



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



**“EFICIENCIA DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO (V) EN
HIDRALGIRITA PRETRATADA CON ÓXIDOS DE HIERRO EN
AGUA”**

Bach. Arnold Henry Caira Apaza

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

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro



Juliaca, 2022



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



**“EFICIENCIA DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO (V) EN
HIDRALGIRITA PRETRATADA CON ÓXIDOS DE HIERRO EN
AGUA”**

Bach. Arnold Henry Caira Apaza

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

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro



Juliaca, 2022

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



**“EFICIENCIA DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO (V) EN
HIDRALGIRITA PRETRATADA CON ÓXIDOS DE HIERRO EN
AGUA”**

Bach. Arnold Henry Caira Apaza

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

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Juliaca, 2022

Caira, A. (2022). *Eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Arnold Henry Caira Apaza

TÍTULO: Eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua.

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2022

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (132 pp.)

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

CÓDIGO: 01-000015-01/C16

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: Dr. Wile Mamani Navarro

PALABRAS CLAVE: Adsorción, arsénico, hidralgiritita, óxidos de hierro, agua

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

**"EFICIENCIA DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO (V) EN
HIDRALGIRITA PRETRATADA CON ÓXIDOS DE HIERRO EN
AGUA"**

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

Presentado por:

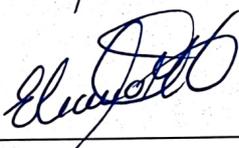
Bach. Arnold Henry Caira Apaza

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

Dr. Gustavo Miguel Pacheco Pacheco
PRESIDENTE DE JURADO



M. Sc. Eliana Mullisaca Contreras
JURADO (Secretario)



M. Sc. Siles Nilo Arce Sancho
JURADO (Vocal)



Dr. Wile Mamani Navarro
ASESOR



DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme siempre en mis éxitos y por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida, dándome fortaleza y aliento para cumplir con mis metas.

A mis padres Erasmo y Lidia, por el apoyo moral e incondicional en el logro de esta meta, que marca una etapa muy importante en mi vida.

A mis hermanos por su apoyo y consejos en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Juliaca, por brindarme las oportunidades académicas en mi formación profesional.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal, por el esfuerzo y dedicación al proporcionarme conocimientos necesarios en mi formación profesional.

Al Dr. Wile Mamani Navarro, por su asesoramiento y apoyo profesional en el desarrollo de la presente investigación.

Al Ing. Rolando Rody Jara Huaranca, por su apoyo profesional en el proceso de experimentación de la presente investigación.

A los miembros del jurado, Dr. Gustavo Miguel Pacheco Pacheco, M. Sc. Eliana Mullisaca Contreras y M. Sc. Siles Nilo Arce Sancho por las críticas y recomendaciones acertadas para el desarrollo de la presente investigación.

A todas las personas que de alguna manera se involucraron en el desarrollo de esta investigación, por sus consejos y apoyo.

Arnold Henry Caira Apaza

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis de la investigación.....	4
1.5. Justificación de la investigación.....	4

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	6
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes regionales.....	9
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Agua.....	10
2.2.2. Arsénico.....	10
2.2.3. Arsénico en agua.....	11
2.2.4. Efectos del arsénico en la salud.....	14

2.2.5.	Tecnologías para la remoción de arsénico en agua	14
2.2.6.	Adsorción	19
2.2.7.	Hidralgiritita	27

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	Variables de investigación	30
3.1.1.	Variables independientes	30
3.1.2.	Variable dependiente	30
3.2.	Operacionalización de variables	31
3.3.	Nivel y tipo investigación	31
3.4.	Ámbito de estudio	32
3.5.	Población y muestra de estudio	32
3.5.1.	Población	32
3.5.2.	Muestra	32
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	33
3.6.1.	Técnicas	33
3.6.2.	Instrumentos	34
3.7.	Materiales, equipos y reactivos	34
3.7.1.	Materiales	34
3.7.2.	Equipos	34
3.7.3.	Reactivos	34
3.8.	Metodología	35
3.8.1.	Determinación de los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro.....	35
3.8.2.	Evaluación de los efectos de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua	39

3.8.3.	Determinación de la isoterma y modelo cinético de adsorción que describe mejor a los datos experimentales	42
3.8.4.	Determinación de la eficiencia de la adsorción de arsénico en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en las pruebas de aplicación de las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.....	44
3.9.	Proceso del diseño experimental y análisis de datos	45
3.9.1.	Diseño experimental.....	45
3.9.2.	Pruebas estadísticas	49

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Parámetros fisicoquímicos y composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro.....	50
4.1.1.	Parámetros fisicoquímicos de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro.....	50
4.1.2.	Composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro.....	51
4.2.	Efectos de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua	55
4.2.1.	Efecto de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro.....	56
4.2.2.	Efecto de la concentración inicial de arsénico (V).....	58
4.2.3.	Efecto del pH.....	60
4.2.4.	Efecto del tiempo de contacto	61
4.3.	Isoterma y modelo cinético de adsorción que describe mejor a los datos experimentales	62
4.3.1.	Isoterma de adsorción.....	62
4.3.2.	Cinética de adsorción.....	65
4.4.	Eficiencia de adsorción de arsénico en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en las pruebas de aplicación de las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca	68

4.4.1. Parámetros fisicoquímicos.....	68
4.4.2. Pruebas de aplicación	69
4.5. Análisis estadístico de datos	70
4.5.1. Estadísticos descriptivos.....	70
4.5.2. Superficie de respuesta	71
4.6. Contraste de hipótesis	77

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	78
5.2. Recomendaciones	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas de la oxidación	15
Tabla 2 Ventajas y desventajas de la coagulación – floculación.....	16
Tabla 3 Ventajas y desventajas del intercambio iónico.....	17
Tabla 4 Ventajas y desventajas de las tecnologías con membranas	18
Tabla 5 Ventajas y desventajas de la remediación biológica	19
Tabla 6 Ventajas y desventajas de la adsorción.....	20
Tabla 7 Generación y disposición de residuos del proceso de adsorción del arsénico.....	20
Tabla 8 Operacionalización de variables	31
Tabla 9 Puntos de muestreo de las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca	44
Tabla 10 Niveles de los factores cuantitativos	47
Tabla 11 Límites de los factores cuantitativos del diseño de experimentos.....	48
Tabla 12 Niveles de los factores cuantitativos	48
Tabla 13 Parámetros fisicoquímicos de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro.....	50
Tabla 14 Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como elementos.....	52
Tabla 15 Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como óxidos	54
Tabla 16 Comparación de la eficiencia máxima de adsorción de arsénico (V) con otros estudios.....	62
Tabla 17 Datos experimentales para el ajuste a las isotermas de adsorción.....	63
Tabla 18 Datos de los ejes de las abscisas (x) y ordenadas (y) para el ajuste a los isotermas de adsorción.....	64
Tabla 19 Parámetros de las isotermas para la adsorción de arsénico (V).....	65
Tabla 20 Datos experimentales para el ajuste a los modelos de cinética de adsorción	66
Tabla 21 Datos de los ejes de las abscisas (x) y ordenadas (y) para el ajuste a los modelos de cinética de adsorción.....	66
Tabla 22 Parámetros de los modelos cinéticos para la adsorción de arsénico (V).....	67
Tabla 23 Parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca	68
Tabla 24 Resultados de la eficiencia de adsorción en las pruebas de aplicación en las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca	70

Tabla 25 Estadísticos descriptivos de la variable respuesta	70
Tabla 26 Resultados de la eficiencia de adsorción del diseño factorial completo con puntos centrales en la búsqueda de I orden	72
Tabla 27 Análisis de la varianza de la eficiencia de adsorción para el diseño de experimentos en la búsqueda de I orden.....	73
Tabla 28 Resultados de la eficiencia de adsorción para el diseño de composición central (DCC) en la búsqueda de II orden	75
Tabla 29 Análisis de la varianza (modelo – primer orden) de la eficiencia de adsorción para el DDC	75
Tabla 30 Análisis de la varianza (modelo-segundo orden) de la eficiencia de adsorción para el diseño de composición central (DCC) en la búsqueda de II orden.....	76
Tabla 31 Datos del Análisis de Varianza de las etapas de experimentación	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo del arsénico en el medio ambiente (A: Fuentes antropogénicas; N: Fuentes naturales; Flechas continuas: Vías de exposición al arsénico de los seres humanos; Flechas punteadas: Vías de arsénico a diferentes sistemas ambientales)	12
Figura 2: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O ₂ -H ₂ O a 25°C y 1 bar de presión total.	12
Figura 3: a) Especies de As(III) como función de pH; b) Especies de As(V) como función de pH.	13
Figura 4: Isotermas de adsorción.	23
Figura 5: Diagrama de flujo de la extracción y tratamiento físico de la hidralgirita natural.	35
Figura 6: Esquema fotográfica de extracción y tratamiento físico de la hidralgirita natural.	36
Figura 7: Diagrama de flujo de la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro.....	37
Figura 8: Esquema fotográfica de la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro.....	38
Figura 9: Diagrama de flujo de las pruebas de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.	40
Figura 10: Esquema fotográfica de las pruebas de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.	41
Figura 11: Diagrama de flujo de la experimentación de la isoterma de adsorción.	42
Figura 12: Diagrama de flujo de la experimentación de la cinética de adsorción.	43
Figura 13: Diagrama de flujo de las pruebas de aplicación del tratamiento de adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.	45
Figura 14: Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como elementos.	53
Figura 15: Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como compuestos.....	55
Figura 16: Efecto de la dosis de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en la adsorción del arsénico (V); pH 7; tiempo de contacto 60 minutos y temperatura 25 °C. ...	57
Figura 17: Perfil de contorno de la eficiencia de adsorción de arsénico (V).	57
Figura 18: Superficie de respuesta de la eficiencia de adsorción de arsénico (V).	58

Figura 19: Efecto de la concentración de arsénico (V) inicial en la eficiencia de adsorción del arsénico (V); pH 7; tiempo de contacto 60 minutos y temperatura 25 °C.	59
Figura 20: a) Perfilador de predicción de los efectos de los factores en la eficiencia de adsorción de As (V) en la búsqueda de primer orden; b) Perfilador de predicción de los efectos de los factores en la eficiencia de adsorción de As (V) en la búsqueda de segundo orden.	61
Figura 21: a) Efecto de la masa del adsorbente en la capacidad y eficiencia de adsorción; b) Isoterma de Langmuir; c) Isoterma de Freundlich; d) Isoterma de Temkin.	64
Figura 22: a) Efecto del tiempo eficiencia de adsorción; b) Efecto del tiempo en la capacidad de adsorción; c) Modelo cinético de pseudo primer orden; d) Modelo cinético de pseudo segundo orden.	67
Figura 23: a) Normalidad en la etapa de búsqueda de I orden; b) Normalidad en la etapa de búsqueda de II orden.....	93
Figura 24: a) Varianza constante de la hidralgirita pretratada (I orden); b) Varianza constante del As (V) inicial (I orden); c) Varianza constante del pH (I orden); d) Varianza constante del tiempo de contacto (I orden); e) Varianza constante de la hidralgirita (II orden); f) Varianza constante del As (V) inicial la hidralgirita (II orden).	95
Figura 25: a) Test de independencia en la etapa de búsqueda de I orden; b) Test de independencia en la etapa de búsqueda de II orden.....	97

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Informe de preparación de soluciones de arsénico realizada por Laboratorios Analíticos de Sur	91
Anexo 2: Pruebas preliminares de adsorción de arsénico (V)	92
Anexo 3: Verificación de los supuestos del modelo	93
Anexo 4: Límites para la prueba de Durbin – Watson.....	98
Anexo 5: Caracterización de la superficie de respuesta.....	99
Anexo 6: Resultados del análisis de la composición química de la hidralgirita natural...	102
Anexo 7: Resultados del análisis de la composición química de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro	105
Anexo 8: Informe de ensayo de pruebas preliminares para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	108
Anexo 9: Informe de ensayo de la etapa de búsqueda de primer orden para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	111
Anexo 10: Informe de ensayo de la etapa de búsqueda de segundo orden para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	114
Anexo 11: Informe de ensayo de la isoterma de adsorción para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	117
Anexo 12: Informe de ensayo de la cinética de adsorción para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	120
Anexo 13: Informe de ensayo de muestras de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur	123
Anexo 14: Informe de ensayo de muestras tratadas de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur.....	126

RESUMEN

La presencia de arsénico en agua y los efectos en la salud asociados representan un problema mundial, que requiere el desarrollo de tecnologías eficientes para la remoción del arsénico. La investigación tuvo como objetivo evaluar eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua. Se da a conocer la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro como adsorbente utilizando hidralgirita natural (chacko) como base y óxidos de hierro como refuerzo, mismos que fueron caracterizados mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. Los experimentos se realizaron siguiendo la metodología de superficie de respuesta para optimizar y evaluar los efectos de la dosis de adsorbente, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto. Los resultados mostraron altas eficiencias de adsorción de arsénico (V) del 99.06, 98.15 y 93.20 % para concentraciones iniciales de arsénico (V) de 0.5, 0.275 y 0.05 mg/L respectivamente, bajo condiciones de dosis de adsorbente, pH, tiempo de contacto y temperatura de 10 g/L, 7, 60 minutos y 25°C respectivamente. Los factores que tienen un efecto significativo en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) fueron la dosis de adsorbente (valor-p:0.001) y la concentración inicial de arsénico (V) (valor-p:0.000). Los datos experimentales se ajustaron de mejor forma al modelo de isoterma de Langmuir ($R^2:0.95$) que indicó que la adsorción del arsénico (V) ocurre en una superficie energéticamente homogénea del adsorbente formando una monocapa, mientras que el modelo cinético de pseudo segundo orden ($R^2:0.99$) que también describió de mejor forma a los datos experimentales mostró que existiría un proceso de adsorción química. Las pruebas de aplicación mostraron que la tecnología propuesta en este estudio es eficiente en la adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

Palabras clave: Adsorción, arsénico, hidralgirita, óxidos de hierro, agua

ABSTRACT

The presence of arsenic in water and the associated health effects represent a global problem, which requires the development of efficient technologies for the removal of arsenic. The objective of the research was to evaluate the adsorption efficiency of arsenic (V) in hydralgyrite pretreated with iron oxides in water. The preparation of hydralgyrite pretreated with iron oxides as adsorbent using natural hydralgyrite (chacko) as base and iron oxides as reinforcement, which were characterized by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry, is disclosed. The experiments were carried out following the response surface methodology to optimize and evaluate the effects of the adsorbent dose, initial arsenic concentration (V), pH and contact time. The results showed high arsenic (V) adsorption efficiencies of 99.06, 98.15 and 93.20% for initial concentrations of arsenic (V) of 0.5, 0.275 and 0.05 mg/L respectively, under conditions of adsorbent dose, pH, contact time. and temperature of 10 g/L, 7, 60 minutes and 25 °C respectively. The factors that have a significant effect on the arsenic adsorption efficiency (V) were the adsorbent dose (p-value: 0.001) and the initial arsenic concentration (V) (p-value: 0.000). The experimental data were better adjusted to the Langmuir isotherm model (R^2 : 0.95) which indicated that the adsorption of arsenic (V) occurs on an energetically homogeneous surface of the adsorbent forming a monolayer, while the pseudo second order kinetic model (R^2 : 0.99) that also better described the experimental data showed that there would be a chemical adsorption process. The application tests showed that the technology proposed in this study is efficient in the adsorption of arsenic in hydralgyrite pretreated with iron oxides in the groundwater of the city of Juliaca.

Keywords: Adsorption, arsenic, hydralgyrite, iron oxides, water

INTRODUCCIÓN

La presencia de arsénico en los recursos hídricos representa una amenaza para la salud pública (OMS, 2011; World Health Organization, 2019) y la exposición prolongada a este elemento puede generar alteraciones cardiovasculares y neurológicas, lesiones cutáneas, riesgo de padecer cáncer de piel, de pulmón, de vejiga y de riñón (Gomez et al., 2001; Kim et al., 2020). Los diversos acontecimientos y estudios han permitido a la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecer 0.01 mg/L como el límite máximo permisible para el arsénico en aguas de consumo humano (OMS, 2011).

En el mundo más de 200 millones de personas en 105 países están expuestas a concentraciones de arsénico en agua que superan el límite máximo permisible establecido por la OMS (Baig, et al., 2013; Shakoor et al., 2017). En América Latina al menos 4.5 millones de personas en México, Chile, Argentina, Nicaragua, El Salvador, Bolivia y Perú están expuestas a la contaminación por arsénico en agua (McClintock et al., 2012). En el Perú se han establecido estándares regulatorios nacionales para el arsénico en agua potable, sin embargo, existe poca información sobre la contaminación del agua por arsénico y sus implicancias en la salud pública (George et al., 2014).

El arsénico (As) se puede integrar al agua mediante procesos naturales como el ascenso de fluidos magmáticos e hidrotermales, la sedimentación de emisiones volcánicas, desorción y mezcla de minerales con arsénico durante la meteorización (Smedley & Kinniburgh, 2002; Thirunavukkarasu et al., 2002) y por actividades antropogénicas, como procesos metalúrgicos, minería, combustión de combustibles fósiles, uso de preservantes de madera y plaguicidas (Gomez et al., 2001). El arsénico en aguas naturales como especie disuelta se muestra generalmente en forma inorgánica como oxianiones en dos estados de oxidación, el arsénico trivalente As(III) o arsenito y el arsénico pentavalente As(V) o arseniato, el estado de oxidación y por tanto su movilidad, están controlados principalmente por el pH y condiciones redox (Smedley & Kinniburgh, 2002).

Las tecnologías que se han desarrollado para la remoción de arsénico en agua comprenden la oxidación, coagulación – floculación, adsorción, intercambio iónico, tecnologías con membranas, remediación biológica, entre otros (Litter et al., 2010; Mondal et al., 2013; Yadav et al., 2021), estas tecnologías presentan ventajas y desventajas, lo cual no asegura en todos los casos un adecuado resultado económico, técnico y ambiental (Francisca & Carro, 2014; Singh et al., 2015). La selección de una tecnología es adecuada y sostenible

cuando posee un diseño simple, utiliza equipos a pequeña escala, utiliza energías renovables, utiliza materiales del ámbito local y es accesible para poblaciones de bajos recursos (Bundschuh et al., 2010).

La adsorción es una tecnología que posee una alta eficiencia de remoción de arsénico, es comparativamente barato, está comercialmente disponible y se tiene un amplio conocimiento del proceso (Mohan & Pittman, 2007; Mondal et al., 2013). Para estudiar el mecanismo y la capacidad de adsorción del adsorbente en prueba se utilizan diferentes modelos de isotermas (Langmuir, Freundlich, Temkin, entre otros) y cinéticos de adsorción (Pseudo primer y segundo orden, entre otros). Existen una diversidad de materiales adsorbentes que pueden tener un origen natural o sintético y adsorbentes ricos en óxidos/hidróxidos de metales presentan afinidad para atraer hacia su superficie los iones de arsénico (Höll & Litter, 2010). La hidralgiritita, es un material adsorbente que pertenece a la familia de las arcillas, al grupo silicato y al subgrupo filosilicatos, es conocido comúnmente por los habitantes de las zonas altiplánicas como chacko (Browman, 2004).

La presente investigación tuvo como propósito evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua, proponiendo una alternativa de solución económicamente viable y de fácil operación para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico y planteando como novedad el pretratamiento a la hidralgiritita natural con óxidos de hierro. En la presente investigación se dan a conocer los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro; se evalúan los efectos de la dosis hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en el proceso de adsorción; se determinan la isoterma y modelo cinético que describe mejor a los datos experimentales y finalmente se determina la eficiencia de la tecnología propuesta en las pruebas de aplicación en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El agua es un recurso renovable, vulnerable, indispensable para la vida, insumo fundamental para las actividades humanas y estratégica para el desarrollo sostenible (MINAGRI, 2009), sin embargo, está continuamente expuesto a la contaminación antropogénica y natural. Entre los diversos contaminantes, el arsénico, debido a su alta toxicidad y movilidad, se encuentra entre los más peligrosos y es el vigésimo elemento más abundante que se distribuye ampliamente en la corteza terrestre, encontrándose en más de 245 minerales (Mandal & Suzuki, 2002).

A nivel mundial la contaminación del agua por arsénico generalmente proviene de procesos naturales y representa una amenaza de amplio alcance que actualmente afecta a muchos países, siendo las zonas más conocidas donde existen aguas subterráneas con elevadas concentraciones de arsénico, Bangladesh (< 2 mg/L), India (< 3.4 mg/L), Chile (< 1.3 mg/L), Argentina (<0.758 mg/L), México (< 0.263 mg/L), entre otros (Bergh et al., 2010). En América Latina, la contaminación del agua por arsénico se conoce en 14 de 20 países como Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Perú y Uruguay, donde se ha visto la necesidad de diseñar e implementar tecnologías para la remoción de arsénico en las zonas afectadas (Bundschuh et al., 2010; Bundschuh et al., 2012).

En el Perú se han encontrado elevadas concentraciones de arsénico en agua, así como, en el río Rímac – Lima (0.0217 mg/L), distrito San Antón – Azángaro – Puno (0.0525 mg/L en agua subterránea), en el sector Ramis – Taraco – Puno (0.0296 mg/L en agua subterránea) (George et al., 2014), en Cotaruse – Aymaraes – Apurímac (0.05 mg/L en aguas del río Iscahuaca) (Chávez & Miglio, 2011), en Coruca – Inclán – Tacna (0.51 mg/L en aguas del río Sama) (Villa et al., 2018), entre otros. Dado que en el país no se han realizado intentos sistemáticos de vigilancia y mitigación, se hace necesario investigaciones urgentes para la identificación y solución de todas las fuentes relevantes de contaminación por arsénico en agua (George et al., 2014).

En la ciudad de Juliaca el agua subterránea está contaminada con arsénico, ya que se han reportado concentraciones que excedieron el límite máximo permisible de 0.01 mg/L recomendado el OMS, como, en las zonas de la salida Puno (0.0517 mg/L) y Taparachi (0.062 mg/L) (George et al., 2014), asimismo, en el agua potable también se han encontrado concentraciones elevadas de 0.053 mg/L de As (V) (Escarcena, 2018). Ante la ausencia de abastecimiento de agua potable, la venta e instalación de pozos tubulares son un negocio y muchas las familias en especial en zonas peri – urbanas solicitan este servicio para hacer uso de las aguas subterráneas, lo que representa una amenaza para la salud pública y requieren atención inmediata (Verano, 2016).

La exposición de las personas a la contaminación del agua por arsénico se da principalmente por el consumo directo del agua contaminada o la ingesta de alimentos y puede generar efectos negativos en la salud como alteraciones cardiovasculares y neurológicas, lesiones cutáneas, riesgo de padecer cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón (Gomez et al., 2001), donde el grado de toxicidad depende de las especies arsenicales, siendo los compuestos inorgánicos más tóxicos que los orgánicos. Los efectos en la salud no solo se manifiestan a alta concentraciones, sino que también a bajas concentraciones en exposiciones prolongadas (Fontcuberta et al., 2011; Medina et al., 2018).

Ante los problemas identificados de contaminación por arsénico en agua a nivel mundial, nacional y local, la presente investigación proporciona una alternativa de solución y tiene como objetivo evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua, para lo cual se determinaron los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro, en la experimentación se evaluaron los efectos de la dosis de hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en el proceso de adsorción, asimismo se determinó la isoterma y modelo cinético que describe mejor a los datos experimentales y finalmente se realizaron pruebas de aplicación para determinar la eficiencia de la adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuánto es la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuánto son los valores de los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro?
- ¿Tienen efectos los factores de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción del arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua?
- ¿Cuál es la isoterma y modelo cinético de adsorción que describe mejor a los datos experimentales?
- ¿En las pruebas de aplicación, cuánto es la eficiencia de adsorción de arsénico en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro.
- Evaluar los efectos de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro en agua.
- Determinar la isoterma y modelo cinético de adsorción que describe mejor a los datos experimentales.

- Determinar en las pruebas de aplicación la eficiencia de la adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

1.4. Hipótesis de la investigación

Dado que los sustratos ricos en hierro adsorben el arsénico en agua (Acuña et al., 2016; Choong et al., 2007; D'Ambrosio, 2005; Mondal et al., 2013; Singh et al., 2015; Thakur & Armstrong, 2021), entonces la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro adsorbe el arsénico (V) en agua.

1.5. Justificación de la investigación

Debido a la presencia de arsénico en agua en muchas zonas a nivel mundial, nacional y local, las personas están expuestas a este contaminante principalmente mediante el consumo o la preparación de alimentos y la exposición a este elemento representa una amenaza para la salud pública, por tanto, resulta un reto ambiental y de importancia, la reducción de concentraciones elevadas de arsénico en aguas de consumo humano a través del desarrollo de tecnologías sustentables.

La presente investigación surge principalmente de la necesidad de dar una solución a las elevadas concentraciones de arsénico en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca, así como lo informan los reportes en las investigaciones y denuncias en medios de comunicación; en este sentido, se planteó como propósito evaluar la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.

Ante la poca disponibilidad de tecnologías económicamente viables y de fácil operación, el presente estudio proporciona una alternativa de solución para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico utilizando materia prima existente en el ámbito regional, la hidralgirita, arcilla natural conocida como chacko en el altiplano peruano. Los resultados y la tecnología que se desarrollaron en el presente estudio benefician y son útiles para la sociedad, economía, el ámbito científico y teórico.

Los resultados de la presente investigación son útiles para el ámbito social, puesto que mediante la aplicación de la tecnología propuesta se permite el consumo de agua sin concentraciones elevadas de arsénico que excedan los límites recomendados por la OMS, evitando así los efectos negativos en la salud. En el ámbito económico, al utilizar en el estudio como materia prima a la hidralgirita (chacko) permite darle un valor agregado en el mercado, beneficiando así a los comercializadores de esta arcilla.

En el ámbito científico y teórico, los resultados obtenidos son un aporte para el enriquecimiento de la presente línea de investigación y son fuente de información en diversos campos del conocimiento, por otro lado, a partir de la presente investigación se van a generar nuevas líneas de investigación para desarrollar en futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Thakur y Armstrong (2021), desarrollaron microesferas de geopolímero recubiertas con óxidos de hierro para la adsorción de arsénico en agua, sintetizando microesferas de geopolímero mediante polimerización en suspensión inversa e impregnarlas con óxido de hierro. Evaluaron los efectos del tiempo de contacto, concentración inicial de arsénico, temperatura, dosis de adsorbente, pH y los iones competidores. En los resultados se observó un alto porcentaje de remoción del 86, 100, 95 y 96 % para el arsénico (III), arsénico (V), arseniato dimetilo (DMA) y arseniato monometilo (MMA) respectivamente, a una concentración inicial de arsénico, dosis de adsorbente y tiempo de contacto de 0.05 mg/L, 10 g/L y 60 minutos respectivamente. Los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Freundlich y al modelo cinético pseudo segundo orden.

Mutar y Saleh (2021), prepararon nanobentonita para la adsorción de arsénico en aguas residuales de hospital, este adsorbente fue preparado a partir de la arcilla bentonita utilizando el método de coprecipitación. Utilizaron la metodología de superficie de respuesta y un diseño de composición central (DCC) con tres niveles y tres puntos centrales para optimizar la capacidad y eficiencia de adsorción. Los resultados mostraron factores óptimos a pH 5.5, dosis de adsorbente 100 mg/L y un tiempo de contacto de 5 minutos. Los datos experimentales se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir y al modelo cinético de pseudo segundo orden, concluyendo que el adsorbente se puede utilizar en los procesos de eliminación de arsénico del agua.

Ayub, et al. (2020), realizaron la preparación de quitosano control y perlas de quitosano magnéticos como biosorbente para la adsorción de arsénico (V) y arsénico (III) en agua. Mediante los experimentos evaluaron el efecto del pH y la dosis de adsorbente, asimismo estudiaron las isotermas y modelos cinéticos para

describir el mecanismo y los parámetros de adsorción. Los resultados mostraron una remoción del 99.5 y 99 % para As (V) y As (III) respectivamente, bajo dosis óptimas del biosorbente de 1.5 y 2 g/L a pH 6.7, asimismo, determinaron que los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo cinético de pseudo segundo orden y a la isoterma de Langmuir describiendo que la adsorción ocurre en monocapa del biosorbente.

Das, et al. (2020), sinterizaron un nanohíbrido de hierro de óxido de grafeno, a través de un proceso sol-gel, para la remoción de arsénico en agua. Los experimentos mostraron resultados favorables, logrando capacidades de remoción de 306 y 431 mg/g para el arsénico (III) y arsénico (V) respectivamente. Se observó una adsorción rápida mayores al 99% en menos de 10 minutos para As(III) y As(V), bajo una concentración inicial de 0.1 mg/L a una dosis de adsorbente de 250 mg/L. Los datos experimentales se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir y al modelo cinético pseudo segundo orden. Asimismo, encontraron que los aniones coexistentes durante el tratamiento no influyeron de manera significativa.

Mejía et al. (2009), desarrollaron un método para pretratar zeolita natural con óxidos de magnesio con el propósito de remover arsénico (V) en agua de consumo humano mediante el proceso de adsorción. En la experimentación se evaluaron los factores de la relación sólido – líquido de la zeolita pretratada, la concentración inicial de arsénico (V), el pH y el tiempo de contacto. Los resultados mostraron que la zeolita pretratada con óxidos de magnesio es un buen adsorbente de arsénico, con una eficiencia de más del 90% de adsorción; en la experimentación se determinaron que la relación sólido – líquido y las concentraciones iniciales de arsénico son los factores más significativos durante el proceso de adsorción de arsénico, mientras que el pH y el tiempo de contacto no tienen un efecto significativo, asimismo, se determinó una capacidad de adsorción de 20.17 mg/g de acuerdo al isoterma de Freundlich al que mejor se ajustó los datos experimentales.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Villa et al. (2018), evaluaron filtros domiciliarios para la remoción de arsénico en aguas procedentes del río Sama, el cual se realizó durante 12 semanas en 18 viviendas seleccionadas de manera aleatoria en la localidad de Coruca, distrito de Inclán – Tacna, el sistema estuvo compuesto por filtros de clavo, arena y material adsorbente de hierro cerivalente, para la determinación de arsénico en las ocho primeras y cuatro últimas semanas se usaron tiras reactivas y espectrometría de absorción atómica (EAA-FIAS) respectivamente. Los resultados mostraron que partir de una concentración promedio de 0.51 mg/L, en las primeras ocho semanas la concentración de arsénico disminuyó en el rango de 0.005 – 0.025 mg/L y en las cuatro últimas en el rango de 0.001 – 0.052 mg/L, demostrándose que a condiciones naturales el sistema de filtración es eficiente en la remoción de arsénico en agua y que podría tener aceptación de la población afectada.

Velarde (2016), describió el mecanismo de remoción de As (V) en sillar revestido con óxidos de hierro en medio acuoso, el adsorbente fue preparado a partir del sillar (material obtenido en Arequipa) y nitrato férrico. Los experimentos mostraron una capacidad máxima de adsorción hasta 4.84 mg/g, asimismo, se encontraron condiciones óptimas de dosis de adsorbente de 0.15 g/50 mL de agua contaminada, tiempo de contacto de 60 minutos y temperatura 19.85 °C. Los datos experimentales se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir (R^2 : 0.986) describiendo una adsorción en monocapa, por otro lado, el modelo cinético de pseudo primer orden describió mejor a los datos experimentales. Los resultados mostraron que el adsorbente sillar revestido con óxidos de hierro es un adsorbente capaz de eliminar elevadas concentraciones de arsénico del agua.

Alvarez y Veli (2014), utilizaron arcilla natural para la remoción de arsénico en agua. La arcilla que fue tomada de Parco – Jauja mostró un área superficial que asciende a 62.89 m²/g. En las pruebas de adsorción lograron una eficiencia del 89%, bajo condiciones óptimas de dosis de adsorbente de 9 g en 500 mL de solución acuosa de arsénico con concentración 0.05 mg/L (solución preparada), pH 5.5 y tiempo de contacto de 12 horas. Los datos experimentales se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir, describiendo una adsorción en monocapa. El factor pH tuvo un efecto significativo en el proceso de adsorción. Asimismo, se realizaron pruebas de adsorción en agua manantial de consumo humano de Quero – Jauja y

considerando los factores óptimos de experimentación se logró una eficiencia de adsorción del 97.5 %, demostrándose así la capacidad de las arcillas naturales para la remoción de arsénico en agua.

2.1.3. Antecedentes regionales

Mamani (2019), determinó la concentración de arsénico total en aguas subterráneas de pozos tubulares en el distrito de Juliaca y planteó como medida de mitigación la adsorción con carbón activado de lenteja de agua (*Lemna gibba*) para la remoción de metales pesados a escala laboratorio, para lo cual se tomaron 12 muestras al azar en agosto del 2018 para ser analizadas y tratadas mediante adsorción. Los resultados indicaron que existe contaminación por arsénico en las aguas subterráneas, del cual el 95% de las muestras contenían arsénico por encima de los límites máximos establecidos por la OMS (0,01 mg/L), registrando 0,1653 mg/L como valor máximo y 0,0038 mg/L como valor mínimo; respecto a la medida de mitigación sobre las pruebas de adsorción con carbón activado de lenteja de agua (*Lemna gibba*), se lograron remover As 24%, Ca 27% y Mn 68% a un tiempo de 120 minutos y con un pH de 7,9.

Tapia (2017), evaluó el proceso de adsorción de arsénico en hidralgirita en aguas subterráneas del distrito de Taraco, en cual realizó un tratamiento físico a la hidralgirita y evaluó su composición química, en la experimentación buscó las condiciones óptimas de los factores (cantidad de adsorbente, pH, temperatura y tiempo de contacto) que influyen en el proceso de adsorción. Los resultados mostraron que la hidralgirita en su composición química está constituida por dióxido de silicio (46.451%), trióxido de aluminio (37.833%), óxido de magnesio (4.871%), óxido de calcio (4.152%) entre otros óxidos; se determinó que el agua subterránea del distrito de Taraco contiene 0.05 mg/L de arsénico excediendo los límites máximos recomendados por la OMS (0.01 mg/L); las condiciones favorables para proceso de adsorción de arsénico en hidralgirita en agua se dieron a una cantidad de adsorbente de 0.2 g, pH 7.5, tiempo de contacto 70 minutos y temperatura 25 °C, llegando a una eficiencia hasta del 84%.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Agua

El agua es un recurso renovable, vulnerable, indispensable para la vida, insumo fundamental para las actividades humanas, estratégica para el desarrollo sostenible del país, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan y la seguridad de la nación (MINAGRI, 2009).

a. Aguas subterráneas

Es aquella que circula y se aloja en el subsuelo, formando acuíferos y tiene su origen mayormente en el ciclo del agua, donde la principal fuente de aporte es el agua de las precipitaciones a través del proceso de infiltración. Los principales factores que afectan en los procesos del ciclo hidrológico son: el clima, la intensidad de los vientos, la temperatura del aire, la insolación, la humedad relativa del aire y la densidad de la vegetación (Montaño & Collazo, 2012).

2.2.2. Arsénico

a. Química del arsénico

El arsénico (As) es un elemento que pertenece al grupo V-A en la tabla periódica, con un peso atómico de 74,92 y un número atómico de 33. Por su ubicación en el grupo mencionado, presenta propiedades intermedias entre los metales y los no metales (mostrándose como metaloide), pero por su energía de ionización y electronegatividad predominan propiedades de no metal y tiene la facilidad de formar más aniones que cationes (Moreno, 2010).

b. Fuentes de arsénico

El As es un elemento natural que se distribuye ampliamente en la corteza terrestre encontrándose en más de 200 minerales, siendo el más común la arsenopirita. Los minerales importantes de arsénico incluyen As elemental, arseniatos, arsenitos, sulfuros, óxidos y arseniuros (Arain et al., 2009), este elemento se encuentra comúnmente en depósitos de zinc, plata, cobre, cadmio, mercurio, oro, estaño, hierro, uranio, cobalto, plomo, selenio, níquel, fósforo, azufre, bismuto, antimonio, telurio, molibdeno, tungsteno y platino (Zhang et al., 2017).

Las actividades volcánicas seguida de la volatilización a bajas temperaturas son una fuente natural de arsénico. En el agua subterránea, como en la zona de Bangladesh, se ha encontrado arsénico inorgánico que tiene un origen geológico. El As también

se encuentra en los compuestos orgánicos, como, arsenocolina, arsenobetaína, arsenoazúcares, sales de tetrametilarsonio y lípidos con arsénico, que se hallan principalmente en organismos marinos, aunque también han reportado algunos de estos compuestos en organismos terrestres (Gomez et al., 2001).

Las principales fuentes antropogénicas que contribuyen a la contaminación por arsénico en el ambiente son la utilización de combustibles fósiles, la extracción y fundición de metales no ferrosos, uso de plaguicidas, minería y uso de preservantes de madera (Gomez et al., 2001).

2.2.3. Arsénico en agua

El arsénico puede llegar al recurso hídrico por vía natural como resultado del ascenso de fluidos magmáticos e hidrotermales, la sedimentación de emisiones volcánicas a la atmósfera, desorción y mezcla de minerales con arsénico durante la meteorización (Smedley & Kinniburgh, 2002; Thirunavukkarasu et al., 2002); por vía antropogénica como, procesos metalúrgicos, la minería, combustión de combustibles fósiles, uso de preservantes de la madera y plaguicidas (Gomez et al., 2001). En la figura 1 se observan las fuentes naturales y antropogénicas del arsénico.

El As se encuentra en aguas naturales como especie disuelta, donde se muestra por lo común como oxianiones en dos estados de oxidación, el arsénico trivalente As(III) y el arsénico pentavalente As(V). Los estados de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados principalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y pH (figura 2), en condiciones oxidantes, el estado As(V) predomina sobre As(III) encontrándose principalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH bajos (inferiores a 6,9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} (en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} , mientras que en condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H_3AsO_4) (figura 2 y figura 3b). En condiciones reductoras a pH inferior a 9,2, predominará la especie H_3AsO_3 , mientras que a pH más altos las especies dominantes serán H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} , AsO_3^{3-} (figura 2 y figura 3a) (Smedley & Kinniburgh, 2002)

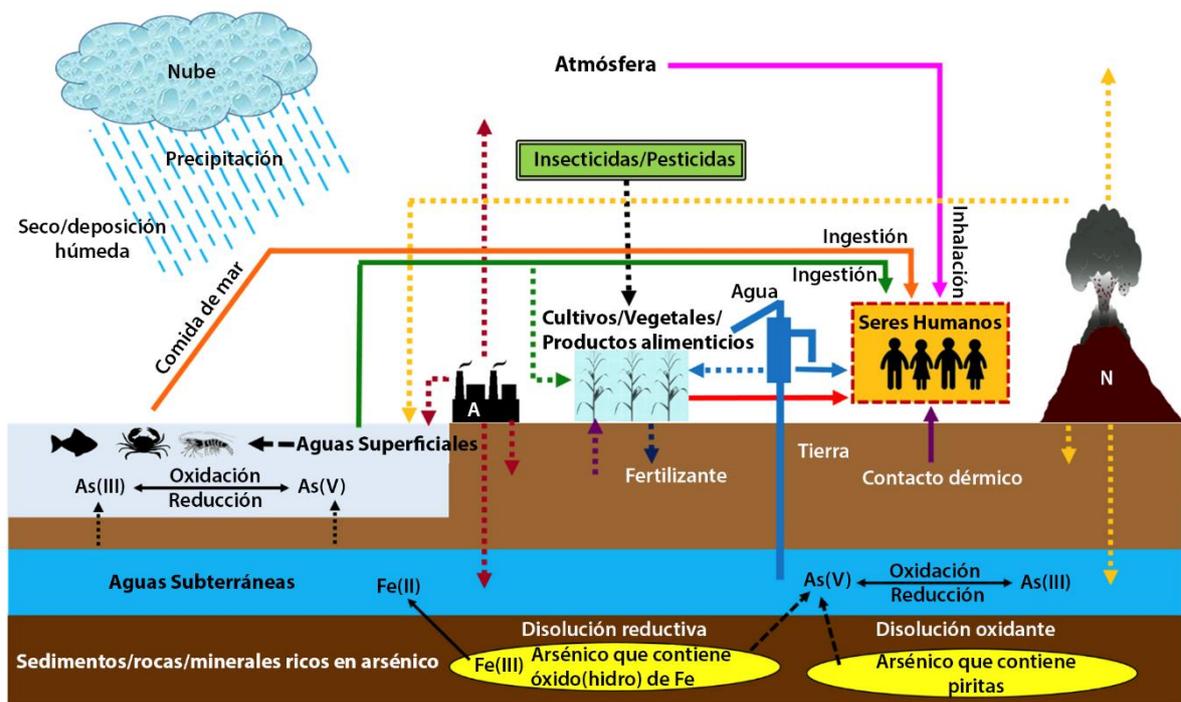


Figura 1: Ciclo del arsénico en el medio ambiente (A: Fuentes antropogénicas; N: Fuentes naturales; Flechas continuas: Vías de exposición al arsénico de los seres humanos; Flechas punteadas: Vías de arsénico a diferentes sistemas ambientales)

Fuente: Yadav et al. (2021).

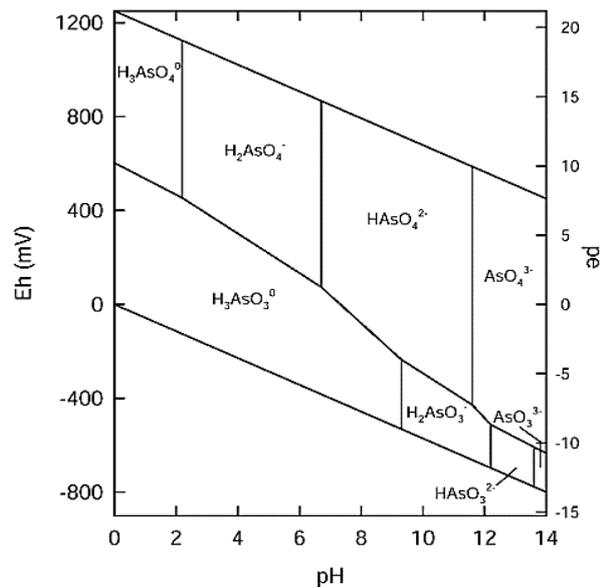


Figura 2: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema $\text{As-O}_2\text{-H}_2\text{O}$ a 25°C y 1 bar de presión total.

Fuente: Smedley y Kinniburgh (2002).

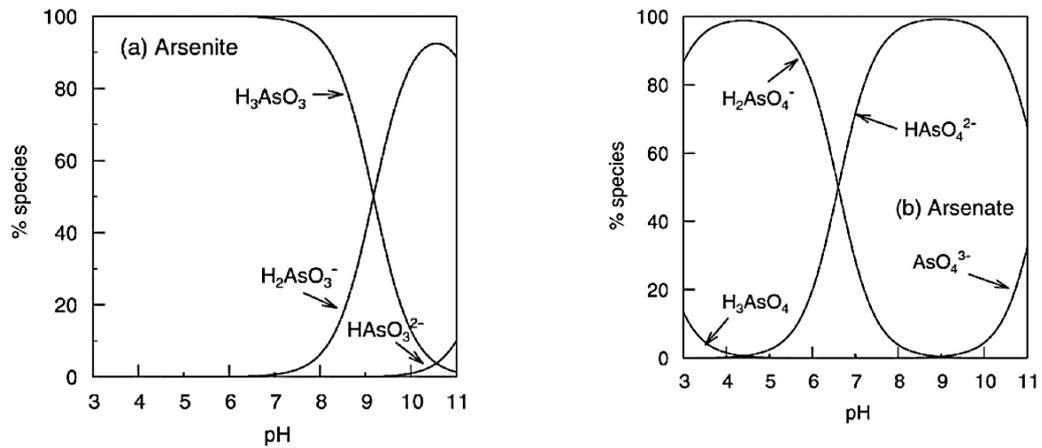


Figura 3: a) Especies de As(III) como función de pH; b) Especies de As(V) como función de pH.

Fuente: Smedley & Kinniburgh (2002).

a. Distribución del arsénico en aguas superficiales

El rango de las concentraciones de arsénico varía desde menos de 0.0005 mg/L a más de 5 mg/L en aguas dulces, incluidos, lagos, ríos y arroyos, dependiendo de la geoquímica de la fuente, cuenca y la disponibilidad. Las concentraciones en agua dulce son menos de 0.01 mg/L y con frecuencia menos de 0.001 mg/L. En ocasiones, se encuentran concentraciones mucho más altas, particularmente en aguas subterráneas (Singh et al., 2015; Smedley & Kinniburgh, 2002).

b. Distribución del arsénico en aguas subterráneas

La contaminación por As de las aguas subterráneas en diversas partes del mundo es el resultado de fuentes naturales y/o antropogénicas, millones de personas a nivel mundial dependen en gran medida del agua subterránea que contiene un alto nivel de As para su consumo (Shankar et al., 2014). Los diferentes casos de la contaminación natural por arsénico en aguas subterráneas que existen en el mundo están ligados con ambientes geológicos muy distintos: metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcano-sedimentarias, formaciones volcánicas, zonas mineras, sistemas hidrotermales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, entre otros (Smedley & Kinniburgh, 2002).

2.2.4. Efectos del arsénico en la salud

La exposición de los seres humanos al arsénico se da principalmente por el consumo directo de agua contaminada con As y la ingesta de alimentos (pescado, mariscos, carnes, pollo, algas marinas y arroz). El arsénico es un elemento tóxico, carcinogénico y ocasiona diversos efectos negativos en la salud humana, y no solo en concentraciones altas, donde la exposición a corto plazo genera desde efectos agudos hasta letales, sino también causa efectos negativos crónicos a largo plazo a bajas concentraciones. El grado de toxicidad depende del estado de oxidación, características químicas y solubilidad en el medio biológico, siendo los compuestos inorgánicos más tóxicos que los orgánicos y los compuestos trivalentes más tóxicos que los pentavalentes (Fontcuberta et al., 2011; Medina et al., 2018).

El arsénico inorgánico soluble en agua produce una toxicidad aguda y la ingestión de concentraciones altas produce síntomas gastrointestinales, trastornos en las funciones de los sistemas nervioso y cardiovascular, y en última instancia la muerte. En los pacientes afectados se han observado depresión de la médula ósea, hepatomegalia, melanosis, hemólisis, polineuropatía y encefalopatía. La prolongada exposición al elemento arsénico en el agua de consumo tiene una relación causal con un aumento de los riesgos de padecer cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón, así como con otros cambios epidérmicos, así por ejemplo como, la hiperqueratosis y los cambios de pigmentación (Basu et al., 2014; Gomez et al., 2001; World Health Organization, 2019).

2.2.5. Tecnologías para la remoción de arsénico en agua

a. Oxidación

Mediante este proceso el arsenito (As (III)) se oxida a arseniato (As (V)), seguido de la precipitación del As (V) (Singh et al., 2015). Se utiliza generalmente la oxidación de As con el propósito de optimizar su eliminación en los posteriores procesos. La oxidación del As (III) a As (V) se lleva a cabo por oxidantes químicos como el ozono, cloro, dióxido de cloro, cloroamina, ferrato y permanganato; donde la reacción para la oxidación, es muy rápida para cloro, ozono y permanganato en comparación con el peróxido de hidrogeno y cloroamina (Dodd et al., 2006; Emmett & Khoe, 2001; Sharma et al., 2007). Las ventajas y desventajas de la oxidación se muestran en la tabla 1.

La oxidación también puede llevarse a cabo por oxidación fotoquímica (proceso químico por el cual ocurre la oxidación de As (III) a As (V) generalmente en presencia de hierro o citratos mediante el uso de luz ultravioleta o luz solar), oxidación fotocatalítica (proceso químico por el cual una superficie tratada con agentes como el dióxido de titanio que actúa como catalizador y que en presencia de luz solar o radiación ultravioleta oxida el arsenito a arseniato), oxidación biológica (proceso biológico por el cual ciertas plantas y microorganismos oxidan el arsénico) y oxidación in situ (puede lograrse bombardeando agua oxigenada al cuerpo de agua contaminado con As) (Singh et al., 2015).

Tabla 1

Ventajas y desventajas de la oxidación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Proceso simple - Bajo costo operativo - Aplicable para grandes volúmenes de agua 	<ul style="list-style-type: none"> - Los productos químicos tóxicos y carcinogénicos se producen como subproductos - Las sustancias interferentes disminuyen la eficiencia de eliminación - Es necesario un proceso de eliminación adicional

Fuente: Mondal et al. (2013).

b. Coagulación – Flocculación

La adición de un coagulante seguido de la formación de un flóculo es una forma potencial que se ha utilizado para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con As. La coagulación tiene como propósito la desestabilización química de las partículas coloidales al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La flocculación consiste en la agitación de la masa coagulada que mediante la acción de los polímeros se forman puentes entre las partículas de masa más grandes para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad (Choong et al., 2007). Los coagulantes más utilizados para eliminar arsénico del agua son sulfato de aluminio y sales férricas como cloruro

férrico o sulfato férrico (Singh et al., 2015). Las ventajas y desventajas de la coagulación – floculación se muestran en la tabla 2.

En la eliminación del arsénico también se han utilizado procesos alternativos como la electrocoagulación, donde en lugar de agregar un reactivo químico como cloruro férrico, los cationes metálicos se generan directamente en el efluente a ser tratado, aplicando una corriente entre electrodos de hierro para disolver ánodos solubles. En la electrocoagulación, la oxidación electrolítica de un ánodo de hierro sacrificado produce oxihidróxidos / precipitados de Fe (III) en agua contaminada como As. Los cationes metálicos y los hidróxidos formados neutralizan los coloides cargados negativamente, lo que les permite coagularse (Genuchten et al., 2012).

Tabla 2

Ventajas y desventajas de la coagulación – floculación

Ventajas	Desventajas
- Efectivo en un amplio rango de pH	- Se necesita una dosis muy alta de coagulante
- Eficaz para el sistema con agua dura y es aplicable para grandes volúmenes de agua.	- Se hace necesario paso adicional de separación
- La eliminación de As (V) es alta	- La recontaminación ambiental por los lodos residuales contaminados con As
- Simple y rentable	

Fuente: Mondal et al., (2013).

c. Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso físico / químico por el cual un ion en la fase de resina sólida se intercambia por un ion en el agua de alimentación. Para la remoción de As se usan comúnmente resinas de intercambio aniónico, donde las especies oxianiónicas de arseniato ($H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-}) se intercambian efectivamente con el grupo funcional cargado aniónicamente de la resina, produciendo efluentes con baja concentración de As (V) (Choong et al., 2007; Singh et al., 2015). Las ventajas y desventajas del intercambio iónico se muestran en la tabla 3.

Tabla 3*Ventajas y desventajas del intercambio iónico*

Ventajas	Desventajas
- La eficiencia de eliminación no depende del pH y la concentración del influente	- La eliminación de As (III) no es posible y es necesaria la oxidación previa
- La eliminación es moderadamente efectiva	- Interferencias de otros aniones
	- Los sólidos y el hierro causan obstrucción
	- Produce un gran volumen de salmuera tóxica durante la regeneración de resinas

Fuente: Mondal et al., (2013).

d. Tecnologías con membranas

Las membranas comúnmente son materiales sintéticos con miles de millones de poros o agujeros microscópicos que actúan como una barrera selectiva, la estructura de la membrana permite a través de la presión el paso de algunos componentes y otros son rechazados. Generalmente, se utilizan cuatro tipos diferentes de procesos de membrana: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento del agua contaminada con As (Choong et al., 2007; Shih, 2005).

La microfiltración es un proceso impulsado por baja presión para separar partículas coloidales y suspendidas en el rango 0.1 – 10 μm , la eliminación de As se puede lograr aumentando el tamaño de partícula de las especies portadoras de As, por lo tanto, sería adecuado un previo proceso como la coagulación – floculación (Ghurye et al., 2004).

La ultrafiltración es un proceso de separación de baja presión basado en exclusión de tamaño que tiene tamaños de poro en el rango de 10 a 1000 Å es capaz de retener especies en el peso molecular que varía de 300 a 500 000 Da. (Brandhuber & Amy, 2001).

La nanofiltración es un proceso de alta presión y es capaz de eliminar el As disuelto del agua contaminada a un nivel apreciable, siempre y cuando contenga una cantidad muy baja de sólidos en suspensión, el tamaño de poro nominal de la membrana es de aproximadamente 1 nm y el peso molecular es típicamente menor de 1000 Da. (Figoli et al., 2010).

El proceso de ósmosis inversa es de las más antiguas e identificada como la mejor tecnología disponible para la eliminación de As del agua en pequeños sistemas de tratamiento, haciendo uso de la presión. La membrana contiene poros extremadamente pequeños $<0.001 \mu\text{m}$. y se puede lograr un rechazo muy alto (a menudo cercano al 100%) de compuestos e iones de baja masa molecular (Velizarov et al., 2004).

Las ventajas y desventajas de las tecnologías con membranas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Ventajas y desventajas de las tecnologías con membranas

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se produce una buena purificación y no se producen residuos sólidos tóxicos - Alta eficiencia de eliminación de As (V) del agua junto con otros contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia de eliminación es muy baja para As (III) - Requiere alta energía eléctrica para ejecutar los procesos - Alto costo de operación y capital - Los pasos de pretratamiento a menudo son necesarios - La eficiencia es muy baja con alta concentración de agua contaminada con As

Fuente: Mondal et al., (2013).

e. Remediación biológica

Es una tecnología respetuosa con el medio ambiente basada en el uso de plantas, bacterias, hongos, o enzimas derivados de ellos para la remediación de sitios contaminados con As (Behera, 2014; Ike et al., 2008). Durante los últimos años se han desarrollado de manera considerable estudios sobre la especiación, adquisición, transporte, tolerancia y desintoxicación del arsénico en plantas (Bali & Singh, 2021), por ejemplo, en plantas se encontró que *Pteris vittata* (helecho de freno chino) era resistente al As, con la capacidad de hiperacumular grandes cantidades de As en sus hojas (Ma et al., 2001). En bacterias se encontraron que *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Haemophilus*, *Micrococcus* y *Bacillus* pueden estar involucrados en la remediación de ambientes contaminados con arsénico (Ike et al., 2008;

Yamamura et al., 2003). Las ventajas y desventajas de la remediación biológica se muestran en la tabla 5.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de la remediación biológica

Ventajas	Desventajas
- Es ambientalmente seguro	- Es un tratamiento lento
- Inversión moderada	- Requiere condiciones particulares adecuadas para el desarrollo de los organismos
- No genera residuos en la mayoría de los casos	
- Es autosuficiente	

Fuente: Choong et al., (2007).

2.2.6. Adsorción

Es un proceso que consiste en la transferencia de masa por el cual las especies iónicas de una sustancia son transportadas del agua a la superficie de un sólido y quedan retenidas por fuerzas físicas o químicas, los iones que son transportados se les denomina adsorbato y la superficie del sólido o el medio donde ocurre la adsorción se le llama adsorbente. Es un fenómeno superficial y por tal motivo, cuanto mayor sea la superficie del medio, mayor será la capacidad de adsorber el material. Los adsorbentes más usados para la eliminación de arsénico son el carbón activado, minerales arcillosos (caolinita, montmorillonita, etc.), alumina activada, minerales basados en óxidos de hierro, adsorbentes artificiales, entre otros (D'Ambrosio, 2005; Singh et al., 2015; Yadav et al., 2021). Las ventajas y desventajas de adsorción se muestran en la tabla 6.

En la adsorción se generan potencialmente dos tipos de residuos: adsorbentes gastados y soluciones de regeneración. Los adsorbentes gastados se generan a partir de sistemas que los usan una sola vez, o de sistemas donde los adsorbentes se han agotado y ya no se pueden regenerar, o ya no son efectivos; en algunos casos, según la política del fabricante, los adsorbentes gastados pueden enviarse de vuelta al proveedor para su reactivación, recuperación o eliminación. Las soluciones de regeneración se dan a partir de la reactivación del adsorbente generalmente mediante procesos como el intercambio iónico (Choong et al., 2007). Los posibles métodos adoptados para la disposición de estos residuos se muestran en la tabla 7.

El tipo de desecho de arsénico o sus características juegan un papel importante en la elección del mejor método de tratamiento y eliminación. Actualmente, la encapsulación de los residuos de arsénico a través de las técnicas de solidificación / estabilización se considera la solución más atractiva (Nguyen et al., 2014).

- **Adsorbente:** Es el material sólido sobre el cual se produce la adsorción (Arias et al., 2009).
- **Adsorbato:** Es la sustancia que resulta adsorbida o retenida en la superficie del adsorbente (Arias et al., 2009).

Tabla 6

Ventajas y desventajas de la adsorción

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia de remoción - Comparativamente barato y comercialmente disponible - Amplio conocimiento que se tiene del proceso del proceso y de su funcionamiento, haciendo que su manejo sea fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interferencias de aniones competitivos (PO_4^{3-}, HCO_3^-, SiO_3^{2-}, SO_4^{2-}) - Requiere ajustes de pH - Generación de residuos sólidos y líquidos cuando el adsorbente este saturado que a menudo es difícil de eliminar, representando quizá una mayor amenaza para el ambiente - Problemas relacionados con la regeneración y usos múltiples de los adsorbentes

Fuente: Mohan y Pittman (2007); Mondal et al. (2013).

Tabla 7

Generación y disposición de residuos del proceso de adsorción del arsénico

Método de tratamiento	Forma residual	Generación residual	Posibles métodos de disposición
Adsorción	Líquido	<ul style="list-style-type: none"> Soluciones de regeneración - Lavado - Regenerante gastado - Flujo de enjuague gastado 	<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje sanitario - Estanques de evaporación / lagunas - Descarga directa
	Sólido	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorbente gastado 	<ul style="list-style-type: none"> - Vertedero controlado

Fuente: (Sorg, 2000).

En fase líquida la cantidad de adsorción de arsénico en el material adsorbente se describe mediante la siguiente ecuación (Ayub et al., 2020):

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{W} \times V \quad (1)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción (mg/g)

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

C_e : Concentración en equilibrio del adsorbato (mg/L)

V : Volumen de la solución (L)

W : Masa del adsorbente (g)

La determinación de la eficiencia de adsorción de arsénico en el adsorbente viene dada por la siguiente ecuación (Ayub et al., 2020):

$$\%Ads = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$\%Ads$: Eficiencia de adsorción o remoción

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

C_e : Concentración en equilibrio del adsorbato (mg/L)

a. Tipos de adsorción

- Adsorción física

Llamada también fisisorción, esta adsorción se da debido a fuerzas débiles de atracción, como las fuerzas de Van der Waals, es decir, las moléculas no comparten ni transfieren electrones. La adsorción física en comparación a la adsorción química es menos específica, donde los compuestos que se adsorben a los sitios de la superficie, tienen fuerzas y energías de unión más débiles, opera a distancias más largas y es más reversible (Crittenden et al., 2012).

- Adsorción química

Llamada también quimisorción, ocurre cuando el adsorbato reacciona con la superficie para formar un enlace covalente o un enlace iónico. En la adsorción química la atracción entre adsorbente y adsorbato se aproxima a la de un enlace químico covalente o electrostático entre átomos, con una longitud de enlace más corta y una energía de enlace más alta (Crittenden et al., 2012).

b. Factores de adsorción en fase líquida

- Propiedades del adsorbente

La adsorción depende de las propiedades del adsorbente tales como: propiedades de la textura (área específica, volumen y diámetro promedio de los poros), propiedades fisicoquímicas (carga superficial, concentraciones y tipos de sitios activos) y la composición química del medio adsorbente (Leyva, 2007).

- Propiedades del adsorbato

Las propiedades del adsorbato son factores de la adsorción tales como: características químicas y físicas (tamaño de molécula, solubilidad, polaridad, composición química y concentración del adsorbato en la solución) (Leyva, 2007).

- pH

La eficiencia de adsorción está muy influenciada por el grado de ionización del adsorbato, que a su vez depende del pH de la solución (Mohan & Pittman, 2007).

- Temperatura

Generalmente, el aumento de la temperatura conduce a una disminución de la adsorción debido a las moléculas adsorbidas que tienen mayores energías y, por lo tanto, tienen más probabilidades de liberación de la superficie del adsorbente (Leyva, 2007).

- Tiempo de contacto

Es un factor importante a determinar en la eficiencia de adsorción, generalmente, a medida que se incrementa el tiempo de contacto aumenta la cantidad del metal eliminado llegando a un punto de saturación del adsorbente, donde la remoción empieza a disminuir (Vizcaíno et al., 2017).

- Presencia de otros iones

Las presencias de otros iones en la adsorción compiten en la afinidad al medio adsorbente como: fosfatos, carbonatos, sulfatos, fluoruros, silicatos, etc. (Mondal et al., 2013; Wang et al., 2014).

c. Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción describe la relación de equilibrio entre la cantidad de metal adsorbido y la concentración de iones metálicos que quedan en la solución, a una determinada temperatura. Existe una variedad de isotermas de adsorción que presentan ecuaciones para analizar los datos experimentales de equilibrio de adsorción, en el cual los parámetros de la ecuación y los supuestos termodinámicos subyacentes de estos modelos de equilibrio a menudo proporcionan una idea del mecanismo de adsorción y de las propiedades superficiales y la afinidad del adsorbente (Pérez et al., 2007). Se alcanza el equilibrio en el proceso de adsorción cuando las velocidades de adsorción y desorción son iguales (Smedley & Kinniburgh, 2002). Las isotermas más utilizadas son la de Langmuir y Freundlich.

En la figura 4 se observan algunas formas de isotermas de adsorción. La isoterma lineal que pasa por el origen de las coordenadas, indica que la cantidad adsorbida del adsorbato en el adsorbente es proporcional a la concentración del adsorbato en la solución. Las isotermas convexas hacia arriba son favorables, debido a que puede obtenerse una carga relativamente elevada del adsorbato en el adsorbente para una baja concentración del adsorbato en la solución. El caso límite de una isoterma muy favorable es la adsorción irreversible, en el cual la cantidad adsorbida es independiente a la concentración del adsorbato en la solución. Una isoterma cóncava hacia arriba es desfavorable, dado a que se obtienen cargas relativamente bajas del adsorbato en el adsorbente y que conducen a largas zonas de transferencia del adsorbato de la fase líquida a la fase sólida, las isotermas que presentan esta forma son raras, pero son interesantes para la comprensión de los procesos de regeneración del adsorbente (McCabe et al., 2007).

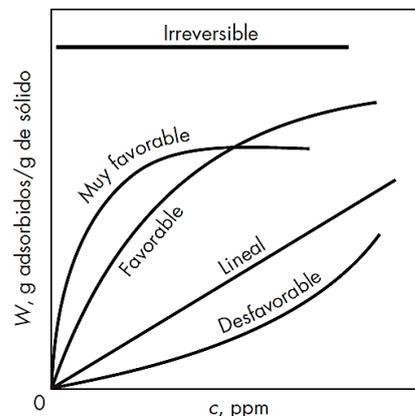


Figura 4: Isotermas de adsorción.

Fuente: McCabe et al.(2007).

- **Isoterma de Langmuir**

Este isoterma describe los datos experimentales producidos en el equilibrio de adsorción y supone que la superficie del adsorbente presenta sitios energéticos que son homogéneos, únicamente una molécula puede ser adsorbida en un sitio de la superficie del adsorbente y la adsorción ocurre hasta formar una monocapa completa (saturación) en cuyo momento finaliza la adsorción, no existe interacciones entre las moléculas adsorbidas (Ayub et al., 2020; Herrejón et al., 2008; Pérez et al., 2007). La isoterma de Langmuir se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)

C_e : Concentración en equilibrio del adsorbato (mg/L)

q_{max} : Capacidad máxima de adsorción (mg/g)

K_L : Constante de isoterma de Langmuir que muestra la afinidad de unión entre el adsorbato y adsorbente

Los valores de q_{max} y b se obtienen experimentalmente a través de la siguiente ecuación lineal transformada:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (4)$$

El factor de separación (R_L), constante adimensional indica la posibilidad de adsorción favorable ($0 < R_L < 1$), desfavorable ($R_L > 1$), lineal ($R_L = 1$) o irreversible ($R_L = 0$). El factor R_L está dada por la siguiente ecuación:

$$R_L = \frac{1}{1 + C_i \times K_L} \quad (5)$$

- **Isoterma de Freundlich**

Es un modelo empírico, donde se considera que la superficie del adsorbente está conformada por sitios activos que son energéticamente heterogéneos debido a que los sitios de adsorción poseen diferentes afinidades. También este modelo asume que durante el proceso de adsorción inicialmente se ocupan las posiciones

de mayor afinidad, seguidamente el resto, por lo que se genera la formación de una multicapa (Ayub et al., 2020; Herrejón et al., 2008; Padmesh et al., 2006). El modelo está representado mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)

C_e : Concentración en equilibrio del adsorbato (mg/L)

k_f : Constante de Freundlich, es un indicador de la capacidad de adsorción

$1/n$: Intensidad de adsorción, es favorable ($0.1 < 1/n < 0.5$) o desfavorable ($1/n > 2$)

Los valores de k_f y n se obtienen experimentalmente mediante la siguiente ecuación lineal:

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

- **Isoterma de Temkin**

Este modelo considera que en las interacciones del adsorbato y adsorbente existe una disminución del valor de adsorción lineal en lugar de logarítmica, como en el modelo de Freundlich (Penedo et al., 2015). El modelo se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{RT}{b} (\ln A_t) + \frac{RT}{b} (\ln C_e) \quad (8)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)

RT/b : Se relaciona con el calor de adsorción

R : Constante universal de los gases (8,314 J/mol.k)

T : Temperatura (k)

b : Variación de la energía de adsorción (J/mol)

A_t : Constante de equilibrio de Temkin

C_e : Concentración en equilibrio del adsorbato en la solución (mg/L)

d. Cinética de adsorción

La cinética describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y permite determinar el tiempo en que se alcanza el equilibrio. Los modelos más utilizados para describir los procesos de adsorción en fase líquida son los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intraparticular (Murillo et al., 2011).

- Modelo de Pseudo Primer Orden

El modelo se fundamenta en la suposición de que a cada ión metálico se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente (Pinzón & Villamizar, 2009). En este modelo y en el modelo de Pseudo Segundo Orden se considera que la diferencia de concentraciones de adsorbato que hay entre la solución y la superficie del adsorbente, es la principal fuerza responsable del proceso de adsorción (Sun-Kou & Lazo, 2009). El modelo dado por Lagergren está representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (9)$$

Donde:

q_t : Capacidad de adsorción en un tiempo t (mg/g)

q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)

t : Tiempo (min)

K_1 : Constante de velocidad de equilibrio (Pseudo primer orden) (min^{-1})

Integrando la ecuación (9) con respecto a las condiciones de contorno para $q_t = 0$ a $t = 0$ y $q_t = q_t$ a $t = t$, se obtiene:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (10)$$

El valor de k_1 se obtiene en la siguiente ecuación despejada:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (11)$$

- Modelo de Pseudo Segundo Orden

El modelo se basa en la capacidad adsorción de equilibrio del adsorbente y supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos del adsorbente, este modelo desarrollado por Ho y McKay se representa con la siguiente ecuación de velocidad de la cinética de adsorción (Ho & Mckay, 1999; Özacar & Şengil, 2005):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (12)$$

Donde:

q_t : Capacidad de adsorción en un tiempo t (mg/g)

q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)

t : Tiempo (min)

k_2 : Constante de cinética de Pseudo Segundo orden (g/mg.min)

$h = k_2 q_e^2$: Velocidad inicial de adsorción (mg/g.min)

Integrando la ecuación (12) con respecto a las condiciones de contorno para $q_t = 0$ a $t = 0$ y $q_t = q_t$ a $t = t$, se obtiene:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (13)$$

Los valores de k_2 y h se obtiene en la siguiente ecuación despejada:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (14)$$

2.2.7. Hidralgiritita

La hidralgiritita, es un silicato de aluminio hidratado, perteneciente a la familia de las arcillas, al grupo de filosilicatos, es conocido comúnmente por los habitantes de las zonas altiplánicas como chacko (Browman, 2004; Guerrero, 2019). Esta arcilla es usada principalmente para el consumo y tratamiento de acidez estomacal, ulcera, desinfección de parásitos, entre otros (Castillo & Frisancho, 2015). Actualmente estas arcillas naturales son consumidas por los pobladores rurales generalmente al finalizar la etapa de cosecha de papas y son comercializadas en los yacimientos, en las ferias y en los mercados informales de algunas ciudades (Aranibar, 2012).

a. Características fisicoquímicas

Es importante mencionar los beneficios de la hidralgirita para el mantenimiento de la calidad del suelo, puesto que se han reportado que en estos suelos existe un contenido muy bajo de elementos contaminantes como los metales pesados. La hidralgirita o chacko de la región Puno en promedio tiene un pH ligeramente ácido de 6.78, siendo homogéneos de acuerdo a su origen, con una coloración que varía de lechoso (Asillo, Azángaro) a cremoso (Acora, Tiquillaca), contiene 0.339% de impurezas en arenas (Fernández & Aranibar, 2016).

b. Composición química

En los análisis de la hidralgirita en diferentes zonas de Puno indicaron que poseen en promedio un contenido mínimo de 0.055% de materia orgánica, en su composición química tiene micro elementos como nitrógeno, siendo levemente mayor en los provenientes de Tiquillaca, Ácora y Azángaro (0.16, 0.17 y 0.17 ppm, respectivamente) y menor el de Asillo (0.14 ppm), en cuanto al potasio es mayor el de Asillo y Tiquillaca (518.33 y 592.00 ppm, respectivamente) y menor en Ácora y Azángaro (273.33 y 371.33 ppm, respectivamente) y respecto al fósforo es mayor en Asillo y Tiquillaca (19.13 y 20.28 ppm, respectivamente) y menor en Ácora y Azángaro (17.65 y 16.92 ppm, respectivamente) (Aparicio, 2002; Fernández & Aranibar, 2016).

c. Yacimientos

La hidralgirita se extrae de yacimientos, se ha identificado su presencia en la región Puno (Ácora, Asillo, Azángaro y Tiquillaca) y en Bolivia (Achocalla, Mocomoco y Andamarca) (Aranibar, 2012).

- Ácora (Provincia de Chucuito)

El yacimiento está ubicado en la comunidad de Mocaraya, aquí la hidralgirita tiene un color verde claro, con un 25 a 30% de humedad y en su superficie de la arcilla natural, en ocasiones se observa manchas oscuras y amarillas (Aranibar, 2012).

- Asillo (Provincia de Azángaro)

Este yacimiento se ubica en la comunidad de Catawicuchu, en el distrito de Asillo, la hidralgirita seca posee un color gris claro con ciertas manchas

amarillas, con un 8 a 10% de humedad, presenta una estructura laminar y es de mayor dureza a diferencia de las otras arcillas (Aranibar, 2012).

- **Azángaro**

Se hallan dos yacimientos importantes, uno en la comunidad de San Martín y el otro a 12 km al sur oriente de Azángaro. En estos yacimientos generalmente la hidralgiritita tiene un color gris. Asimismo, se puede hallar una arcilla de color rojo – canela, que es una variedad de arcilla no apreciada en los mercados, macroscópicamente esta presenta una alta pureza, ya que no se observa ninguna coloración o manchas en su superficie y en el interior de su estructura (Aranibar, 2012).

- **Tiquillaca (Provincia de Puno)**

El yacimiento está ubicado a 3 km al sur – este del distrito de Tiquillaca, la hidralgiritita presenta un color gris y muy pocas impurezas, microscópicamente tiene una similitud a la arcilla del yacimiento de Acora (Aranibar, 2012).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Variables de investigación

3.1.1. Variables independientes

- **Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro**

Definición conceptual: Dosis del adsorbente para remover el arsénico en agua.

Definición operativa: Balanza analítica.

- **Arsénico (V) inicial**

Definición conceptual: Concentración de arsénico (V) en el agua antes del tratamiento.

Definición operativa: Espectrofotómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

- **pH**

Definición conceptual: Medida de acidez o alcalinidad del agua.

Definición operativa: Multiparámetro de calidad de agua.

- **Tiempo de contacto**

Definición conceptual: Intervalo de tiempo donde ocurre el proceso de adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.

Definición operativa: Cronómetro.

3.1.2. Variable dependiente

- **Adsorción de arsénico (V)**

Definición conceptual: Proceso de transferencia de los iones de arsénico a la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.

Definición operativa: Espectrofotómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

3.2. Operacionalización de variables

En la tabla 8 se muestra la operacionalización de variables.

Tabla 8

Operacionalización de variables

	Variab	Indicadores	Unidad/ Categoría	
Variables independientes	Hidralgirit	Relación Sólido/Líquido de la	10 g/L	
		con óxidos de hierro	155 g/L	
		pretratada con óxidos de hierro	300 g/L	
	Arsénico (V) inicial	Concentración inicial de arsénico (V)		0.05 mg/L
				0.275 mg/L
				0.5 mg/L
pH	pH		5	
			7	
			9	
Tiempo de contacto	Tiempo de contacto		5 minutos	
			32.5 minutos	
			60 minutos	
Variable dependiente	Adsorción de arsénico (V)	Adsorción de arsénico (V)	%	

3.3. Nivel y tipo investigación

El nivel de la investigación es explicativo, ya que estos estudios están orientados a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales, explicando la ocurrencia del fenómeno y las condiciones en las que se manifiesta (Hernández et al., 2014).

El tipo de investigación es experimental, en el cual se manipuló las variables independientes; analítico, donde su análisis estadístico es multivariado; prospectivo, donde los datos fueron recogidos de las unidades de experimentación (fuente primaria); y longitudinal, donde la variable en estudio fue medida en dos ocasiones (Supo, 2012).

3.4. Ámbito de estudio

El presente proyecto de investigación tuvo como principal ámbito de estudio la ciudad de Juliaca, que se encuentra ubicada en la provincia de San Román, en la meseta altiplánica del departamento de Puno, al sur del Perú (Municipalidad Provincial de San Román, 2017).

- Latitud : 15° 29' 40'' latitud sur
- Longitud : 70° 07' 54'' longitud oeste de Greenwich
- Altitud : 3824 m.s.n.m
- Extensión : 178.2 km.

3.5. Población y muestra de estudio

3.5.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por la solución acuosa de arsénico (V), misma que fue preparada en laboratorio.

Asimismo, en la presente investigación se realizaron pruebas de aplicación del tratamiento propuesto, donde la población de estudio estuvo conformada por las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

3.5.2. Muestra

- Unidades de estudio

La unidad de estudio estuvo constituida por la solución acuosa de arsénico (V), que a su vez representa la unidad de información. La unidad de análisis y experimentación estuvo constituida por 100 mL de solución acuosa de arsénico (V).

Además, en la presente investigación se realizaron pruebas de aplicación del tratamiento propuesto, para lo cual, la unidad de estudio estuvo conformada por el agua subterránea de la ciudad de Juliaca, la unidad de información estuvo constituida por el agua subterránea en los pozos, la unidad de análisis y experimentación estuvo dada por 100 mL del agua subterránea de cada pozo.

- **Unidad de muestreo**

En las pruebas de aplicación del tratamiento propuesto, las unidades de muestreo estuvieron constituidas por las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca.

- **Tamaño de muestra**

En las pruebas de aplicación del tratamiento propuesto en las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca, no se calculó el tamaño de muestra y se tomó a criterio 3 puntos de muestreo.

- **Técnica de muestreo**

La técnica de muestreo para las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca fue no probabilística, en esta, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra (Hernández et al., 2014).

El muestreo se realizó por criterio, estableciendo 3 puntos de muestreo, en las salidas Puno, Huancané y Cusco.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

- **Observación**

La observación es una técnica que consiste en el registro sistemático, válido y confiable de situaciones observables. Las variables a observar cuantitativamente son especificadas y definidas antes de empezar la recolección de datos. Se enfoca en la información que pueda ser evaluada por medio de los sentidos (datos visuales, auditivos, producto del tacto y el olfato) (Hernández et al., 2014).

Esta técnica fue utilizada en el presente estudio para obtener a través de los instrumentos datos cuantitativos de la concentración de arsénico en agua, los parámetros de calidad de agua, las coordenadas del punto de extracción y composición química de la hidralgiritita y los puntos de muestreo del agua subterránea de los pozos de la ciudad de Juliaca.

3.6.2. Instrumentos

Toda medición o instrumento debe reunir tres requisitos esenciales: confiabilidad, es el grado del instrumento donde produce resultados consistentes y coherentes; validez, es el grado donde un instrumento en verdad mide la variable que se busca medir; objetividad, se refiere al grado en que el instrumento es o no permeable a la influencia de los sesgos y tendencias de los investigadores que lo administran, califican e interpretan (Hernández et al., 2014). Los instrumentos de recolección de datos de la presente investigación se tomaron de acuerdo a los requisitos ya mencionados, dichos instrumentos fueron: espectrófotómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), multiparámetro de calidad de agua, GPS, hoja de datos y cámara fotográfica.

3.7. Materiales, equipos y reactivos

3.7.1. Materiales

Matraces Erlenmeyer, vasos de precipitado, probetas, pipetas, fioles, vidrio de reloj, placas petri, pera de succión, mortero, espátulas, papel filtro Whatman 41 y 42, recipiente de vidrio, recipientes de plástico, soportes universales, embudos, culer, tamices, varilla, bolsas con cierre hermético, etiquetas autodhesivas, cinta maski, marcador permanente, cinta embalaje, lapiceros.

3.7.2. Equipos

Agitadores magnéticos con calentamiento (VELP SCIENTIFICA), multiparámetro de calidad de agua (OAKTON PCD650), Espectrofotómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) (PERKIN ELMER NexION 350), tamizadora analítica (RETSCH AS 200 CONTROL), GPS (GARMIN 64S), balanza analítica (METTLER TOLEDO ME204), estufa (SELECTA), termómetro (ISOLAB), cronómetro (SAMSUNG), cámara fotográfica (SAMSUNG).

3.7.3. Reactivos

Arsénico (MERCK, solución patrón trazable a SRM de NIST H_3AsO_4 en HNO_3 0,5 mol/L 1000 mg/L As Certipur®), óxido de hierro (III) (Fe_2O_3 , 98.3%), ácido clorhídrico (HCl, 37%), ácido nítrico (HNO_3 , 70%), hidróxido de sodio (NaOH, 99%), agua destilada (H_2O , Envasado por laboratorio JENFARMA PERU S.A.C.).

3.8. Metodología

3.8.1. Determinación de los parámetros fisicoquímicos y la composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro

a. Extracción y tratamiento físico de la hidralgirita natural

La muestra de hidralgirita natural se extrajo de manera selectiva para evitar que se contamine con restos de tierra e impurezas, en la zona 19L con coordenadas este 0377284 – norte 8357725 a una altitud de 3978 m.s.n.m., ubicado en el sector Chacuwiri de la comunidad de Chaupi Sahuacasi, provincia de Azángaro, región Puno, la muestra se almacenó en bolsas resistentes y estas fueron puestas en un culer para mantener sus propiedades. La muestra fue sometida a tratamiento físico: secado bajo sombra a temperatura ambiente y sin influencia de humedad ambiental extrema, reducción de tamaño y tamizado (malla número 60) (Aranibar, 2012).

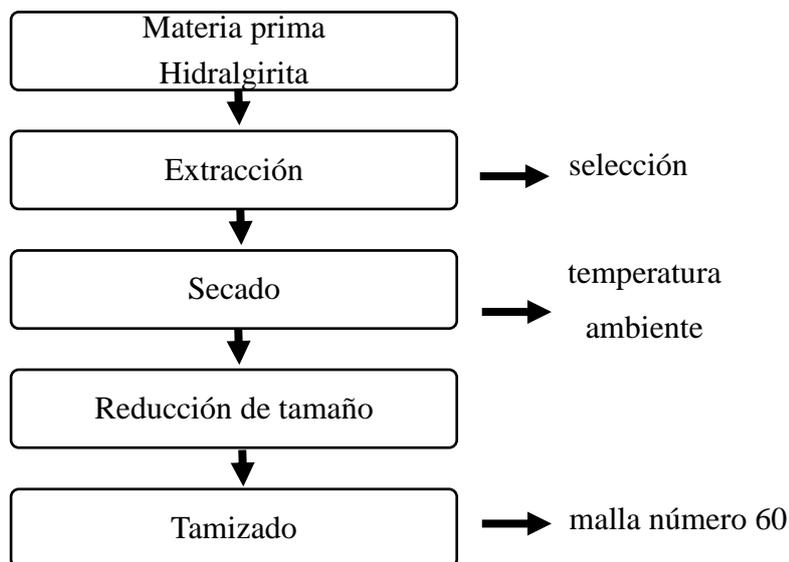


Figura 5: Diagrama de flujo de la extracción y tratamiento físico de la hidralgirita natural.

Fuente: Aranibar (2012).

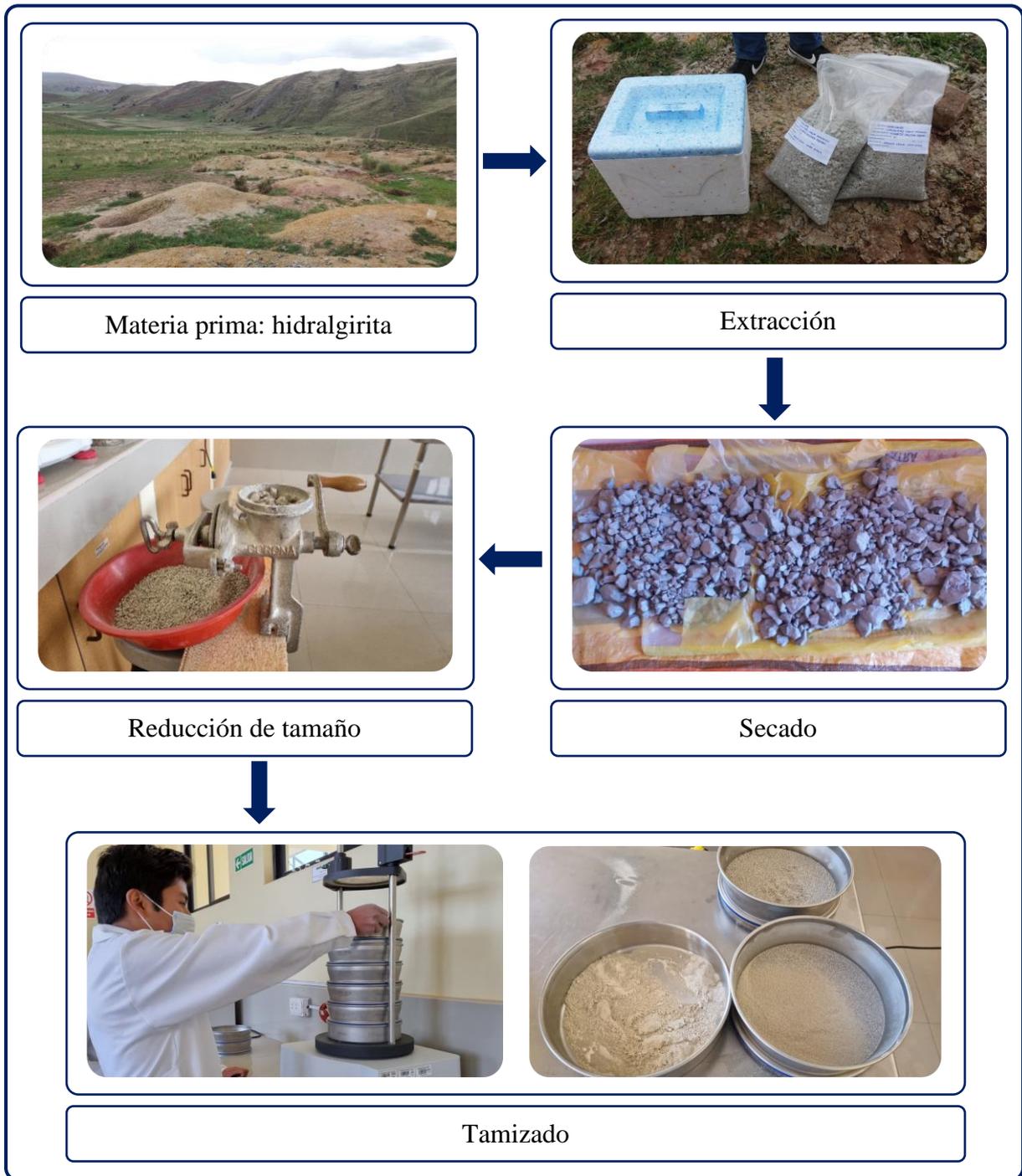


Figura 6: Esquema fotográfica de extracción y tratamiento físico de la hidralginita natural.

b. Preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro

La preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro se realizó en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ).

Se preparó una solución de 500 mL de ácido clorhídrico (HCl, 37%) 2M en un fiola de 500 mL, dicha solución fue sobresaturada con óxido de hierro (III) (Fe_2O_3 , 98.3%) en un matraz erlenmeyer de 500 mL. Se utilizó la solución sobresaturada para la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro. A la solución sobresaturada con óxido de hierro (III) (Fe_2O_3 , 98.3%) se agregó 100g de hidralgirita natural y se mezcló mediante agitación magnética por 8 horas. Posteriormente se filtró la mezcla con papel Whatman 41 y se secó en una estufa a 110 °C por 24 horas (Mejía et al., 2009).

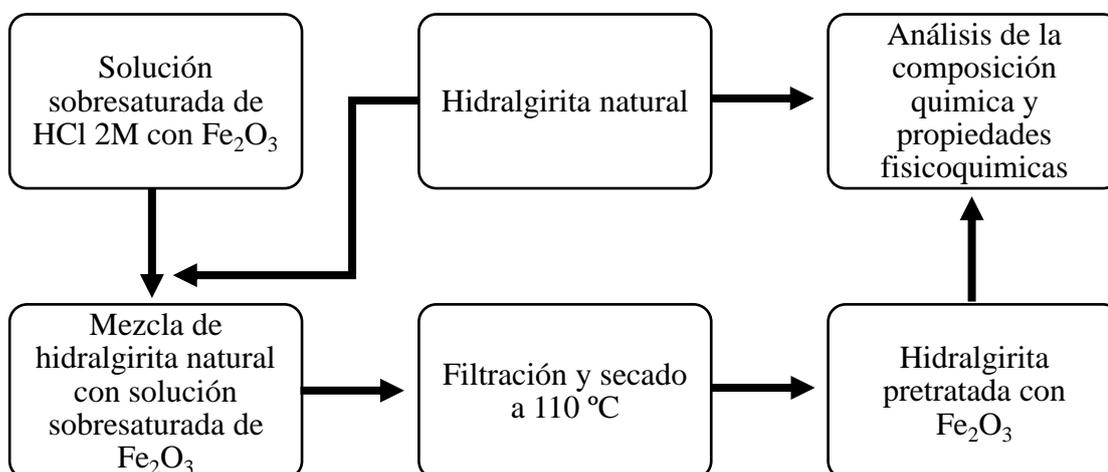


Figura 7: Diagrama de flujo de la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro.

Fuente: Mejía et al. (2009).

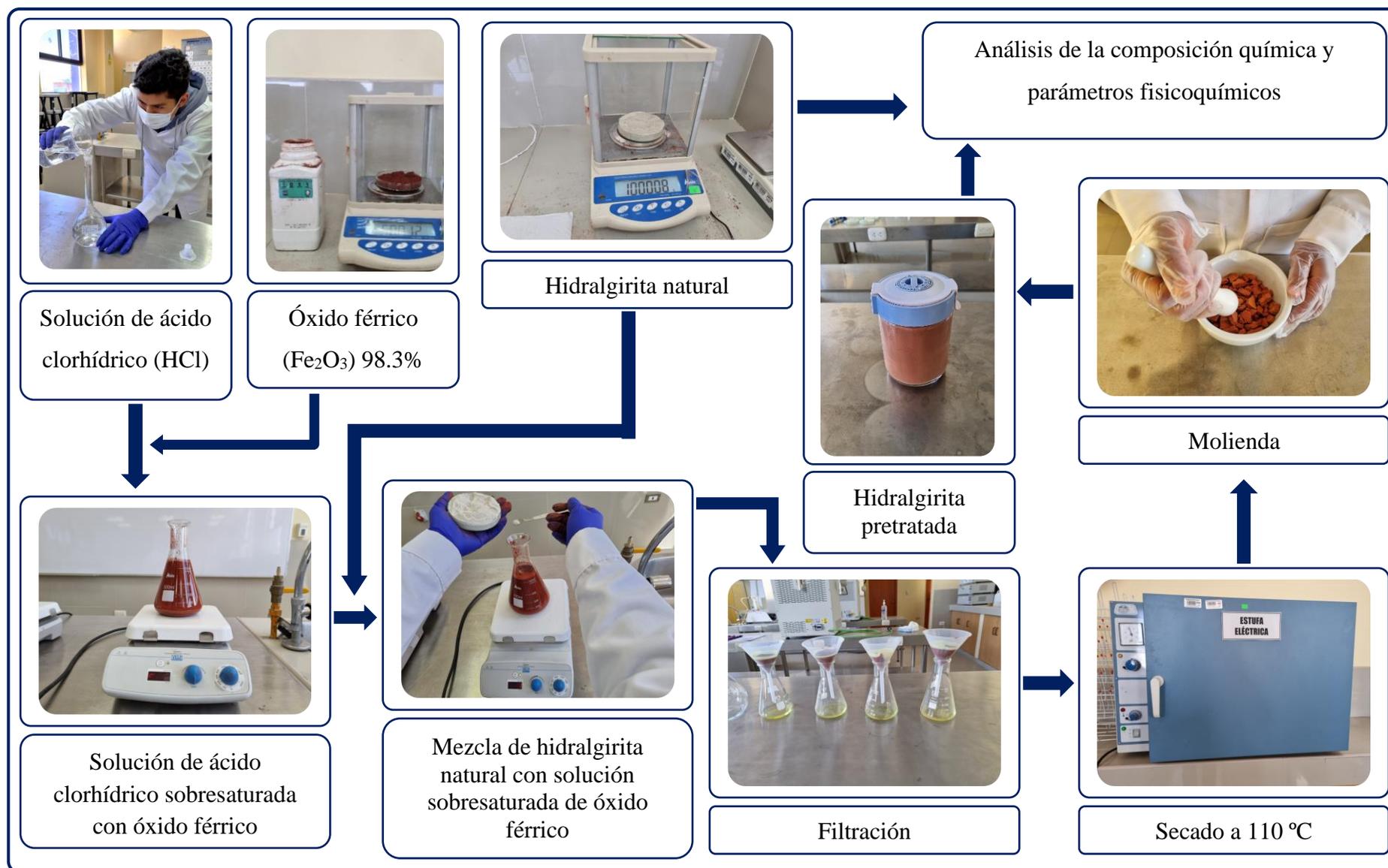


Figura 8: Esquema fotográfica de la preparación de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro.

c. Análisis de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro

Las muestras de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca para determinar los parámetros fisicoquímicos de pH (método potenciómetro, determinado con multiparámetro), conductividad eléctrica (determinado con multiparámetro), humedad (método gravimétrico), textura (método al tacto) y color (tabla Munsell). Para el análisis de la composición química las muestras se enviaron al laboratorio LABICER de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se usó espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.

3.8.2. Evaluación de los efectos de la dosis de hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua

La experimentación se realizó en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ).

a. Pruebas de adsorción

Con la finalidad de garantizar las concentraciones iniciales de arsénico (V) de 0.05, 0.275 y 0.5 mg/L en agua, se solicitó a Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L. la preparación de dichas soluciones iniciales con agua destilada y el reactivo arsénico (solución patrón trazable a SRM de NIST H_3AsO_4 en HNO_3 0,5 mol/l 1000 mg/L As Certipur®) (anexo 1).

A fin de determinar la dosis de hidralgirita pretratada con óxidos de hierro a experimentar se realizaron pruebas preliminares de acuerdo a antecedentes investigativos, los resultados de dichas pruebas se muestran en el anexo 2.

Para la experimentación se añadió hidralgirita pretratada con óxidos de hierro con un contenido de peso de 1, 15.5 y 30 g respectivamente en matraces de 250 mL, con 100 mL de solución de arsénico (V) a diferentes concentraciones (0.05, 0.275 y 0.5 mg/L). Los tratamientos se trabajaron a temperatura constante de 25 °C, a diferentes pH (5,7 y 9) que fueron ajustadas con soluciones de HNO_3 1M y NaOH 1M, y se agitaron a diferentes tiempos (5, 32.5 y 60 minutos) en agitadores magnéticos con calentamiento a 200 rpm. Posteriormente las muestras se dejaron precipitando por 3 minutos y se filtraron con papel Whatman 42 (Mejía et al., 2009).

Con el propósito de determinar la concentración de arsénico en agua después de los tratamientos las muestras se enviaron a Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L, donde el método de ensayo utilizado para el análisis de las muestras fue 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).

La capacidad y porcentaje de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua se determinaron usando las ecuaciones 1 y 2.

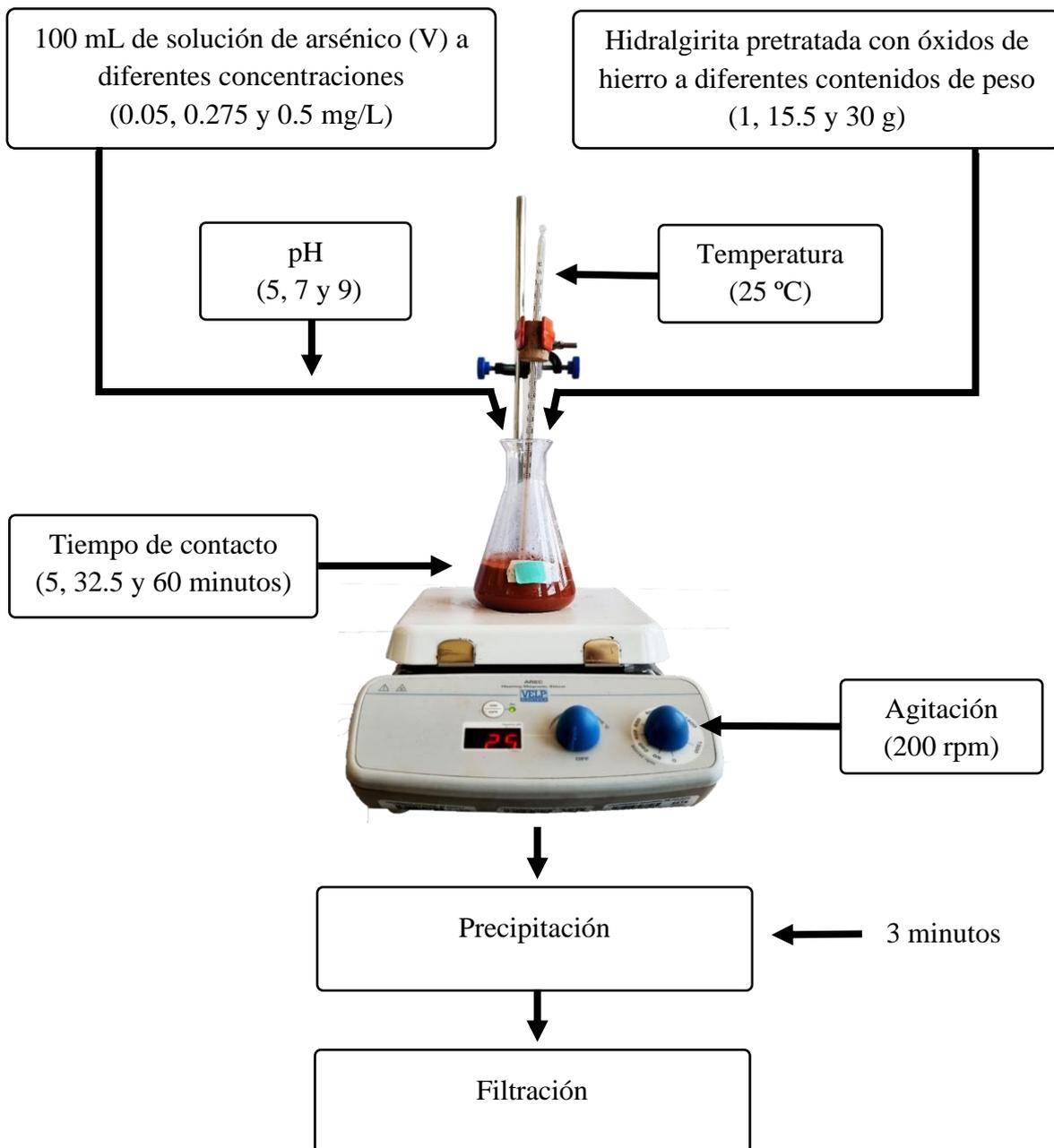


Figura 9: Diagrama de flujo de las pruebas de adsorción de arsénico (V) en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en agua.

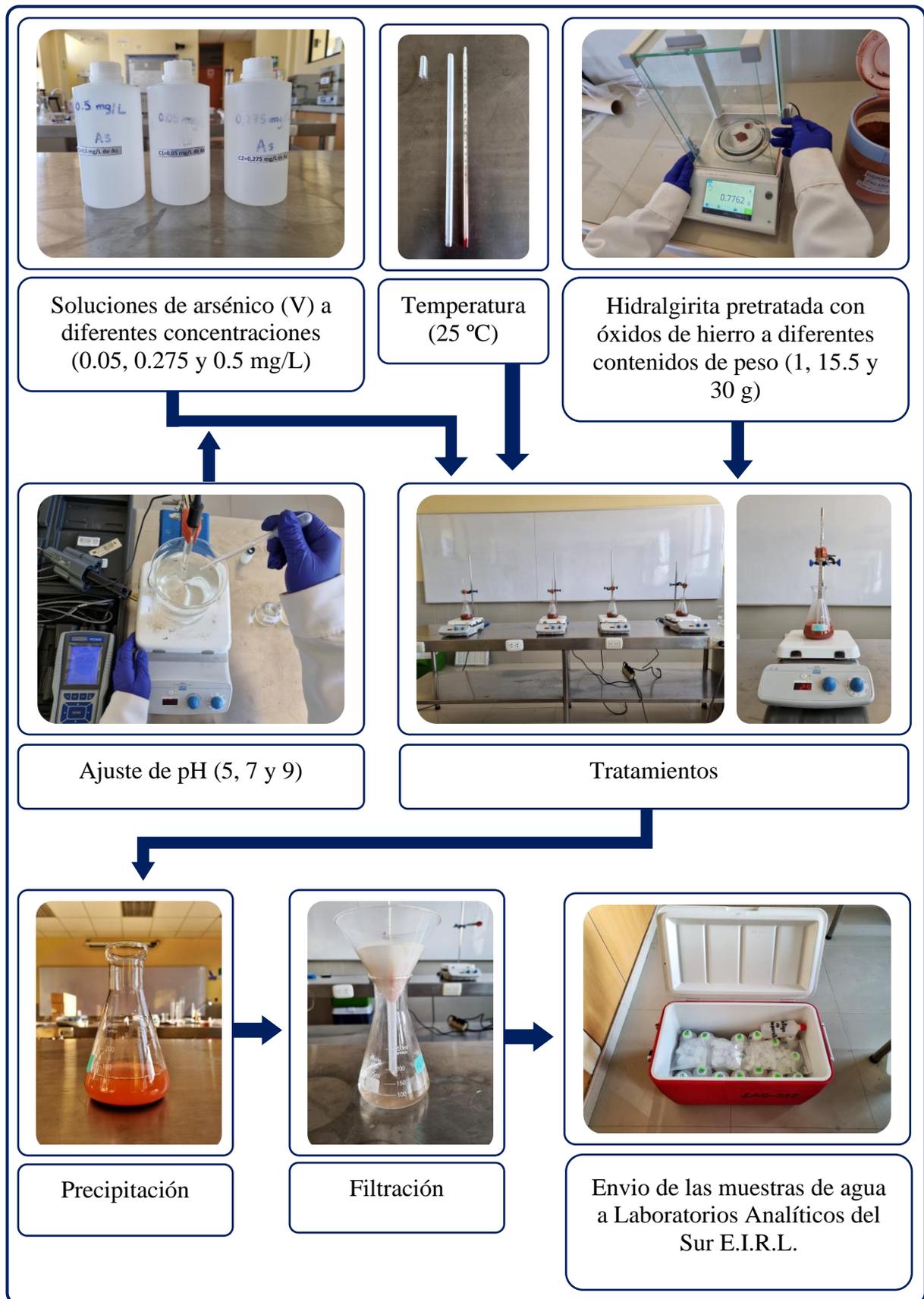


Figura 10: Esquema fotográfica de las pruebas de adsorción de arsénico (V) en hidralginita pretratada con óxidos de hierro en agua.

b. Cinética de adsorción

Para realizar el estudio y ajuste a los modelos cinéticos, se agregaron 500 mL de arsénico (solución patrón trazable a SRM de NIST H_3AsO_4 en HNO_3 0,5 mol/L 1000 mg/L As Certipur®) con una concentración inicial de 0.05 mg/L de As (V) a un vaso de precipitado de 1 L donde se adicionó 5 g de hidralgirita pretratada con óxidos de hierro. En la experimentación los valores del pH, temperatura y velocidad de agitación fueron 7, 25 °C y 400 rpm respectivamente. Se extrajeron 100 mL de muestras en diferentes intervalos de tiempos de contacto de 2, 5, 20, 60 y 120 minutos, las cuales se dejaron precipitando por 3 minutos y fueron filtradas con papel Whatman 42 (Matus et al., 2011).

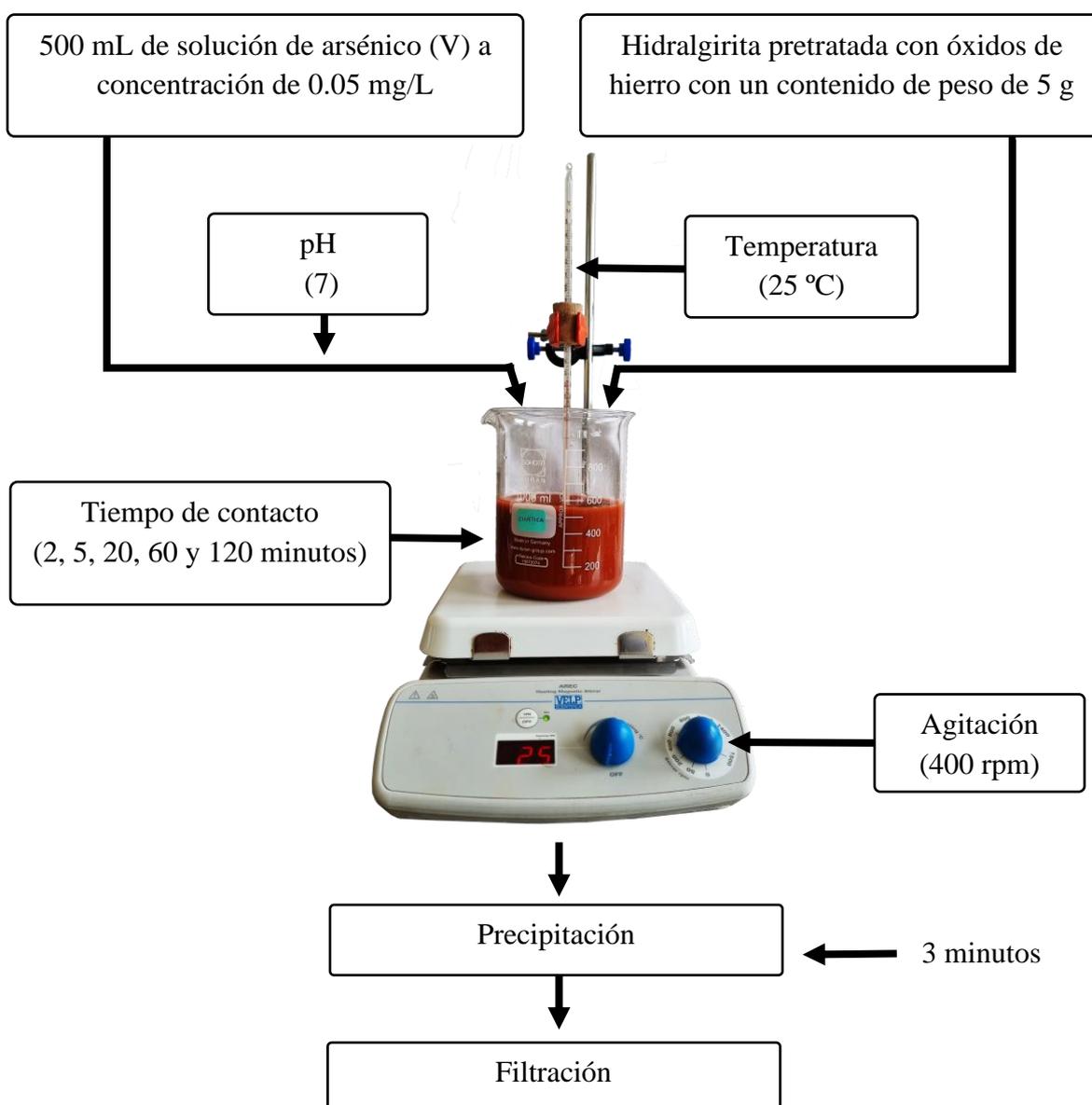


Figura 12: Diagrama de flujo de la experimentación de la cinética de adsorción.

3.8.4. Determinación de la eficiencia de la adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en las pruebas de aplicación de las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca

Se tomaron muestras de aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca como se aprecian en la tabla 9 y fueron analizadas para la determinación de los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos mediante un multiparámetro de calidad de agua (OAKTON PCD650), asimismo, fueron almacenadas en un culer refrigerado y trasladadas al laboratorio para su tratamiento.

A fin conocer la concentración del arsénico antes del tratamiento, las muestras fueron enviadas a Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L. Las pruebas de aplicación se realizaron en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), donde las muestras de aguas contaminadas con arsénico fueron tratadas mediante la adsorción en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, considerando los factores óptimos determinados en las pruebas de adsorción detalladas anteriormente. Para la determinación de la concentración de arsénico en agua después de los tratamientos las muestras se enviaron a Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.

Tabla 9

Puntos de muestreo de las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca

Código de campo	Coordenadas UTM Este / Norte	Ubicación	Profundidad
MA 01	0380469 – 8283594	Parque Industrial Taparachi – Salida Puno	6 m
MA 02	0382275 – 8291808	Urbanización Santa Fé – Salida Huancané	10 m
MA 03	0377340 - 8291779	Urbanización Escuri Koriwata – Salida Cusco	13 m

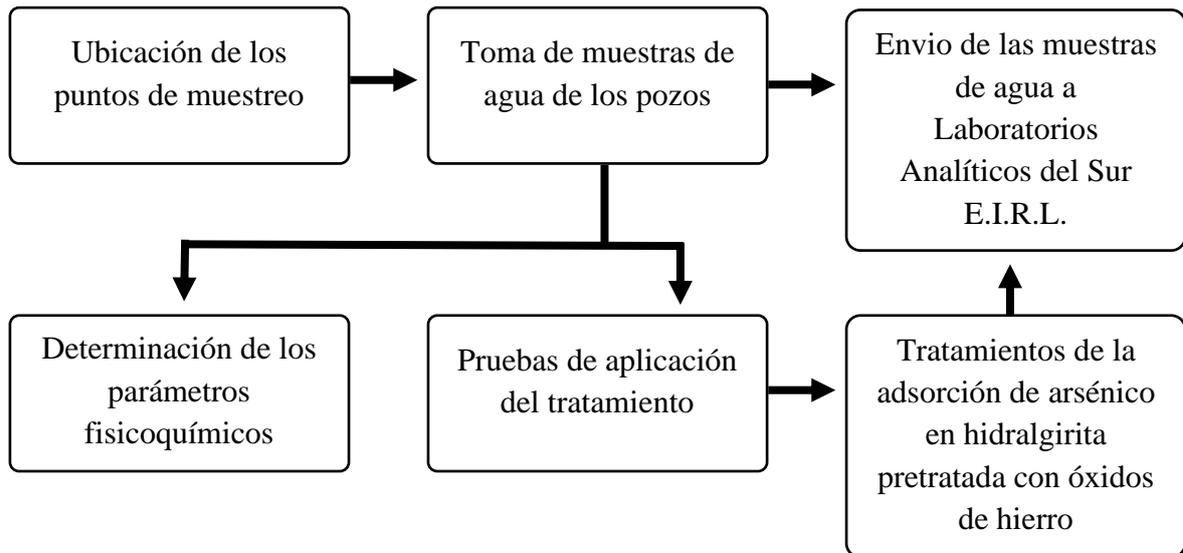


Figura 13: Diagrama de flujo de las pruebas de aplicación del tratamiento de adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

3.9. Proceso del diseño experimental y análisis de datos

3.9.1. Diseño experimental

Para el diseño de experimentos se siguió la metodología de superficie de respuesta (Gutiérrez & Vara, 2012; Montgomery, 2004).

a. Metodología de superficie de respuesta (MSR)

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que se utilizan en el estudio de la relación entre una o más respuestas y un conjunto de factores o variables independientes y donde el objetivo es optimizar ésta(s) respuesta(s). Esta metodología permite al investigador inspeccionar una respuesta, que se puede mostrar como una superficie (Figuroa, 2003; Montgomery, 2004).

En busca del punto óptimo para determinar la máxima adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, se siguió la metodología de superficie de respuesta, para lo cual, Gutiérrez y Vara (2012) distingue tres etapas:

- **Cribado**

Dado que en la presente investigación se tienen cuatro factores no se consideró esta etapa inicial de la optimización del proceso, ya que para el cribado se debe tener muchos factores ($k > 6$) que pueden influir en la variable respuesta (Gutiérrez & Vara, 2012).

- **Búsqueda de primer orden:**

Etapa de la metodología de superficie de respuesta donde se utiliza un diseño – modelo de primer orden para caracterizar de manera preliminar la superficie y detectar curvatura. Es aplicable cuando se posee pocos factores ($k \leq 5$) y se sabe que estos influyen en la variable respuesta (Gutiérrez & Vara, 2012).

Si la variable respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la representación matemática es el modelo MSR de primer orden, que está dada por la siguiente ecuación (Montgomery, 2004):

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \quad (15)$$

Donde:

y : Respuesta del modelo

β_0 : Constante del modelo

β_k : Coeficientes de los factores

x_k : Factores

ε : error o ruido observado en la respuesta y

Para determinar la influencia de los factores en la eficiencia de adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro y detectar la presencia de curvatura en la superficie de respuesta, se estableció un diseño factorial completo 2^4 con 4 puntos centrales. Para el diseño de experimentos se utilizó el software JMP® Pro 14. Los niveles de los factores cuantitativos del diseño de experimentos ingresados en el software se muestran en la tabla 10.

Tabla 10*Niveles de los factores cuantitativos*

Símbolo matemático	Factores cuantitativos	Niveles		
		-1	0	1
x_1	Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	40	220	400
x_2	Arsénico (V) inicial (mg/L)	0.05	0.275	0.5
x_3	pH	5	7	9
x_4	Tiempo de contacto (minutos)	5	32.5	60

- Búsqueda de segundo orden:

Si el modelo de primer orden no describe adecuadamente a los datos, se pasa a un modelo de segundo orden para describir además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura, para lo cual se estableció un diseño central compuesto 2^2 con 4 puntos axiales centrada sobre las caras y 5 puntos centrales. Los límites y niveles de los factores cuantitativos del diseño de experimentos ingresados en el software se muestran en la tabla 11 y tabla 12 respectivamente.

Los diseños centrales compuestos son diseños de tratamientos factoriales 2^k con $2k$ combinaciones adicionales llamadas puntos axiales y n_0 puntos centrales (Gutiérrez & Vara, 2012).

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (16)$$

Donde:

N : número de experimentos

k : número de factores

n_0 : número de puntos centrales

En la presente investigación el número de experimentos fue 13, de acuerdo a la ecuación (18):

$$N = 2^2 + 2(2) + 5$$

$$N = 13$$

La representación matemática del modelo MSR de segundo orden está dada por la siguiente ecuación (Figueroa, 2003; Montgomery, 2004).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (17)$$

Donde:

y : Respuesta del modelo

β_0 : Constante del modelo

β_i : Coeficientes de los factores

x_i : Factores

ε : error o ruido observado en la respuesta y

Tabla 11

Límites de los factores cuantitativos del diseño de experimentos

Factores cuantitativos		Condiciones	
Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	Arsénico (V) inicial (mg/L)	Variable respuesta y	MSR 5 puntos centrales
40	0.05	% de ads.	Valor axial ($\alpha = 1$)
400	0.5	Maximizar	Centrada sobre las caras

Tabla 12

Niveles de los factores cuantitativos

Símbolo matemático	Factores cuantitativos	Niveles				
		$\alpha = -1$	-1	0	1	$\alpha = 1$
x_1	Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	40	40	220	400	400
x_2	Arsénico (V) inicial (mg/L)	0.05	0.05	0.275	0.5	0.5

3.9.2. Pruebas estadísticas

a. Análisis de la varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza es la técnica central en el análisis de datos experimentales, consiste en separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuye a la misma (Gutiérrez & Vara, 2012). Esta prueba estadística se utilizó para analizar los datos de los experimentos en las etapas ya mencionadas con el fin de determinar la significancia de los factores estudiados.

b. Verificación de supuestos del modelo

Para la validez de los resultados obtenidos en el análisis de la varianza en las diferentes etapas de la presente investigación se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo, estos son: normalidad, varianza constante (homocedasticidad) e independencia. Con el fin asegurar que se cumplan los supuestos del modelo mencionados se aplicó principios básicos en el diseño de experimentos: repetición, aleatorización y bloqueo (Gutiérrez & Vara, 2012).

Las pruebas estadísticas que se utilizaron para determinar distribución normal, varianzas homogéneas e independencia fueron Shapiro-Wilk, Levene y Durbin-Watson respectivamente.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros fisicoquímicos y composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro

4.1.1. Parámetros fisicoquímicos de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos se muestran en la tabla 13, en el cual se aprecian que para la hidralgirita natural el pH, conductividad eléctrica, humedad, textura y color determinados son 6.85, 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5.63 %, arcilloso y blanco respectivamente; asimismo, para la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro el pH, conductividad eléctrica, humedad, textura y color determinados son 3.92, 355 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3.79 %, franco – arcillo – limoso y rojo respectivamente.

Tabla 13

Parámetros fisicoquímicos de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro

Parámetros fisicoquímicos	Hidralgirita	
	Natural	Pretratada con óxidos de hierro
pH	6.85	3.92
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	70	355
Humedad (%)	5.63	3.79
Textura	Arcilloso	Franco – arcillo – limoso
Color (Seco)	5YR 8/1 Blanco	10R 5/8 Rojo

Los parámetros fisicoquímicos determinados por Guerrero (2019) respecto al pH y humedad determinados en la hidralgirita natural son 6 y 7.78 % respectivamente, para Roque (2019) el pH y color determinados en la hidralgirita natural proveniente

de Azángaro son 6.93 y gris claro respectivamente, para Fernández y Aranibar (2016) el pH y la conductividad eléctrica en la hidralgiritita natural proveniente de Azángaro son de 6.92 y 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, dichas diferencias con la presente investigación se debería a que los autores tomaron la muestra de hidralgiritita en una época y lugar distinto, ya que en la región de Puno existen varios yacimientos ubicados en distintas zonas, así como lo menciona Aranibar (2012).

4.1.2. Composición química de la hidralgiritita natural y pretratada con óxidos de hierro

a. Expresado como elementos

La composición química expresado como elementos fue determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (anexo 6 y anexo 7), los resultados se muestran la tabla 14 y figura 14, donde se observa que para la hidralgiritita natural el mayor y menor componente químico son los elementos silicio (Si) con un valor de 54.66 % y el manganeso (Mn) con un valor de 0.07 % respectivamente, por otro lado, el elemento hierro (Fe) determinado es de 6.39 % de composición. Para la hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro se observa que el mayor y menor componente químico son los elementos silicio (Si) con un valor de 35.06 % y el zinc (Zn) con un valor de 0.09 % respectivamente, por otro lado, el elemento hierro (Fe) determinado es de 31.71 % de composición.

Asimismo, en la tabla 14 se aprecia que la hidralgiritita natural después del pretratamiento con óxidos de hierro experimenta una variación en su composición química, en el cual existen elementos que incrementan y disminuyen, donde se destaca que el hierro (Fe) incrementa en un 25.32%, con lo que se afirma que el pretratamiento mejora la presencia del hierro en la hidralgiritita y por tanto incrementaría la eficiencia de adsorción de arsénico presente en el agua, ya que según D'Ambrosio (2005) y Mondal et al.(2013) sustratos ricos en hierro adsorben el arsénico en agua.

Tabla 14

Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como elementos

Elementos	Hidralgirita		Diferencia (%)
	Natural (%) ^a	Pretratada con óxidos de hierro (%) ^a	
Silicio (Si)	54.66	35.06	-19.60
Aluminio (Al)	26.34	19.05	-7.29
Hierro (Fe)	6.39	31.71	25.32
Potasio (K)	5.96	3.39	-2.57
Magnesio (Mg)	3.30	0	-3.30
Titanio (Ti)	1.30	0.82	-0.48
Calcio (Ca)	1.07	0.61	-0.46
Azufre (S)	0.63	0.85	-0.22
Fósforo (P)	0.28	0	-0.28
Manganeso (Mn)	0.07	0	-0.7
Cloruro (Cl ⁻)	0	8.43	8.43
Zinc (Zn)	0	0.09	0.09

Nota. ^a Determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.

Para Tapia (2017), la composición química determinada en la hidralgirita natural proveniente de Azángaro, indica que el mayor y menor componente químico son los elementos silicio (Si) con un valor de 54.176 % y el zinc (Zn) con un valor de 0.062 % respectivamente, por otro lado, el elemento hierro (Fe) determinado es de 1.422 % de composición, dichas diferencias respecto a la presente investigación se debería a que el autor tomó la muestra en una época y lugar distinto, ya que dependiendo del lugar la composición química de los elementos son diferentes, así como lo indica Roque (2017).

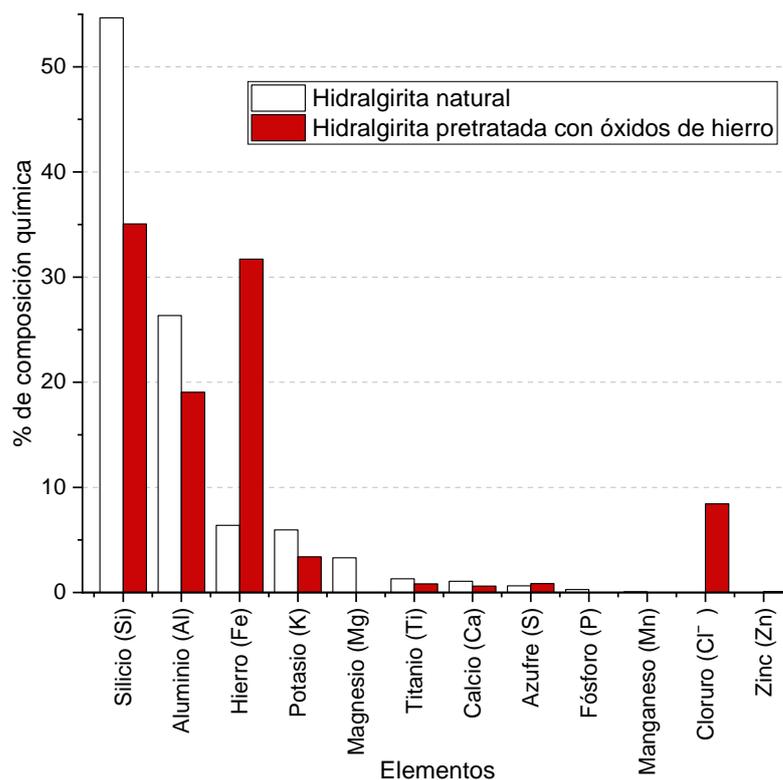


Figura 14: Composición química de la hidralginita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como elementos.

b. Expresado como óxidos

La composición química expresado como óxidos fue determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (anexo 6 y anexo 7), los resultados se observan en la tabla 15 y figura 15, donde se aprecia que para la hidralginita natural el mayor y menor componente químico son el óxido de aluminio (Al_2O_3) con un valor de 40.21 % y el óxido de azufre (SO_3) con un valor de 0.05 % respectivamente, por otro lado, el óxido de hierro determinado es de 4.64 % de composición. Para la hidralginita pretratada con óxidos de hierro se observa que el mayor y menor componente químico es el óxido de aluminio (Al_2O_3) con un valor de 32.08 % y el óxido de zinc (ZnO) con un valor de 0.03 % respectivamente, por otro lado, el óxido de hierro (Fe_2O_3) determinado es de 28.25 % de composición.

Tabla 15

Composición química de la hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como óxidos

Óxidos	Hidralgirita		Diferencia (%)
	Natural (%) ^a	Pretratada con óxidos de hierro (%) ^a	
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	40.21	32.08	-8.13
Óxido de silicio (SiO ₂)	38.11	31.10	-7.01
Óxido de potasio (K ₂ O)	10.13	7.42	-2.71
Óxido de magnesio (MgO)	5.48	0	-5.48
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	4.64	28.25	23.61
Óxido de titanio (TiO ₂)	0.67	0.53	-0.14
Óxido de calcio (CaO)	0.41	0.30	-0.11
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0.26	0	-0.26
Óxido de manganeso (MnO)	0.05	0	-0.05
Óxido de azufre (SO ₃)	0.05	0.09	0.04
Cloruro (Cl ⁻)	0	0.20	0.20
Óxido de zinc (ZnO)	0	0.03	0.03

Nota. ^a Determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.

Asimismo, en la tabla 15 se observa que la hidralgirita natural después del pretratamiento con óxidos de hierro experimenta una variación en su composición química, en el cual existen óxidos que se incrementan y en su mayoría disminuyen, donde se destaca que el óxido de hierro (Fe₂O₃) incrementa en un 23.61 % con lo que se afirma que el pretratamiento mejora la presencia del óxido de hierro (Fe₂O₃) y por tanto incrementaría la eficiencia de adsorción de arsénico presente en el agua, ya que se han demostrado de que la aplicación de óxidos de hierro remueven el arsénico del agua (Mondal et al., 2013; Thakur & Armstrong, 2021; Yadav et al., 2021).

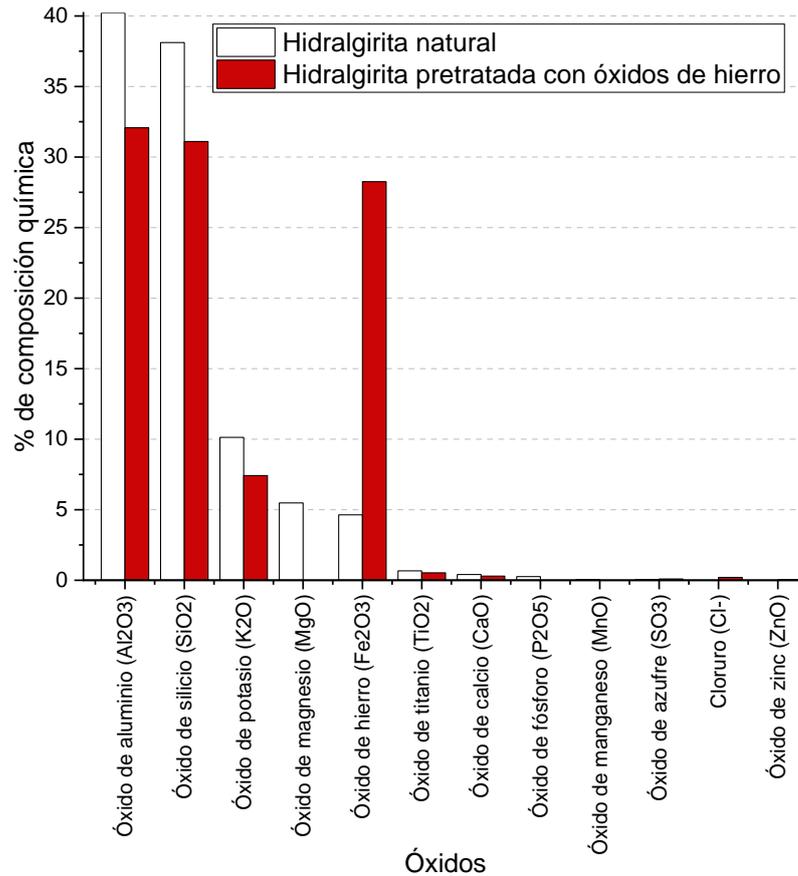


Figura 15: Composición química de la hidralginita natural y pretratada con óxidos de hierro expresado como compuestos.

4.2. Efectos de la dosis de hidralginita pretratada con óxidos de hierro, concentración inicial de arsénico (V), pH y tiempo de contacto en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en hidralginita pretratada con óxidos de hierro en agua

Los efectos de los factores en la adsorción de arsénico (V) en hidralginita pretratada con óxidos de hierro en agua, se evaluaron utilizando la metodología de superficie de respuesta, donde a través de las etapas de búsqueda de primer y segundo orden se experimentaron aplicando diferentes niveles en los factores como se observa en el diseño de experimentos de la tabla 26 y tabla 28 respectivamente. El análisis de la varianza mostró un mejor ajuste del modelo para los datos experimentales de la etapa de búsqueda de II orden (R^2 : 95.85% y $R^2_{(aj)}$: 92.89%) que la etapa de búsqueda de I orden (R^2 : 80.58% y $R^2_{(aj)}$: 75.40%) como se aprecia en la tabla 27 y tabla 30 respectivamente.

4.2.1. Efecto de la dosis de hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro

El efecto de la dosis del adsorbente en la adsorción de arsénico (V) se evaluó a través de experimentos aplicando diferentes contenidos de peso (10, 155 y 300 g/L) en las etapas de búsqueda primer y segundo orden como se observa en el diseño de experimentos de la tabla 26 y tabla 28 respectivamente. El análisis de la varianza con un nivel de significancia del 5% en ambas etapas mostró que la dosis de adsorbente tiene un efecto significativo en la eficiencia adsorción del As (V) como se muestran en la tabla 27 y tabla 30. Al incrementar gradualmente la dosis de adsorbente de 10 a 155 y 300 g/L se observó una disminución de la eficiencia de adsorción de As (V), es decir que existe en un efecto inversamente proporcional como se aprecia en la figura 16 y figura 20 a y b, dicha disminución de la eficiencia podría atribuirse a la sobresaturación del adsorbente haciendo que el contacto con el oxianión arseniato a través de la agitación sea más complicada.

Los resultados de la presente investigación están en relación a lo determinado por Mejía et al. (2009) y Tapia (2017) que utilizaron como adsorbente a la zeolita pretratada con óxidos de magnesio y la hidralgiritita natural respectivamente encontrando que las dosis de estos adsorbentes tienen un efecto significativo en la eficiencia de adsorción del arsénico. Por otro lado, Ayub et al. (2020) y Thakur y Armstrong (2021) utilizando perlas magnéticas de quitosano y microesferas de geopolimero recubiertas con óxido de hierro respectivamente determinaron que la dosis de adsorbente es directamente proporcional a la eficiencia de adsorción, lo que difiere de la presente investigación, ello se debería a la naturaleza de la composición química del adsorbente y a las cantidades de las dosis que utilizaron los autores en los experimentos.

Considerando los datos experimentales de la etapa de búsqueda de II orden de la tabla 28 que mostró un mejor ajuste del modelo en el ANOVA (R^2 : 95.85% y $R^2_{(aj)}$: 92.89%), se destaca que con dosis de adsorbente de 10 g/L se obtuvieron los mejores tratamientos mostrando eficiencias de adsorción de As (V) del 99.06, 98.15 y 93.20 % para concentraciones iniciales de As (V) de 0.5, 0.275 y 0.05 mg/L respectivamente, esto bajo un pH, tiempo de contacto y temperatura de 7, 60 minutos y 25 °C respectivamente, como se observa en figura 16. Las dosis óptimas del adsorbente donde se alcanzan teóricamente eficiencias de adsorción de As (V) de hasta el 100% se muestran en la figura 17 y figura 18.

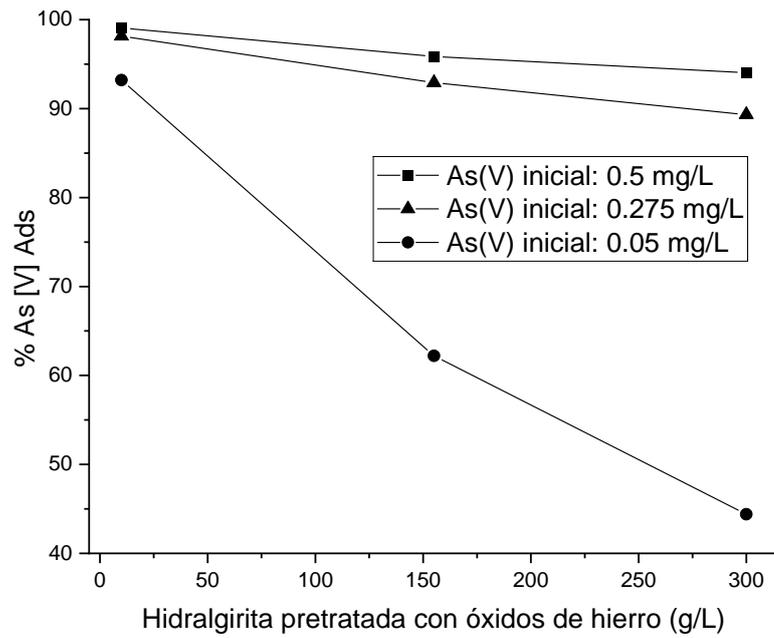


Figura 16: Efecto de la dosis de la hidralgita pretratada con óxidos de hierro en la adsorción del arsénico (V); pH 7; tiempo de contacto 60 minutos y temperatura 25 °C.

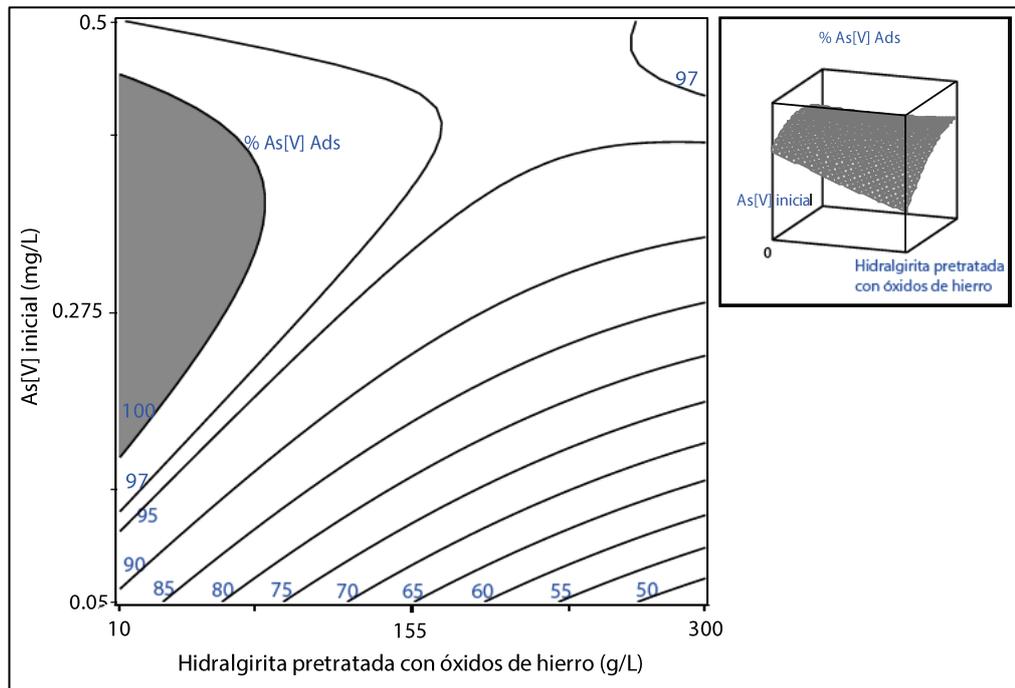


Figura 17: Perfil de contorno de la eficiencia de adsorción de arsénico (V).

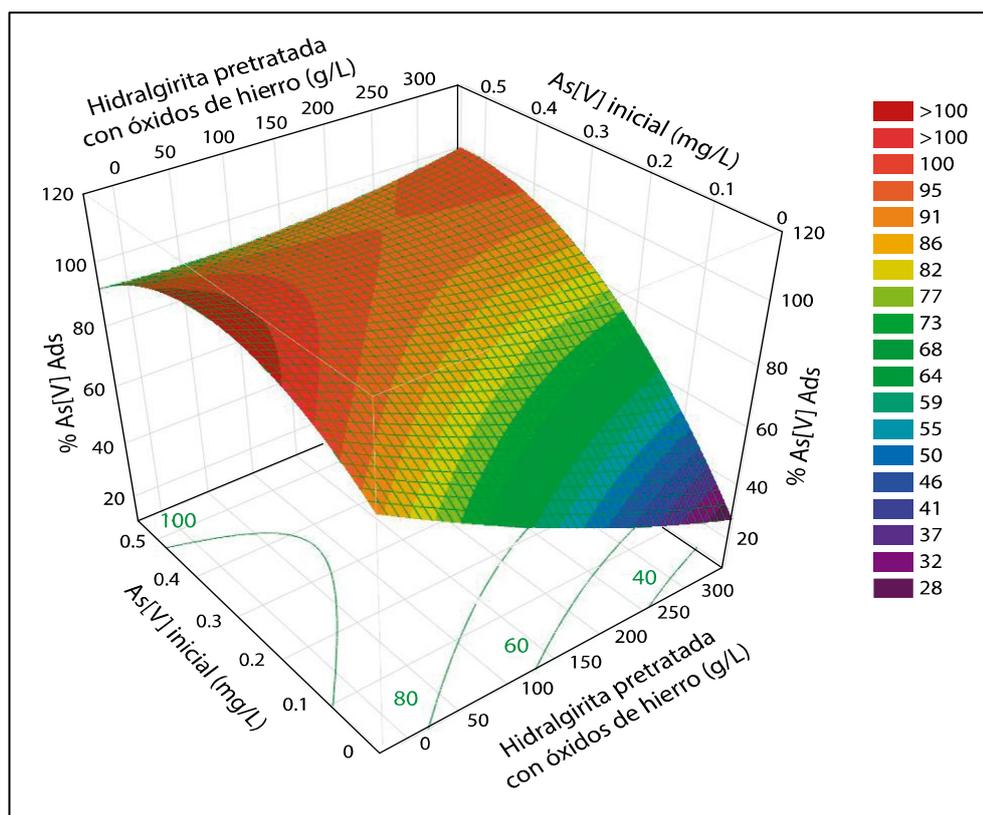


Figura 18: Superficie de respuesta de la eficiencia de adsorción de arsénico (V).

4.2.2. Efecto de la concentración inicial de arsénico (V)

La concentración inicial de arsénico (V) de acuerdo al análisis de la varianza con un nivel de significancia del 5% tuvo un efecto significativo en la eficiencia de adsorción de arsénico (V) en las etapas de búsqueda de primer y segundo orden como se observa en la tabla 26 y tabla 28 respectivamente, por lo que se considera un factor muy importante en el proceso de adsorción. El efecto del arsénico (V) inicial se evaluó aplicando concentraciones en el rango de 0.05, 0.275 y 0.05 mg/L, donde al aumentar gradualmente la concentración inicial de As (V) se observó un incremento en la eficiencia de adsorción, es decir que existe un efecto directamente proporcional como se observa en la figura 19 y figura 20 a y b, dicho incremento favorable podría estar asociada a la alta disponibilidad del oxianión arseniato por unidad de masa del adsorbente (Ayub et al., 2020).

Ayub et al. (2020) y Mejía et al. (2009) utilizando los adsorbentes de perlas magnéticas de quitosano y zeolita pretratada con óxidos de hierro respectivamente determinaron que la concentración inicial de arsénico tuvo un efecto significativo y directamente proporcional en la eficiencia de adsorción, estando en relación con

la presente investigación. Sin embargo, Thakur y Armstrong (2021) utilizando como adsorbente las microesferas de geopolimero recubiertas con óxido de hierro determinó que la concentración inicial de arsénico tuvo un efecto inversamente proporcional en la eficiencia de adsorción, dicha diferencia en relación a la presente investigación se justifica en que la cantidad de adsorbato que se puede adsorber se fija para una determinada cantidad de adsorbente.

Considerando los datos experimentales de la etapa de búsqueda de II orden de la tabla 28 que mostró un mejor ajuste del modelo en el ANOVA (R^2 : 95.85% y $R^2_{(aj)}$: 92.89), se destaca que con una concentración inicial de arsénico (V) de 0.5 mg/L se obtuvieron los mejores tratamientos mostrando eficiencias de adsorción de As (V) del 99.06, 95.86 y 94.02 % para dosis de adsorbente de 10, 155 y 300 g/L respectivamente, esto bajo un pH, tiempo de contacto y temperatura de 7, 60 minutos y 25 °C respectivamente, como se observa en figura 19. Las concentraciones iniciales de As (V) óptimas en interacción con las dosis de adsorbente donde se alcanza teóricamente eficiencias de adsorción de As (V) hasta del 100% se muestran en el perfil de contornos y la superficie de respuesta de la figura 17 y figura 18 respectivamente.

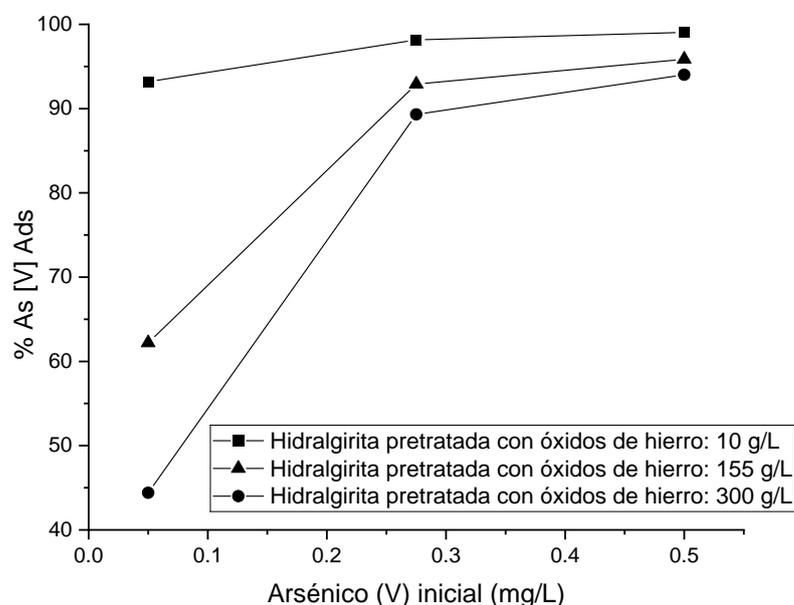


Figura 19: Efecto de la concentración de arsénico (V) inicial en la eficiencia de adsorción del arsénico (V); pH 7; tiempo de contacto 60 minutos y temperatura 25 °C.

4.2.3. Efecto del pH

El pH es un factor importante en el proceso de adsorción, ya que afecta a la especiación del arsénico y la carga superficial del adsorbente (Wang et al., 2014). El efecto del pH en la adsorción de arsénico (V) se evaluó a través de experimentos como se observa en la tabla 26 en diferentes rangos de 5, 7 y 9. El análisis de la varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que el pH no tiene efecto significativo en la eficiencia de adsorción del As (V) como se aprecia en la tabla 27. A medida que el pH aumenta de 5 a 9 se observó una ligera tendencia creciente en la eficiencia de adsorción de As (V) como se observa en la figura 20 a, esto podría explicarse en base a la afinidad del adsorbente por la presencia de diferentes especies de As (V) en los niveles cambiantes del pH, donde normalmente en medios acuosos se presenta como una especie con carga negativa, encontrándose en el rango de pH de 3 a 6 como H_2AsO_4^- , mientras que la especie HAsO_4^{2-} predomina en el rango de pH de 8 a 10.5. En la zona intermedia en el rango de pH de 6 a 8 coexisten ambas especies (Wang et al., 2014).

La adsorción de As (V) en el adsorbente podría deberse a la interacción electrostática entre el arseniato de carga negativa y el adsorbente de carga positiva (Ayub et al., 2020). El adsorbente utilizado en los experimentos presentó un pH ácido como se muestra en la tabla 13, lo que de alguna manera dependiendo de la dosis de adsorbente influyó ligeramente en la disminución del pH del agua creando un medio relativamente ácido durante el proceso de adsorción.

Lo determinado en la presente investigación está en relación a lo que indican Das et al. (2020) y Mejía et al. (2009) que utilizaron como adsorbente nanohíbrido de hierro de óxido de grafeno y zeolita pretratada con óxidos de magnesio respectivamente, donde encontraron que el pH no tiene un efecto significativo en la eficiencia de adsorción del arsénico. Sin embargo, Thakur y Armstrong (2020) y Tapia (2017) utilizando los adsorbentes de microesferas de geopolímero recubiertas de óxido de hierro y hidralginita natural respectivamente determinaron que el pH tiene un efecto significativo en la eficiencia de adsorción del arsénico, dicha diferencia en comparación al presente estudio se debería a la naturaleza de la composición química del adsorbente y a los factores de experimentación.

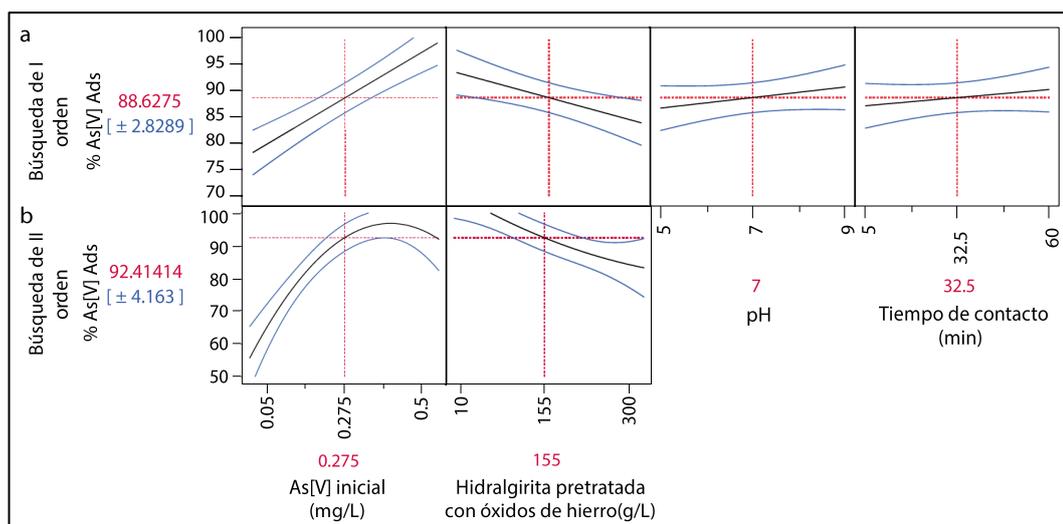


Figura 20: a) Perfilador de predicción de los efectos de los factores en la eficiencia de adsorción de As (V) en la búsqueda de primer orden; b) Perfilador de predicción de los efectos de los factores en la eficiencia de adsorción de As (V) en la búsqueda de segundo orden.

4.2.4. Efecto del tiempo de contacto

El efecto del tiempo de contacto en la adsorción de arsénico (V) se evaluó mediante experimentos como se observa en la tabla 26, en diferentes rangos de 5, 32.5 y 60 minutos. El análisis de la varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que el tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la eficiencia de adsorción del As (V) como se muestra en la tabla 27. A medida que aumenta el tiempo de contacto de 5 a 60 minutos se observó una ligera tendencia creciente en la eficiencia de adsorción de As (V) como se observa en la figura 20 a, dicha tendencia de incremento podría estar asociada en que a mayor tiempo de contacto existe mayor probabilidad de interacción entre el arseniato y el adsorbente, sin embargo se considera que la cinética de adsorción es rápida así como se observa en la tabla 20 y figura 22 a.

Tapia (2017), utilizando hidralgirita natural como adsorbente encontró que el tiempo de contacto tiene un efecto directamente proporcional, por otro lado, Mejia et al. (2009), utilizando zeolita pretratada con óxidos de hierro determinó que el tiempo de contacto no tuvo un efecto significativo en la eficiencia de adsorción de arsénico, ambas investigaciones están en relación a la presente investigación.

Tabla 16*Comparación de la eficiencia máxima de adsorción de arsénico (V) con otros estudios*

Adsorbente	Dosis de adsorbente (g/L)	Concentración inicial de arsénico (V) (mg/L)	pH	Tiempo de contacto (min)	%As (V) Ads máx.	Referencia
Microesferas de geopolímero recubiertas con óxido de hierro	10	0.5	-	60	100%	Thakur y Armstrong (2021)
Perlas magnéticas de quitosano	1.5	10	6.7	-	99.50%	Ayub, et al. (2020)
Nanohíbrido de hierro de óxido de grafeno	0.25	0.1	-	<10	>99%	Das, et al. (2020)
Hidralgirita natural (experimentación con arsénico total)	2	0.05	7.5	70	84%	Tapia (2017)
Zeolita pretratada con óxidos de magnesio	400	0.5	9	5	98.69%	Mejía, et al. (2009)
Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro	10	0.5	7	60	99.06%	Estudio actual

4.3. Isoterma y modelo cinético de adsorción que describe mejor a los datos experimentales

4.3.1. Isoterma de adsorción

Para comprender el mecanismo de adsorción de unión del As (V) y el adsorbente (hidralgirita pretratada con óxidos de hierro) se estudiaron las isotermas de adsorción que brindan información sobre la capacidad de adsorción, la afinidad de unión y las propiedades superficiales del adsorbente. En la presente investigación se utilizaron los modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin como se observa en la figura 21 b, c y d respectivamente. La isoterma de Langmuir describe la adsorción en monocapa del adsorbato en la superficie del adsorbente que tiene un número finito de sitios de adsorción, mientras que la isoterma de Freundlich indica que la adsorción ocurre en una superficie heterogénea del adsorbente y la isoterma de Temkin indica que el calor de adsorción disminuye en forma lineal con la cobertura debido a la interacción entre el adsorbente y el adsorbato (Sierra et al., 2020).

Los datos experimentales y resultados se presentan en la tabla 17 (resultados calculados a partir del anexo 11), asimismo, los datos de las coordenadas para el ajuste y parámetros de las isothermas de adsorción se presentan en la tabla 18 y tabla 19 respectivamente. En la tabla 19 se observa que los datos experimentales se ajustaron de mejor forma a la isoterma de Langmuir, ya que el valor del coeficiente de regresión lineal ($R^2 = 0.9535$) de esta isoterma fue mayor que la isoterma de Freundlich ($R^2 = 0.8557$) y Temkin ($R^2 = 0.5637$), con lo que se verifica que la adsorción del As (V) ocurre en una superficie del adsorbente (hidralgirita pretratada con óxidos de hierro) que está conformada por sitios activos que son energéticamente homogéneos debido a que los sitios de adsorción únicamente pueden adsorber un oxianión de As(V) y la adsorción ocurre hasta formar una monocapa en cuyo momento finaliza la adsorción.

Un parámetro importante a destacar en la isoterma de Langmuir es el factor de separación (R_L), constante adimensional indica la posibilidad de adsorción favorable ($0 < R_L < 1$), desfavorable ($R_L > 1$), lineal ($R_L = 1$) o irreversible ($R_L = 0$). En la tabla 19 se aprecia que el valor de R_L determinado fue -0.0712 , este cálculo negativo indicaría la existencia de algunos datos experimentales que describieron un proceso de desorción, por lo que no se pudo concluir si la adsorción es favorable, desfavorable, lineal o irreversible.

Tabla 17

Datos experimentales para el ajuste a las isothermas de adsorción

Tratamiento	Masa de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro (W) (g)	Concentración inicial de As[V] (C_i) (mg/L)	Concentración en equilibrio de As[V] (C_e) (mg/L)	Capacidad de adsorción (q_e) (mg/g)	%As[V] Ads
1	0.5	0.05	0.0035	0.0093	93.00
2	1	0.05	0.0034	0.0047	93.20
3	3	0.05	0.0047	0.0015	90.60
4	5	0.05	0.0069	0.0009	86.20
5	8	0.05	0.0115	0.0005	77.00

Tabla 18

Datos de los ejes de las abscisas (x) y ordenadas (y) para el ajuste a los isotermas de adsorción

Tratamiento	Langmuir		Freundlich		Temkin	
	x	y	x	y	x	y
	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$	$\ln C_e$	q_e
1	285.714	107.527	-2.456	-2.032	-5.6550	0.0093
2	294.118	214.592	-2.469	-2.332	-5.6840	0.0047
3	212.766	662.252	-2.328	-2.821	-5.3602	0.0015
4	144.928	1160.093	-2.161	-3.064	-4.9762	0.0009
5	86.957	2077.922	-1.939	-3.318	-4.4654	0.0005

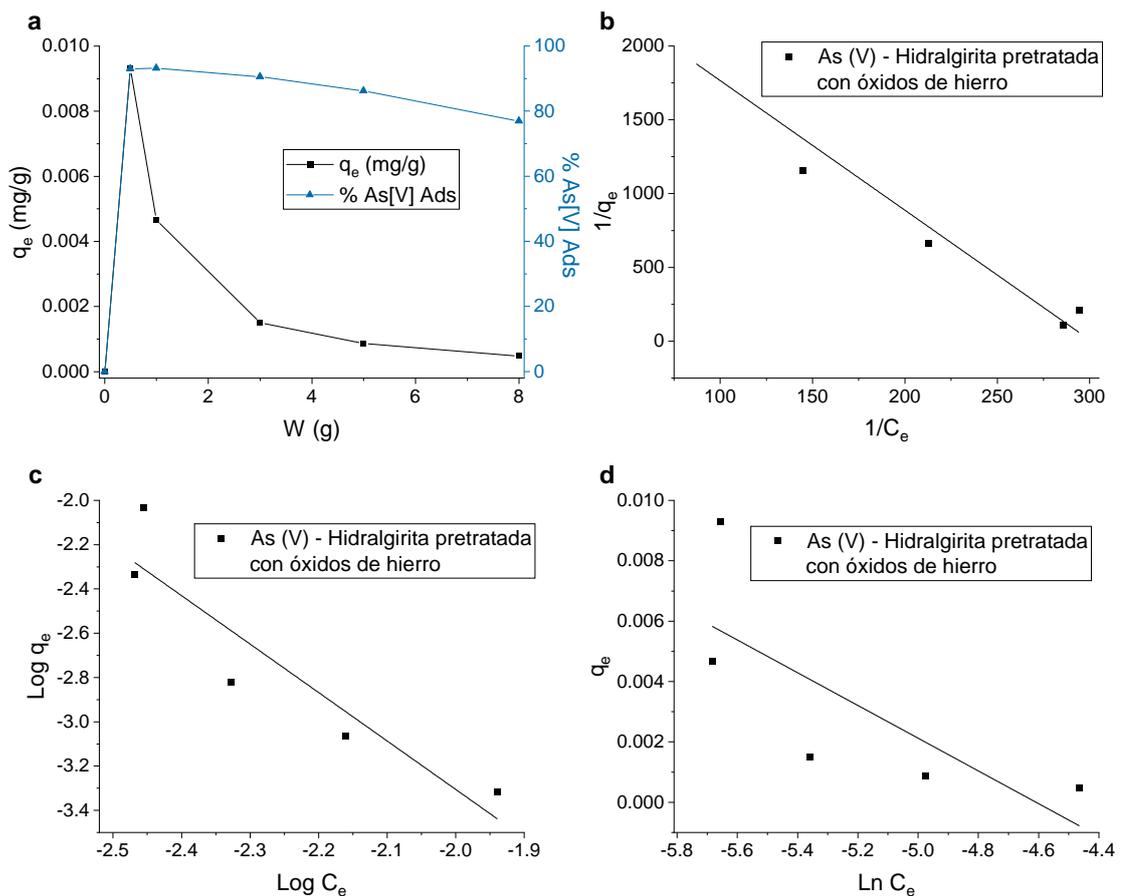


Figura 21: a) Efecto de la masa del adsorbente en la capacidad y eficiencia de adsorción; b) Isoterma de Langmuir; c) Isoterma de Freundlich; d) Isoterma de Temkin.

Tabla 19*Parámetros de las isothermas para la adsorción de arsénico (V)*

Modelo de isoterma	Parámetros	As (V) – Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro
Langmuir	q_{\max} (mg/g)	0.0004
	K_L (L/mg)	-301.0425
	R_L	-0.0712
	R^2	0.9535
Freundlich	K_f	2E-08
	1/n	-2.1878
	R^2	0.8557
Temkin	BT (J/mol)	-0.0054
	KT(L/mg)	100.5546
	R^2	0.5637

4.3.2. Cinética de adsorción

Los datos experimentales y resultados para el ajuste a los modelos de cinética de adsorción se presentan en la tabla 20 (resultados calculados a partir del anexo 12) donde se aprecia que en los primeros 2 minutos ocurre una rápida adsorción de As (V), llegando al equilibrio en 60 minutos como se observa también la figura 22 a. El comportamiento de cinética rápida observado indica que el proceso de adsorción del As (V) dependía de los sitios de unión disponibles en el adsorbente (hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro). Para comprender la cinética de adsorción y sus parámetros se estudiaron los modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden.

Los datos de las coordenadas para el ajuste a los modelos cinéticos se observan en la tabla 21 y los resultados de dicho ajuste se observan en la tabla 22 y figura 22, del cual el modelo de pseudo segundo orden fue el mejor modelo que describió la cinética de adsorción del As (V) en el adsorbente, ya que el valor del coeficiente de regresión lineal ($R^2 = 0.99$) de este modelo cinético fue mayor que el modelo de pseudo primer orden ($R^2 = 0.48$), por tanto, se verifica que los sitios de adsorción y la especiación del arsénico en el medio influyen en la reacción y su interacción es el paso limitante de la velocidad, esto sugiere que la adsorción de arsénico en la

hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro se da a través de un mecanismo de adsorción química (Ilahi et al., 2020).

Tabla 20

Datos experimentales para el ajuste a los modelos de cinética de adsorción

Tratamiento	Tiempo (t) (min)	Concentración inicial de As[V] (C_i) (mg/L)	Concentración en equilibrio de As[V] (C_e) (mg/L)	Capacidad de adsorción (q_e) (mg/g)	%As[V] Ads
1	2	0.05	0.0049	0.0045	90.20
2	5	0.05	0.0036	0.0046	92.80
3	20	0.05	0.0042	0.0046	91.60
4	60	0.05	0.0033	0.0047	93.40
5	120	0.05	0.0034	0.0047	93.20

Tabla 21

Datos de los ejes de las abscisas (x) y ordenadas (y) para el ajuste a los modelos de cinética de adsorción

Tratamiento	Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden	
	x	y	x	y
	tiempo	$\ln(q_e - q_t)$	tiempo	t/q_t
1	2	-8.568	2	443.46
2	5	-9.721	5	1077.59
3	20	-9.028	20	4366.81
4	60	-10.414	60	12847.97
5	120	-10.127	120	25751.07

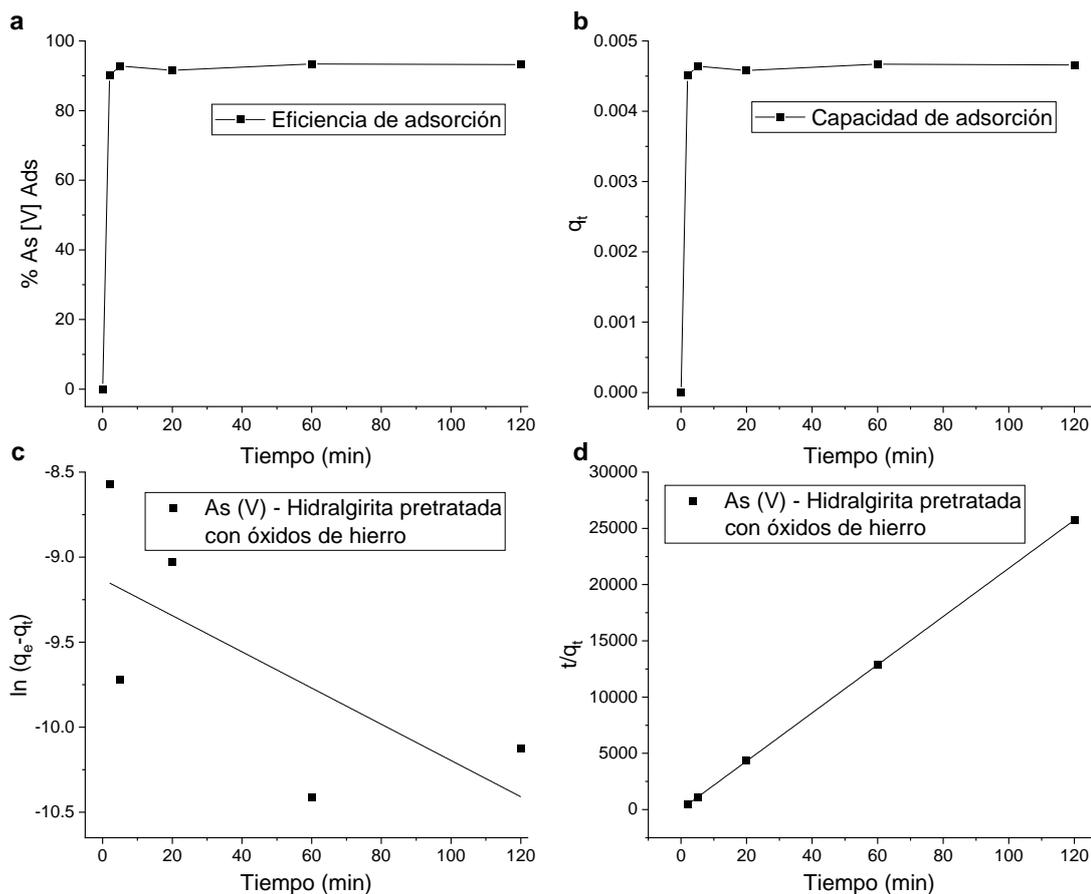


Figura 22: a) Efecto del tiempo eficiencia de adsorción; b) Efecto del tiempo en la capacidad de adsorción; c) Modelo cinético de pseudo primer orden; d) Modelo cinético de pseudo segundo orden.

Tabla 22

Parámetros de los modelos cinéticos para la adsorción de arsénico (V)

Modelo cinético	Parámetros	As (V) – Hidralginita pretratada con óxidos de hierro
Pseudo primer orden	q_e (mg/L)	0.0001
	K_1 (min^{-1})	-8.88E-05
	R^2	0.4775
Pseudo segundo orden	q_e (mg/L)	0.0047
	K_2 (g/mg.min)	1821.1888
	R^2	0.9999

4.4. Eficiencia de adsorción de arsénico en hidralgirita pretratada con óxidos de hierro en las pruebas de aplicación de las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca

4.4.1. Parámetros fisicoquímicos

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de las muestras tomadas de las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca se muestran en la tabla 23, donde se observa que el pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos para el punto de muestreo de la salida Puno son 7.45, 13.2 °C, 985 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 467 ppm respectivamente; para el punto de muestreo de la salida Huancané son 7.50, 14.5 °C, 2458 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1182 ppm respectivamente y para el punto de muestreo de la salida Cusco son 7.79, 14.6 °C, 715 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 397 ppm respectivamente.

Tabla 23

Parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas en los pozos de la ciudad de Juliaca

Parámetros fisicoquímicos	Salida Puno	Salida Huancané	Salida Cusco
pH	7.45	7.50	7.79
Temperatura (C°)	13.2	14.5	14.6
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	985	2458	715
Sólidos totales disueltos (ppm)	467	1182	397

La tabla 23 muestra resultados donde el pH que se encuentran dentro de los valores permitidos por la OMS (6.5 – 8.5) respecto de los puntos de muestreo; la conductividad eléctrica para las salidas Puno y Cusco se encuentran de los rangos permitidos por la OMS (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que para la salida Huancané supera los límites permitidos por la OMS. Los sólidos totales disueltos para las muestras de agua de las salidas Puno y Cusco se encuentran dentro de los límites máximos permisibles dada la OMS (1000 ppm), sin embargo, la muestra de agua de la salida Huancané supera este valor establecido.

4.4.2. Pruebas de aplicación

Los resultados en la tabla 24 mostraron que las concentraciones de arsénico en las muestras de aguas subterráneas de la salida Huancané (0.012 mg/L) y Cusco (0.08 mg/L) superaron los límites máximos permisibles para el arsénico en aguas de consumo humano establecido por la Organización Mundial de la Salud (0.01 mg/L) (OMS, 2011), mientras que la muestra de agua subterránea de la salida Puno se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecido por la OMS. Las altas concentraciones de arsénico pueden estar asociadas a pH altos, condiciones geoquímicas reducidas y directamente proporcional al factor profundidad (Haugen et al., 2021).

Para probar la tecnología de tratamiento propuesto en la presente investigación, se realizaron pruebas de aplicación en las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca, considerando factores óptimos encontrados en la etapa de experimentación. Las pruebas de aplicación se realizaron en muestras de aguas subterráneas de la salida Puno, Huancané y Cusco donde se obtuvieron eficiencias de adsorción de arsénico del 39.51%, 34.65% y 93.88% respectivamente como se observa en la tabla 24, asimismo se aprecia que las concentraciones en equilibrio se encuentran por debajo del límite máximo permisible de 0.01 mg/L para el arsénico en aguas de consumo humano establecido por la OMS (OMS, 2011), con lo que se afirma que la tecnología propuesta es eficiente para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico.

La eficiencia de adsorción de arsénico en aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca posiblemente fue afectada por la presencia de otros iones en el medio como Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y PO_4^{3-} , que podrían competir con el arsénico por los sitios activos del adsorbente y en gran medida afectar el rendimiento de eliminación del arsénico del agua (Ayub et al., 2020; Wang et al, 2014). Según Wang, et al. (2014) la presencia de fosfato podría causar la mayor disminución en la eficiencia de adsorción, debido a la fuerte competencia entre arsénico y el fosfato por los sitios activos de unión en el adsorbente, asimismo, ambos elementos proceden de un mismo grupo principal, por lo que la estructura molecular del ion fosfato es muy similar al ion arsénico. Un aspecto importante a considerar en el proceso de adsorción es el estado de oxidación del arsénico, puesto que para lograr eficiencias optimas es necesario la oxidación del As (III) a As (V) (Liu & Qu, 2021).

Tabla 24

Resultados de la eficiencia de adsorción en las pruebas de aplicación en las aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca

Nombre de la muestra	Factores				Arsénico en equilibrio (mg/L)	Eficiencia (%)
	Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	Arsénico Inicial (mg/L)	pH	Tiempo de contacto (min)		
Salida Puno	10	0.0081	7.45	60	0.0049	39.51
Salida Huancané	10	0.0127	7.50	60	0.0083	34.65
Salida Cusco	10	0.0800	7.79	60	0.0049	93.88

4.5. Análisis estadístico de datos

Para la presente investigación se siguió la metodología de superficie de respuesta, para lo cual se tomaron en cuenta las etapas de búsqueda de primer y segundo orden (Gutiérrez & Vara, 2012; Montgomery, 2004). Para el análisis estadístico de datos se utilizó el software JMP® Pro 14.

4.5.1. Estadísticos descriptivos

Los estadísticos descriptivos para la eficiencia de adsorción (variable respuesta) se muestran en la tabla 25, donde en la búsqueda de primer orden la media, el valor máximo y mínimo son 88.63, 99 y 62.2 mg/L respectivamente con un intervalo de confianza para la media (95%) de 94.23 y 83.03 mg/L; mientras que en la búsqueda de segundo orden la media, el valor máximo y mínimo son 87.7, 99.06 y 44.4 mg/L respectivamente con un intervalo de confianza para la media (95%) de 97.31 y 78.1 mg/L.

Tabla 25

Estadísticos descriptivos de la variable respuesta

Medidas estadísticas	Estadístico	Búsqueda de I orden	Búsqueda de II orden
Medidas de tendencia central	Media	88.63	87.70
	Mediana	93.56	92.91
	Moda	-	92.91

Medidas de dispersión	Desviación estándar	11.97	15.90
	Varianza	143.22	252.69
	Error estándar de la media	2.68	4.41
	Máximo	99	99.06
	Mínimo	62.2	44.40
	Número de datos	20	13.00
Intervalos de confianza para la media (95%)	Límite superior	94.23	97.31
	Límite inferior	83.03	78.10

4.5.2. Superficie de respuesta

a. Búsqueda de primer orden

Se utilizó un diseño factorial completo 2^4 con 4 puntos centrales para evaluar los efectos de los factores (hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, arsénico (V) inicial, pH y tiempo de contacto) y detectar la presencia de curvatura como se presenta en la tabla 26, donde se experimentaron con 20 tratamientos de manera aleatoria. Los resultados de la tabla 26 fueron calculados a partir del anexo 9.

Al ajustar los datos al modelo de primer orden se obtuvo el análisis de la varianza que se presenta en la tabla 27, se observa que los factores de hidralgirita pretratada con óxidos de hierro y el arsénico (V) inicial tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de adsorción (% As(V) Ads). La calidad del modelo ajustado es satisfactoria, ya que los coeficientes de determinación (R^2) son altos, sin embargo, no son los óptimos debido a la presencia de curvatura, como se demuestra en la prueba de falta de ajuste, donde indica que es significativo.

El modelo ajustado en unidades no codificadas al primer orden está representado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \%As(V)Ads = & 72.31 - 0.0329 \text{ Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro} \\ & + 46.21 \text{ Arsénico(V) inicial} + 0.986 \text{ pH} \\ & + 0.0556 \text{ Tiempo de contacto} \end{aligned}$$

Para validar los resultados obtenidos en el análisis de la varianza de la tabla 27 se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo a partir de los residuos, donde se afirma que los datos proceden de una distribución normal, los niveles de los factores presentan varianzas constantes y los datos no tienen autocorrelación. Dichos supuestos del modelo se analizan en el anexo 3.

Tabla 26

Resultados de la eficiencia de adsorción del diseño factorial completo con puntos centrales en la búsqueda de I orden

Tratamientos	Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	Arsénico (V) inicial (mg/L)	pH	Tiempo de contacto (minutos)	% As(V) Ads
1	10	0.05	5	60	90.80
2	300	0.5	9	60	95.98
3	10	0.05	9	60	91.60
4	155	0.275	7	32.5	93.27
5	10	0.5	9	5	98.86
6	300	0.5	5	5	95.90
7	10	0.5	5	60	98.98
8	155	0.275	7	32.5	92.98
9	300	0.05	9	60	72.00
10	155	0.275	7	32.5	94.91
11	10	0.05	5	5	73.60
12	300	0.05	9	5	73.20
13	300	0.5	9	5	98.70
14	300	0.5	5	60	95.64
15	10	0.5	5	5	98.88
16	300	0.05	5	5	62.20
17	10	0.05	9	5	85.20
18	155	0.275	7	32.5	93.85
19	10	0.5	9	60	99.00
20	300	0.05	5	60	67.00

Tabla 27

Análisis de la varianza de la eficiencia de adsorción para el diseño de experimentos en la búsqueda de I orden

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor p
Modelo	4	2192.73	548.18	15.56	0.000
Hidralgirita pretratada	1	363.86	363.86	10.33	0.006
Arsénico (V) inicial	1	1729.31	1729.31	49.08	0.000
pH	1	62.17	62.17	1.76	0.204
Tiempo de contacto	1	37.39	37.39	1.06	0.319
Error	15	528.44	35.23		
Falta de ajuste	12	526.26	43.86	60.38	0.003
Error puro	3	2.18	0.73		
Total	19	2721.17			
$R^2 = 80.58\%$		$R^2_{(aj)} = 75.40\%$			

b. Búsqueda de segundo orden

Debido a que el modelo de primer orden no describió adecuadamente el proceso de adsorción y se detectó la presencia de curvatura, se procedió a pasar un modelo de segundo orden con los factores que tenían efectos significativos (hidralgirita pretratada con óxidos de hierro y arsénico (V) inicial) en la eficiencia de adsorción de As (V), respecto al pH y tiempo de contacto se tomaron como factores fijos en 7 y 60 minutos respectivamente. Se utilizó un diseño central compuesto 2^2 con 4 puntos axiales centrada sobre las caras y 5 puntos centrales como se observa en la tabla 28, donde se experimentaron con 13 tratamientos de manera aleatoria. Los resultados de la tabla 28 fueron calculados a partir del anexo 10.

Al ajustar los datos de la tabla 28 al modelo de primer orden como se observa en el análisis de la varianza de la tabla 29, la calidad del modelo no es satisfactoria, ya que los coeficientes de determinación ($R^2 = 65.27\%$, $R^2_{(aj)} = 58.32\%$) son bajos, la razón de ello es la presencia de una fuerte curvatura como se demuestra en la prueba de falta de ajuste, lo que hace necesario pasar al modelo de segundo orden.

Al ajustar los datos de la tabla 28 al modelo de segundo, se obtiene el análisis de la varianza de la tabla 30, donde se aprecia que los coeficientes de determinación ($R^2 = 95.85\%$, $R^2_{(aj)} = 92.89\%$) son altos y describen satisfactoriamente el modelo, a partir de ello se genera el perfil de contornos y la superficie de respuesta como se observa en la figura 17 y figura 18 respectivamente.

El modelo ajustado en unidades no codificadas al segundo orden está representado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \%As(V)Ads = & 83.68 - 0.1973 \text{ Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro} \\ & + 149.3 \text{ Arsénico}(V) \text{ inicial} + 0.000107 \text{ Hidralgiritita}^2 \\ & + 246 \text{ Arsénico}(V) \text{ inicial}^2 \\ & + 0.3353 \text{ Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro} \\ & * \text{ Arsénico}(V) \text{ inicial} \end{aligned}$$

Así como en la etapa de búsqueda de I orden, también en esta etapa de búsqueda de II orden para validar los resultados obtenidos en el análisis de la varianza de la tabla 30 se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo a partir de los residuos, donde se afirma que los datos proceden de una distribución normal, los niveles de los factores presentan varianzas constantes y los datos no tienen autocorrelación. Dichos supuestos del modelo se analizan en el anexo 3.

Tabla 28

Resultados de la eficiencia de adsorción para el diseño de composición central (DCC) en la búsqueda de II orden

Tratamientos	Hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	Arsénico (V) inicial (mg/L)	% As (V) Ads
1	10	0.05	93.20
2	300	0.05	44.40
3	155	0.275	92.87
4	10	0.5	99.06
5	155	0.275	92.84
6	155	0.275	92.91
7	300	0.275	89.31
8	155	0.275	92.40
9	155	0.275	92.91
10	155	0.5	95.86
11	10	0.275	98.15
12	155	0.05	62.20
13	300	0.5	94.02

Tabla 29

Análisis de la varianza (modelo – primer orden) de la eficiencia de adsorción para el DDC

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor p
Modelo	2	1979.12	989.56	9.40	0.005
Hidralgiritita pretratada	1	654.80	654.80	6.22	0.032
Arsénico (V) inicial	1	1324.32	1324.32	12.58	0.005
Error	10	1053.17	105.32		
Falta de ajuste	6	1052.93	175.49	3707.07	0.000
Error puro	4	0.19	0.05		
Total	12	3032.29			
$R^2 = 65.27\%$		$R^2_{(aj)} = 58.32\%$			

Tabla 30

Análisis de la varianza (modelo-segundo orden) de la eficiencia de adsorción para el diseño de composición central (DCC) en la búsqueda de II orden

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Valor p
Modelo	5	2906.44	581.29	32.33	0.000
Lineal	2	1979.04	989.52	55.02	0.000
Hidralgiritra pretratada	1	654.80	654.80	36.42	0.001
Arsénico (V) inicial	1	1324.32	1324.32	73.66	0.000
Cuadrado	2	448.49	224.24	12.47	0.005
Hidralgi. Pret.*Hidralgi. Pret.	1	13.93	13.93	0.77	0.408
Arsénico(V) I*Arsénico(V) I.	1	428.41	428.41	23.83	0.002
Interacción de 2 factores	1	478.73	478.73	26.62	0.001
Hidral. Pret.*Arsénico(V) I.	1	478.73	478.73	26.63	0.001
Error	7	125.85	17.99		
Total	12	3032.29			
$R^2 = 95.85\%$		$R^2_{(aj)} = 92.89\%$			

- Caracterización de la superficie de respuesta

En la figura 18 se observa que la superficie de respuesta en estudio presenta dos picos máximos (un máximo absoluto y relativo), por tanto, el punto estacionario ($x_1 = 0.422$, $x_2 = 0.782$) es un punto silla (no es un máximo y no es un mínimo), puesto que en los valores propios o eigenvalores ($\lambda_1 = 4.058$, $\lambda_2 = -14.266$) existe un valor positivo y negativo. Los cálculos para la caracterización de la superficie de respuesta se muestran en el anexo 5.

4.6. Contraste de hipótesis

Dado que los sustratos ricos en hierro adsorben el arsénico en agua (Acuña et al., 2016; Choong et al., 2007; D'Ambrosio, 2005; Mondal et al., 2013; Singh et al., 2015; Thakur & Armstrong, 2021), entonces la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro adsorbe el arsénico (V) en agua.

- Planteamiento de la hipótesis

Hipótesis nula (H_0): La hidralgirita pretratada con óxidos de hierro no adsorbe el arsénico (V) en agua.

Hipótesis alterna (H_A): La hidralgirita pretratada con óxidos de hierro adsorbe el arsénico (V) en agua.

- **Nivel de significancia:** 5 % ($\alpha = 0.05$)

- **Prueba estadística:** Análisis de la varianza (ANOVA)

- **Valor p**

Tabla 31

Datos del Análisis de Varianza de las etapas de experimentación

Etapas	Fuente	Prueba estadística	R ²	Razón F	Valor p
Búsqueda de I	Modelo	ANOVA	80.58 %	15.56	0.000
orden	Hidralgirita pretrat.	ANOVA	80.58 %	10.33	0.006
Búsqueda de II	Modelo	ANOVA	95.85 %	33.32	0.000 ^a
orden	Hidralgirita pretrat.	ANOVA	95.85 %	36.42	0.001

Nota. ^a Valor p del experimento de adsorción con mejor ajuste del modelo

Lectura del valor p: Con una probabilidad de error del 0 % la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro es eficiente en la adsorción del arsénico (V) en agua.

- Toma de decisión

La hidralgirita pretratada con óxidos de hierro adsorbe el arsénico (V) en agua.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La hidralgirita natural presentó un pH, conductividad eléctrica, humedad, textura y color de 6.85, 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5.63 %, arcilloso y blanco respectivamente; mientras que, la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro mostró un pH, conductividad eléctrica, humedad, textura y color de 3.62, 355 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3.79 %, franco – arcillo – limoso y rojo respectivamente. La hidralgirita natural y pretratada con óxidos de hierro presentaron en su composición como el mayor elemento al silicio con 54.66 y 35.06 % respectivamente, de igual manera, el óxido de aluminio se mostró como el mayor compuesto con 40.21 y 32.08 % respectivamente. El pretratamiento a la hidralgirita natural mejoró en un 25.32% la presencia de hierro en el adsorbente, logrando a que se obtengan resultados favorables en la adsorción del arsénico (V).

Los resultados mostraron que en el proceso de adsorción del arsénico (V) la dosis de adsorbente y la concentración inicial de arsénico (V) tienen un efecto significativo, mientras que el pH y tiempo de contacto no influyen de manera significativa. Se observaron unas máximas eficiencias de adsorción de arsénico (V) del 99.06, 98.15 y 93.20 % para concentraciones de concentraciones iniciales de arsénico (V) de 0.5, 0.275 y 0.05 mg/L respectivamente, bajo una dosis de adsorbente, pH, tiempo de contacto y temperatura de 10 g/L, 7, 60 minutos y 25 °C respectivamente.

Los datos experimentales se ajustaron de mejor forma al modelo de isoterma de Langmuir (R^2 : 0.95) que indicó que la adsorción del arsénico (V) ocurre en monocapa en una superficie de la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro que está conformada por sitios activos que son energéticamente homogéneos, mientras que el modelo cinético de pseudo segundo orden (R^2 : 0.99) que también describió de mejor forma a los datos experimentales mostró que existiría un proceso de adsorción química.

En las pruebas de aplicación la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro logró adsorber eficientemente el arsénico en las muestras de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca.

5.2. Recomendaciones

Para las futuras investigaciones, se sugiere evaluar el efecto de los factores de temperatura y concentración inicial de arsénico (III) en la eliminación del arsénico en agua.

Se recomienda realizar investigaciones a nivel aplicativo en base a los resultados obtenidos de la presente investigación para mejorar la tecnología de adsorción de arsénico (V) propuesta en este estudio.

Se sugiere evaluar la eficiencia de adsorción en la hidralgirita pretratada con óxidos de hierro de otros elementos contaminantes presentes en el agua.

Se requiere realizar más investigaciones para la disposición final del arsénico recuperado del agua mediante el adsorbente.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, A., Araya, A., & Romero, L. G. (2016). Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29(suppl. 4), 23-34.
- Alvarez, G. L., & Veli, L. E. (2014). Remoción de arsénico mediante arcilla natural del agua procedente del manantial de Quero - Jauja. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Aparicio, W. B. (2002). Determinación de la capacidad de adsorción del chacko aplicado a la extracción de cationes metálicos. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Arain, M., Kazi, T., Baig, J., Jamali, M., Afridi, H., Shah, A., . . . Sarfraz, A. (2009). Determination of arsenic levels in lake water, sediment, and foodstuff from selected area of Sindh, Pakistan: Estimation of daily dietary intake. *Food and Chemical Toxicology*, 47(1), 242-248. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.11.009>
- Aranibar, M. (2012). *Arcillas comestibles del altiplano Peruano - Boliviano*. Puno: Editorial Altiplano E.I.R.L.
- Arias, J. M., Paternina, E., & Barragán, D. (2009). Adsorción física sobre sólidos: aspectos termodinámicos. *Química Nova*, 32(5), 1350-1355. doi:<https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000500046>
- Ayub, A., Ali Raza, Z., Irfan Majeed, M., Rizwan Tariq, M., & Irfan, A. (2020). Development of sustainable magnetic chitosan biosorbent beads for kinetic remediation of arsenic contaminated water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 603-617. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.287>
- Baig, S., Sheng, T., Hu, Y., Xu, J., & Xu, X. (2013). Arsenic Removal from Natural Water Using Low Cost Granulated Adsorbents: A Review. *Clean Soil Air Water*, 42(9999), 1-14. doi:<https://doi.org/10.1002/clen.201200466>
- Bali, A. S., & Singh, G. P. (2021). Arsenic acquisition, toxicity and tolerance in plants - From physiology to remediation: A review. *Chemosphere*, 283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131050>

- Basu, A., Saha, D., Saha, R., & Saha, B. (2014). A review on sources, toxicity and remediation technologies for removing arsenic from drinking water. *Research on Chemical Intermediates*, 40, 447-485. doi:<https://doi.org/10.1007/s11164-012-1000-4>
- Behera, K. K. (2014). Phytoremediation, transgenic plants and microbes. *Sustainable Agriculture Reviews*, 13, 65-85.
- Bergh, K., Du Laing, G., Montoya, J., Deckere, E., & Tack, F. (2010). Arsenic in drinking water wells on the Bolivian high plain: Field monitoring and effect of salinity on removal efficiency of iron-oxides- containing filters. *Journal of environmental science and health - Part A*, 45, 1741-1749.
- Brandhuber, P., & Amy, G. (2001). Arsenic removal by a charged ultrafiltration membrane - influences of membrane operating conditions and water quality on arsenic rejection. *Desalination*, 140(1), 1-14. doi:[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00350-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00350-2)
- Browman, D. L. (2004). Tierras comestibles de la Cuenca del Titicaca: Geofagia en la prehistoria boliviana. *Estudios atacameños*, 133-141. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-10432004002800011>
- Bundschuh, J., Litter, M., Ciminelli, V., Morgada, M., Cornejo, L., Hoyos, S., . . . Bhattacharya, P. (2010). Emerging mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban areas in Latin America – A critical analysis. *Water research*, 44(19), 5828-5845. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.001>
- Bundschuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román, G., Nicolli, H., Jean, J.-S., . . . Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of The Total Environment*, 429, 2-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Castillo, O., & Frisancho, O. (2015). El "chaco": arcilla medicinal comestible del altiplano peruano y sus propiedades en la patología digestiva. *Revista de Gastroenterología del Perú*, 35(1), 97-99.
- Chávez, M. L., & Miglio, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(4), 307-314.

- Choong, T., Chuah, T., Robiah, Y., Gregory Koay, F., & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, 217(1-3), 139-166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015>
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., Tchobanoglous, G., & Borchardt, J. H. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (Third ed.). Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- D'Ambrosio, C. (2005). Evaluación y selección de tecnologías disponibles para remoción de arsénico. En: G. Galindo, J.L. Fernández, M.A. Parada, D. Gimeno Torrente (Eds). *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento. Taller. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea - IV Congreso Hidrogeológico Argentino*, 123-136.
- Das, T. K., Sakthivel, T. S., Jeyaranjan, A., Seal, S., & Bezbaruah, A. N. (2020). Ultra-high arsenic adsorption by graphene oxide iron nanohybrid: Removal mechanisms and potential applications. *Chemosphere*, 253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126702>
- Dodd, M. C., Vu, N. D., Ammann, A., Kissner, V. C., Pham, H. V., Cao, T. H., . . . Gunten, U. (2006). Kinetics and mechanistic aspects of As(III) oxidation by aqueous chlorine, chloramines, and ozone: relevance to drinking water treatment. *Environmental Science and Technology*, 40, 3285-3292. doi:<https://doi.org/10.1021/es0524999>
- Emett, M. T., & Khoe, G. H. (2001). Photochemical oxidation of arsenic by oxygen and iron in acidic solutions. *Water Research*, 35(3), 649-656. doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00294-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00294-3)
- Escarcena, C. R. (2018). Remoción del arsénico de las aguas municipales y pozos domésticos en la ciudad de Juliaca por precipitación alcalina. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Fernández, E. P., & Aranibar, M. J. (2016). La arcilla ch'aqo, conocimiento andino, características fisicoquímicas y su efecto en la productividad de gallinas de postura. *Revista Ciencia Animal*, 1(2), 98-102.
- Figoli, A., Cassano, A., Criscuoli, A., Mozumder, S., Uddin, M. T., Islam, M. A., & Drioli, E. (2010). Influence of operating parameters on the arsenic removal by

nanofiltration. *Water Research*, 44(1), 97-94.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.007>

Figueroa, G. (2003). Optimización de una superficie de respuesta utilizando JMP IN. *Mosaicos Matemáticos*, 17-23.

Fontcuberta, M., Calderon, J., Villalbí, J., Centrich, F., Portaña, S., Espelt, A., . . . Nebot, M. (2011). Total and Inorganic Arsenic in Marketed Food and Associated Health Risks for the Catalan (Spain) Population. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(18), 10013-10022. doi:<https://doi.org/10.1021/jf2013502>

Francisca, F. M., & Carro, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177-190.

Genuchten, C., Amrose, S., Peña, J., & Gadgil, A. (2012). Removing arsenic from synthetic groundwater with iron electrocoagulation: An Fe and As K-Edge EXAFS study. *Environmental science and technology*, 46, 986-994. doi:<https://doi.org/10.1021/es201913a>

George, C. M., Sima, L., Arias, M. H., Mihalic, J., Cabrera, L. Z., Danz, D., . . . Gilman, R. H. (2014). Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(8), 565-572. doi:<https://dx.doi.org/10.2471%2FBLT.13.128496>

Ghurye, G., Clifford, Dennis, & Tripp, A. (2004). Iron coagulation and direct microfiltration to remove arsenic from groundwater. *American Water Works Association*, 96(4), 143-152. doi:<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2004.tb10605.x>

Gomez, A., Howe, P. D., Hughes, M., Kenyon, E., Lewis, D., Moore, M., & Ng, J. (2001). Arsenic and arsenic compounds. *World Health Organization*.

Guerrero, D. M. (2019). El "cchacco": composición físico - química y uso alimentario. *Ciencia & Desarrollo*, 49-58. doi:<https://doi.org/10.33326/26176033.1995.1.16>

Gutiérrez, H., & Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (Tercera ed.). México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.

Haugen, E. A., Jurgens, B. C., Arroyo, J. A., & Bennett, G. L. (2021). Groundwater development leads to decreasing arsenic concentrations in the San Joaquin Valley,

California. *Science of The Total Environment*, 771.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145223>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES S.A.

Herrejón, M. L., Limón, B., & Martínez, V. (2008). Cinética e isotermas de adsorción de Pb(II) en suelo de Monterrey. *Ingenierías*, 11(4), 24-31.

Ho, Y., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465. doi:[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

Höll, W., & Litter, M. (2010). Ocurrencia y química del arsénico en aguas. *Sumario de tecnologías de remoción de arsénico de aguas. Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas*, 17-31.

Ike, M., Miyazaki, T., Yamamoto, N., Sei, K., & Soda, S. (2008). Removal of arsenic from groundwater by arsenite-oxidizing bacteria. *Water Sci. Technol.*, 58(5), 1095-1100. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2008.462>

Ilahi, S., Narayan, P., Tara, N., Pal, S., Ali, S., & Sinha, I. (2020). Arsenic removal from water by starch functionalized maghemite nano-adsorbents: Thermodynamics and kinetics investigations. *Colloid and Interface Science Communications*, 36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colcom.2020.100263>

Kim, K., Shin, E.-K., Chung, J.-H., & Lim, K.-M. (2020). Arsenic induces platelet shape change through altering focal adhesion kinase-mediated actin dynamics, contributing to increased platelet reactivity. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.114912>

Leyva, R. (2007). Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. *En Sólidos Porosos. Preparación, Caracterización y Aplicaciones por J. C. Moreno-Piraján*, 155-207.

Litter, M., Morgada, M., & Bundschuh, J. (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption. *Environmental pollution*, 158, 1105-1128. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.028>

- Liu, R., & Qu, J. (2021). Review on heterogeneous oxidation and adsorption for arsenic removal from drinking water. *Journal of Environmental Sciences*, *110*, 178-188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.04.008>
- Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kennelley, E. D. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, *409*, 579.
- Mamani, W. (2019). Determinación de la concentración de arsénico (As) total en las aguas subterráneas de pozos tubulares en el distrito de Juliaca y medidas de mitigación. (*Tesis de maestría*). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2002). Arsenic Round the World: A Review. *Talanta*, *58*(1), 201-235. doi:[https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)
- Matus, I., Paniagua, L., & Benavente, M. (2011). Estudio de la cinética de adsorción de Cu y Hg a partir de soluciones binarias usando quitosano. *Nexo Revista Científica*, *24*(1), 20-32.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Séptima ed.). México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., . . . Parvez, F. (2012). Arsenic exposure in Latin America: biomarkers, risk assessments and related health effects. *The Science of the total environmental*, *429*, 76-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.051>
- Medina, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *35*(1), 93-102. doi:<https://dx.doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604>
- Mejía, F., Valenzuela, J. L., Aguayo, S., & Meza, D. (2009). Adsorción de arsénico en zeolita natural pretratada con óxidos de magnesio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *25*(4), 217-227.
- MINAGRI. (2009). *Ley de los Recursos Hídricos*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.

- Mohan, D., & Pittman, C. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents - A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 1-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.006>
- Mondal, P., Bhowmick, S., Chatterjee, D., Figoli, A., & Van der Bruggen, B. (2013). Remediation of inorganic arsenic in groundwater for safe water supply: A critical assessment of technological solutions. *Chemosphere*, 92(2), 157-170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.097>
- Montaño, J., & Collazo, M. P. (2012). *Manual de agua subterránea*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda ed.). México: Limusa Wiley.
- Moreno, E. (2010). Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías. (*Tesis doctoral*). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- Municipalidad Provincial de San Román. (2017). *Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Juliaca 2016-2025*.
- Murillo, Y. S., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2011). Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso bovino por espectrofotometría UV-VIS. *Revista Colombiana de Química*, 40(1), 91-103.
- Mutar, R. F., & Saleh, M. A. (2021). Optimization of arsenic ions adsorption and removal from hospitals wastewater by nano-bentonite using central composite design. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.213>
- Nguyen, T. V., Loganathan, P., Vigneswaran, S., Krupanidhi, S., Pham, N., & Ngo, H.-H. (2014). Arsenic waste from water treatment systems: characteristics, treatments and its disposal. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(6), 939-950. doi:<https://doi.org/10.2166/ws.2014.073>
- OMS. (2011). Guidelines for drinking - water quality. *World Health Organization*.
- Özacar, M., & Şengil, İ. (2005). A kinetic study of metal complex dye sorption onto pine sawdust. *Process Biochemistry*, 40(2), 565-572. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.032>

- Padmesh, T. V., Vijayaraghavan, K., Sekaran, G., & Velan, M. (2006). Application of two- and three-parameter isotherm models: Biosorption of acid red 88 onto *Azolla microphylla*. *Bioremediation Journal*, *10*(1-2), 37-44. doi:<https://doi.org/10.1080/10889860600842746>
- Penedo, M., Manals, E. M., Vendrell, F., & Salas, D. (2015). Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. *Tecnología Química*, *35*(1), 110-124.
- Pérez, A. B., Zapata, V. M., Ortuño, J. F., Aguilar, M., Saez, J., & Lloréns, M. (2007). Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption onto orange waste. *Journal of Hazardous Materials*, *139*(1), 122-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.008>
- Picasso, G., & Sun Kou, M. (2008). Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *74*, 57-74. Obtenido de https://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2008000100007&lng=es&tlng=es
- Pinzón, M. L., & Villamizar, L. E. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (II) usando cáscara de naranja. *DYNA*, *76*(160), 95-106.
- Roque, L. (2017). Caracterización físico - química y grado de conocimiento de los consumidores y comercializadores de las arcillas comestibles (cha'qo) de la región de Puno. (*Tesis de postgrado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Shakoor, M., Nawaz, R., Hussain, F., Raza, M., Ali, S., Rizwan, M., . . . Ahmad, S. (2017). Human health implications, risk assessment and remediation of As-contaminated water: A critical review. *Science of The Total Environment*, *601-602*, 756-769. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.223>
- Shankar, S., Shanker, U., & Shikha. (2014). Arsenic Contamination of Groundwater: A Review of Sources, Prevalence, Health Risks, and Strategies for Mitigation. *The Scientific World Journal*. doi:<https://doi.org/10.1155/2014/304524>
- Sharma, V. K., Dutta, K., P., & Ray, A. K. (2007). Review of kinetics of chemical and photocatalytical oxidation of Arsenic(III) as influenced by pH. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *42*, 997-1004. doi:<https://doi.org/10.1080/10934520701373034>

- Shih, M. C. (2005). An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes. *Desalination*, 172(1), 85-97. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.07.031>
- Sierra, P. V., Guibal, E., & Louvier, J. F. (2020). Arsenic Sorption on Chitosan-Based Sorbents: Comparison of the Effect of Molybdate and Tungstate Loading on As(V) Sorption Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 934-947. doi:<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01654-6>
- Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V., & Prasad, S. (2015). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247-270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568. doi:[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Sorg, T. J. (2000). Regulations on the disposal of arsenic residuals from drinking water treatment plants. *EPA Contract 68-C7-0011, Work Assignment 0-38, EPA/600/R-00/025*.
- Sun-Kou, M. d., & Lazo, J. C. (2009). Estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas: Equilibrio y cinética. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75(1), 17-25.
- Supo, J. (2012). *Seminarios de investigación científica*. Obtenido de Seminarios de investigación para la producción científica: <https://seminariosdeinvestigacion.com>
- Tapia, L. (2017). Evaluación de arsénico con chacko (hidralgirita) en aguas subterráneas contaminadas del distrito de Taraco - Puno. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Thakur, N., & Armstrong, D. W. (2021). Arsenic sequestration by iron oxide coated geopolymer microspheres. *Journal of Cleaner Production*, 291. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125931>
- Thirunavukkarasu, O., Viraraghavan, T., Subramanian, K., & Tanjore, S. (2002). Organic Arsenic Removal from Drinking Water. *Urban Water*, 4, 415-421.

- Tuesta, E. G., Vivas, M., Sun, R., & Gutarra, A. (2005). Modificación química de arcillas y su aplicación en la retención de colorantes. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 26-36. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2005000100005&lng=es&tlng=es
- Velarde, L. (2016). Remoción de arsénico (V) en medio acuoso utilizando sillar revestido con óxidos de hierro. (*Tesis de postgrado*). Universidad Católica de Santa María, Arequipa.
- Velizarov, S., Crespo, J., & Reis, M. (2004). Removal of inorganic anions from drinking water supplies by membrane bio/processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 361-380. doi:<https://doi.org/10.1007/s11157-004-4627-9>
- Verano, P. (2016). *El veneno de Juliaca*. Obtenido de Somos Periodismo: <http://somosperiodismo.com/el-veneno-de-juliaca>
- Villa, G. F., Huamaní, C., Chávez, M., & Huamaní, J. A. (2018). Evaluación de la remoción de arsénico en agua superficial utilizando filtros domiciliarios. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(4), 652-656. doi:<https://dx.doi.org/10.17843/rpmpesp.2018.354.3715>
- Vizcaíno, L., Fuentes, N., & Gonzalez, H. (2017). Adsorción de plomo (II) en solución acuosa con tallos y hojas de *Eichhornia crassipes*. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 435-444.
- Wang, J., Xu, W., Chen, L., Huang, X., & Liu, J. (2014). Preparation and evaluation of magnetic nanoparticles impregnated chitosan beads for arsenic removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 251, 25-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.061>
- World Health Organization. (2019). Preventing disease through healthy environments: exposure to arsenic: a major public health concern. *World Health Organization*. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/329482>
- 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.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105203>

Yamamura, S., Ike, M., & Fujita, M. (2003). Dissimilatory arsenate reduction by a facultative anaerobe, *Bacillus* sp. strain SF-1. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96(5), 454-460. doi:[https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)70131-5](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)70131-5)

Zhang, L., Qin, X., Tang, J., Liu, W., & Yang, H. (2017). Review of arsenic geochemical characteristics and its significance on arsenic pollution studies in karst groundwater, Southwest China. *Applied Geochemistry*, 77, 80-88.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.05.014>

ANEXOS

Anexo 1: Informe de preparación de soluciones de arsénico realizada por Laboratorios Analíticos de Sur

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Teléfono (054) 443294 Fax: (054) 444582
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

LAS EIRL N° 002– 2021

Arequipa, 12 de agosto de 2021

Señores: ARNOLD HENRY CAIRA APAZA
Dirección: Juliaca Puno
Presente. -

REFERENCIA: COTIZACION N° 21-PE-00094-01

De nuestra consideración:

Mediante la presente hago llegar un cordial saludo, a la vez hacer de su conocimiento que, según la cotización mencionada en la referencia, se realizó la preparación de solución ingresada al laboratorio el día 11 de agosto en las siguientes concentraciones requeridas:

$C_1 = 0.050 \text{ mg/L}$ de As, obteniendo 4 litros de solución.

$C_2 = 0.275 \text{ mg/L}$ de As, obteniendo 3 litros de solución.

$C_3 = 0.500 \text{ mg/L}$ de As, obteniendo 3 litros de solución.

Realizando la solución en agua destilada + arsénico.

Es todo en cuanto podemos informar sobre el servicio realizado según su requerimiento.

Laboratorios Analíticos Del Sur agradece de antemano su preferencia, y quedamos atentos para sus siguientes requerimientos.

Atentamente,


OMAR WAREZ SOTO
GERENTE OPERACIONES

Anexo 2: Pruebas preliminares de adsorción de arsénico (V)

Tratamientos	Hidralgirita pretratada con óxidos de hierro (g/L)	Arsénico (V) inicial (mg/L)	pH	Tiempo de contacto (minutos)	% As(V) Ads
1	10	0.05	7	60	94.40
2	40	0.05	7	60	86.60
3	300	0.5	7	60	96.50
4	400	0.5	7	60	95.34
5	220	0.275	7	32.5	94.00

Anexo 3: Verificación de los supuestos del modelo

3.1. Normalidad

- **Planteamiento de la hipótesis**

H_0 : Los datos proceden de una distribución normal

H_A : Los datos no proceden de una distribución normal

- **Nivel de significancia:** 5 % ($\alpha = 0.05$)

- **Prueba estadística:** Shapiro – Wilk

- **Valor p**

Etapa	ANOVA	Prueba estadística	W	Valor p
Búsqueda de I orden	Tabla 26	Shapiro – Wilk	0.919	0.096
Búsqueda de II orden	Tabla 28	Shapiro – Wilk	0.948	0.572

Lectura del valor p: Con una probabilidad de error del 9.6 y 57.2 % para la tabla 26 y tabla 28 respectivamente, los datos no proceden de una distribución normal

- **Gráficos**

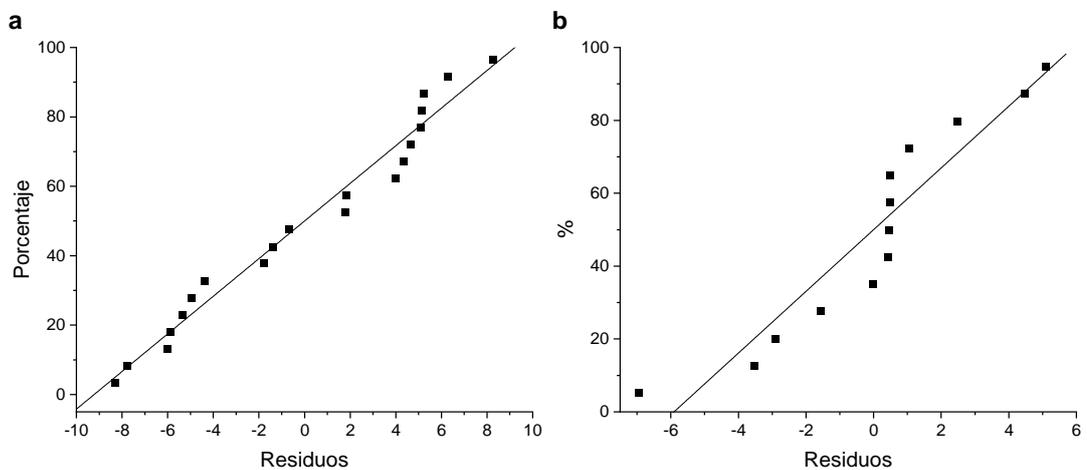


Figura 23: a) Normalidad en la etapa de búsqueda de I orden; b) Normalidad en la etapa de búsqueda de II orden

- **Toma de decisión**

Los datos de la tabla 26 y tabla 28 proceden de una distribución normal.

3.2. Varianza constante

- **Planteamiento de la hipótesis**

H_0 : Los niveles de los factores presentan varianzas constantes

H_A : Los niveles de los factores no presentan varianzas constantes

- **Nivel de significancia:** 5 % ($\alpha = 0.05$)

- **Prueba estadística:** Levene

- **Valor p**

Etapa	ANOVA	Factor	Prueba estadística	Razón F	Valor p
Búsqueda de I orden	Tabla 26	Hidralgirita pretrata.	Levene	3.20	0.066
		Arsénico (V) inicial	Levene	3.51	0.053
		pH	Levene	3.24	0.064
		Tiempo de contacto	Levene	2.82	0.087
Búsqueda de II orden	Tabla 28	Hidralgirita pretrata.	Levene	1.51	0.267
		Arsénico (V) inicial	Levene	0.05	0.949

Lectura del valor p:

Con una probabilidad de error del 6.6, 5.3, 6.4 y 8.7 % para los factores hidralgirita pretratada con óxidos de hierro, arsénico (V) inicial, pH y tiempo de contacto respectivamente de la tabla 26, los datos no presentan varianzas constantes.

Con una probabilidad de error del 26.7 % y 94.9 % para los factores hidralgirita pretratada con óxidos de hierro y arsénico (V) respectivamente de la tabla 28, los datos no presentan varianzas constantes.

- Gráficos

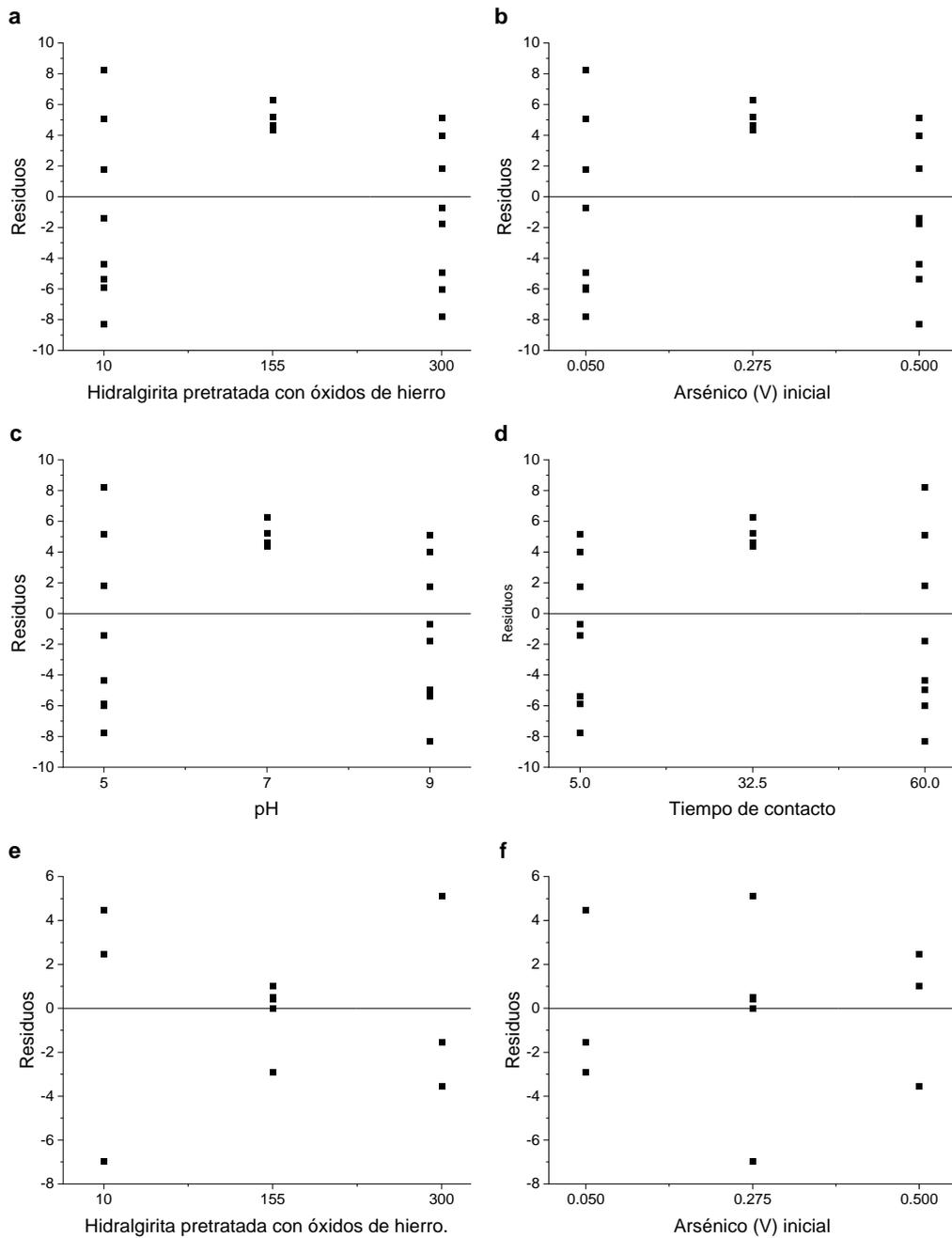


Figura 24: a) Varianza constante de la hidralginita pretratada (I orden); b) Varianza constante del As (V) inicial (I orden); c) Varianza constante del pH (I orden); d) Varianza constante del tiempo de contacto (I orden); e) Varianza constante de la hidralginita (II orden); f) Varianza constante del As (V) inicial la hidralginita (II orden).

- Toma de decisión

Los niveles de los factores de la tabla 26 y tabla 28 presentan varianzas constantes

3.3. Test de independencia

- **Planteamiento de la hipótesis**

H_0 : Los datos no tienen autocorrelación ($\rho = 0$)

H_A : Los datos tienen correlación ($\rho > 0$)

- **Nivel de significancia:** 5 % ($\alpha = 0.05$)

- **Prueba estadística:** Durbin – Watson (d)

- **Regla de decisión**

$d < d_L$ Se rechaza H_0

$d > d_U$ No se rechaza H_0

$d_L \leq d \leq d_U$ Sin decisión

A partir de la tabla de límites para la prueba de Durbin Watson (anexo 4)

Donde:

n : Número de datos u observaciones

$p - 1$: Número de variables o términos en el modelo

- **Valor de Durbin – Watson**

Etapa	ANOVA	Estadístico de Durbin – Watson	Número de observaciones	Autocorrelación
Búsqueda de I orden	Tabla 26	2.841	20	-0.456
Búsqueda de II orden	Tabla 28	2.097	13	-0.065

- **Toma de decisión**

ANOVA	Parámetros		Estadístico d	Límites		Regla de decisión	Interpretación
	n	$p - 1$		d_L	d_U		
Tabla 26	20	3	2.841	1.00	1.68	$d > d_U$	No se rechaza H_0
Tabla 28	13	1	2.097	1.01	1.34	$d > d_U$	No se rechaza H_0

- Gráficos

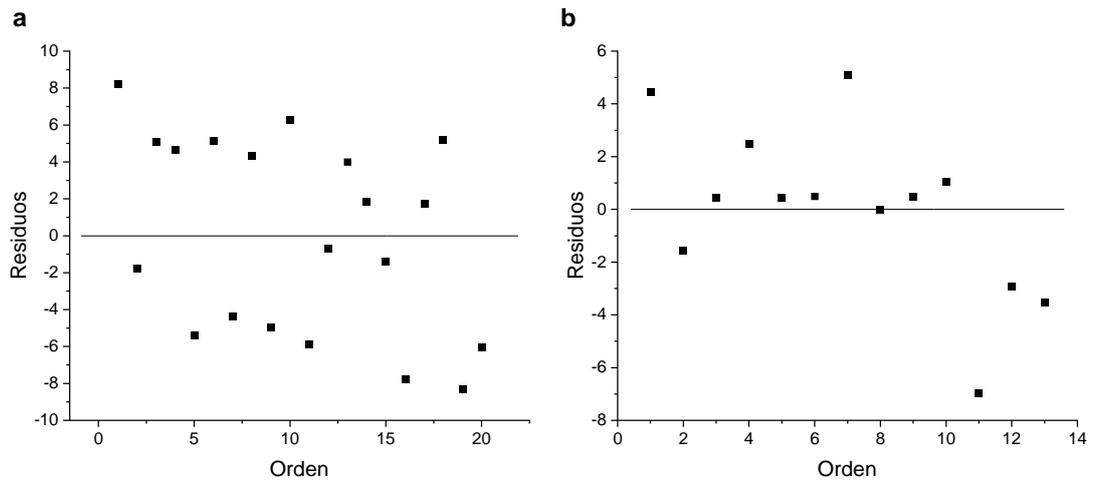


Figura 25: a) *Test de independencia en la etapa de búsqueda de I orden;* b) *Test de independencia en la etapa de búsqueda de II orden*

- Conclusión

Los datos de la tabla 26 y tabla 28 no tienen autocorrelación entre los residuos consecutivos, es decir que los residuos son independientes.

Anexo 4: Límites para la prueba de Durbin – Watson

Nivel de significancia $\alpha = .05$, $p - 1$ es el número de variables o términos en el modelo, n el número de datos										
n	p - 1 = 1		p - 1 = 2		p - 1 = 3		p - 1 = 4		p - 1 = 5	
	d_L	d_U								
15	1.08	1.36	0.95	1.54	0.82	1.75	0.69	1.97	0.56	2.21
16	1.10	1.37	0.98	1.54	0.86	1.73	0.74	1.93	0.62	2.15
17	1.13	1.38	1.02	1.54	0.90	1.71	0.78	1.90	0.67	2.10
18	1.16	1.39	1.05	1.53	0.93	1.69	0.82	1.87	0.71	2.06
19	1.18	1.40	1.08	1.53	0.97	1.68	0.86	1.85	0.75	2.02
20	1.20	1.41	1.10	1.54	1.00	1.68	0.90	1.83	0.79	1.99
21	1.22	1.42	1.13	1.54	1.03	1.67	0.93	1.81	0.83	1.96
22	1.24	1.43	1.15	1.54	1.05	1.66	0.96	1.80	0.86	1.94
23	1.26	1.44	1.17	1.54	1.08	1.66	0.99	1.79	0.90	1.92
24	1.27	1.45	1.19	1.55	1.10	1.66	1.01	1.78	0.93	1.90
25	1.29	1.45	1.21	1.55	1.12	1.66	1.04	1.77	0.95	1.89
26	1.30	1.45	1.22	1.55	1.14	1.65	1.06	1.76	0.98	1.88
27	1.32	1.47	1.24	1.56	1.16	1.65	1.08	1.76	1.01	1.86
28	1.33	1.48	1.26	1.56	1.18	1.65	1.10	1.75	1.03	1.85
29	1.34	1.48	1.27	1.56	1.20	1.65	1.12	1.74	1.05	1.84
30	1.35	1.49	1.28	1.57	1.21	1.65	1.14	1.74	1.07	1.83
31	1.36	1.50	1.30	1.57	1.23	1.65	1.16	1.74	1.09	1.83
32	1.37	1.50	1.31	1.57	1.24	1.65	1.18	1.73	1.11	1.82
33	1.38	1.51	1.32	1.58	1.26	1.65	1.19	1.73	1.13	1.81
34	1.39	1.51	1.33	1.58	1.27	1.65	1.21	1.73	1.15	1.81
35	1.40	1.52	1.34	1.58	1.28	1.65	1.22	1.73	1.16	1.80
36	1.41	1.52	1.35	1.59	1.29	1.65	1.24	1.72	1.18	1.80
37	1.42	1.53	1.36	1.59	1.31	1.66	1.25	1.72	1.19	1.80
38	1.43	1.54	1.37	1.59	1.32	1.66	1.26	1.72	1.21	1.79
39	1.43	1.54	1.38	1.60	1.33	1.66	1.27	1.72	1.22	1.79
40	1.44	1.54	1.39	1.60	1.34	1.66	1.29	1.72	1.23	1.79
45	1.48	1.57	1.43	1.62	1.38	1.67	1.34	1.72	1.29	1.78
50	1.50	1.59	1.46	1.63	1.42	1.67	1.38	1.72	1.34	1.77

Anexo 5: Caracterización de la superficie de respuesta

Se define que:

$$f: A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \quad y \rightarrow f(Y)$$

$$\text{Donde: } A = [10; 300] \times [0.05; 0.5]$$

5.1. Punto estacionario

Los puntos críticos o punto estacionario de la función f se determinaron a partir del modelo ajustado de segundo orden en unidades codificadas, que está representado por la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = 2.246x_1^2 - 12.455x_2^2 + 10.94x_1x_2 - 10.447x_1 + 14.857x_2 + 92.414$$

Los puntos críticos están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f(\hat{Y})}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial f(\hat{Y})}{\partial x_2} = 0$$

Realizando las derivadas parciales, se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{\partial f(\hat{Y})}{\partial x_1} = 4.492x_1 + 10.94x_2 - 10.447 = 0$$

$$\frac{\partial f(\hat{Y})}{\partial x_2} = 10.94x_1 - 24.91x_2 + 14.857 = 0$$

Resolviendo el sistema de ecuación se determinó que los puntos críticos o punto estacionario expresado en variables codificadas son: $x_1 = 0.422$ y $x_2 = 0.782$

Expresado en variables naturales los puntos críticos o punto estacionario se tiene:

$$x_1 = \frac{\xi - 155}{145} \rightarrow 0.422 = \frac{\xi - 155}{145} \rightarrow \xi = 216.19$$

$$x_2 = \frac{\xi - 0.275}{0.225} \rightarrow 0.782 = \frac{\xi - 0.275}{0.225} \rightarrow \xi = 0.45$$

Por tanto, el punto estacionario se encuentra en $\xi = 216.19$ g/L de dosis de adsorbente y $\xi = 0.45$ mg/L de arsénico (V).

5.2. Respuesta predicha del punto estacionario

La respuesta predicha en el punto estacionario se determina remplazando los puntos críticos $x_1 = 0.422$ y $x_2 = 0.782$ en la ecuación del modelo ajustado de segundo orden en unidades codificadas.

$$\hat{Y} = 2.246(0.422)^2 - 12.455(0.782)^2 + 10.94(0.422)(0.782) - 10.447(0.422) + 14.857(0.782) + 92.414$$

De donde se obtiene la respuesta predicha en el punto crítico: $\hat{Y} = 96.017$

5.3. Valores propios o eigenvalores

El modelo codificado de segundo orden esta expresado por la siguiente ecuación.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j$$

Para calcular los valores propios o eigenvalores se requiere determinar los datos de la matriz B , que esta expresado por:

$$B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{13}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{22} & \hat{\beta}_{23}/2 & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{23}/2 & \hat{\beta}_{33} & \dots & \hat{\beta}_{3k}/2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\beta}_{1k}/2 & \hat{\beta}_{2k}/2 & \hat{\beta}_{3k}/2 & \dots & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

A partir del modelo codificado de segundo orden para los datos de la presente investigación se tiene:

$$B = \begin{bmatrix} 2.246 & 5.47 \\ 5.47 & -12.454 \end{bmatrix}$$

Los valores propios o eigenvalores se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$p(\lambda) = \det(B - \lambda I) = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} 2.246 & 5.47 \\ 5.47 & -12.454 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} 2.246 & 5.47 \\ 5.47 & -12.454 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \right| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} 2.246 - \lambda & 5.47 \\ 5.47 & -12.454 - \lambda \end{bmatrix} \right| = 0$$

$$(2.246 - \lambda)(-12.454 - \lambda) - (5.47)(5.47) = 0$$

$$-27.972 - 2.246\lambda + 12.454\lambda + \lambda^2 - 29.92 = 0$$

$$\lambda^2 + 10.208\lambda - 57.892 = 0$$

Utilizando formula cuadrática:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\lambda = \frac{-10.208 \pm \sqrt{(-10.208)^2 - 4(1)(-57.892)}}{2(1)}$$

$$\lambda = \frac{-10.208 \pm \sqrt{104.203 + 231.568}}{2}$$

$$\lambda = \frac{-10.208 \pm \sqrt{335.771}}{2}$$

$$\lambda_1 = \frac{-10.208 + \sqrt{335.771}}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{-10.208 - \sqrt{335.771}}{2}$$

$$\lambda_1 = 4.058$$

$$\lambda_2 = -14.266$$

Para conocer el tipo de punto estacionario se cumple la siguiente regla (Gutiérrez & Vara, 2012):

1. Si λ_i es positivo para toda i , es un mínimo
2. Si λ_i es negativo para toda i , es un máximo
3. Si hay ambos signos es un punto silla

De acuerdo a los valores propios o eigenvalores determinados: $\lambda_1 = 4.058$, $\lambda_2 = -14.266$, el punto estacionario en la superficie de respuesta de la presente investigación es un punto silla.

Anexo 6: Resultados del análisis de la composición química de la hidralgiritita natural



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



INFORME TÉCNICO N° 0805 – 21 – LABICER

- 1. DATOS DEL SOLICITANTE**
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : ARNOLD HENRY CAIRA APAZA
 - 1.2 DNI : 70520084
- 2. CRONOGRAMA DE FECHAS**
 - 2.1 FECHA DE RECEPCIÓN : 12 / 08 / 2021
 - 2.2 FECHA DE ENSAYO : 16 / 08 / 2021
 - 2.3 FECHA DE EMISIÓN : 17 / 08 / 2021
- 3. ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA
- 4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN SOLICITANTE**
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE HIDRALGIRITA NATURAL
 - 4.2 CÓDIGO DE LA MUESTRA : M-01
 - 4.3 SECTOR : CHACUWIRI
 - 4.4 COMUNIDAD : CHAUPI SAHUACASI
 - 4.5 PROVINCIA : AZÁNGARO
 - 4.6 FECHA Y HORA DEL MUESTREO : 18 – 06 – 21 / 10:15 a.m.
 - 4.7 MUESTREO POR : ARNOLD HENRY CAIRA APAZA
 - 4.8 PROFUNDIDAD DE MUESTREO : 3 METROS
- 5. LUGAR DE RECEPCIÓN** : LABORATORIO LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
- 6. CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 21.2°C; Humedad relativa: 65%
- 7. EQUIPO UTILIZADO** : ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA. SHIMADZU, EDX 800HS.
- 8. RESULTADOS**
 - 8.1 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL**

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %	MÉTODO UTILIZADO
Silicio, Si	54.66	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽¹⁾
Aluminio, Al	26.34	
Hierro, Fe	6.39	
Potasio, K	5.96	
Magnesio, Mg	3.30	
Titanio, Ti	1.30	
Calcio, Ca	1.07	
Azufre, S	0.63	
Fósforo, P	0.28	
Manganeso, Mn	0.07	

⁽¹⁾ Balance de resultados al 100% del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío.



8.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADO EN ÓXIDOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %	MÉTODO UTILIZADO
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	40.21	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽¹⁾
Óxido de silicio, SiO ₂	38.11	
Óxido de potasio, K ₂ O	10.13	
Óxido de magnesio, MgO	5.48	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	4.64	
Óxido de titanio, TiO ₂	0.67	
Óxido de calcio, CaO	0.41	
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.26	
Óxido de manganeso, MnO	0.05	
Óxido de azufre, SO ₃	0.05	

⁽¹⁾ Balance de resultados al 100% de óxidos calculados del análisis elemental (de l sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío.

9. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO

Los resultados de este Informe técnico son válidos solo para la muestra proporcionada por el solicitante del servicio en las condiciones indicadas del presente informe técnico.


Bach. Kevin Sullca
Analista Químico
LABICER – UNI




M.Sc. Elena A. Córder Cuyubamba
Responsable de análisis
Jefe de Laboratorio
CQP 793

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

ANEXO



FIGURA N°1. Muestra de Hidralgiritá M-01.



FIGURA N°2. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva.



Anexo 7: Resultados del análisis de la composición química de la hidralgiritita pretratada con óxidos de hierro



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



INFORME TÉCNICO N° 0807 – 21 – LABICER

- 1. DATOS DEL SOLICITANTE**
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : ARNOLD HENRY CAIRA APAZA
 - 1.2 DNI : 70520084
- 2. CRONOGRAMA DE FECHAS**
 - 2.1 FECHA DE RECEPCIÓN : 12 / 08 / 2021
 - 2.2 FECHA DE ENSAYO : 16 / 08 / 2021
 - 2.3 FECHA DE EMISIÓN : 17 / 08 / 2021
- 3. ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA
- 4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN SOLICITANTE**
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE HIDRALGIRITA PRETRATADA CON ÓXIDOS DE HIERRO
 - 4.2 CÓDIGO DE LA MUESTRA : M-02
 - 4.3 OBSERVACIÓN : MUESTRA PRETRATADA EN LABORATORIO
 - 4.4 FECHA : 02 – 08 – 21
- 5. LUGAR DE RECEPCIÓN** : LABORATORIO LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
- 6. CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 21.2°C; Humedad relativa: 65%
- 7. EQUIPO UTILIZADO** : ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA. SHIMADZU, EDX 800HS.
- 8. RESULTADOS**
 - 8.1 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL**

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %	MÉTODO UTILIZADO
Silicio, Si	35.06	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽¹⁾
Hierro, Fe	31.71	
Aluminio, Al	19.05	
Cloruro, Cl	8.43	
Potasio, K	3.39	
Azufre, S	0.85	
Titanio, Ti	0.82	
Calcio, Ca	0.61	
Zinc, Zn	0.09	

⁽¹⁾ Balance de resultados al 100% del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío.



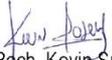
8.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADO EN ÓXIDOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %	MÉTODO UTILIZADO
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	32.08	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽¹⁾
Óxido de silicio, SiO ₂	31.10	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	28.25	
Óxido de potasio, K ₂ O	7.42	
Óxido de titanio, TiO ₂	0.53	
Óxido de calcio, CaO	0.30	
Cloruro, Cl	0.20	
Óxido de azufre, SO ₃	0.09	
Óxido de zinc, ZnO	0.03	

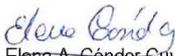
⁽¹⁾ Balance de resultados al 100% de óxidos calculados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío.

9. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO

Los resultados de este Informe técnico son válidos solo para la muestra proporcionada por el solicitante del servicio en las condiciones indicadas del presente informe técnico.


Bach. Kevin Sullca
Analista Químico
LABICER – UNI




Sc. Elena A. Córdor Cuyubamba
Responsable de análisis
Jefe de Laboratorio
CQP 793

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

ANEXO



FIGURA N°1. Muestra de Hidralginita pretratada con óxidos de hierro M-02.



FIGURA N°2. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva.



Anexo 8: Informe de ensayo de pruebas preliminares para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00357

Fecha de emisión: 27/08/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 8B567C3E

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : Proyecto de tesis

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : ARNOLD HENRY CAIRA APAZA
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 244-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 20/08/2021
 Fecha de ensayo : 20/08/2021

Nro de muestras : 6

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
AG21000656	PRUEBA PRELIMINAR 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:10
AG21000657	PRUEBA PRELIMINAR 02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:12
AG21000658	PRUEBA PRELIMINAR 03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:15
AG21000659	PRUEBA PRELIMINAR 04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:19
AG21000660	PRUEBA PRELIMINAR 05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:21
AG21000661	PRUEBA BLANCO 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	19/08/2021	14:24

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

Condiciones de recepción de la muestra
 Cooler refrigerado

Observación
 -

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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





Laboratorios Analíticos del Sur

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



Laboratorios Analíticos del Sur

Registro N°LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00357

Fecha de emisión: 27/08/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 8B567C3E

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG21000656	PRUEBA PRELIMINAR 01	0,0028
AG21000657	PRUEBA PRELIMINAR 02	0,0067
AG21000658	PRUEBA PRELIMINAR 03	0,0175
AG21000659	PRUEBA PRELIMINAR 04	0,0233
AG21000660	PRUEBA PRELIMINAR 05	0,0165
AG21000661	PRUEBA BLANCO 01	0,0465


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

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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





Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00357

Fecha de emisión: 27/08/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 8B567C3E

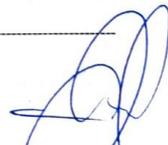
MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

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)	[- 2.5] mg/L

* : Límite detección

b : Límite de cuantificación

Fin del informe


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

"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 sólo están relacionados a la muestra ensayada.

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

Validar el informe
vía web



Anexo 9: Informe de ensayo de la etapa de búsqueda de primer orden para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00385

Fecha de emisión: 11/09/2021

Página 1 de 3

Clave generada : D0F6635F

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 265-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 3/09/2021
 Fecha de ensayo : 3/09/2021
 Nro de muestras : 20

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
AG21000712	TRATAMIENTO 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	15:40
AG21000713	TRATAMIENTO 02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	10:45
AG21000714	TRATAMIENTO 03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	12:24
AG21000715	TRATAMIENTO 04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	2/09/2021	11:42
AG21000716	TRATAMIENTO 05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	10:50
AG21000717	TRATAMIENTO 06	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	15:11
AG21000718	TRATAMIENTO 07	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	12:02
AG21000719	TRATAMIENTO 08	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	2/09/2021	11:32
AG21000720	TRATAMIENTO 09	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	14:09
AG21000721	TRATAMIENTO 10	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	2/09/2021	11:46
AG21000722	TRATAMIENTO 11	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	12:04
AG21000723	TRATAMIENTO 12	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	11:58
AG21000724	TRATAMIENTO 13	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	10:38
AG21000725	TRATAMIENTO 14	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	12:08
AG21000726	TRATAMIENTO 15	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	14:49
AG21000727	TRATAMIENTO 16	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	2/09/2021	11:36
AG21000728	TRATAMIENTO 17	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	12:01
AG21000729	TRATAMIENTO 18	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	14:06
AG21000730	TRATAMIENTO 19	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/09/2021	10:41
AG21000731	TRATAMIENTO 20	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ / JULIACA / SAN ROMAN / PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	31/08/2021	15:48

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

Condiciones de recepción de la muestra Cooler refrigerado
Observación -

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Oroya A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico
 Verificar el informe
 vía web

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00385

Fecha de emisión: 11/09/2021

Página 2 de 3

Clave generada : D0F6635F

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG21000712	TRATAMIENTO 01	0,0046
AG21000713	TRATAMIENTO 02	0,0201
AG21000714	TRATAMIENTO 03	0,0042
AG21000715	TRATAMIENTO 04	0,0185
AG21000716	TRATAMIENTO 05	0,0057
AG21000717	TRATAMIENTO 06	0,0205
AG21000718	TRATAMIENTO 07	0,0051
AG21000719	TRATAMIENTO 08	0,0193
AG21000720	TRATAMIENTO 09	0,0140
AG21000721	TRATAMIENTO 10	0,0140
AG21000722	TRATAMIENTO 11	0,0132
AG21000723	TRATAMIENTO 12	0,0134
AG21000724	TRATAMIENTO 13	0,0065
AG21000725	TRATAMIENTO 14	0,0218
AG21000726	TRATAMIENTO 15	0,0056
AG21000727	TRATAMIENTO 16	0,0189
AG21000728	TRATAMIENTO 17	0,0074
AG21000729	TRATAMIENTO 18	0,0169
AG21000730	TRATAMIENTO 19	0,0050
AG21000731	TRATAMIENTO 20	0,0165


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

"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.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

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





Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00385

Fecha de emisión: 11/09/2021

Página 3 de 3

Clave generada : D0F6635F

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)	[- 2.5] mg/L

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

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

(Firma manuscrita)
 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Omar A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"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, ">b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

Validar el informe
vía web



Anexo 10: Informe de ensayo de la etapa de búsqueda de segundo orden para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00411

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 3160A8A

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 285-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 2/10/2021
 Fecha de ensayo : 2/10/2021
 Nro de muestras : 13

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
AG21000785	TRATAMIENTO 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	12.32
AG21000786	TRATAMIENTO 02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	12.52
AG21000787	TRATAMIENTO 03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	11.05
AG21000788	TRATAMIENTO 04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	14.20
AG21000789	TRATAMIENTO 05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	12.25
AG21000790	TRATAMIENTO 06	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	11.02
AG21000791	TRATAMIENTO 07	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	10.59
AG21000792	TRATAMIENTO 08	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	12.46
AG21000793	TRATAMIENTO 09	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	13.54
AG21000794	TRATAMIENTO 10	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	14.02
AG21000795	TRATAMIENTO 11	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	15.21
AG21000796	TRATAMIENTO 12	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	29/09/2021	15.10
AG21000797	TRATAMIENTO 13	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	1/10/2021	10.56

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

Condiciones de recepción de la muestra
Cooler refrigerado
Observación
-

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Omar A. Juarez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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



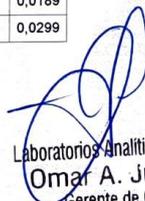
INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00411

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 2 de 3
Clave generada : 3160A8A

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG21000785	TRATAMIENTO 01	0,0034
AG21000786	TRATAMIENTO 02	0,0278
AG21000787	TRATAMIENTO 03	0,0196
AG21000788	TRATAMIENTO 04	0,0047
AG21000789	TRATAMIENTO 05	0,0197
AG21000790	TRATAMIENTO 06	0,0195
AG21000791	TRATAMIENTO 07	0,0294
AG21000792	TRATAMIENTO 08	0,0209
AG21000793	TRATAMIENTO 09	0,0195
AG21000794	TRATAMIENTO 10	0,0207
AG21000795	TRATAMIENTO 11	0,0051
AG21000796	TRATAMIENTO 12	0,0189
AG21000797	TRATAMIENTO 13	0,0299


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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

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





Laboratorios Analíticos del Sur

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



Laboratorios Analíticos del Sur

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00411

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 3160A8A

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)	[- 2.5] mg/L

a : Límite detección

b : Límite de cuantificación

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


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

"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

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 11: Informe de ensayo de la isoterma de adsorción para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00412

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 1 de 3

Clave generada : 9A1F5B30

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 285-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 2/10/2021
 Fecha de ensayo : 2/10/2021

Nro de muestras : 5

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
AG21000798	ISOTERMA 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	16.25
AG21000799	ISOTERMA 02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	16.28
AG21000800	ISOTERMA 03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	16.37
AG21000801	ISOTERMA 04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	30/09/2021	16.32
AG21000802	ISOTERMA 05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	30/09/2021	16.46

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

Condiciones de recepción de la muestra
 Cooler refrigerado

Observación
 -

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

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



Registro N° LE - 050

Laboratorios Analíticos del Sur

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00412

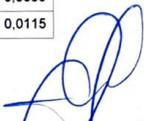
Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 9A1F5B30

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796	
		As	mg/L
AG21000798	ISOTERMA 01	0,0035	
AG21000799	ISOTERMA 02	0,0034	
AG21000800	ISOTERMA 03	0,0047	
AG21000801	ISOTERMA 04	0,0069	
AG21000802	ISOTERMA 05	0,0115	


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

"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.

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

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

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

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



Validar el informe
vía web

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00412

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 9A1F5B30

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)	[- 2.5] mg/L

a : Límite de detección

b : Límite de cuantificación

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



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

"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

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 12: Informe de ensayo de la cinética de adsorción para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00399

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 1 de 3

Clave generada : C05B1E35

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°. 275-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 16/09/2021
 Fecha de ensayo : 16/09/2021
 Nro de muestras : 5

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
AG21000751	CINÉTICA 01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	13/09/2021	9.42
AG21000752	CINÉTICA 02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	13/09/2021	9.45
AG21000753	CINÉTICA 03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	13/09/2021	10.00
AG21000754	CINÉTICA 04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	13/09/2021	10.40
AG21000755	CINÉTICA 05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNAJ - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA PREPARADA Y TRATADA EN LABORATORIO	13/09/2021	11.40

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

Condiciones de recepción de la muestra Cooler refrigerado
Observación -

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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





Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00399

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 2 de 3

Clave generada : C05B1E35

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796	
		As	mg/L
AG21000751	CINÉTICA 01	0,0049	
AG21000752	CINÉTICA 02	0,0036	
AG21000753	CINÉTICA 03	0,0042	
AG21000754	CINÉTICA 04	0,0033	
AG21000755	CINÉTICA 05	0,0034	

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

"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.

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

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



Validar el informe
via web



Laboratorios Analíticos del Sur

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



Laboratorios Analíticos del Sur

Registro N°LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00399

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 3 de 3

Clave generada : C05B1E35

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)	[- 2.5] mg/L

a : Límite detección b : Límite de cuantificación

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

(Firma)
 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"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.

"cValor numérico"=Límite de detección del método, "bValor Numérico"=Límite de cuantificación del método

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

Validar el informe
vía web



Anexo 13: Informe de ensayo de muestras de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos de Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00400

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 1 de 3
Clave generada : 6D0A0B5D

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 275-21
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 16/09/2021
Fecha de ensayo : 16/09/2021
Nro de muestras : 3

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
AG21000756	SALIDA PUNO	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	PARQUE INDUSTRIAL TAPARACHI - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	0380469 - 8283594	13/09/2021	14:05
AG21000757	SALIDA HUANCANÉ	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	URBANIZACIÓN SANTA FE - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	0382275 - 8291808	13/09/2021	14:58
AG21000758	SALIDA CUSCO	Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial	URBANIZACIÓN ESCURI KORIWATA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	0377340 - 8291779	13/09/2021	15:42

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

Condiciones de recepción de la muestra
Cooler refrigerado
Observación
-

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

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

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00400

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 6D0A0B5D

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG21000756	SALIDA PUNO	0,0081
AG21000757	SALIDA HUANCANÉ	0,0127
AG21000758	SALIDA CUSCO	0,0800

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

"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 sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00400

Fecha de emisión: 25/09/2021

Página 3 de 3

Clave generada : 6DOA0B5D

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)	[- 2.5] mg/L

• : Límite de detección

◻ : Límite de cuantificación

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

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

"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

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 14: Informe de ensayo de muestras tratadas de aguas subterráneas de la ciudad de Juliaca para la determinación de arsénico en agua realizada por Laboratorios Analíticos del Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

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



INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00413

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 1 de 3

Clave generada : ED186BA6

Señores : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Dirección : JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 Atención : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Proyecto : TESIS

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : CAIRA APAZA ARNOLD HENRY
 Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 285-21
 Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 2/10/2021
 Fecha de ensayo : 2/10/2021

Nro de muestras : 3

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
AG21000803	SALIDA PUNO	Agua de Proceso - Agua Purificada	PARQUE INDUSTRIAL TAPARACHI - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	15:56
AG21000804	SALIDA HUANCANÉ	Agua de Proceso - Agua Purificada	URBANIZACIÓN SANTA FE - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	13:42
AG21000805	SALIDA CUSCO	Agua de Proceso - Agua Purificada	URBANIZACIÓN ESCURI KORIWATA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO	MUESTRA TRATADA EN LABORATORIO	28/09/2021	11:51

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

Condiciones de recepción de la muestra
Cooler refrigerado
Observación
-

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

"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.

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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





Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

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



Registro N° LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00413

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 2 de 3

Clave generada : ED186BA6

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796
		As mg/L
AG21000803	SALIDA PUNO	0,0049
AG21000804	SALIDA HUANCANÉ	0,0083
AG21000805	SALIDA CUSCO	0,0049


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

"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.

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

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

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

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

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



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

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



Registro N°LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00413

Fecha de emisión: 7/10/2021

Página 3 de 3

Clave generada : ED186BA6

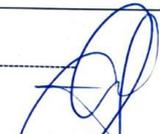
MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

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)	[- 2.5] mg/L

a : Límite de detección

b : Límite de cuantificación

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


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

"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

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

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

Validar el informe
vía web





UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

“Universidad Pública de Calidad”



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"