niveles genera un incremento en la variable de respuesta. El valor $(\text{pH})(\text{TC}) = 0.42$ indica que al aumentar el pH y el TC se tendrá un efecto positivo sobre la variable de respuesta. El valor $(\text{DNPs-FeO})(\text{TC}) = -0.42$ indica que la disminución de estas variables produce un efecto negativo.

El valor $(\text{pH})(\text{DNPs-FeO})(\text{TC}) = -2.17$ sugiere que el grado de efecto de la interacción de las tres variables es insignificante en comparación con los efectos principales y las interacciones de dos variables. Por lo tanto, se considera que esta interacción es despreciable.

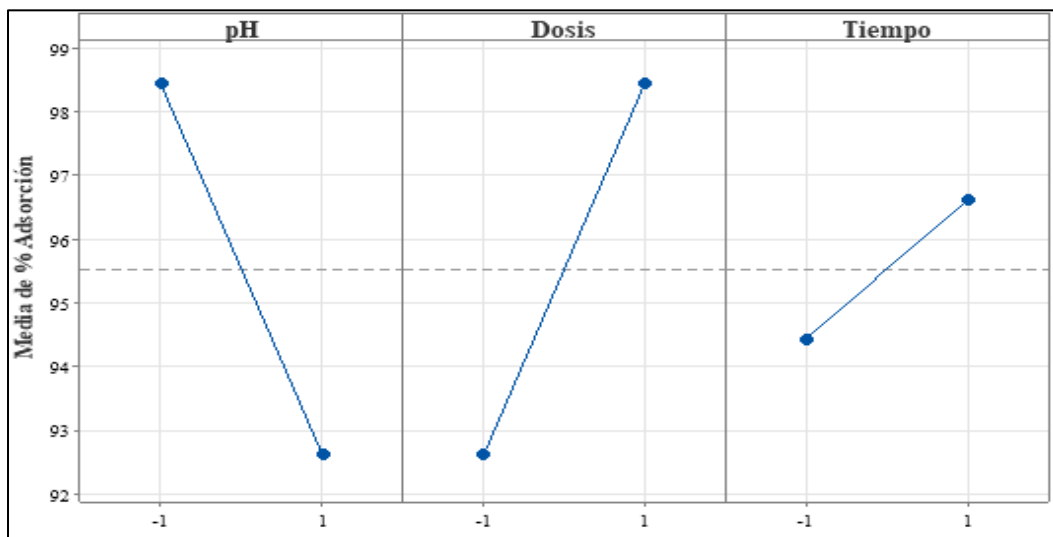


Figura 34. Gráfica de efectos principales del porcentaje de adsorción

La variable pH es inversamente proporcional al porcentaje de adsorción, como se ilustra en la figura 34, esto significa que al aumentar el pH de 5 a 7 resulta en una disminución de la adsorción. En cuanto a las variables, las dosis de NPs-FeO y el tiempo de contacto son directamente proporcionales al porcentaje de adsorción; es decir, al aumentar estas variables de niveles bajos a altos, las concentraciones de adsorción también incrementan. Sin embargo, no es necesario aumentar el tiempo para optimizar la adsorción.

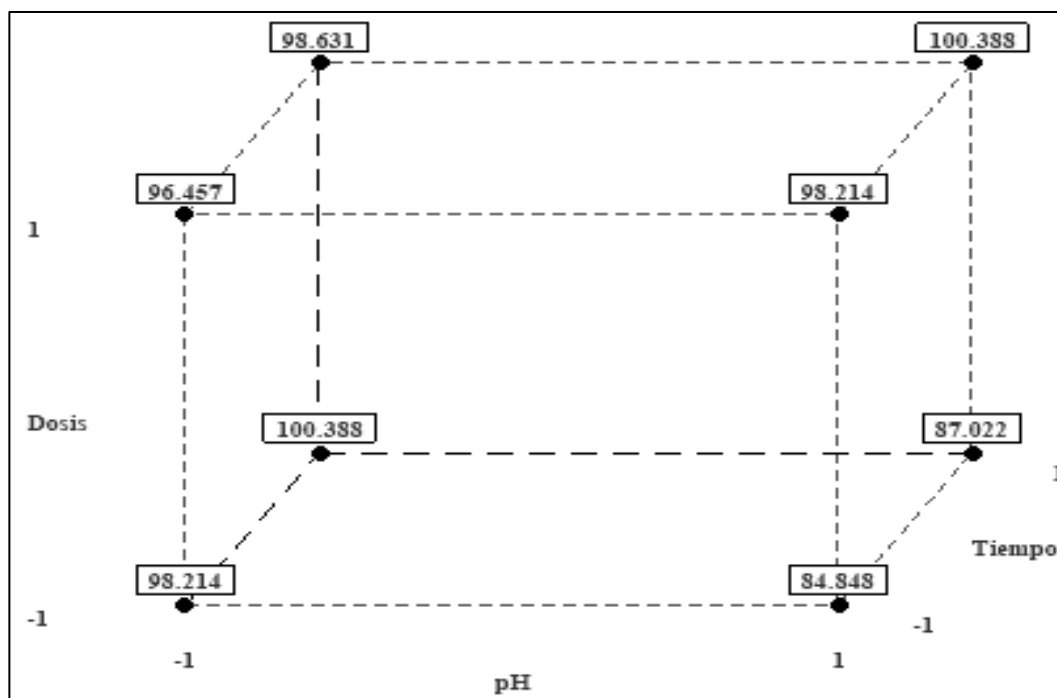


Figura 35. Gráfico de cubos del porcentaje de adsorción

Se muestra la figura 36 para una mejor interpretación de los efectos principales porque al utilizar la gráfica de cubo podemos ver la respuesta esperada en cada punto del diseño factorial.

Para la predicción en cada punto del diseño se utiliza el modelo de regresión que corresponde al mejor ANOVA (tabla 25), el cual, en unidades codificadas, está dado por:

$$\% \text{Adsorción} = 95.520 - 2.902 \text{ pH} + 2.902 \text{ Dosis} + 1.087 \text{ Tiempo} + 3.781 \text{ pH} * \text{Dosis}$$

Con el cubo, también podemos comparar la respuesta predicha en la cara lateral derecha inferior contra la cara lateral izquierda del cubo. Se nota que en los tratamientos donde el pH trabaja en su nivel alto se da menor adsorción que cuando estas se encuentran en su valor bajo, aunque para los tratamientos donde la dosis NPs-FeO y el tiempo de contacto trabajan en su nivel alto, la adsorción es mayor. El factor TC es muy pequeño comparado con los otros dos factores, por lo que no es necesario aumentar el tiempo de contacto para optimizar la adsorción, como se puede ver en la figura 34.

Observando solo los efectos principales, se ha llegado a la conclusión de que las mejores condiciones para la adsorción de arsénico son a pH 5 con 260 mg y a 15 minutos. Sin embargo, para no llegar a una conclusión errónea es necesario considerar los efectos de las interacciones.

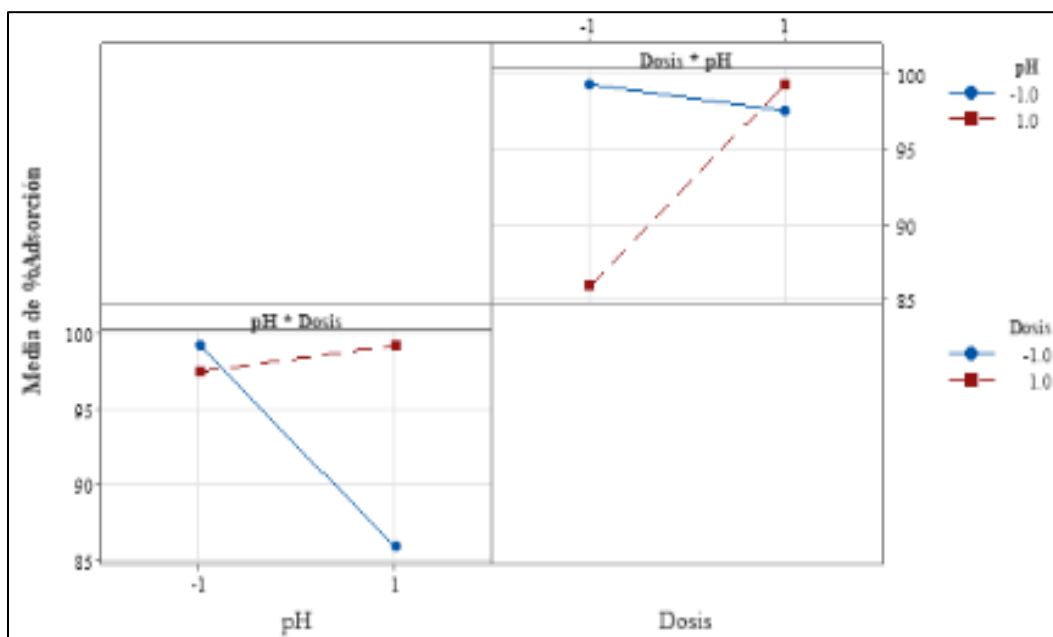


Figura 36. Gráfica de efectos de interacciones del porcentaje de adsorción

La tabla 25 muestra que el valor de la interacción pH*Dosis tiene el valor-p (0.000) menor que 0.05, lo que sugiere que esta interacción tiene un efecto significativo en la adsorción de arsénico. Al observar la figura 36, esta interacción es la más importante en la adsorción. Mientras que para la interacción pH*Tiempo y Dosis*Tiempo tiene el valor-p (0.775) que es mayor que 0.05, lo que indica que estas interacciones no tienen un impacto significativo en la adsorción de arsénico. Para la interacción pH*Dosis*Tiempo, tiene el valor-p (0.149) superando el 0.05, lo que confirma que esta interacción tampoco influye significativamente en la adsorción de arsénico.

En conclusión, los tratamientos han permitido descubrir que la adsorción de arsénico mejora al aumentar la dosis de NPs-FeO, así como el pH y el tiempo proporciona mayor adsorción cuando disminuye su valor. Esto puede observarse en la figura 35, donde muestra cómo en la interacción de los tres factores el rendimiento más alto es <99%.

4.4.4 Diagrama de superficie de respuesta

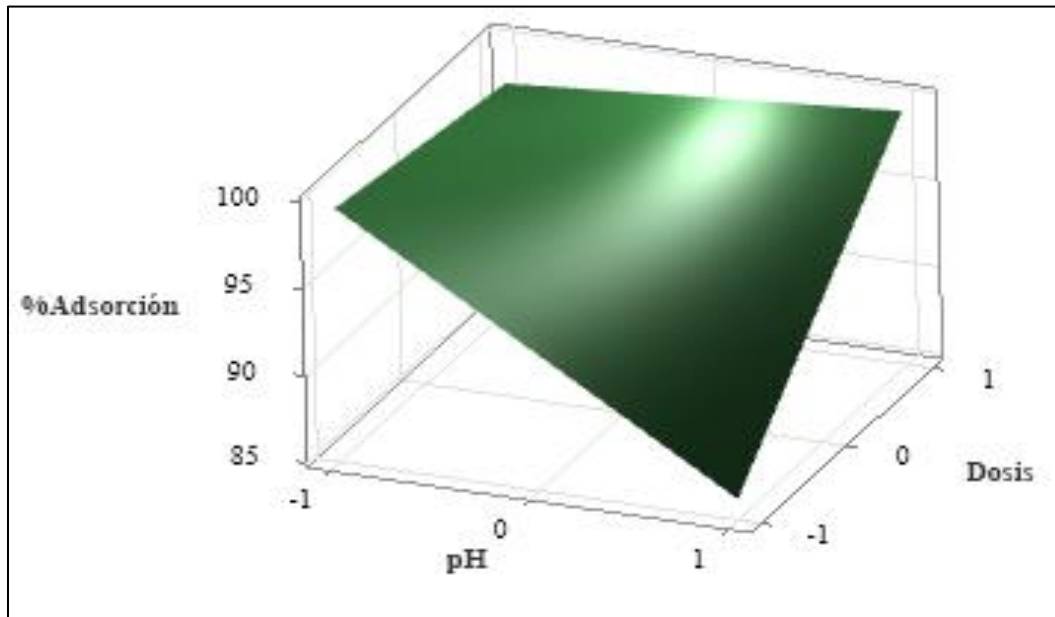


Figura 37. Gráfica de superficie del porcentaje de adsorción versus la dosis y el pH

En la figura 37, se representa la superficie de respuesta del porcentaje de adsorción manteniendo el tiempo de contacto constante a 15 minutos, donde se infiere que a medida que el pH baja el porcentaje de adsorción aumenta (<99%), de manera semejante la dosis de NPs-FeO influye de manera positiva sobre el porcentaje de adsorción a medida que aumenta.

4.4.5 Gráficos de contorno

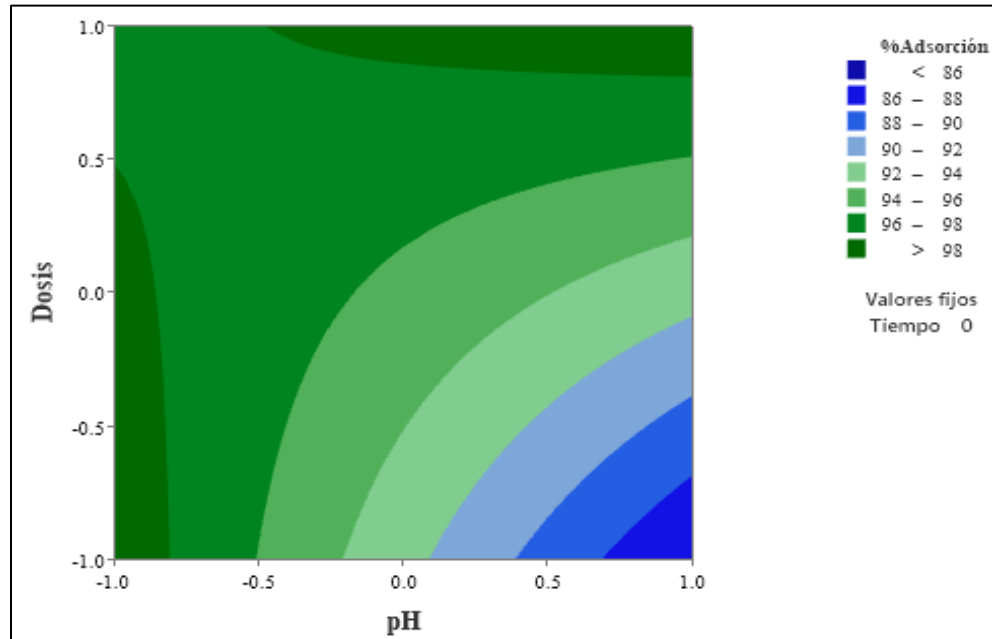


Figura 38. Gráfica de contorno del porcentaje de adsorción versus la dosis y el pH

En la figura 38, se representa la gráfica de contorno en 2D del pH y dosis de NPs-FeO como influyen el porcentaje de adsorción manteniendo el tiempo de contacto constante a 15 minutos, donde se visualiza que a menor pH mayor adsorción de la misma manera la dosis de NPs-FeO a medida que aumenta también la adsorción es favorecida.

Los resultados obtenidos son similares con estudios que involucran la adsorción de arsénico utilizando nanopartículas de óxidos metálicos.

Chandan et al. (2023), obtuvieron una absorción del 91% con nanopartículas de ZnO con extracto de *Acacia Catechu* bajo pH 7, dosis de 2 g/L y 40 minutos. Así también, Tapia & Huanca (2019) lograron una adsorción del 89% y 53.64% con nanopartículas de óxido de hierro soportadas en zeolita bajo condiciones de pH 2.5 y 7.5, respectivamente. Y Gamarra et al., (2022) alcanzaron una adsorción del 88% y 94% con nanopartículas de TiO₂ dopadas con Fe bajo pH 7 y 5. Independientemente del tipo de nanopartícula a pH 5, existe mayor porcentaje de adsorción de As, lo que coinciden con los resultados de la presente investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se obtuvieron nanopartículas de óxido de hierro mediante el uso de extracto de *Eucalyptus globulus* a través del método de biosíntesis. La cuantificación de polifenoles totales en el extracto resultó en 488.8 ppm, utilizando el método de Folin-Ciocalteu. Los análisis espectroscópicos de FTIR revelaron dos picos prominentes en 3343.27 cm^{-1} y 1642.68 cm^{-1} , asociados con grupos funcionales como hidroxilo, amino y carbonilo.

Se logró caracterizar las NPs-FeO con extracto de *Eucalyptus globulus* mediante diversas técnicas instrumentales. Los espectros de FTIR evidenciaron los estiramientos octaédrico y tetraédrico del enlace oxígeno metal (Fe-O), correspondientes a las fases Fe_3O_4 y $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Además, se observó la adsorción de polifenoles del extracto en las superficies de las nanopartículas. El DLS determinó el tamaño hidrodinámico entre 66.36 nm y 83.23 nm. La caracterización mediante MEB reveló nanopartículas de morfología cuasi esférica con una superficie rugosa, con tamaños oscilando entre 182.1 nm y 206.4 nm a una magnificación de 24000x.

Los resultados mostraron que la eficiencia de adsorción del arsénico en aguas subterráneas está significativamente influenciada por el pH y la dosis de nanopartículas mientras que el tiempo de contacto no mostró un impacto relevante en la capacidad de adsorción. Se observó que las nanopartículas exhiben una alta capacidad de adsorción a pH 5 y pH 7, alcanzando una eficiencia del 99.30% bajo condiciones específicas de dosis (130 mg y 260 mg) y un tiempo de contacto de 15 minutos. Estos hallazgos destacan la viabilidad y efectividad de estas nanopartículas como una solución prometedora para la adsorción de arsénico en aguas subterráneas.

5.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio cinético sobre la adsorción de arsénico utilizando estas nanopartículas.
- Investigar cómo la temperatura y la concentración inicial de arsénico influyen en la capacidad de adsorción utilizando estas nanopartículas.
- Se recomienda evaluar la capacidad de adsorción de estas nanopartículas en otros contaminantes.
- Implementar un sistema de recuperación magnética del adsorbente para su posterior reutilización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, B. A., Iqbal, J., Zahra, S. A., Shahbaz, A., Kanwal, S., Rabbani, A., & Mahmood, T. (2019). Bioinspired synthesis and activity characterization of iron oxide nanoparticles made using *Rhamnus triquetra* leaf extract. *Materials Research Express*, 6(12). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab664d>
- Abed, M. A., Jassim, S. M., Hameed, I. A., & Mohammed, S. B. (2023). Physical properties and antibacterial activity of green-iron oxide nanoparticles synthesized with chia seeds. *Chemical Data Collections*, 44, 101013. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101013>
- Abidli, A., Huang, Y., Ben, Z., Zaoui, A., & Park, C. (2022). Sustainable and efficient technologies for removal and recovery of toxic and valuable metals from wastewater: Recent progress, challenges, and future perspectives. *Chemosphere*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133102>
- AdLab. (2024). *Espectrómetro Infrarojo con Transformada de Fourier*. Laboratorios WR.
- Akhtar, M., Hussain, M., Naeem, F., Akhter, P., Jamil, F., Qamar, O., Bazmi, A., Tariq, N., Asrar, A., & Park, Y. (2024). Green and sustainable synthesis of iron oxide nanoparticles for synergetic removal of melanoidin from ethanol distillery simulated model wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 132, 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.022>
- Alara, O., Abdurahman, N., & Ukaegbu, C. (2018). Soxhlet extraction of phenolic compounds from *Vernonia cinerea* leaves and its antioxidant activity. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 11(September), 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.07.003>
- ANA. (2019). *Ley de los recursos hídricos: Ley N° 29338* (p. 40). <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/ley-no-29338-ley-de-recursos-hidricos>
- ANÁHUAC. (2024). *La microscopía electrónica de barrido en las ciencias agrícolas y pecuarias*. Investigaciones y Estudios Superiores, S.C. México.
- Andrade, K., Chacon, Y., Asmat, D., & Raquel, N. (2022). Green Synthesis of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles with *Eucalyptus globulus* Extract and Their Application in the Removal of Heavy Metals from Agricultural Soil. *Molecules*, 27(4). <https://doi.org/10.3390/molecules27041367>

- Anjum, M., Miandad, R., Waqas, M., Gehany, F., & Barakat, M. A. (2019). Remediation of wastewater using various nano-materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 4897-4919. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.10.004>
- Anónimo. (2015). *Aguas Subterráneas*.
- Apaza, R., & Calcina, M. (2014). Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la cuenca baja del Río Callacame, Desaguadero, Puno. *Revista de Investigación Altoandina*, 16(1), 52. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-008.pdf>
- Apaza, T. (2020). Evaluación de arsénico, dureza, coliformes termotolerantes y *E. coli* en aguas subterráneas, de las urbanizaciones de Santa Adriana y Niño San Salvador, del distrito de Juliaca, Puno 2019. En *Universidad Peruana Unión*. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3526>
- Ashraf, I., Singh, N. B., & Agarwal, A. (2023). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Amla seed for methylene blue dye removal from water. *Materials Today: Proceedings*, 72, 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.404>
- Asmat, D., Andrade, K., Chacon, Y., Henriquez, A., & Iparraguirre, F. (2021). Síntesis Ecológica De Nanopartículas De Feo Y Su Aplicación En La Remoción De Metales Pesados Presentes En Suelo Agrícola. *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development" "Leveraging emerging technologies to construct the future"*, 2021-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.19>
- Asmat, D., Murga, E., & Checca, N. (2022). Development, production and characterization of FeO nanoparticles mediated by green route. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions"*, 2022-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.52>
- Atria. (2020). *Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿para qué me sirve? | Atria Innovation*. <https://www.atriainnovation.com/microscopia-electronica-de-barrido-sem-utilidades/>
- Awais, S., Munir, H., Najeeb, J., Anjum, F., Naseem, K., Kausar, N., Shahid, M., Irfan, M., & Najeeb, N. (2023). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Bombax malabaricum* for antioxidant, antimicrobial and photocatalytic applications. *Journal of Cleaner Production*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136916>

- Ayala, E. (2014). Efecto genotóxico in vitro de plantas medicinales antibacterianas *Spartium junceum* L. «retama», *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze «tara» y *Eucalyptus globulus* Labill «eucalipto» Ayacucho 2023. En *Universidad Nacional De San Cristóbal De Huamanga*.
- Basu, S., Dutta, A., Mukherjee, S. K., & Hossain, S. T. (2021). Exploration of green technology for arsenic removal from groundwater by oxidation and adsorption using arsenic-oxidizing bacteria and metal nanoparticles. En *New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater* (pp. 177-211). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822965-1.00009-X>
- Bautista, J., & Gomez, R. (2023). *Influencia del extracto alcohólico/etanólico de residuos de Magnifera indica en la síntesis verde de nanopartículas de FeO y su remediación de suelos agrícolas*. <https://hdl.handle.net/11537/33896>
- Beheshtkhoo, N., Kouhbanani, M., Savardashtaki, A., Amani, A., & Taghizadeh, S. (2018). Green synthesis of iron oxide nanoparticles by aqueous leaf extract of *Daphne mezereum* as a novel dye removing material. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124(5). <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1782-3>
- Bontzolis, C., Dimitrellou, D., Plioni, I., Kandyli, P., Soupioni, M., Koutinas, A., & Kanellaki, M. (2024). Effect of solvents on aniseed aerial plant extraction using soxhlet and ultrasound methods, regarding antimicrobial activity and total phenolic content. *Food Chemistry Advances*, 4(April 2023), 100609. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100609>
- Borjon, S., Soto, E., Salazar, J., & Dávila, G. (2022). Remoción de arsénico en agua subterránea mediante procesos de adsorción. *CHEMISTRY SCIENCES*. <https://quimicahoy.uanl.mx/index.php/r/article/view/269/242>
- Calcina, M., Calcina, L., Huaraya, F., Salas, A., & Tejada, K. (2022). Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno – Perú. *DYNA*, 89(221), 178-184. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.98319>
- Cañazaca, C., & Ccama, W. (2017). *Biosíntesis de nanopartículas de Hierro Cero Valente (NZVI) usando hojas de eucalipto (Eucalyptus Sp.) para la remoción de cromo hexavalente*.
- Cao, W., Gao, Z., Guo, H., Pan, D., Qiao, W., Wang, S., Ren, Y., & Li, Z. (2022). Increases in groundwater arsenic concentrations and risk under decadal groundwater withdrawal in the lower reaches of the Yellow River basin, Henan Province, China. *Environmental Pollution*, 296(December 2021), 118741. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118741>

- Celebi, H., Bilican, I., & Bahadir, T. (2021). Applicability of innovative adsorbents in geogenic arsenic removal. *Journal of Cleaner Production*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129475>
- Chandan, A., Mallika G., & Narsaiah, T. (2023). A green approach to arsenic removal using ZnO nanoparticles synthesized from *Acacia Catechu* leaf extract. *Materials Today: Proceedings*, 72, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.199>
- Choque, A. (2019). Bacterial biorremediation of the arsenic: reduction oxid mechanisms. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.851>
- COEN. (2019). *Contaminación por arsénico y plomo en el agua subterránea del Distrito de Mórrope Lambayeque*. <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/07/INFORME-DE-EMERGENCIA-Nº-685-12AGO2019-CONTAMINACIÓN-DE-ARSÉNICO-Y-PLOMO-EN-EL-AGUA-EN-EL-DISTRITO-DE-MÓRROPE-LAMBAYEQUE-45.pdf>
- Collazo, M., & Montaña, Jo. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. https://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf
- Cornejo, L. (2015). *Propiedades de las nano partículas - Nuevas Tecnologías y Materiales*. <https://nuevastecnologiasymateriales.com/propiedades-de-las-nano-particulas/>
- De Meyer, C. M. C., Wahnfried, I., Rodriguez Rodriguez, J. M., Kipfer, R., García Avelino, P. A., Carpio Deza, E. A., & Berg, M. (2023). Hotspots of geogenic arsenic and manganese contamination in groundwater of the floodplains in lowland Amazonia (South America). *Science of The Total Environment*, 860(August 2022), 160407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160407>
- Di Marco, E. (2015). *Eucalyptus globulus* Labill (Eucalipto blanco) Familia Myrtaceae. *Dirección de Producción Forestal MAGyP*, 14.
- Dikshit, P., Kumar, J., Das, A., Sadhu, S., Sharma, S., Singh, S., Gupta, P., & Kim, B. (2021). Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations. *Catalysts*, 11(8), 902. <https://doi.org/10.3390/catal11080902>
- D.S. N° 031-2010-SA. Reglamento de la Calidad del Agua Para Consumo Humano, Ministerio de Salud (2010). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/273650/reglamento-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano.pdf>

- Dzimitrowicz, A., Berent, S., Motyka, A., Jamroz, P., Kurcbach, K., Sledz, W., & Pohl, P. (2019). Comparison of the characteristics of gold nanoparticles synthesized using aqueous plant extracts and natural plant essential oils of *Eucalyptus globulus* and *Rosmarinus officinalis*. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 4795-4805. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.09.007>
- Escobar, R. (2022). *Eucalipto: una especie exótica que causa controversia en el Perú*. MONGABAY.
- Escobaro, A., Pizzioa, L., & Romanelli, G. (2019). Catalizadores magnéticos basados en Óxidos de Hierro: Síntesis, Propiedades y Aplicaciones. *CINDECA*. <https://doi.org/https://doi.org/10.19053/01217488.v10.n1.2019.88111> Resumen
- Feng, Y., Dong, S., Ma, M., Hou, Q., Zhao, Z., & Zhang, W. (2023). The influence mechanism of hydrogeochemical environment and sulfur and nitrogen cycle on arsenic enrichment in groundwater: A case study of Hasuhai basin, China. *Science of The Total Environment*, 858(235), 160013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160013>
- Fernández, L. (2021). Puno: solo el 20% de población de Juliaca tiene agua potable. *LA REPÚBLICA*. <https://larepublica.pe/sociedad/2021/05/16/puno-solo-el-20-de-poblacion-de-juliaca-tiene-agua-potable-lrsd>
- Ferro, J. (2020). *Síntesis verde de nanopartículas de hierro cero valente para la remoción de cadmio, cromo y arsénico en solución* [Tesis]. Universidad de los Andes.
- Gamarra, F., Medina, J., Lanchipa, W., Tamayo, R., & Sacari, E. (2022). Structural, Optical, and Arsenic Removal Properties of Sol–Gel Synthesized Fe-Doped TiO₂ Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12(19), 3402. <https://doi.org/10.3390/nano12193402>
- García, S., & León, J. (2021). *Estrategia para mejorar la producción de metabolitos secundarios en plantas*. CIENCIA UANL. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=10898>
- Gastañaga, M. del C. (2018). Agua, saneamiento y salud. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 181. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3732>
- George, C., Sima, L., Jahuir, M., Mihalic, J., Cabrera, L., Danz, D., Checkley, W., & Gilman, R. (2014). Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(8), 565-572. <https://doi.org/10.2471/BLT.13.128496>
- Gleichmann, N. (2020). *SEM frente a TEM*. News courier. <https://www.news-courier.com/analysis/articles/sem-vs-tem-331262>

- Google Earth Pro. (2024). *Mapa de puntos de muestreo de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca, Puno - Perú.*
- Gregorio, K., Rivera, J., Saade, H., López, R., Martínez, J., & Iliina, A. (2018). Las nanopartículas magnéticas y sus múltiples aplicaciones. *Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, México*, 397-411.
- GuíaLab. (2019, noviembre 15). *Dispersión de luz dinámica: definición de términos comunes.*
- Gullón, B., Muñoz-Mouro, A., Lú-Chau, T. A., Moreira, M. T., Lema, J. M., & Eibes, G. (2019). Green approaches for the extraction of antioxidants from eucalyptus leaves. *Industrial Crops and Products*, 138, 111473. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111473>
- Harbor. (2023). *Una mirada en profundidad a las diferencias y ventajas respectivas de la microscopía electrónica de transmisión y de barrido | Shenzhen Harbor Semiconductor Technology Co.* <https://www.nanofab.com.cn/es/vision-2/application/tem-sem-diferencia/>
- Hernández, J. (2021). Síntesis de nanopartículas de oro con extracto vegetal de café (*Coffea arabica* L.). En *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/7c014da2-f70a-4fe9-b4dc-a2d559411ab9>
- Hokkanen, S., Repo, E., Lou, S., & Sillanpää, M. (2015). Removal of arsenic(V) by magnetic nanoparticle activated microfibrillated cellulose. *Chemical Engineering Journal*, 260, 886-894. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.093>
- Horst, M., Lassalle, V., & Ferreira, M. (2015). Nanosized magnetite in low cost materials for remediation of water polluted with toxic metals, azo- and antraquinonic dyes. En *Frontiers of Environmental Science and Engineering* (Vol. 9, Número 5, pp. 746-769). Higher Education Press. <https://doi.org/10.1007/s11783-015-0814-x>
- Hu, J., & Xianyu, Y. (2021). When nano meets plants: A review on the interplay between nanoparticles and plants. *Nano Today*, 38, 101143. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101143>
- Huaracha, J., & Quispe, L. (2020). Determinación de la concentración de arsénico en aguas subterráneas en las salidas: Puno, Lampa y Arequipa de la ciudad de Juliaca - 2019. En *Universidad Peruana Unión*. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3321/Josue_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Huillca, M., & Apaza, L. (2019). Evaluación de la concentración de Arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en la Asociación Nueva Jerusalén, Juliaca - Puno. *Universidad Peruana Unión*.
https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/2611/Martha_Trabajo_Bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Iconaru, S., Guégan, R., Popa, C., Motelica, M., Ciobanu, C., & Predoi, D. (2016). Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles as adsorbents for As and Cu removal. *Applied Clay Science*, 134, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.019>
- INEI. (2020). *Perú: Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico* (Vol. 9). https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua_junio2020.pdf
- Jha, P., & Tripathi, P. (2021). Arsenic and fluoride contamination in groundwater: A review of global scenarios with special reference to India. *Groundwater for Sustainable Development*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100576>
- Juárez, J. (2018). *Estudio de las características fisicoquímicas y fitoquímicas de las hojas de Eucalyptus globulus Labill (eucalipto)* [UNIVERSIDAD CATÓLICA LOS ANGELES CHIMBOTE]. http://docs.bvsalud.org/biblioref/2018/10/915645/uso-terapeutico-de-menta-piperita-menta-en-pobladores-del-asent_eRypfJU.pdf
- Kaltenbach, P. (2021). *Espectroscopia FTIR | Equipos, ejemplos y definición | Mettler Toledo S.A.E.* https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy.html
- Katata, L., Moremedi, T., Aremu, O., & Bahadur, I. (2018). Green synthesis of iron nanoparticles using Moringa oleifera extracts and their applications: Removal of nitrate from water and antibacterial activity against Escherichia coli. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.093>
- Khoshkalam, E., Fotovat, A., Halajnia, A., Kazemian, H., & Eshghi, H. (2023). Nitrate adsorption using green iron oxide nanoparticles synthesized by Eucalyptus leaf extracts: Kinetics and effects of pH, KCl salt, and anions competition. *Journal of Molecular Liquids*, 375. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121366>
- Kirdat, P., Dandge, P., Hagwane, R., Nikam, A., Mahadik, S., & Jirange, S. (2021). Synthesis and characterization of ginger (z. officinale) extract mediated iron oxide nanoparticles and its

- antibacterial activity. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2826-2831.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.422>
- Kumar, A., Kumar, H., Naz, A., Koul, M., Chowdhury, A., & Shekhar, S. (2022). Arsenic removal technologies for middle- and low-income countries to achieve the SDG-3 and SDG-6 targets: A review. *Environmental Advances*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100262>
- Lillo, J. (2007). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*.
https://www.aulados.net/Temas_ambientales/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf
- Liu, B., Kim, K., Kumar, V., & Kim, S. (2020). A review of functional sorbents for adsorptive removal of arsenic ions in aqueous systems. *Journal of Hazardous Materials*, 388.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121815>
- López, M. (2019). Nanopartículas para la remoción de arsénico del agua. En *COLOQUIO DE FÍSICA-PUCP*.
https://educast.pucp.edu.pe/video/11266/coloquio_de_fisica__nanoparticulas_para_la_remo_cion_de_arsenico_del_agua
- López, M. A., & Luque de Castro, M. D. (2020). *Soxhlet extraction* (pp. 327-354). Department of Analytical Chemistry. <https://doi.org/doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00011-6>
- Macías, K. (2022). Aplicación de nanopartículas magnéticas de hierro (magnetita) en la adsorción de arsénico en aguas contaminadas. En *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16939>
- Mamani, E. (2023). Arequipa: 9,500 personas toman agua con arsénico que causa cáncer. *La República*. <https://larepublica.pe/sociedad/2023/06/25/arequipa-9500-personas-toman-agua-con-arsenico-que-cause-cancer-lrsd-296750>
- Mamani, W. (2019). Contaminación de las Aguas Subterráneas por Arsénico (As) el caso del Distrito de Juliaca-Perú. *Ñawparisun*, 1(4), 31-36.
- Marimon, W. (2018). Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. En *Pontificia Universidad Javeriana Bogotá*.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/39649>
- Márquez, J. (2022). *Determinación de concentraciones de arsénico en aguas subterráneas del distrito de Végueta-Huaura, Lima en el periodo 2017-2018*.
https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1574/Marquez_Jeanpeare_tesis_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Martínez, M. (2017). *Desarrollo de materiales híbridos para la eliminación de Arsénico de medios acuosos* [UNIVERSIDAD DE CORUÑA]. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/18400>
- Martínez, M., Aguilera, E., & Martínez, A. (2018). Remoción de arsénico de agua potable mediante adsorción sobre óxido y oxihidróxidos de hierro. *CienciAcierta*, 56. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2018/12/14/remocion-de-arsenico-de-agua-potable-mediante-adsorcion-sobre-oxido-y-oxihidroxidos-de-hierro/>
- Mbachu, A., Kamoru, A., Egbosiuba, T., Ifeanyichukwu, J., Ijeoma, J., & Mustapha, S. (2023). Green synthesis of iron oxide nanoparticles by Taguchi design of experiment method for effective adsorption of methylene blue and methyl orange from textile wastewater. *Results in Engineering*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101198>
- MCLCP. (2019). *Reporte N ° 01-2019 / SC / MCLCP. Situación Actual Sobre La Contaminación de los Distritos De Mórrope, Pacora y Otros -2019*. <https://www.mesadeconcertacion.org.pe/storage/documentos/2019-09-26/reporte-01-2019-sobre-contaminacion-de-agua-morrope-y-pacora-final.pdf>
- Méndez, M., Boderó, K., Alvarado, S., Huayamave, A., & Apolo, D. (2020). Biosíntesis de nanopartículas de hierro (Fe₃O₄) en la remediación de aguas contaminadas. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 24(96), 35-45. <https://orcid.org/0000-0001-7451-8994>
- MICROTRAC. (2024). *Dispersión de Luz Dinámica (DLS): Análisis del tamaño de las partículas y del potencial zeta*. Particle characterization.
- MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. En *El Peruano*. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed). LIMUSA WILEY. <https://es.slideshare.net/jairjosemunozsuarez/diseo-y-analisis-de-experimentos-montgomery-ocr>
- Municipalidad Provincial de San Román. (2017). *Plan de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Juliaca 2016-2025*. <https://es.scribd.com/document/392643098/2-Volumen-2-PDU-Juliaca-2016-2025-pdf>
- Nolazco, D., Villanueva, E., Hatta, B., & Tellez, L. (2020). Extracción y caracterización química del aceite esencial de Eucalipto obtenido por microondas y ultrasonido. *Revista de*

- Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(3), 274-284.
<https://doi.org/10.18271/ria.2020.661>
- Núñez, E. (2008). *Extracciones con equipo Soxhlet*.
<https://www.yumpu.com/es/document/read/48898557/extracciones-con-equipo-soxhlet-cenunezcomar>
- OneLab. (2023). *Diferentes tipos de microscopios y sus usos* / OneLab.
<https://www.onelab.com.ar/diferentes-tipos-de-microscopios-y-sus-usos>
- Pabón, S., Benitez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2021). Síntesis de nanopartículas de óxido de hierro usando extracto acuoso de *Eucalyptus grandis*. *DYNA*, 88(216), 220-226.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89031>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2022). Mercury (II) removal from aqueous solutions by iron nanoparticles synthesized from extract of *Eucalyptus grandis*. *Heliyon*, 8(11).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11429>
- Pacori, E., & Pacori, A. (2019). *Metodología y Diseño de la Investigación Científica* (Ffecaat, Ed.; Segunda Ed).
- Pál, L., Jenei, T., McKee, M., Kovács, N., Vargha, M., Bufa-Dórr, Z., Muhollari, T., Bujdosó, M. O., Sándor, J., & Szűcs, S. (2022). Health and economic gain attributable to the introduction of the World Health Organization's drinking water standard on arsenic level in Hungary: A nationwide retrospective study on cancer occurrence and ischemic heart disease mortality. *Science of The Total Environment*, 851, 158305.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158305>
- Palomares, E. (2022). Síntesis verde de compuestos de nanopartículas de hierro-cobre. En *Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco*.
- Parada, M. (2017). *Estudio del equilibrio de extracción hidrofílico de la corteza de Eucalyptus nitens y Eucalyptus globulus*. Universidad de Concepción.
- Patiño, D., Sánchez, L., Tejeda, L., Hinestroza, J., & Herrera, A. (2020). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Cymbopogon citratus* extract and sodium carbonate salt: Nanotoxicological considerations for potential environmental applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100377.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100377>

- Peréz, L., & Villalva, Y. (2021). *Síntesis y caracterización de las nanopartículas de hierro con extracto de hojas del Eucalyptus globulus sp.* https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7922/T010_70557148_T.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Pillai, P., Kakadiya, N., Timaniya, Z., Dharaskar, S., & Sillanpaa, Mi. (2020). Removal of arsenic using iron oxide amended with rice husk nanoparticles from aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.307>
- Pineda, D. (2023). *Dispersión de luz dinámica (DLS) en un poliaromático, naftaleno.*
- Piñero, J., Sifaoui, I., & López, A. (2021). *Bloque II: Desde el extracto crudo al compuesto puro.* https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/18761/mod_resource/content/2/OCW_INES_SIFAUI_Final.pdf
- Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, Pub. L. No. Resolución jefatural N°010-2016-ANA (2016). https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/protocolo_nacional_para_el_monitoreo_de_la_calidad_de_los_recursos_hidricos_superficiales.pdf
- Rahman, M. M., Hafez, I., Tajvidi, M., & Amirbahman, A. (2021). Highly Efficient Iron Oxide Nanoparticles Immobilized on Cellulose Nanofibril Aerogels for Arsenic Removal from Water. *Nanomaterials*, 11(11), 2818. <https://doi.org/10.3390/nano11112818>
- Rahmayanti, M., Nurul Syakina, A., Fatimah, I., & Sulistyarningsih, T. (2022). Green synthesis of magnetite nanoparticles using peel extract of jengkol (*Archidendron pauciflorum*) for methylene blue adsorption from aqueous media. *Chemical Physics Letters*, 803, 139834. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139834>
- Ramos, J. (2018). *Híbridos de nanopartículas magnéticas funcionalizadas con diferentes agentes para la adsorción y remoción de metales pesados del agua* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/8487>
- Rodríguez, P. (2021). Intoxicación por arsénico. *Medicina Legal de Costa Rica*, 38(2), 4-16. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152021000300004
- Sachin, Jaishree, Singh, N., Singh, R., Shah, K., & Pramanik, B. K. (2023). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using lychee peel and its application in anti-bacterial properties and CR dye removal from wastewater. *Chemosphere*, 327, 138497. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138497>





- Saiz, J. (2015). *Diseño de nanoadsorbentes magnéticos funcionalizados para la eliminación de arsénico de aguas subterráneas contaminadas*. 222. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/16438>
- Sarkar, A., Paul, B., & Darbha, G. K. (2022). The groundwater arsenic contamination in the Bengal Basin-A review in brief. *Chemosphere*, 299, 134369. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134369>
- Selvaraj, R., Pai, S., Vinayagam, R., Varadavenkatesan, T., Kumar, P. S., Duc, P. A., & Rangasamy, G. (2022). A recent update on green synthesized iron and iron oxide nanoparticles for environmental applications. *Chemosphere*, 308, 136331. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136331>
- Seynnaeve, B., Folens, K., Krishnaraj, C., Ilic, I. K., Liedel, C., Schmidt, J., Verberckmoes, A., Du Laing, G., Leus, K., & Van Der Voort, P. (2021). Oxygen-rich poly-bisvanillonitrile embedded amorphous zirconium oxide nanoparticles as reusable and porous adsorbent for removal of arsenic species from water. *Journal of Hazardous Materials*, 413, 125356. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125356>
- Shafey, A. (2020). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles from plant leaf extracts and their applications: A review. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 304-339. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0031>
- Sharma, P., Nanda, K., Yadav, M., Shukla, A., Srivastava, S. K., Kumar, S., & Singh, S. P. (2022). Remediation of noxious wastewater using nanohybrid adsorbent for preventing water pollution. *Chemosphere*, 292, 133380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133380>
- Siddiqui, S., Naushad, M., & Chaudhry, S. (2019). Promising prospects of nanomaterials for arsenic water remediation: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.037>
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2018). «Green» synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4>
- Sinha, S., Nigam, S., Solanki, S., Batra, L., Chug, P., & Singh, R. (2023). Prospects on arsenic remediation using organic cellulose-based adsorbents. *Industrial Crops and Products*, 201, 116928. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116928>

- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- SPDA. (2020). Puno: 34 personas presentan arsénico y mercurio por consumir agua contaminada. *ACTUALIDAD AMBIENTAL*. <https://www.actualidadambiental.pe/puno-34-personas-presentan-arsenico-y-mercurio-por-consumir-agua-contaminada/>
- Swathi, S., Yuvakkumar, R., Kumar, P. S., Ravi, G., & Velauthapillai, D. (2021). Annealing temperature effect on cobalt ferrite nanoparticles for photocatalytic degradation. *Chemosphere*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130903>
- Tapia, N., & Huanca, M. (2019). *Remoción de arsénico en agua proveniente del Río Tambo Quelgua con nanopartículas de óxido de hierro soportadas en zeolita* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/d9cb4dde-7319-480f-b44f-fb5198d9b416>
- Torrenegra, M., Granados, C., & León, G. (2019). Extracción, caracterización y actividad antioxidante del aceite esencial de Eucalyptus globulus Labill. *Revista Cubana de Farmacia*. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=93927>
- Torres, J., Feregrino, A., Vega, M., Escobar, L., Cervantes, J., & Esquivel, K. (2022). Green Synthesis via Eucalyptus globulus L. Extract of Ag-TiO₂ Catalyst: Antimicrobial Activity Evaluation toward Water Disinfection Process. *Nanomaterials*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/nano12111944>
- Universidad Complutense Madrid. (2024). *ICTS Microscopía: Microscopio electrónico, partes, aumentos y características*. Centros de Asistencia a la Investigación.
- Valenzuela, H., Vázquez, P., Zazueta, D., López, J., & Rojas, J. (2023). Síntesis verde de nanopartículas de magnetita (NPs-Fe₃O₄): factores y limitaciones. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 16(30). <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69744>
- Villacrés, J., & Barreto, C. (2022). Actividad antibacteriana in vitro de los extractos acuosos de Eucalyptus globulus Labill. y Cinnamoum zeylanicum Blume sobre Escherichia coli, Enterococcus faecalis y Staphylococcus aureus. *Revista Peruana de Medicina Integrativa. EsSalud*. <https://doi.org/10.26722/rpmi.2022.71.223>




- Viña, S. (s. f.). *Productos naturales vegetales. CAPÍTULO 4. Compuestos fenólicos*. Recuperado 8 de agosto de 2023, de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/112803>
- Wang, T., Jin, X., Chen, Z., Megharaj, M., & Naidu, R. (2014). Green synthesis of Fe nanoparticles using eucalyptus leaf extracts for treatment of eutrophic wastewater. *Science of the Total Environment*, 466-467, 210-213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.022>
- Wang, Z. (2013). Iron complex nanoparticles synthesized by eucalyptus leaves. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 1(12), 1551-1554. <https://doi.org/10.1021/sc400174a>
- Wang, Z., Fang, C., & Mallavarapu, M. (2015). Characterization of iron-polyphenol complex nanoparticles synthesized by Sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Environmental Technology and Innovation*, 4, 92-97. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2015.05.004>
- Water, G. (2019, abril 4). *Beneficios de la electrocoagulación para la eliminación de arsénico del agua*. Genesis Water Technologies.
- Wu, W., Wu, Z., Yu, T., Jiang, C., & Kim, W. (2015). Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, surface functional strategies and biomedical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(2), 23501. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/2/023501>
- Xiao, X., Wang, Q., Owens, G., Chiellini, F., & Chen, Z. (2019). Reduced graphene oxide/iron nanoparticles used for the removal of Pb (II) by one step green synthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 557, 598-607. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.09.058>
- Yadav, M. K., Saidulu, D., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Mukherjee, A. (2021). Status and management of arsenic pollution in groundwater: A comprehensive appraisal of recent global scenario, human health impacts, sustainable field-scale treatment technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105203. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105203>

ANEXOS

Anexo 1. Constancia de identificación botánica del eucalipto según el sistema de clasificación filogenético de Adolph Engler

	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRONOMICA LABORATORIO DE TAXONOMIA VEGETAL	
CONSTANCIA		
<p>El que suscribe jefe del Laboratorio de Taxonomía Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la U.N.A. Puno, hace constar que el espécimen botánico puesto a disposición pertenece a la especie: <i>Eucalyptus globulus</i> Labill "Eucalipto" que, según el Sistema de Clasificación Filogenético de Adolph Engler, posee la siguiente Posición Taxonómica:</p>		
REINO	Plantae	
SUB REINO	Phanerogamae	
DIVISIÓN	Angiospermae	
CLASE	Dycotyledoneae	
SUB CLASE	Archychlamydeae	
ORDEN	Myrtales	
FAMILIA	Myrtaceae	
GENERO	Eucalyptus	
ESPECIE	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill	
<p>Según la solicitud esta muestra fue colectada en el distrito de San Juan de Salinas de Azángaro, se expide la presente constancia a petición escrita de las interesadas: Jimena Massiely Jove Laruta y Fiorella Dayli Huamaliano León, Bachilleres en Ingeniería Ambiental y forestal, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Juliaca-Puno, para los fines que vieren por conveniente.</p>		
  MSc. Edgar Polanco Ruelis INGENIERO AGRÓNOMO C.I.P. N° 88134 JEFE LABORATORIO TAXONOMIA VEGETAL		  UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FAC. CIENCIAS AGRARIAS Sr. Javier Mamani Paredes DECANO

Anexo 2. Informe de ensayo del extracto de hojas de Eucalyptus globulus para la determinación de polifenoles totales

	<p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 382038 ANEXO 1165 ✉ laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Apto. 1350 AREQUIPA - PERÚ</p>	
INFORME DE ENSAYO N° ANA06L23.005128		
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE		
Nombre del cliente	: Fiorella Dayli Huamaliano León/Jimena Massiely Jove Laruta	
Dirección del cliente	: Cal Urb Villa Medica Block 28 Piso 1	
RUC	: No corresponde	
Identificación del contacto	: Fiorella Dayli Huamaliano León	
Descripción de la muestra	: Extracto de eucalipto	
INFORMACIÓN DEL ENSAYO		
Condición del muestreo	: Por el cliente	
Tamaño de muestra	: 50 mL	
Fecha de recepción	: 06/12/2023	
Fecha de ejecución de ensayo	: 06/12/2023 al 13/12/2023	
Fecha de emisión de informe	: 14/12/2023	
Página	: 1 de 1	
I. ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:		
ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE POLIFENOLES TOTALES (taninos exp en Acido Tánico) Método espectrofotométrico FOLIN-CIOCALTEAU	mg/100 mL	48,88
OBSERVACIONES:		
<ul style="list-style-type: none">- La información proporcionada por el cliente es de responsabilidad exclusiva del mismo.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento previo y transporte de la muestra hasta el ingreso al LECC son responsabilidad del solicitante y los resultados emitidos en el presente informe se refieren a la muestra tal como se recibió.- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y 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. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad		
	Firmado digitalmente por: RICARDO ALONSO ABRIL RAMIREZ DNI:29651987 RUC:20141637941 Motivo: Fecha: 14/12/2023 14:57:03-0500	
Código: LECC-15INF-002F ED:01 Fecha de Aprobación: 2022-08-16 Aprobación por: DT		

Anexo 3. Informe de ensayo del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* y NPs-FeO análisis por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier



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: Fiorella Dayli Huamaliano León / Jimena Massiely Jove Laruta

Aprobado por: Dra. Adriana Edith Larrea Valdivia

Analista: Carlos Javier Valenzuela Huillca

Informe de ensayo No: 228-24			
VERSIÓN	RECEPCIÓN DE MUESTRA	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	EMISIÓN DE INFORME
1	25-Mar-2024	01-Abr-2024	03-Abr-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.			

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de las investigadoras Fiorella Dayli Huamaliano León y Jimena Massiely Jove Laruta, se ha realizado el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, rango medio (MIR), de la siguiente muestra:

NPs tratamiento

Se recibió en consistencia sólida, 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	Fiorella Dayli Huamaliano León / Jimena Massiely Jove Laruta
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 ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER FT-IR

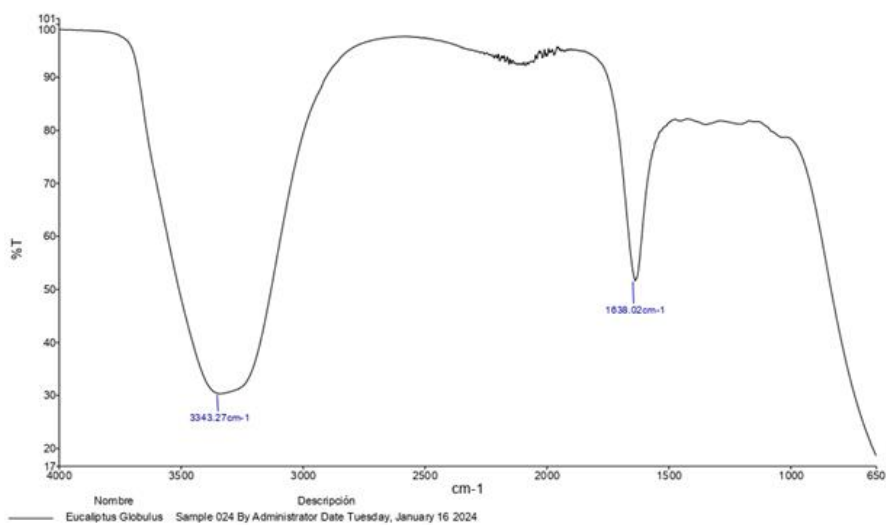
Equipo	Marca Perkin Elmer, modelo Frontier FT-IR/NIR
Rango de barrido	4000 cm^{-1} - 650 cm^{-1}
Tipo de accesorio	Universal ATR
Cristal UATR	Diamante/ZnSe
Salto UATR	3

Anexo 3. (Continuación)

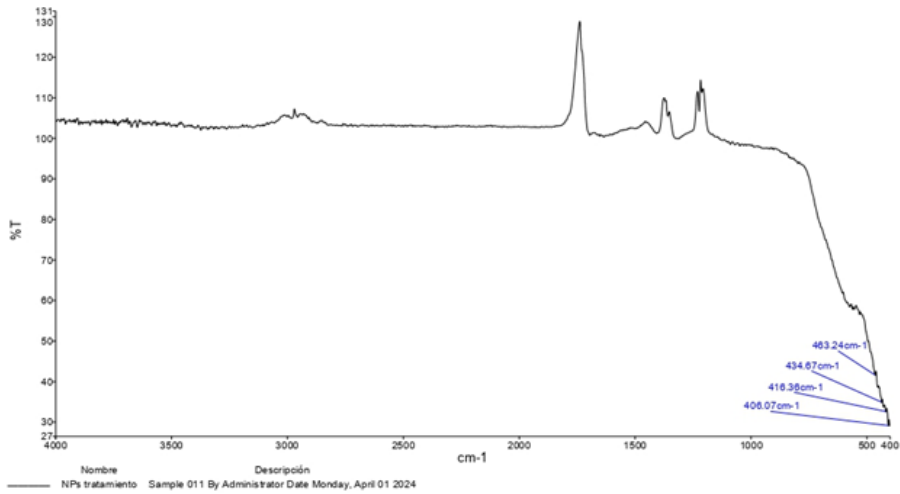
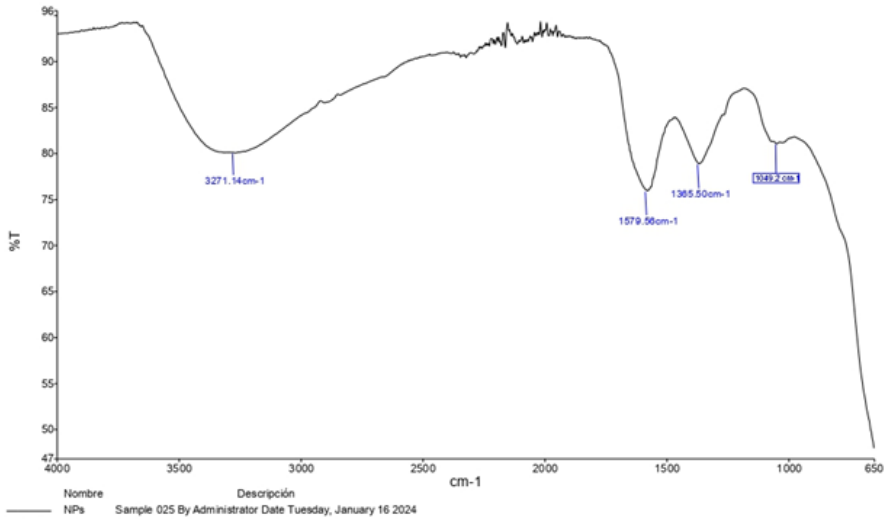
5. OBSERVACIONES

- ✓ 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. ESPECTRO



Anexo 3. (Continuación)



Anexo 4. Informe de sesión de NPs-FeO analizadas por Microscopia Electrónica de Barrido



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
LABORATORIO DE EQUIPAMIENTO ESPECIALIZADO



REPORTE SESIÓN DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO

MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO (MEB)

MARCA: INSPECT

MODELO: S50

FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 20/05/2024

FECHA DE EJECUCIÓN DEL SERVICIO: 22/05/2024

FECHA DE EMISION DE INFORME: 24/05/2024

MUESTRA: Nanopartículas de óxido de hierro – NpsFeO (1)

Se informa que el día 22 de mayo de 2024 se llevó a cabo la sesión de microscopía electrónica de barrido para las Srtas. JIMENA MASSIELY JOVE LARUTA y FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEÓN. Durante esta sesión, se analizó 1 muestra de nanopartículas de óxido de hierro (biosintetizadas con extracto de *Eucalyptus globulus*).

Todas las muestras se fijaron en fibra de carbono sobre plataformas de metal conocidas como "stubs" y se metalizaron con oro. La observación se llevó a cabo en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) FEI INSPECT S50 en condiciones de alto vacío. Se utilizaron los siguientes niveles de magnificación: 200 x a 24000 x.

Los parámetros utilizados para el filamento fueron los siguientes: abertura de 1.5 a 5, distancia de trabajo de 10 mm y una intensidad energía eléctrica de kilovoltios 6 a 20 (kV). Se entregaron aproximadamente 16 fotos como parte del análisis que fueron compartidas a través de una carpeta de Google Drive para su acceso y revisión.

Atentamente,

Danayra Cristhel Cruz Espinoza
Técnica
Laboratorio de Equipamiento Especializado
Facultad de Ciencias Biológicas
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Anexo 5. Informe de ensayo de muestras de agua subterránea de la ciudad de Juliaca para la determinación de arsénico total



UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 24346-23

CLIENTE: FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEON
JIMENA MASIELY JOVE LARUTA

DIRECCIÓN: AREQUIPA

ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PRODUCTO AGUA.

CANTIDAD DE MUESTRA 04

FECHA DE RECEPCION: Martes, 14 de noviembre de 2023.

CARACTERISTICAS Y CONDICIONES: FRASCO DE PLÁSTICO CON TAPA

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Miércoles, 22 de noviembre 2023.

REFERENCIA MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

PROCEDENCIA: AGUA SUBTERRANEA - JULIACA

CÓDIGO DE MUESTRA 30753 - 30754 - 30755 - 30756.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 2

Anexo 5. (Continuación)



UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 24346-23

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	CARACTERÍSTICA	RESULTADOS	MÉTODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
Arsénico	mg/L	P-01	0.0202	Método de Dietilditiocarbamato de plata.
		P-02	0.0097	
		P-03	0.090	
		P-04	0.099	

Emitido en Arequipa, 22 de noviembre de 2023.


Página 2 de 2


Dra. Miriam Vilma María Mátaya Cornejo
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259



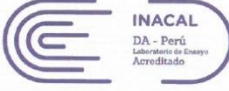

Lito Quirós Freddy Agustín Valdeavita Peña
Químico Responsable
RCQP - 842

Anexo 6. Informe de ensayo de muestra (P-04) de agua subterránea para la determinación de arsénico total



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 Ensayo Acreditado

Registro N° LE - 050

Clave generada : E4038F88

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00022

Fecha de emisión: 12/02/2024 Página 1 de 4

Señores : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEON
 Dirección : JULIACA SAN ROMAN PUNO
 Atención : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEÓN / JIMENA MASSIELY JOVE LARUTA
 Proyecto : EFECTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO BIOSINTETIZADAS CON EUCALYPTUS GLOBULUS EN LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO (V) EN AGUAS SUBTERRÁNEAS JULIACA-2023


PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEÓN / JIMENA MASSIELY JOVE LARUTA Fecha de recepción : 5/02/2024
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 023-24 Fecha de ensayo : 5/02/2024
 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
AG24000043	AGUA SUBTERRÁNEA INICIAL	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	URB. CASUARINAS / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	19L 377235 8289683	2/02/2024	13:21

Condiciones de recepción de la muestra
 Al ambiente

Observación
 -



Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P.19474

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"


(*) Los métodos indicados 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.

(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



Validar el informe
vía web

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

Anexo 6. (Continuación)

 Laboratorios Analíticos del Sur	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 Ensayo Acreditado Registro N° LE - 050
--	--	---

Clave generada : E4038F88


INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00022

Fecha de emisión: 12/02/2024

Página 2 de 4

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO


Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG24000043	AGUA SUBTERRANEA INICIAL	0,1542


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474


"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"
(* Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.
"sValor numérico"=Limite de detección del método, "hValor 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 solo 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




Anexo 6. (Continuación)



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 Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 050

Clave generada : E4038F88

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00022

Fecha de emisión: 12/02/2024

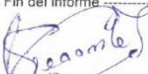
Página 3 de 4

MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

Código	Título	Rango de método analítico
796	EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP-OES. Revisión 4.4. Arsénico Total (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) - As	[< 0.0012 - 50] mg/L

: Límite de detección
 : Límite de cuantificación

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



Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P.19474

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "<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 solo 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



Anexo 6. (Continuación)



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 Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 050

Página 4 de 4

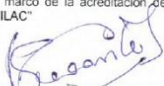
Declaración de evaluación de la conformidad LAS01-AG-AC-24-00022
según JCGM 106:2012 Fecha de emisión: 12/02/2024

Norma : Reglamento de la calidad del agua para consumo humano DS 031-2010 SA DIGESA

Cod.Interno :AG24000043		Nom.Muestra :AGUA SUBTERRANEA INICIAL				
Método	Unidad Medida	Resultado	Incertidumbre k=2; 95% confiable	Especificación	Evaluación de la conformidad	
INORGANICO						
796	Arsénico	mg/L	0,154	0,022	≤0,010	0,00% RECHAZADO

LMP* = Límites Máximos Permisibles indicado en el D.S. N° 031-2010
 * En caso de analizar por la técnica de Número Más Probable - NMP, el valor <1,1 * o <1,8 * se consideran como "0"
 † Rango de Incertidumbre para métodos microbiológicos cuantitativos

N.A. : No Aplica
 "Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"




Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P.19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.
 "k<Valor numérico"=Límite de detección del método, "k<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.


Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.

Validar el informe
vía web




Anexo 7. Informe de ensayo de muestras tratadas de agua subterránea para la determinación de arsénico total



Laboratorios Analíticos del Sur

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 Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 050

Clave generada : 87028E95

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00066

Fecha de emisión: 25/03/2024 Página 1 de 4

Señores : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEON
 Dirección : JULIACA SAN ROMAN PUNO
 Atención : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEÓN / JIMENA MASSIELY JOVE LARUTA
 Proyecto : EFECTO DE LAS NANOPARTICULAS DE ÓXIDO DE HIERRO BIOSINTETIZADAS CON EUCALYPTUS GLOBULUS EN LA ADSORCIÓN DE ARSENICO (V) EN AGUAS SUBTERRANEAS JULIACA-2023

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : FIORELLA DAYLI HUAMALIANO LEÓN / JIMENA MASSIELY JOVE LARUTA Fecha de recepción : 9/03/2024
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 044-24 Fecha de ensayo : 9/03/2024
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente Nro de muestras : 26





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
AG24000095	CONCENTRACIÓN INICIAL DE As	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	07:16
AG24000096	TRATAMIENTO 1	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000097	TRATAMIENTO 2	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000098	TRATAMIENTO 3	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000099	TRATAMIENTO 4	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000100	TRATAMIENTO 5	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000101	TRATAMIENTO 6	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000102	TRATAMIENTO 7	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000103	TRATAMIENTO 8	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000104	1º REPETICION T1	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000105	1º REPETICION T2	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	11:32
AG24000106	1º REPETICION T3	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	14:13
AG24000107	1º REPETICION T4	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	14:13
AG24000108	1º REPETICION T5	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000109	1º REPETICION T6	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	16:34
AG24000110	1º REPETICION T7	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	17:16
AG24000111	1º REPETICION T8	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	17:16
AG24000112	2º REPETICION T1	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	14:13
AG24000113	2º REPETICION T4	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	14:13
AG24000114	2º REPETICION T3	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb. Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024	14:13

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.
 "Límite de detección del método"="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 certificación del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra enviada a IOTIS CALIDAD. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier uso indebido de la información contenida 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)443284 - (054)



Anexo 7. (Continuación)

 Laboratorios Analíticos del Sur <small>Laboratorios Analíticos del Sur</small>		Laboratorios Analíticos del Sur <small>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050</small>		 INACAL <small>DA - Perú Laboratorio de Ensayo Acreditado</small> <small>Registro N° LE - 050</small>	
Clave generada : 87028E95					
INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00066					
Fecha de emisión: 25/03/2024 Página 2 de 4					
AG24000115	2ª REPETICION T2	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 14:13
AG24000116	2ª REPETICION T5	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 17:16
AG24000117	2ª REPETICION T8	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 17:16
AG24000118	2ª REPETICION T7	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 17:16
AG24000119	2ª REPETICION T6	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 17:16
AG24000120	TRATAMIENTO 9	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	Urb Casuarinas / Juliaca / San Roman / Puno	19L 377235 8289683	8/03/2024 17:43
Condiciones de recepción de la muestra					
Cooler refrigerado					
Observación					
-					
El presente informe de ensayo reemplaza al informe de ensayo LAS01-AG-AC-24-00064, a pedido del cliente con solicitud 013-24.					
* Nombre de muestra:					
		Donde dice		Debe decir	
AG24000113		2ª REPETICION T2		2ª REPETICION T4	
AG24000115		2ª REPETICION T4		2ª REPETICION T2	
AG24000117		2ª REPETICION T6		2ª REPETICION T8	
AG24000119		2ª REPETICION T8		2ª REPETICION T6	
Los demás datos y resultados del informe de ensayo permanecen inalterables.					
 LABORATORIOS ANALITICOS DEL SUR E.I.R.L. Leslie A. Torres Calizaya INGENIERO QUIMICO N.º 128326					
<p>Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"</p> <p>(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.</p> <p>"a"<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b"<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método</p> <p>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.</p> <p>(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.</p> <p>Los resultados se aplican a la muestra como se recibió</p>					
Web: https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)					
					Validar el informe via web 

Anexo 7. (Continuación)




Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

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 Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 050

Clave generada : 87028E95


INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00066

Fecha de emisión: 25/03/2024

Página 3 de 4

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG24000095	CONCENTRACIÓN INICIAL DE As	0,1717
AG24000096	TRATAMIENTO 1	b<0,0012
AG24000097	TRATAMIENTO 2	b<0,0012
AG24000098	TRATAMIENTO 3	b<0,0012
AG24000099	TRATAMIENTO 4	0,0203
AG24000100	TRATAMIENTO 5	b<0,0012
AG24000101	TRATAMIENTO 6	b<0,0012
AG24000102	TRATAMIENTO 7	b<0,0012
AG24000103	TRATAMIENTO 8	0,0185
AG24000104	1ª REPETICION T1	b<0,0012
AG24000105	1ª REPETICION T2	b<0,0012
AG24000106	1ª REPETICION T3	b<0,0012
AG24000107	1ª REPETICION T4	0,0164
AG24000108	1ª REPETICION T5	b<0,0012
AG24000109	1ª REPETICION T6	b<0,0012
AG24000110	1ª REPETICION T7	b<0,0012
AG24000111	1ª REPETICION T8	0,0267
AG24000112	2ª REPETICION T1	b<0,0012
AG24000113	2ª REPETICION T4	0,0224
AG24000114	2ª REPETICION T3	b<0,0012
AG24000115	2ª REPETICION T2	b<0,0012
AG24000116	2ª REPETICION T5	0,0193
AG24000117	2ª REPETICION T8	0,0426
AG24000118	2ª REPETICION T7	b<0,0012
AG24000119	2ª REPETICION T6	b<0,0012
AG24000120	TRATAMIENTO 9	b<0,0012



Leslie A. Torres Calizaya
INGENIERO QUÍMICO
C.I.F. 128525

Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC


(*) Los métodos indicados 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

Validar el informe
con el QR



Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú (054)443294 - (054)444592.

Anexo 7. (Continuación)

 LAS Laboratorios Analíticos del Sur	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 Ensayo Acreditado Registro N° LE - 050
Clave generada : 87028E95		
INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-24-00066 Fecha de emisión: 25/03/2024		
Página 4 de 4		
MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS		
Código	Título	Rango de método analítico
796	EPA 200.7 Determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP -OES, Revisión 4.4. Arsénico Total (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) - As	P 0.0012 - 50 mg/L
a : Límite de detección b : Límite de cuantificación ----- Fin del informe -----		
 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L. Leslie A. Torres Calizaya INGENIERO QUÍMICO N.I.F. 128836		
<p>"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"</p> <p>(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.</p> <p>"<Valor numérico">=Límite de detección del método, ">Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método</p> <p>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.</p> <p>Los resultados se aplican a la muestra como se recibió</p> <p>Web: https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.</p>		
		Validar el informe via web 

Anexo 8. Toma de muestra de agua subterránea



Anexo 9. Etiquetado y preservación de muestra de agua subterránea



Anexo 10. Traslado de muestra del punto de muestreo al laboratorio UNAJ



Anexo 11. Insumos y reactivos para el desarrollo experimental



$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
(98%)

NaOH
(99%)

HNO_3
(70%)

$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$
(96°)

Agua ultrapura
(Tipo 1)

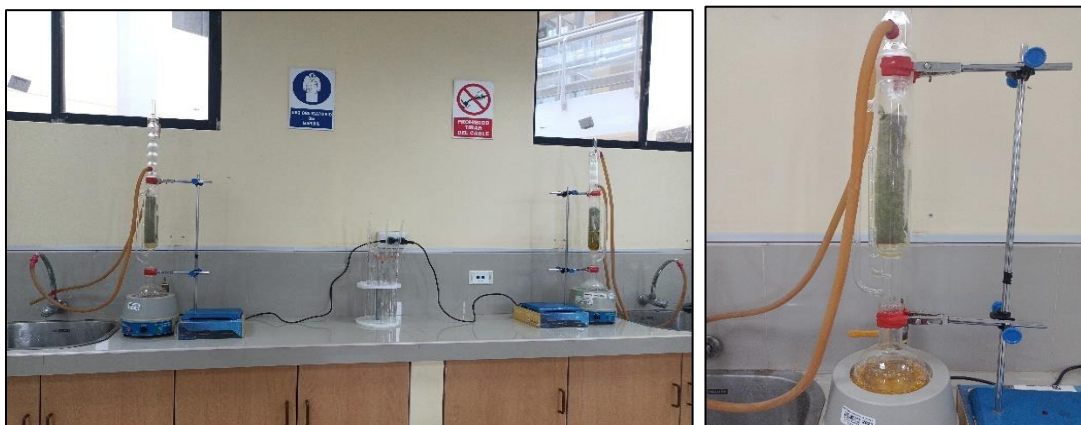
Anexo 12. Obtención del agua ultrapura



Anexo 13. Secado de las hojas de *Eucalyptus globulus* a 60° durante 24 horas



Anexo 14. Preparación del extracto de hojas de *Eucalyptus globulus* utilizando el Soxhlet



Anexo 15. Biosíntesis de nanopartículas de óxido de hierro



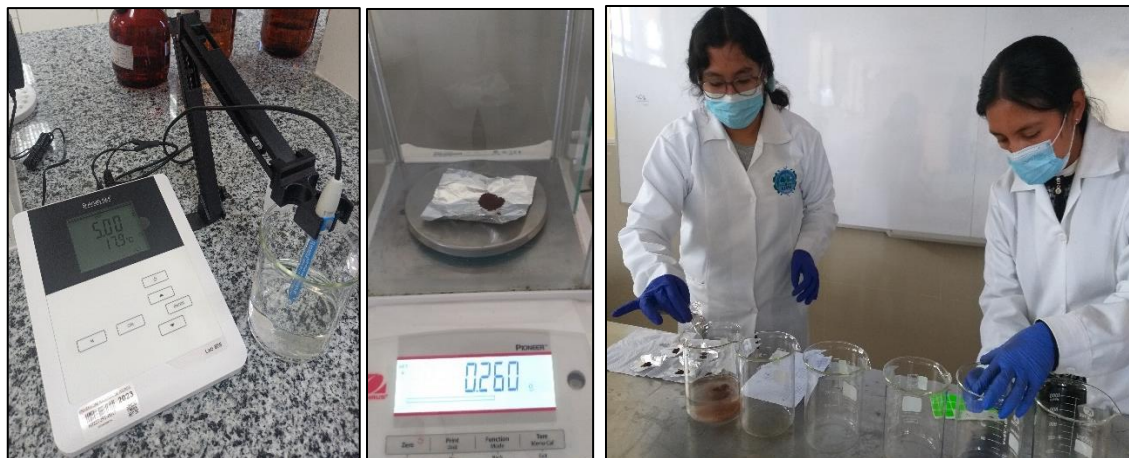
Anexo 16. Centrifugación, lavado y purificación de nanopartículas



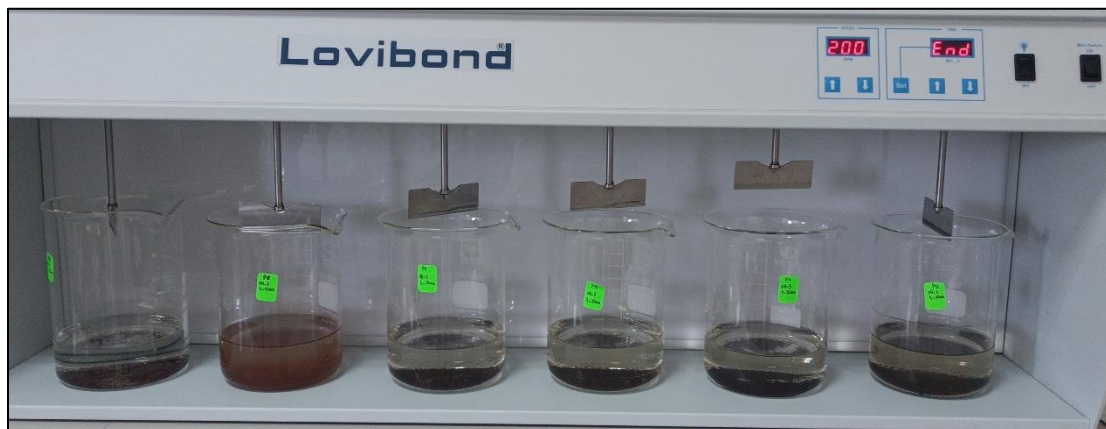
Anexo 17. Secado de nanopartículas a 70° durante 24 horas



Anexo 18. Ajuste del pH y pesado de NPs-FeO para la adsorción



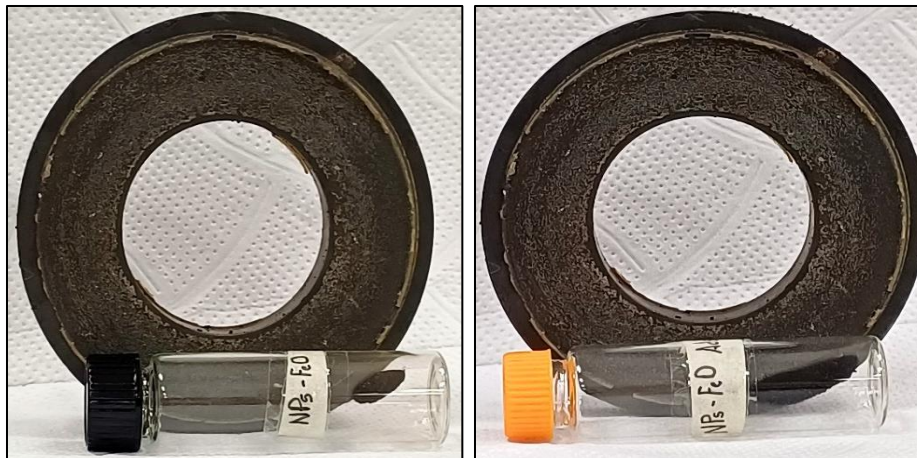
Anexo 19. Prueba de adsorción por lotes utilizando la prueba de jarras



Anexo 20. *Filtración y decantación magnética de las NPs-FeO*



Anexo 21. *Prueba magnética de las NPs-FeO antes y después de la adsorción de As*





UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"