

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



“Evaluación de Arsénico con Chacko (*Hidralgirita*) en Aguas Subterráneas Contaminadas del Distrito de Taraco – Puno”.

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Lidia Rut Tapia Callata

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**“EVALUACION DE ARSENICO CON CHACKO (*Hidralgirita*) EN AGUAS
SUBTERRANEAS CONTAMINADAS DEL DISTRITO DE TARACO – PUNO”.**

PRESENTADO POR:

BACH. LIDIA RUT TAPIA CALLATA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

APROBADA POR:

PRESIDENTE:

M.Sc. Lidia Ensueño Romero Iruri

PRIMER MIEMBRO:

Ing. Percy Eloy Mamani Luque

SEGUNDO MIEMBRO:

Ing. Elva Luz Macedo Enríquez

DIRECTOR:

M.Sc. Norberto Sixto Miranda Zea

Área : Tecnologías ambientales y recursos naturales

Tema : Análisis químico

DEDICATORIA

A Dios, quien me ha acompañado siempre en mis alegrías y en mis tristezas dándome aliento y fortaleza para no desmayar y perseverar en el cumplimiento de este reto.

A mis padres Calixto y Isidora, por inculcarme valores y principios, por enseñarme que los problemas son para madurar y crecer como persona, que a pesar de todo se debe conservar el corazón integro.

A mis hermanas Diana, Yody y a mi hermano Alfredo, gracias por brindarme su apoyo, ustedes han sido pilar fundamental en el logro de esta meta, por sus consejos y ayuda.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano, a toda la plana docente y al personal administrativo y técnico por ser el alma mater de todos los profesionales que pasaron por sus distintas aulas universitarias.

En especial a la escuela profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química por el tiempo y dedicación prestada para mi formación profesional.

A mi director de tesis Ing. M.Sc. Norberto Sixto Miranda Zea por guiarme en el transcurso de este trabajo especialmente en la parte experimental.

A la Ing. M.Sc. Lidia Ensueño Romero Iruri, al Ing. Percy Eloy Mamani Luque y a la Ing. Elva Luz Macedo Enríquez, por sus recomendaciones en la realización de la tesis y por sus acertados comentarios.

A Julio Cesar, quien en todo momento me ayudo a mantener el ánimo para llevar adelante el presente trabajo.

Muchas Gracias.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE DIAGRAMA	9
INDICE DE TABLAS	10
INDICE DE ACRÓNIMOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
I. INTRODUCCION	15
1.1. ANTECEDENTES.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
II. REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1. MARCO CONCEPTUAL	20
2.1.1. AGUA SUBTERRANEA.....	20
2.1.2. METAL PESADO DE MUY ALTA TOXICIDAD	20
2.1.3. ARSÉNICO.....	20
2.1.4. HIDRALGIRITA	20
2.1.5. CHACKO	21
2.1.5.1. Origen del chacko (<i>Hidralgirita</i>).	21
2.1.6. ADSORBENTE.....	21
2.1.7. ADSORBATO	21
2.1.8. EXTRACCION SOLIDO – LÍQUIDO	21
2.1.9. FILTRACIÓN	21
2.2. MARCO TEORICO	22
2.2.1. METALES PESADOS.....	22
2.2.2. ARSENICO.....	22
2.2.2.1. Compuestos químicos del arsénico	23
2.2.2.2. Arsénico en el agua.....	24
2.2.2.3. Toxicidad y efecto en la salud.	30
2.2.2.4. Efectos ambientales del arsénico.	31
2.2.2.5. Límites permisibles del Arsénico.	32

2.2.3. METODOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO	32
2.2.3.1. Coagulación/filtración	32
2.2.3.2. Alúmina activa	33
2.2.3.3. Osmosis inversa	33
2.2.3.4. Intercambio iónico	33
2.2.3.5. Nanofiltración	34
2.2.3.6. Ablandamiento con Cal	34
2.2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN	35
2.2.4.1. Adsorción física	35
2.2.4.2. Adsorción química	36
2.2.4.3. Mecanismos de incorporación de arsénico a las aguas	36
2.2.4.4. Factores que influyen en la adsorción	40
2.2.4.5. Equilibrio e isothermas de Adsorción	45
2.2.4.6. Cinética de adsorción	50
2.2.5. ARCILLA CHACKO (<i>Hidralgirita</i>)	54
2.2.5.1. Distribución geográfica	55
2.2.5.2. Usos del chacko (<i>Hidralgirita</i>)	55
2.2.5.3. Fuente de minerales del chacko (<i>Hidralgirita</i>)	56
2.2.5.4. Chacko (<i>Hidralgirita</i>) en adsorción	57
2.2.5.5. Propiedades físicas y químicas de las arcillas	57
2.2.6. OTROS TIPOS DE ARCILLAS ESPECIALES	60
2.3. HIPÓTESIS	61
2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL	61
2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA	61
III. MATERIALES Y MÉTODOS	62
3.1. MATERIALES	62
3.1.1. MATERIA PRIMA	62
3.1.2. MATERIAL DE LABORATORIO, EQUIPOS Y REACTIVOS	62
3.2. METODOLOGÍA	63
3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE CHACKO (<i>Hidralgirita</i>)	63
3.2.1.1. Sitio de extracción de la arcilla Chacko (<i>Hidralgirita</i>)	63
3.2.1.2. Determinación de las características organolépticas	64
3.2.1.3. Análisis de las características químicas	64

3.2.2. TRATAMIENTO DE CHACKO (<i>Hidralgirita</i>).....	66
3.2.2.1. Tratamiento físico	66
3.2.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUBTERRRANEA CONTAMINADA CON ARSENICO.....	67
3.2.3.1. Sitio de muestreo de agua subterránea	67
3.2.3.2. Características Físico – Químicas	68
3.2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN DEL ION ARSÉNICO.	68
3.2.4.1. Evaluación de las variables más influyentes.....	69
3.2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN DEL ION ARSÉNICO.	71
3.2.5.1. Diseño experimental central compuesto ortogonal	71
3.2.6. ISOTERMA DE ADSORCIÓN	75
3.2.6.1. Ajuste a una isoterma de equilibrio.....	76
3.2.7. CINETICA DE ADSORCIÓN	76
3.2.7.1. Ajuste a un modelo cinético.....	77
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ARCILLA CHACKO (<i>HIDRALGIRITA</i>).....	79
4.1.1. CARACTERISTICAS ORGANOLEPTICAS	79
4.1.2. CARACTERISTICAS QUÍMICAS	79
4.2. TRATAMIENTO DE LA ARCILLA CHACKO (<i>HIDRALGIRITA</i>).....	81
4.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUBTERRANEA CONTAMINADA CON ARSENICO (As).	82
4.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS.....	82
4.4. PROCESO DE ADSORCIÓN DEL ION ARSENICO As	82
4.4.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES MÁS INFLUYENTES	82
4.4.1.1. Efecto de cantidad de adsorbente	82
4.4.1.2. Efecto del pH.....	84
4.4.1.3. Efecto de la temperatura	86
4.4.1.4. Efecto de tiempo de contacto	87
4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCION DEL ION As.....	89
4.5.1. ANALISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO	90
4.5.2. RESPUESTA OPTIMIZADA.	95
4.6. CINÉTICA DE ADSORCIÓN.....	96

4.6.1. AJUSTE A UN MODELO CINÉTICO	97
4.6.1.1. Modelo de Pseudo primer orden	97
4.6.1.2. Modelo de Pseudo segundo orden	98
4.6.1.3. Modelo de Elovich	100
4.6.1.4. Modelo de difusión intrapartícula	101
V. CONCLUSIONES	103
VI. RECOMENDACIONES	104
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	105
ANEXOS	112

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas en que el Arsénico se encuentra.	23
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.	42
Figura 3. Especies de As (V) como función de pH.	43
Figura 4. Especies de As (III) como función de pH.	43
Figura 5. Isoterma de Langmuir	48
Figura 6. Isoterma de Freundlich.....	50
Figura 7. Etapas de la cinética de adsorción.	51
Figura 8. Extracción de Arcilla Chacko (<i>Hidralgirita</i>).....	55
Figura 9. Efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de As.	83
Figura 10. Efecto del pH en la adsorción de As.	85
Figura 11. Efecto de la temperatura en la adsorción de As.	86
Figura 12. Efecto del tiempo de contacto en la adsorción de As.	88
Figura 13. Grafica de los efectos principales.....	91
Figura 14. Diagrama de Pareto estandarizado.	93
Figura 15. Grafica de superficie de respuesta estimada.....	95
Figura 16. Cinética de adsorción de As.	96
Figura 17. Ajuste de datos al modelo de Pseudo primer orden.	98
Figura 18. Ajuste de datos al modelo de Pseudo segundo orden.	99
Figura 19. Ajuste de datos al modelo de Elovich.	100
Figura 20. Ajuste de datos al modelo de difusión intraparticular.....	102

INDICE DE DIAGRAMA

Diagrama 1. Proceso de adsorción del ion arsénico utilizando la arcilla chacko (<i>Hidralgirita</i>).	67
Diagrama 2. Balance de Materia de tratamiento físico de la Arcilla chacko (<i>Hidralgirita</i>).	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Las concentraciones de arsénico por dist. y el tipo de fuente Perú, 2012.	16
Tabla 2. Propiedades químicas del Arsénico.	23
Tabla 3. Concentración de arsénico en algunos de los minerales más comunes.....	29
Tabla 4. Diferencias entre la adsorción física y adsorción química.	36
Tabla 5. Accesibilidad para la extracción de la arcilla Chacko (<i>Hidralgirita</i>).	64
Tabla 6. Composición química expresada como óxidos de chacko (<i>Hidralgirita</i>) natural de la zona Asillo – Puno.	65
Tabla 7. Composición química expresada como elementos de chacko (<i>Hidralgirita</i>) natural de la zona Asillo – Puno	65
Tabla 8. Accesibilidad para muestreo de agua subterránea contaminada con As.....	68
Tabla 9. Características físico - químicas.....	68
Tabla 10. Efecto de la cantidad de adsorbente.....	69
Tabla 11. Efecto de pH.....	70
Tabla 12. Efecto de la temperatura.....	70
Tabla 13. Efecto de tiempo de contacto.	71
Tabla 14. Niveles de las variables independientes a estudiar.	71
Tabla 15. Variable respuesta.	72
Tabla 16. Transformación de variables.	72
Tabla 17. Matriz del diseño central compuesto ortogonal.....	74
Tabla 18. Isotermas de adsorción.....	76
Tabla 19. Modelos cinéticos de adsorción.....	78
Tabla 20. Análisis de la composición química expresada como óxidos de chacko (<i>Hidralgirita</i>) natural de la zona Azángaro – Puno.	79
Tabla 21. Análisis de la composición química expresada como elementos de chacko (<i>Hidralgirita</i>) natural de la zona Azángaro – Puno.....	80
Tabla 22. Características de Análisis físico - químicas.....	82
Tabla 23. Adsorción de As a diferentes cantidades de adsorbente.....	83
Tabla 24. Tiempos de equilibrio en la adsorción de As.....	84
Tabla 25. Adsorción de As con un pH.	84
Tabla 26. pH óptimos en la adsorción de As con diversos Adsorbentes.....	85
Tabla 27. Adsorción de As con temperatura.	86
Tabla 28. Temperaturas óptimos en la adsorción de As con diversos Adsorbentes....	87
Tabla 29. Adsorción de As a diferentes tiempos de contacto.....	87
Tabla 30. Tiempos de equilibrio en la adsorción de As.....	88

Tabla 31. Resultados de la variable respuesta.	89
Tabla 32. Resumen del diseño de experimentos.	90
Tabla 33. Resumen de las bases del diseño de experimentos.....	90
Tabla 34. Efectos estimados de las variables e interacciones.....	90
Tabla 35. Análisis de Varianza para Capacidad de adsorción de As.	92
Tabla 36. Coeficiente de regresión del modelo ajustado.	94
Tabla 37. Resultados de las variables óptimas.	95
Tabla 38. Resultados de la cinética de adsorción.	96
Tabla 39. Resultados del modelo de Pseudo primer orden.	97
Tabla 40. Resultados del modelo de Pseudo segundo orden.	99
Tabla 41. Resultados del modelo de Elovich.....	100
Tabla 42. Resultados del modelo de difusión intraparticular.	101

INDICE DE ACRÓNIMOS

APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
As:	Arsénico.
°C:	Grados Centígrados.
cm	Centímetros
Dv.	Desvió.
E:	Este.
Eh	Potencial redox
EPA	Environmental Protection Agency
H.A.C.R.E.	Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
K:	Constantes.
L:	Litro.
MINAM:	Ministerio de Ambiente.
m.s.n.m:	Metros Sobre el Nivel del Mar.
mL:	Mililitro.
mm:	Milímetros.
mg:	Miligramos
N:	Norte
OMS:	Organización Mundial de la Salud
pH:	Potencial de hidrógeno.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se presenta la metodología requerida para la adsorción de arsénico de las aguas subterráneas contaminadas del distrito de Taraco de 0.05 mg/L, usando chacko (*Hidralgirita*), el cual se desarrolló en los ambientes de laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano Puno y para su análisis de arsénico, se envió al laboratorio de Seda Juliaca el consumo de agua que contiene metal pesado como el arsénico según a la OMS no debería ser mayor a 0.01 mg/L lo cual afecta a la salud humana. Se determinaron las variables más influyentes según a nuestro objetivo, cantidad de adsorbente, pH, temperatura y tiempo. La metodología con la que se trabajó es por diseño experimental central compuesto ortogonal de segundo orden. Se evaluó las propiedades del Chacko (*Hidralgirita*), mediante un estudio de caracterización de la materia prima como óxidos: dióxido de silicio 46.451%, trióxido de aluminio 37.833%, óxido de magnesio 4.871%, óxido de calcio 4.152% entre otros óxidos, estos óxidos facilitan la adsorción del ion arsénico, el chacko (*Hidralgirita*) para su análisis se envió al laboratorio de la (UNI) y para la adsorción de As al laboratorio de control de calidad Seda Juliaca y así aplicarlo como arcilla natural para el ablandamiento de agua subterránea. En la adsorción del ion As se obtuvieron condiciones favorables: La cantidad de adsorbente 0.2 g, pH óptimo que es 7.5, temperatura 25 °C y tiempo óptimo de contacto que es de 70 minutos. Se determinó la cinética de adsorción para determinar el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio y se evaluaron los cinéticos de Pseudo primer orden, Pseudo segundo orden, Elovich y Difusión intraparticular. Se analizó el agua subterránea contaminada con As del distrito de Taraco antes 0.05 mg/L y después de la remoción con chacko (*Hidralgirita*) se llegó a disminuir a 0.008 mg/L. Se llegó a una máxima capacidad de adsorción de 84%.

PALABRA CLAVE: Chacko (*Hidralgirita*), evaluación, adsorción, cinética, arsénico, aguas, subterráneas.

ABSTRACT

In the present research, the methodology required for the adsorption of arsenic from the contaminated groundwater of the Taraco district of 0.05 mg/L, using chacko (*Hydralgirite*), was developed in laboratory environments of the Faculty Of Chemical Engineering of the National University of the Puno Plateau and for its analysis of arsenic, the consumption of water containing heavy metal as the arsenic according to Who was sent to the laboratory of Seda Juliaca should not be greater than 0.01 mg/L which Affects human health. The most influential variables were determined according to our objective, amount of adsorbent, pH, temperature and time. The methodology with which it was worked is by central experimental design orthogonal composed of second order. The properties of Chacko (*Hydralgirite*) were evaluated by a study of the characterization of the raw material as oxides: silicon dioxide 46.451%, aluminum trioxide 37.833%, magnesium oxide 4.871%, calcium oxide 4.152% among other oxides, these Oxides facilitate the adsorption of the arsenic ion that was sent chacko clay (*Hydralgirite*) for its analysis was sent to the laboratory of the (UNI) and for the adsorption of Ace to the quality control laboratory Seda Juliaca and thus to apply it as natural clay for the Softening of groundwater. In the adsorption of the As ion favorable conditions were obtained: The amount of adsorbent 0.2 g, optimum pH being 7.5, temperature 25 ° C and optimum contact time which is 70 minutes. The adsorption kinetics were determined to determine the time required to reach equilibrium and the kinetics of Pseudo first order, Pseudo second order, Elovich and intraparty diffusion were evaluated. The groundwater contaminated with Ace of the district of Taraco was analyzed before 0.05 mg/L and after the removal with chacko (*Hydralgirite*) was decreased to 0.008 mg/L. A maximum adsorption capacity of 84% was reached.

KEY WORD: Chacko (*Hydralgirite.*), evaluation, adsorption, isotherm, kinetics, arsenic, groundwater.

I. INTRODUCCION

La presencia de arsénico constituye uno de los grandes problemas de la contaminación del agua. La mayoría de arsénico proviene de la lixiviación natural de suelos y fuentes mineras. Estos se filtran y se extienden hacia los acuíferos, ríos, lagos y pozos subterráneos que generan eminente contaminación del agua. La toxicidad del arsénico es conocida a través de los incidentes por envenenamiento de seres humanos y por el uso que se le ha dado en medicina. En la actualidad, los reportes epidemiológicos de cáncer y problemas como la enfermedad de pie negro y lesiones cutáneas, asociados al arsénico han generado un creciente interés sobre los efectos que la exposición crónica de este elemento causa, debido a la ingesta y uso de agua contaminada, por lo que ya se le considera un problema de salud pública. La mayor amenaza del arsénico para la salud pública, proviene del agua que es bebida, generalmente como resultado de la ingestión prolongada de agua con bajas concentraciones de arsénico inorgánico. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido como máxima concentración de arsénico en agua para consumo humano de 0.01 mg/L y las normas de calidad de agua subterránea el máximo es de 0.05 mg/L con previo tratamiento para consumo humano, por encima del cual no sería adecuada para el consumo humano, ya que cantidades superiores produce cáncer y otras malformaciones del organismo humano.

En la actualidad existen métodos convencionales para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con arsénico, se han empleado una serie de materiales como resinas de intercambio iónico, nanofiltración, electrodiálisis reversible y membranas que son eficientes pero presentan elevado costo de adquisición e implementación para su tratamiento que ha impedido que su aplicación sea viable, sin embargo en la actualidad ha surgido la adsorción como una alternativa prometedora debido a sus ventajas como son: el adsorbente es económico y puede ser regenerado, también existe la posibilidad de recuperar el metal pesado.

Este trabajo considera como premisa el uso de chacko (*Hidralgirita*); que es una arcilla que se encuentra en forma abundante en la naturaleza, su precio es

económico, su tratamiento es sencillo. En Puno tenemos la bendición de contar con la arcilla de *Hidralgiritita* (silicato de aluminio hidratado) llamada chacko por los nativos Quechua del Distrito de Azángaro, esta arcilla existe en todas las partes del Perú. Las arcillas de chacko se caracterizan por su capacidad de adsorber metales alcalinos y algunos metales tóxicos. En las comunidades campesinas del Distrito de Taraco, Provincia de Huancané – Departamento de Puno, están bebiendo agua subterránea contaminada que provienen de pozos subterráneos con profundidades entre 2 a 4 metros que son aledañas al río Ramis con elevados niveles de arsénico (0.05 mg/L de As) que fueron analizadas, los mismos que fueron encontrados en diferentes pozos subterráneos de la Zona de Juliaca, Coata y otros, lo cual afecta gravemente a la salud pública y que son las sustancias más perjudiciales para la salud humana.

Tabla 1. Las concentraciones de arsénico, por distritos y el tipo de fuente, Perú, 2012.

Distritos	Comunidad	Tipo de fuente	N° de Muestras	Concentración de arsénico media, µg/l (rango)
Taraco	Taraco	Agua Subterránea	3	39.6 (9.6–63.0)
	Ramis	Rio	2	11.5 (1.4–13.6)
Juliaca	UANCV	Agua Subterránea	27	51.7 (1.6–154.8)
	S.P Pampa	Agua Subterránea	1	150
	Taparachi	Agua Subterránea	48	62.0 (1.2–193.1)
Achaya	Achaya	Agua Subterránea	1	4.6
	Rio Calapuja	Rio	1	34
	Rio Ramis	Rio	3	16.9 (7.1–31.5)
Ananea	Ananea	Agua Subterránea	1	0.1
San Antón	Collacachi	Agua Subterránea	2	1.65 (0.3–3.0)
	San Antón	Agua Subterránea	2	52.5 (45.6–59.4)

Fuente: Ministerio del Ambiente-Gestión integral de calidad ambiental, Autoridad Nacional del Agua ANA (2012).

1.1. ANTECEDENTES

Paredes J. (2012). “Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción”. Se realizó la remoción de arsénico por medio de los tres adsorbentes utilizados teniendo como concentración inicial de As 0.220 mg/L resultando con la Goethita reduce a 0.005 mg/L con un pH óptimo de 7.05, tiempo óptimo de 30 min cantidad de adsorbente 01 g con una capacidad de adsorción de 97.72% , con el dióxido de titanio (DOW) reduce a 0.015 mg/L con un pH óptimo de 7.5, tiempo óptimo de 90 min cantidad de adsorbente 01 g con una capacidad de adsorción de 93.18% y con la pectina ácida reduce a 0.02 mg/L con un pH óptimo de 5.0, tiempo óptimo de 150 min cantidad de adsorbente 01 g con una capacidad de adsorción de 90.91%.

Flérida M. (2009). Se desarrolló una metodología para pretratar una zeolita natural (chabazita) con óxido de magnesio para remover arsénico (As^{+5}) en agua de consumo humano. Se propone un tratamiento con óxido de magnesio por considerarse un adsorbente eficiente para remoción de metales en agua. Los resultados del diseño experimental muestran una eficiencia superior a 90 % de As^{+5} adsorbido en un tiempo de cinco minutos. Los resultados indican que las variables más significativas que afectan la adsorción de As^{+5} son la concentración inicial de As y la relación sólido/líquido (S/L). Los datos experimentales se ajustan de mejor forma a la isoterma de Freundlich, con lo que se obtiene una capacidad de adsorción de 20.17 mg/g.

Marta I. (2010). “La reducción de los niveles de arsénico en aguas de consumo humano representa uno de los retos ambientales prioritarios a nivel mundial. Teniendo en cuenta los efectos tóxicos de arsénico, la organización mundial de la salud recomienda una concentración máxima de 0.01 mg/l de arsénico en el agua potable, las poblaciones latinoamericanas presentan graves problemas de salud debido al consumo de aguas con contenido de arsénico, los métodos para la remoción de arsénico adecuados para ser aplicado en las aguas de América Latina están las tecnologías convencionales de oxidación, coagulación, precipitación, adsorción, osmosis inversa y el uso de intercambiadores de iones. Se examinó la relación entre los procesos de adsorción y la solubilidad del arsénico en los sedimentos superficiales, y se mostró una alta capacidad para

adsorber el As (V), la capacidad de adsorción fue 92 mg/Kg a pH 7.5 utilizando Isoterma de adsorción Langmuir se calculó el arsénico soluble > 97% de As (V)".

Gao, S. (2006). "El chacko con contenido de minerales óxido de hierro y alúmina tiene la propiedad de adsorber iones arsénico de agua superficiales y subterráneas. Se estudió la adsorción de arsénico (V) bajo diferentes condiciones fisicoquímicas sobre cuatro adsorbentes comerciales: hematita, goethita, magnetita y hierro valencia cero, los resultados muestran que el arseniato de adsorción está relacionado con el contenido de hierro en el adsorbente, y la tasa de adsorción aumente en el siguiente orden: geotita, hematita, magnetita, hierro".

Huaming G. (2010). "Se ha reportado la máxima adsorción de As (III) por sericita fue 28.57 mg/Kg a pH 7.5 en 2h. La eliminación de arsénico (III) y arsénico (V) se estudió mediante bioadsorción de quitosano a pH 4.0, el equilibrio de adsorción se ajustaron a los datos de Langmuir, Freundlich y de Redlich – Peterson. La capacidad de adsorción de bioadsorbente a partir de la isoterma de Langmuir es 56.50 y 96.46 mg/g de quitosano para As (III) y As (V) respectivamente. Los humedales artificiales son un sistema natural rentable utilizado con éxito para la eliminación de arsénico, las diferentes especies de arsénico puede ser encontrados en los humedales, influenciados por la vegetación y microorganismos".

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la adsorción de arsénico usando chacko (*Hidralgirita*) natural con alto contenido de óxidos minerales en aguas subterráneas contaminadas del Distrito de Taraco - Puno.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la cantidad de mg/L de arsénico en el agua antes y después del tratamiento con chacko (*Hidralgirita*).
2. Determinar el pH óptimo, Temperatura óptima y Tiempo óptimo en la adsorción de arsénico usando chacko (*Hidralgirita*) natural.
3. Determinar el contenido de óxidos y elementos de chacko (*Hidralgirita*) natural de distrito de Azángaro para la adsorción de arsénico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. AGUA SUBTERRANEA

Es el agua que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes o manantiales o cauces fluviales. (Auge M. 2006).

2.1.2. METAL PESADO DE MUY ALTA TOXICIDAD

A continuación, nos centraremos en el estudio del problema ambiental y de salud humana relacionados con Arsénico. Cabe destacar que no analizaremos todas las fuentes de contaminación, sino solamente relacionado si es apto para consumo humano. (Anawar, H. 2003).

2.1.3. ARSÉNICO

El arsénico es un elemento muy común en aguas naturales, en rocas y suelos, en la hidrosfera y la biosfera. Es movilizado al medio ambiente a través de una combinación de procesos que incluyen tanto procesos naturales (meteorización, actividad biológica, emisiones volcánicas), así como procesos antropogénicos (aguas residuales, actividad minera, uso de combustibles fósiles, uso de pesticidas y herbicidas). Ello es así, que ha llevado a organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), a establecer la reducción del límite del contenido de arsénico en agua de consumo de 0.05 a 0.01 mg/L. (Berg M. 2006).

2.1.4. HIDRALGIRITA

Es un silicato de aluminio hidratado ($\text{Ca}_2 [(\text{AlO}_2)_4 (\text{SiO}_2)_8] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), pertenece a la familia de las arcillas y es conocido por habitantes de las zonas altiplánicas y su nombre común es chacko. (Browman D. 2013).

2.1.5. CHACKO

Arcilla conocida desde tiempos inmemoriales y pertenece al grupo de los filosilicatos, se encuentra en todo el altiplano puneño y es consumido por los pobladores puneños del campo en forma de pasta con sal y papas. Es una arcilla llamada esmecitita muy esméctica muy homogénea y compacta formada por pequeñas plaquitas de esméctica que constituyen agregados laminares con tamaños medios inferiores a 1µm dispuestas según una textura tipo cornflakes. Entre estos agregados laminares, ocasionalmente, se observan algunas placas de mayor tamaño, correspondientes a partículas de sillita recubiertas de láminas de esmectita. (Browman D. 2013).

2.1.5.1. Origen del chacko (*Hidralgírta*).

- Desecación de lagunas y salinas del pleistoceno.
- Se presenta en yacimientos sedimentarios
- Meteorización de rocas sílices que contienen feldespatos
- Es un producto de la sedimentación natural, por acción de agua y CO₂
- Se presenta como: Terrones de tierra natural y de forma irregular.

2.1.6. ADSORBENTE

Es el producto que retiene a la otra sustancia en su especie. (Weber Walter J. 1989).

2.1.7. ADSORBATO

La especie química que resulta adsorbida o retenida sobre la superficie de un material adsorbente. (Weber Walter J. 1989).

2.1.8. EXTRACCION SOLIDO – LÍQUIDO

Operación unitaria en ingeniería química que consiste en remover un soluto soluble en un solvente. (R. Treybal. 1993).

2.1.9. FILTRACIÓN

Separación de las partículas sólidas de un líquido haciendo pasar la mezcla a través de un material que retiene partículas sólidas. (Weber Walter J. 1989).

2.2. MARCO TEORICO

2.2.1. METALES PESADOS

Los metales pesados pueden encontrarse en aguas superficiales bajo forma particulada, coloidal o fases disueltas. Las formas particuladas y coloidales pueden darse en hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfitos bien en arcillas, sílice o materia orgánica. La solubilidad de los metales traza en las aguas superficiales, está controlada predominantemente por el pH del agua, la concentración de los ligandos en los cuales el metal podría fijarse por adsorción, el estado de oxidación de los componentes minerales y de las condiciones redox del sistema. (Anawar H. 2003).

Los metales pesados en cantidades pequeñas son nutricionalmente esenciales para una vida sana. Pero en cantidades excesivas llegan a ser tóxicos cuando no son metabolizados por el cuerpo y se acumulan en los tejidos. Los metales pesados pueden incorporarse en el cuerpo humano a través de los alimentos, el agua, el aire o la absorción a través de la piel cuando entran en contacto con los seres humanos, en agricultura, en procesos de fabricación industrial. Los metales pueden provenir de fuentes naturales o antropogénicas. (Anawar H. 2003).

2.2.2. ARSENICO

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico.

El arsénico presenta raramente sólido, principalmente en forma de sulfuros. Presenta tres estados alotrópicos. Gris o metálico, amarillo y negro.

La arsenopirita (FeAsS) es la forma más abundante. (Alós y Juvina 2005).



Figura 1. Formas en que el Arsénico se encuentra.

Tabla 2. Propiedades químicas del Arsénico.

Nombre	Arsénico
Símbolo	As
Número atómico	33
Valencia	+3, +5
Estado de oxidación	-3, +3, +5
Configuración electrónica	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³
Masa atómica (g/mol)	74.9216
Densidad (kg/m ³)	5780 (gris), 4700 (amarilla)
Punto de ebullición (°C)	613 (siblima)
Punto de fusión (°C)	817 (a 28 atm)

Fuente: Alós y Juvina (2005).

2.2.2.1. Compuestos químicos del arsénico

El arsénico es un elemento químico no metálico del Grupo V del Sistema Periódico. De color gris y apariencia metálica y brillante, el arsénico posee escasas propiedades metálicas y se encuentra ampliamente distribuido en el universo. Su comportamiento químico es complejo y forma numerosos compuestos arsenicales, tanto orgánicos como inorgánicos.

Los estados de oxidación en que el arsénico se encuentra comúnmente en el agua son los estados +5 y +3. El arsenito, o arsénico trivalente (As⁺³) se encuentra en solución como H₃AsO₃, H₂AsO₃⁻, H₂AsO₄⁻ y H₂AsO₄ en aguas naturales con pH entre 5 a 9, y el arsenato, o arsénico pentavalente (As⁺⁵) se encuentra en forma estable en aguas con altos niveles de oxígeno como H₃AsO₄

en un rango de pH de 2 a 13. Su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua. Aun si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos.

La concentración del arsénico en aguas naturales frescas es muy variable y probablemente depende de las formas de arsénico en el suelo local. En el agua natural de pH de 5 a 9, el arsénico se encuentra fundamentalmente como arsenito (As_2O_4)⁻ o arseniato (AsO_4)⁻³. Los compuestos arsenicales metilados se encuentran naturalmente en el ambiente como resultado de la actividad biológica del suelo. El compuesto arsenical de mayor importancia económica es el óxido de arsénico (+3) (As_2O_3).

La toxicidad de un arsenical se relaciona con su índice de clearance, que es la depuración o eliminación de un elemento en el organismo por unidad de tiempo y, por consiguiente, por su grado de acumulación en los tejidos. En general la toxicidad aumenta en la secuencia de los arsenicales orgánicos, es decir: $\text{As}^{+5} < \text{As}^{+3} < \text{As}^{-3}$.

Los compuestos arsenicales inorgánicos solubles en agua como el arsenito de sodio ($\text{Na}_2\text{As}_2\text{O}_4$) y ácido arsenioso ($\text{H}_2\text{As}_2\text{O}_4$) son compuestos que presentan una conocida y elevada toxicidad de arsénico se encuentra presente en más de 200 especies minerales, siendo: (Bournod L. 2010).

- ✓ La arsenopirita (FeAsS),
- ✓ La enargita (Cu_3AsS_4),
- ✓ La tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) las más comunes.

2.2.2.2. Arsénico en el agua.

El arsénico puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica, siendo esta última la forma en que se haya en las aguas naturales.

A su vez presenta cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo los más comunes sus estados trivalentes As (III) (arsenitos) y pentavalente As (V) (arsenatos).

En aguas superficiales, con condiciones aeróbicas, es más frecuente encontrar el arsénico en estado pentavalente As (V), mientras que en aguas profundas o de pozo, en condición de anaerobiosis es más común encontrarlo en estado trivalente As (III)

En pH de 4 a 10 el As (V) se encuentra cargado negativamente, lo que explica su mayor eficiencia en los sistemas de remoción, comparándolo con el As (III) que, a esos valores de pH, no posee carga.

Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambian el equilibrio al estado trivalente. (Bournod L. 2010).

La ionización de arsénico está expresada por la constante de disociación, pKa, cuyos valores para el arsenato y arsenito son:

Arsenato: H_3AsO_4 pK1 = 2.2 pK2 = 6.94 pK3 = 11.5

Arsenito: H_3AsO_3 pK1 = 9.2 pK2 = 14.22* pK3 = 19.22

a) Arsénico en las aguas subterráneas.

En general, los valores de fondo de concentración de arsénico en aguas subterráneas son, para la mayoría de los casos, inferiores a 0.01 mg/L. Las concentraciones altas no se restringen a determinadas condiciones o ámbitos, apareciendo en acuíferos en condiciones oxidantes y de pH alto, acuíferos en condiciones reductoras, acuíferos con circulación geotermal, acuíferos afectados por procesos ligados a la actividad minera o relacionados con depósitos minerales, y acuíferos ligados a otros procesos antropogénicos (actividad industrial, asentamientos urbanos, actividad agropecuaria, etc). Sin embargo, la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales. A diferencia de la contaminación antropogénica, la cual genera una afección de carácter más local, la ocurrencia de concentraciones altas de arsénico de origen natural afecta a grandes áreas. Los numerosos casos de "contaminación" natural de aguas subterráneas por arsénico que existen en el mundo están relacionados con ambientes geológicos muy diferentes: metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas

hidrotermales actuales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, etc. (Welch A. 2000)

Se han identificado un gran número de áreas con aguas subterráneas que presentan contenidos de arsénico superiores a 0.05 mg/l, en distintos lugares del planeta. Los problemas más importantes citados en la literatura se sitúan en Argentina, Bangladesh, Nepal, Chile, China, Hungría, India (Bengala Oeste), México, Rumania, Taiwan, Vietnam y EE.UU., siendo en este último país y en Bangladesh donde han sido objeto de estudios más profundos. Áreas con problemas de arsénico en relación a depósitos minerales y minería han sido reconocidas en numerosas partes del mundo, siendo los casos más sobresalientes los de Ghana, Grecia, Tailandia, Chile y EE.UU. (Boyle 2002).

Uno de las peculiaridades más notables del problema del arsénico de origen natural en las aguas subterráneas, es que no siempre hay una relación directa entre el alto contenido en arsénico en el agua y un alto contenido en arsénico en los materiales que constituyen el acuífero. De hecho, como a continuación se expondrá, no existe un modelo geológico/hidrogeológico común para todas las ocurrencias identificadas. Encontrándose aguas con arsénico en situaciones muy variadas, tanto en condiciones reductoras como en condiciones oxidantes, o en acuíferos sobreexplotados, tanto en zonas áridas como en zonas húmedas, o tanto en acuíferos superficiales libres como en acuíferos profundos confinados. Esta variedad de situaciones viene definida por la peculiaridad de las circunstancias y procesos que concurren en cada uno de los casos, o en otras palabras, la presencia de arsénico en cada caso es la consecuencia de un ambiente geoquímico y condiciones hidrogeológicas. (Boyle 2002).

- **Tipo de acuífero/geología:** Acuífero poco profundo (100-150 m). Sedimentos fluviales y deltaicos de edad Holocena, procedentes de la denudación de las elevaciones del Himalaya y de rocas del basamento. Presentan contenidos en arsénico en el rango de <2 a 20 ppm. Están formados por arenas micáceas, limos y arcillas con materia orgánica abundante. A techo, estos materiales están sellados por un nivel de arcillas.

- **Condiciones hidrogeológicas:** Los altos contenidos de arsénico se restringen generalmente al acuífero poco profundo Holoceno, con aguas jóvenes (~ 2.000 años), de flujo lento (tiempo de residencia largo). El acuífero más profundo, formado por sedimentos de edad Plio-Pleistocena y aguas con un periodo de residencia mayor (2.000 a 12.000 años), presenta contenidos en arsénico bajos.
- **Hidrogeoquímica/Geoquímica:** Condiciones fuertemente reductoras, de pH \sim neutro a superior a 7, rangos muy amplios de proporción arsenito/arsenato, aunque suele ser de 50 a 60 % de arsenito sobre el total de arsénico. Distribución a real del contenido de arsénico en zonas discretas. No existe una correlación clara entre los contenidos de arsénico y los metales o especies disueltas, aunque con generalmente hay una correlación negativa de arsénico con $SO_4^{=4}$ y NO_3^{-3} . Los contenidos de arsénico presentan una acusada correlación con carbono orgánico disuelto. En el caso de los sedimentos, el contenido de arsénico se correlaciona bien con el contenido en Fe, Mn y Al en la fracción fina de los sedimentos, mientras que en la fracción más gruesa, los contenidos de arsénico muestran una correlación buena con los contenidos de Carbono Orgánico. (Boyle; Smedley y Kinniburgh, 2002).

b) **Minerales de arsénico más frecuentes.**

Aunque no como componente mayoritario, el arsénico también se encuentra en concentraciones variables formando parte de un gran número de minerales, tanto primarios como secundarios. Las mayores concentraciones de arsénico aparecen en sulfuros como pirita, calcopirita, galena y marcasita (tabla 3), donde el arsénico se encuentra sustituyendo al azufre en la estructura. En estos minerales, el contenido de arsénico puede superar el 10% en peso del mineral. (Baur 1969).

La pirita es el sulfuro más frecuente en la naturaleza, ya que además de formarse en ambientes hidrotermales, también se forma en medios sedimentarios de baja temperatura en condiciones reductoras. Esta autigénica juega, como veremos

más adelante, un importante papel en el ciclo geoquímico del arsénico, al encontrarse en una gran variedad de ambientes, incluyendo ríos, lagos, fondos marinos, y acuíferos, donde al formarse puede incorporar arsénico en su estructura, y donde, al variar las condiciones del medio, puede oxidarse y liberar ese arsénico. Otros minerales donde puede encontrarse arsénico en concentraciones apreciables son los óxidos y oxihidróxidos, sobre todo los de hierro, y en menor proporción los de manganeso y aluminio, fases minerales donde puede estar formando parte de la estructura o adsorbido en su superficie. La adsorción de As (V) en oxihidróxidos de hierro, como plantearemos más adelante, es el mecanismo más efectivo de retención de arsénico en la fase sólida. Los fosfatos son otro grupo de minerales que pueden tener contenidos relativamente altos de arsénico. El arsénico puede sustituir a Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} y Ti^{4+} en muchas estructuras minerales, encontrándose de esta manera en muchos minerales formadores de rocas, si bien en concentraciones muy bajas. Por ejemplo, la mayoría de los silicatos contienen alrededor de 1 ppm o menos. (Baur 1969).

Los carbonatos (calcita, dolomita y siderita) normalmente tienen menos de 10 ppm (Boyle 2002).

Tabla 3. Concentración de arsénico en algunos de los minerales más comunes.

Mineral	Concentración de As (ppm)	Referencia
Sulfuros		
Pirita	100 – 77000	(a)
Pirrotina	5 – 100	(b)
Galena	5 – 10000	(a)
Calcopirita	10 – 5000	
Óxidos		
Hematitas	Hasta 160	(a)
Óxidos de Hierro	Hasta 2000	(b)
Oxihidróxido de Fe(III)	Hasta 76000	(c)
Magnetita	2,7 – 41	(a)
Silicatos		
Cuarzo	0,4 – 1,3	(a)
Feldespato	<0,1 – 2,1	(a)
Biotita	1,4	(a)
Anfibol	1,1 – 2,3	(a)
Olivino	0,08 – 0,17	(a)
Piroxeno	0,05 – 0,8	(a)
Carbonatos		
Calcita	1 – 8	(b)
Dolomita	<3	(b)
Siderita	<3	(b)
Sulfatos		
Yeso/Anhidrita	<1 – 6	(b)
Barita	<1 – 12	(b)
Jarosita	34 – 1000	(b)
Fosfatos		
Apatito	<1 – 1000	(a), (b)

Fuente: a) Baur y Onishi, 1969, b) Boyle y Jonasson, 1973, c) Pichler., 1999.

2.2.2.3. Toxicidad y efecto en la salud.

El arsénico interfiere con numerosas actividades fisiológicas esenciales (Adsorción de elementos esenciales, Actividad enzimática, Transcripción celular).

Alteraciones cardíacas, vasculares y neurológicas, lesiones hepáticas y renales, repercusiones en el aparato respiratorio y lesiones cutáneas que avanzan progresivamente hasta las neoplasias: estos son los riesgos a los que se expone quien consume agua con excesivo contenido de arsénico durante un tiempo prolongado. A pesar de ser absorbido por las plantas no pasa a la carne vacuna en cantidades apreciables. Por otra parte, cuando los animales beben aguas arsenicales, pueden acumularse en sus distintos tejidos, incluyendo los que servirán posteriormente como alimento para el ser humano, como por ejemplo hígado y riñón. Pueden aparecer o acumularse arsénico o metabolitos producidos por el organismo, lo que significa un riesgo para el consumidor. (Baur 1969).

El arsénico se combina con los grupos sulfhidrilo de los tejidos queratinizados, acumulándose en ellos (pelos). Hay especialistas que sugieren que la ingesta de aguas con concentraciones de 0,050 a 0,100 mg/L durante apenas un año sería suficiente como para que una persona, incluso mucho tiempo después de haber dejado de consumirlas, pueda padecer alguna enfermedad maligna.

El Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) es una enfermedad producida por exposición de la población a la ingestión prolongada (crónico) de agua que contenga sales de arsénico (hidro-arsenicismo), que afecta a gran parte de la población (endémico) de una región (regional) lo cual constituye un ejemplo interesante de analizar como complejo eco-patógeno. (Berg M. 2001).

Progresivamente la enfermedad evoluciona en cuatro periodos:

- ✓ Hiperhidrosis palmoplantar con prurito y descamación, conjuntivitis, vómitos o diarreas.
- ✓ Hiperqueratosis palmoplantar con lesiones dolorosas que impiden caminar y realizar tareas manuales.
- ✓ Melanodermia del tronco y parte superior de los miembros y
- ✓ Cancerización (cáncer de Hutchinson, epiteloma de Bowen).

El HACRE es un síndrome tóxico órgano-endémico adquirido que se presenta en individuos de 1 a 15 años debido a la ingesta prolongada de agua con concentraciones de arsénico superiores a los 0,05 miligramos/litro. La piel engrosada, rugosa y más oscura es un síntoma en quienes padecen esta enfermedad. Puede confundir el hecho de que los agricultores, que son trabajadores manuales, poseen por lo general esta característica, pero: “le aseguro que con sólo estrecharle la mano a una persona afectada se le puede hacer el diagnóstico, precisó el médico Carlos Padial”, quien atiende a pacientes con esta patología en una zona cercana a la ciudad de La Banda, en la provincia de Santiago del Estero.

El arsénico se deposita también en los huesos y en los dientes, e impacta escuchar que el veneno atraviesa con facilidad la barrera placentaria y que su potencial queratogénico produce daño fetal, es decir, no sólo afecta al bebé ya nacido sino incluso al que está en gestación. (Berg M. 2001).

2.2.2.4. Efectos ambientales del arsénico.

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en el ambiente. Suele ser detectable en casi todos sus compartimentos y generalmente aparece en la litosfera en concentraciones entre 1,5 y 2 ppm, ocupando el puesto 52 en abundancia. (Berg M. 2001).

Forma parte de más de 245 minerales en forma de arseniatos (60%), sulfuros y sulfosales (20%) y otras formas como arseniuros, arsenitos, óxidos y silicatos (20%). (Kumar M. 2002).

Los mayores depósitos de As de la corteza terrestre se encuentran en forma de pirita, galena, calcopirita, y esfalerita. Existen altas concentraciones en depósitos de azufre como por ejemplo As_2S_3 , AsS , $FeAsS$, $FeAs_2$, razón por la que la arsenopirita ha sido utilizada para la obtención de arsénico a lo largo de la historia, al ser el mineral de As más abundante en la naturaleza. (Smedley 2002).

2.2.2.5. Límites permisibles del Arsénico.

El arsénico es un elemento muy común en aguas naturales, en rocas y suelos, en la hidrosfera y la biosfera. Es movilizado al medio ambiente a través de una combinación de procesos que incluyen tanto procesos naturales (meteorización, actividad biológica, emisiones volcánicas), así como procesos antropogénicos (aguas residuales, actividad minera, uso de combustibles fósiles, uso de pesticidas y herbicidas). Ello es así, que ha llevado a organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), a establecer la reducción del límite del contenido de arsénico en agua de consumo de 0.01 mg/L. (Ministerio del ambiente. 2008).

2.2.3. METODOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO

Con el fin de eliminar los metales pesados describen diversos mecanismos mediante los cuales puede removerse el arsénico, entre ellos cuando se combinan sus iones con metales como el hierro, el aluminio, principalmente, o el itrio y el lantano. Estos metales pueden adsorber el arsénico ya que precipitan masivamente en forma de hidróxidos. Existen diferentes métodos de tratamiento para reducir el arsénico presente en el agua y alcanzar los niveles de los valores guía de agua para consumo humano.

Debido a que el As^{+5} es más fácil de remover que el As^{+3} , el tratamiento se inicia con la oxidación del As^{+3} a As^{+5} . Los oxidantes más utilizados son: cloro, hipoclorito de calcio y permanganato de potasio. Sin embargo la adsorción es una técnica que resulta ser más económica debido a su empleo con materiales de origen biológico a continuación se muestra una breve descripción de alguna de estas tecnologías. (Volesky B. 2003).

2.2.3.1. Coagulación/filtración

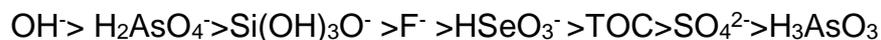
Es un proceso de tratamiento por el cual las cargas eléctricas de las sustancias coloidales disueltas o suspendidas son neutralizadas con la adición de sustancias insolubles en el agua, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración.

El tipo y la dosis del coagulante y el pH influyen en la eficiencia del proceso. El rendimiento del sulfato de aluminio es ligeramente menor que el del sulfato férrico. A un pH de 7,6 o menor, ambos coagulantes tienen la misma eficiencia de remoción, sin embargo el sulfato férrico remueve mejor a un pH menor de 7,6. Se determinó que a dosis mayores de 20 mg/L de cloruro férrico ó 40 mg/L de sulfato de aluminio se alcanza una remoción de As^{+5} de más del 90 %. A bajas dosis de coagulantes la remoción de As^{+5} es menor. (Aguilar L. 2005).

2.2.3.2. Alúmina activa

Es un tipo de intercambio iónico, donde los iones presentes en el agua son adsorbidas por la superficie oxidada de la alúmina activada.

Es altamente selectiva para remover el As^{+5} y efectiva para tratar agua con alto contenido de sólidos disueltos totales. En la superficie de adsorción de la alúmina activada pueden interferir el selenio, fluoruro, cloruro y sulfato. Este método tiene alta remoción de arsénico a pH 8,2. La alúmina activada adsorbe preferentemente $H_2AsO_4^-$ (As^{+5}) más que H_3AsO_3 (As^{+3}) además de otros iones competitivos, tal como se muestra en la siguiente relación: (Aguilar L. 2005).



2.2.3.3. Osmosis inversa

Es un proceso para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica. Tiene una eficiencia de más de 95 % de remoción de arsénico disuelto. Este método es efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas. El rendimiento del proceso con ósmosis inversa es afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice. (Aguilar L. 2005).

2.2.3.4. Intercambio iónico

Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución. Remueve efectivamente el arsénico en el rango de pH entre 8 y 9. No obstante, el selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos totales compiten con el arsénico y afectan la duración del proceso. Las consideraciones

que se tiene en este proceso comprenden el pH, iones competitivos, tipo de resina, alcalinidad, concentración de arsénico en el afluente, disposición de la resina y los regenerantes usados, efectos secundarios de la calidad del agua y los parámetros de diseño de la operación. La resina básica de intercambio iónico adsorbe los iones con la siguiente preferencia: (Aguilar L. 2005).

$\text{HCrO}_4^- > \text{CrO}_4^{2-} > \text{ClO}_4^- > \text{SeO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > (\text{HPO}_4^{2-}, \text{HAsO}_4^{2-}, \text{SeO}_3^{2-}, \text{CO}_3^{2-}) > \text{CN}^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > (\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}, \text{H}_2\text{AsO}_4^-, \text{HCO}_3^-) > \text{OH}^- > \text{CH}_3\text{COO}^- > \text{F}^-$
(2 - 1)

2.2.3.5. Nanofiltración

Es un proceso de separación líquida mediante membranas operadas bajo presión que permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular en el rango de 200 a 1000. Se puede remover el As^{+5} y el As^{+3} disueltos en el agua. Con este método se alcanza hasta una remoción de 90% de arsénico disuelto en aguas subterráneas. Este proceso no es tan apropiado para tratar aguas superficiales debido al extensivo pretratamiento que se requiere para remover partículas sólidas o coloidales del agua. La remoción depende de los parámetros de operación, propiedades de la membrana y el estado de oxidación del arsénico. (Aguilar L. 2005).

2.2.3.6. Ablandamiento con Cal

Es un método usado para remover la dureza del agua y consiste en adicionar cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al agua.

Este método es efectivo para remover As^{+3} ó As^{+5} y la eficiencia de la remoción está en función del pH. Este método tiene un alto rendimiento para remover concentraciones de arsénico de 50 $\mu\text{g/L}$; sin embargo, para reducir a 1 $\mu\text{g/L}$ se necesita de un tratamiento secundario. La remoción de As^{+5} es mayor al 90 % a un pH de 10.5 o más, siendo el pH óptimo de operación mayor que 10.5. Por debajo del rango del pH óptimo la remoción disminuye a menos del 20%. En el sistema de ablandamiento con cal se produce una considerable cantidad de lodo. (Aguilar L. 2005).

2.2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN

“La adsorción implica la acumulación en la interface o la concentración de sustancias en una superficie o interface. El proceso de separación mediante el cual ciertos componentes pueden ocurrir en una interface que separa a dos fases tales como Líquido-Líquido, Gas-Líquido, Líquido-Sólido, Gas-Sólido. El material que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbente. La adsorción es un método efectivo con bajos niveles de iones metálicos. (Weber Walter J. 1989).

El adsorbente se caracteriza por su alta porosidad, con poros de tamaño extremadamente pequeño que dan lugar a que la superficie interna del adsorbente, sea mucho mayor que la externa. Diferencias de masa molar hacen que unas moléculas sean retenidas más fuertemente que otras (Villaescusa et al. 2004).

2.2.4.1. Adsorción física

La adsorción física es un fenómeno fácilmente reversible puesto que la unión entre adsorbente y adsorbato es causada por la interacción intramolecular de las fuerzas electrostáticas de Van der Waals. La capacidad de adsorción de un material está en función de su superficie interna y externa. La adsorción física es la más frecuente y suele predominar a temperaturas bajas. En la adsorción física puede ser que la adhesión de partículas del adsorbato se realice en varias capas (multicapas) o en una sola capa (monocapa). (R. Treybal. 1980).

Cuando una partícula es fisiadsorbida indica que la energía que libera durante el proceso de adsorción es del mismo orden de magnitud que el calor (entalpía) de condensación. Así dicha energía puede adsorberse en forma de vibración de la red posteriormente disiparse como energía térmica. Las entalpias de fisorción son del orden de decenas de KJ/mol, siendo un valor de 25 KJ/mol. Estos cambios de energía no son lo suficientemente grandes como para romper los enlaces químicos, por lo que la molécula retiene su afinidad química, aunque puede distorsionarse debido a la interacción con la superficie. (Gonzales U. 2001).

2.2.4.2. Adsorción química

La quimisorción o adsorción activada, únicamente tiene lugar cuando el adsorbente y el adsorbato se unen mediante enlaces químicos para formar un nuevo compuesto, el calor liberado durante la quimisorción es parecido al calor de la reacción química, la formación de enlaces de tipo covalente durante la adsorción química hace que el proceso sea más selectivo y que dependa en gran medida de la naturaleza de las sustancias involucradas. (R. Treybal. 1980).

Tabla 4. Diferencias entre la adsorción física y adsorción química.

Parámetro	Adsorción física	Adsorción química
Adsorbente	Todos los solidos	Algunos son solidos
Adsorbato	Todos son gases por debajo de la temperatura critica	Algunos son gases químicamente reactivos
Intervalo de temperatura	Temperaturas bajas	Generalmente temperaturas altas
Calor de adsorción	Baja entalpia de reacción	Alto, del orden de los calores de reacción
Velocidad (energía de activación)	Muy rápida, baja energía de activación	No activada, baja energía; activa alta energía
Rango de acción	Es posible en mono o multicapas	Es posible en monocapas
Reversibilidad	Altamente reversible	Generalmente irreversibles
Importancia	Para la determinación del área superficial y el tamaño de los poros	Para la determinación del área de centros activados y la evaluación de la cinética de las reacciones superficiales

Fuente: Smith (1991).

2.2.4.3. Mecanismos de incorporación de arsénico a las aguas

Aunque los materiales de la geósfera no presenten grandes concentraciones de arsénico en la fase sólida, una pequeña cantidad relativa de arsénico liberado de esa fase sólida por procesos de desorción o disolución puede elevar la concentración de arsénico en el agua por encima de 0.04 mg/L. Y en este sentido hay que considerar, que para que existan aguas con contenidos altos en

arsénico, no basta solo con que tengan lugar mecanismos por los cuales este se libere de la fase sólida, sino que además el arsénico liberado tiene que permanecer en el agua, es decir no tiene que ser transportado ni transferido a otro medio, ni tampoco se han de producir procesos de dilución por mezcla. Estos son los factores claves que hay que estudiar para entender la existencia de aguas con contenidos altos de arsénico. Otra consideración que hay que hacer, es sobre la naturaleza diferente de las aguas superficiales y las aguas subterráneas: las aguas superficiales constituyen sistemas abiertos donde los factores ambientales están continuamente variando; en contraste, las aguas subterráneas se pueden considerar, en la mayoría de los casos, sistemas cerradas, donde las condiciones pueden variar, pero de forma discontinua en el tiempo, permitiendo que el sistema solución-fase sólida pueda reequilibrarse. (Smedley 2002).

Ello implica que, en condiciones naturales, y si no se producen grandes cambios en la evolución de un acuífero, este llegará a una etapa donde la interacción agua-fase sólida será mínima, y por tanto no habrá transferencias de arsénico. Este escenario contrasta con el de las aguas superficiales donde no tienen por qué alcanzarse situaciones próximas al equilibrio solución-fase sólida. Uno de los problemas fundamentales con respecto a las aguas subterráneas y el arsénico radica en que la explotación de aquellas puede introducir cambios sustanciales en las condiciones originales del acuífero. En relación con el problema de la variación temporal de las condiciones geoquímicas del acuífero, es muy relevante el estudio del Servicio Geológico de Estados Unidos sobre las aguas subterráneas de la Cuenca Willamette (Oregon). (Smedley 2002).

Como señalan BGS y DPHE (2001), la readsorción de arsénico en el óxido (que puede llegar al 90% del arsénico codisuelto de la pirita), hace que el mecanismo de movilización de arsénico por oxidación de pirita no se considere como el más eficiente en cuanto a movilización de arsénico.

➤ **Disolución de óxidos e oxihidróxidos de Fe y Mn en condiciones ácidas**

Los óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn se disuelven en condiciones fuertemente ácidas. El arsénico presente en ellos, tanto adsorbido como coprecipitado, será movilizado durante la disolución. A diferencia de la desorción, la disolución es eficaz en la movilización de arsénico no lábil, incorporado en la red estructural del mineral. Esto explica, al menos en parte, las concentraciones altas de arsénico en el drenaje ácido de minas. (Smedley 2002).

➤ **Desorción en condiciones oxidantes a pH alto**

La acusada naturaleza no lineal de la isoterma de adsorción para As (V) determina que la cantidad de arsénico adsorbido sea grande, incluso cuando las concentraciones de arsénico disuelto son bajas. Pero, en condiciones oxidantes, se produce la desorción de arsénico si se alcanzan valores de pH alto (>8,5). Normalmente el incremento de pH se produce como consecuencia de los procesos de meteorización e intercambio iónico, combinado con los efectos de un incremento en salinidad en climas áridos y semi-áridos. El proceso de desorción en condiciones alcalinas es considerado como uno de los mecanismos más efectivos en cuanto a movilización de arsénico en condiciones oxidantes, dándose además una correlación positiva entre la concentración de arsénico en la fase acuosa y los valores de pH. Los procesos de desorción liberan además una amplia variedad de oxianiones como vanadatos, fosfatos, uranilos y molibdatos. El papel del anion bicarbonato en relación a los procesos de desorción de arsénico no está claro. A menudo se observan, en las aguas ricas en arsénico, concentraciones altas en C orgánico disuelto como ácidos fúlvicos y húmicos, aunque todavía no se ha podido establecer una relación causal entre el C orgánico disuelto y arsénico desorbido. (Smedley 2002).

La presencia de cationes como Ca y Mg pueden facilitar la adsorción de especies de As (V) negativamente cargadas en la fase sólida. Efectos similares pueden tener el Al en aguas ácidas y el Fe^{2+} en aguas reductoras. Los procesos evaporativos en ambientes áridos permiten el mantenimiento de valores altos de pH, así como concentraciones altas en Cl, F y U. En general, este mecanismo

no explicaría las concentraciones altas de arsénico observadas en ambientes reductores, ya que estos suelen tener un pH próximo al valor neutro.

➤ **Desorción por reducción de superficie específica en la fase sólida**

Este es un mecanismo que tiene especial incidencia en los óxidos e hidróxidos de Fe, donde se produce una mayor adsorción de arsénico en las etapas iniciales de su formación, generalmente como oxihidróxidos formados por agregados de micropartículas de pequeño tamaño. Al evolucionar y transformarse en fases de mayor cristalinidad, las partículas y agregados aumentan su tamaño, reduciendo así su superficie específica, y por tanto las sedes de intercambio donde se halla el arsénico adsorbido, con la consiguiente movilización de este a la fase acuosa. Debido al carácter no lineal más acusado de la isoterma de As (V), la desorción mediante este mecanismo es mucho más acusada para As (V) que para As (III). (Smedley 2002).

➤ **Adsorción/desorción de arsénico en la fase sólida**

El arsénico puede ganar o perder electrones en reacciones de oxidación-reducción. Como resultado de ese fenómeno, el arsénico puede estar presente en la naturaleza en diversos estados de oxidación (-3, 0, +3 y +5), si bien Adsorción/desorción de arsénico se suele encontrar en las aguas en dos estados de valencia: arsenito As (III) y arsenato As (V). El arsenato predomina en condiciones oxidantes, mientras que el arsenito predomina cuando las condiciones son suficientemente reductoras. Bajo las condiciones de pH más comunes en las aguas subterráneas, el arsenato está presente como oxianiones cargados negativamente (H_2AsO_4^- , $\text{HAsO}_4^{=}$), mientras que el arsenito está presente como especie neutra (H_3AsO_3). La fuerza de la adsorción de estas especies arsenicales por las superficies de la fase sólida, dependerá en parte de las diferencias de carga entre las especies acuosas y la fase sólida, ya que determinan el carácter de las interacciones electrostáticas entre las especies y la fase sólida. Las reacciones de adsorción-desorción son descritas mediante isotermas de adsorción (o desorción). Una isoterma de adsorción o intercambio relaciona la concentración de un determinado componente en solución con su concentración en la superficie de la partícula. Esa concentración en la superficie

no solo depende del componente implicado y de la carga de superficie, también depende de otros iones en solución y de su concentración, ya que competirán a su vez para ocupar lugares (sedes de intercambio) en la superficie. Este fenómeno, está ligado a los procesos de adsorción-desorción, y es lo que se conoce como intercambio iónico. La principal consecuencia es que a determinadas condiciones de concentración de una especie iónica, esta puede provocar la desorción de otra especie previamente adsorbida. Dada la cantidad de especies iónicas que pueden estar en solución, y por tanto compitiendo por ocupar las sedes de intercambio, es muy complejo describir las reacciones de superficie para un caso dado. A diferencia de las reacciones de precipitación-disolución, la adsorción-desorción tiende a ser rápida para la escala temporal geológica. Las isotermas de adsorción pueden ser “lineales” o “no lineales”. Una isoterma “lineal” significa que la cantidad adsorbida de una especie es directamente proporcional a su concentración en la solución. Las isotermas para los dos estados de oxidación del arsénico son muy diferentes, incluyendo su dependencia del pH. La isoterma para As (V) es “no lineal” de forma muy acusada, la isoterma para As (III) lo es algo menos. Una consecuencia de la isoterma de adsorción “no lineal” tan acusada del arsenato es que, incluso a concentraciones del orden de $\mu\text{g l}^{-1}$, la adsorción de arsénico sobre el óxido puede corresponder a miles de ppm en el caso de oxihidróxidos férricos. En general, aunque depende de las fases minerales presentes, la máxima adsorción de As (III) se produce a $\text{pH} < 8$, mientras que la máxima adsorción de As (V) se da $\text{pH} < 7$. (Smedley 2002).

2.2.4.4. Factores que influyen en la adsorción

Un material determinado puede ser usado como extractor de metales para lo cual es necesario conocer las condiciones óptimas para conseguir la máxima extracción, para lo cual se deben estudiar los principales parámetros que afectan a la adsorción en el sistema adsorbato y adsorbente.

A) Influencia del tiempo de contacto.

El efecto del tiempo de contacto se estudia como paso previo a la cinética de adsorción, para determinar el equilibrio que se alcanza usando cuando el adsorbente se satura de los iones metálicos por lo que no aumenta la cantidad

de metal extraído, para lo cual se deben estudiar los principales parámetros que afectan a la adsorción en el sistema adsorbato y adsorbente.

- ✓ Migración de los iones de metal desde la solución a la superficie del adsorbente.
- ✓ Difusión a través de la capa superficial de la masa.
- ✓ Fijación en el grupo activo.
- ✓ Difusión intraparticular hacia el interior de la masa.

Cuando el tiempo de adsorción es corto y la capacidad de adsorción es alta significa que podría estar presente un mecanismo de adsorción a nivel superficial. (Maldonado 2006).

B) Influencia de pH

El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante en la adsorción de los iones metálicos, en el pH se consideran las siguientes:

B.1. La especiación del metal depende de pH.

Los metales en disolución acuosa se encuentran en forma de diferentes especies químicas en función del pH de la disolución, de aquí la fuerte dependencia que existe entre el pH de la disolución y la extracción del metal de acuerdo a los mecanismos de adsorción. (Villaescusa et al. 2004).

El arsénico se halla en las aguas naturales como especie disuelta, la cual se presenta por lo común como oxianiones con arsénico en dos estados de oxidación, arsénico trivalente [As (III)] y arsénico pentavalente [As (V)], y con menos frecuencia como As (0), As (-I) y As (-II). As (V) aparece como H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación ($H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-}). As (III) aparece como H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación ($H_4AsO_3^+$, $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$ y AsO_3^{3-}). Aunque tanto As (V) como As (III) son móviles en el medio, es precisamente el As (III) el estado más lábil y biotóxico.

El estado de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH (Fig. 02 y 03). De hecho, el arsénico es un elemento singular entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxianiones por su sensibilidad a movilizarse

en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6,5-8,5). Como aproximación, y sin tener en cuenta otros factores como contenido en materia orgánica, en condiciones oxidantes, el estado As (V) predomina sobre As (III), encontrándose fundamentalmente 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 acidez, la especie dominante será H_3AsO_4^0 , mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} . En condiciones reductoras a pH inferior a 9,2, predominará la especie neutra (Brookins, 1988).

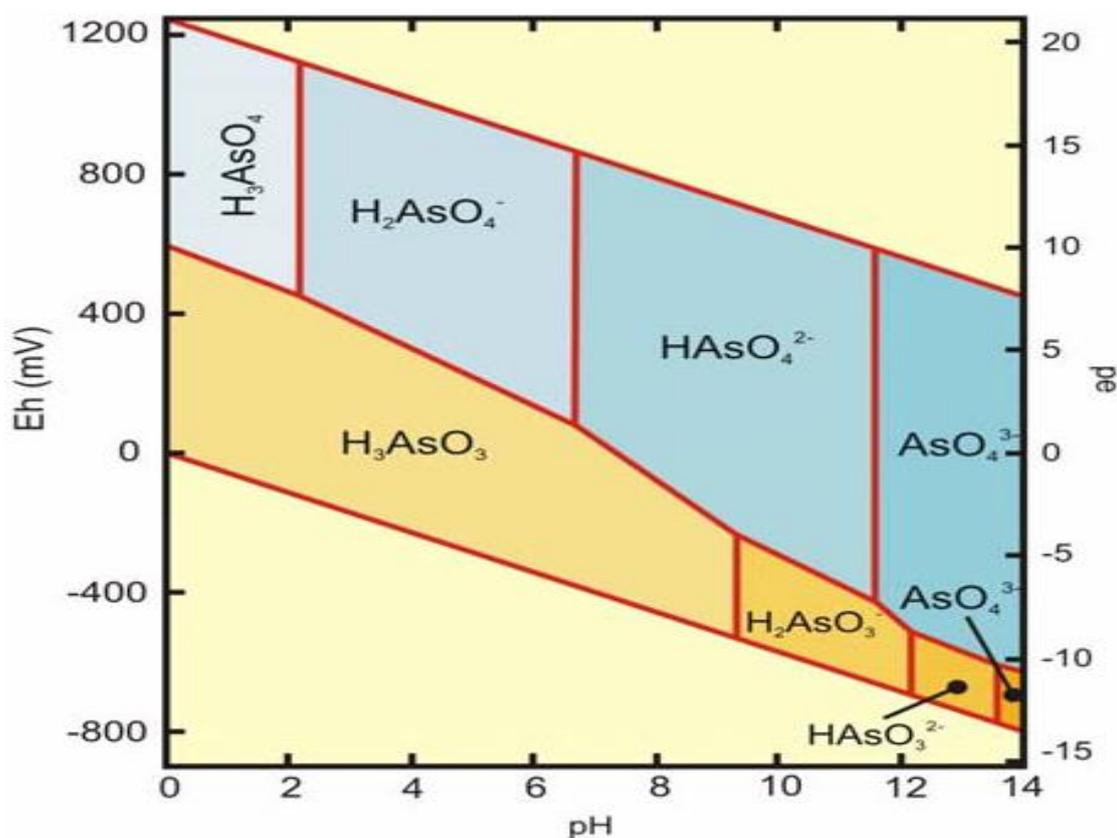


Figura 2. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As–O₂–H₂O a 25°C y 1 bar de presión total.

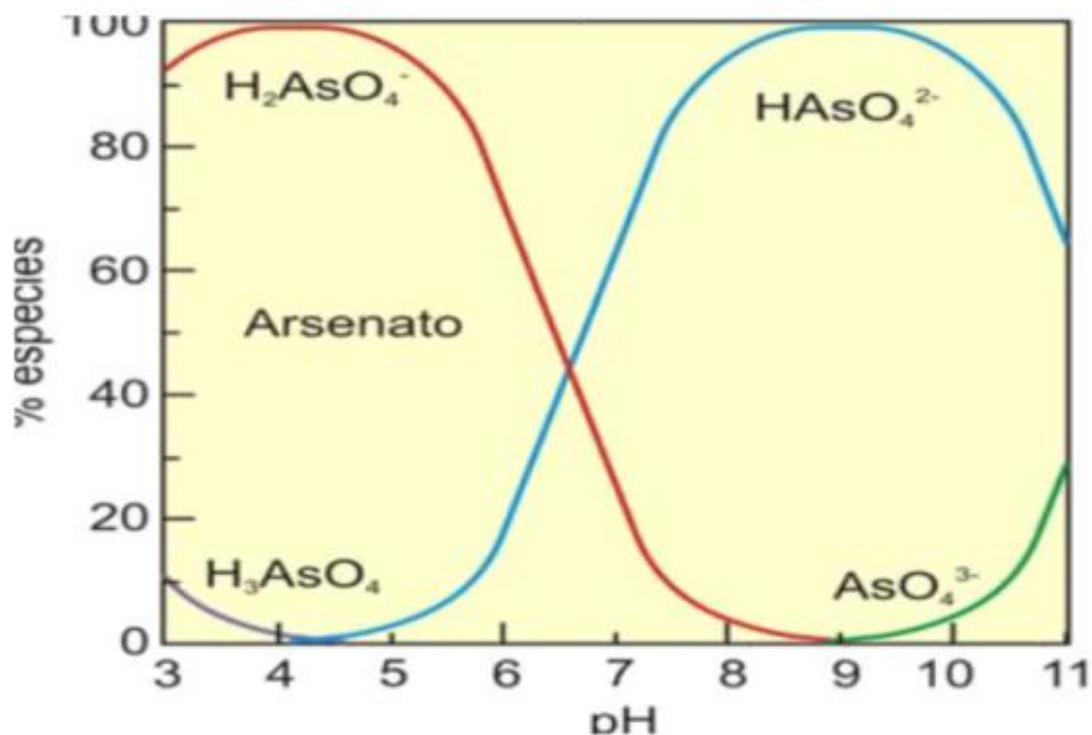


Figura 3. Especies de As (V) como función de pH.

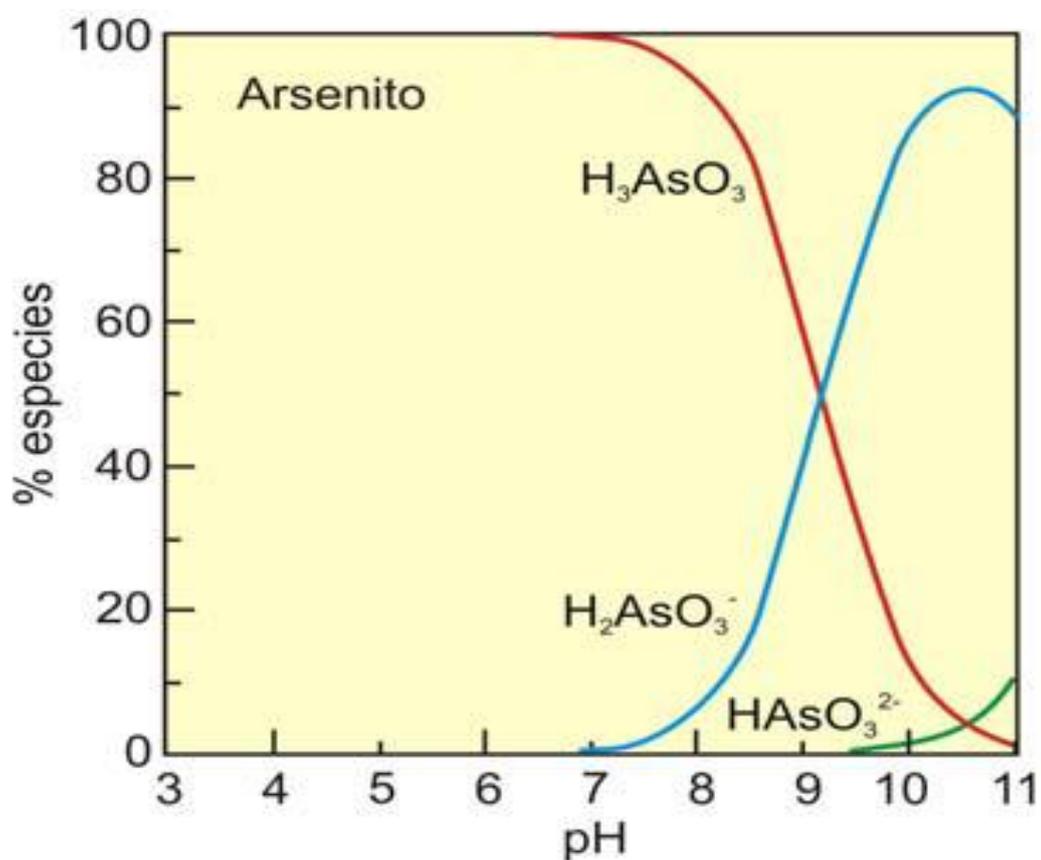


Figura 4. Especies de As (III) como función de pH.

C) Influencia de temperatura

La temperatura es uno de los factores que más influye en los procesos de adsorción. El efecto de la temperatura presenta diferentes comportamientos, está relacionado con el tipo de adsorción que se establece entre el metal y la masa. La temperatura depende del calor de adsorción (cambio de entalpia), generalmente cuando la adsorción es de tipo físico, el calor de adsorción es negativo, lo que indica que la reacción es exotérmica y se favorece a bajas temperaturas. Por el contrario, cuando la adsorción es de tipo químico, el calor de adsorción es positivo, indicando que el proceso es endotérmico y se ve favorecido a altas temperaturas. La adsorción en fase líquida indica que la temperatura afecta el equilibrio de adsorción de 2 formas. (Martins et al. 2004)

- ✓ El equilibrio de adsorción se favorece disminuyendo la temperatura.
- ✓ El equilibrio de adsorción se favorece aumentando la temperatura.

D) Influencia de la concentración del adsorbato

Al aumentar la concentración inicial del adsorbato en la disolución también aumenta su capacidad de adsorción. Este aumento se establece por el equilibrio que se origina entre el metal en disolución y el metal adsorbido por el material adsorbente. Los modelos teóricos que se utilizan para describir los resultados experimentales, deben ser capaces de predecir los procesos de adsorción a bajas y altas concentraciones, además de permitir una interpretación física del mecanismo de adsorción. (Villaescusa et al. 2004).

E) Influencia de la cantidad del adsorbente

La cantidad de adsorbente es el factor que va limitar hasta cierto punto la cantidad de iones metálicos que se logra adsorber en la solución acuosa. Un aumento en la cantidad de masa conduce a una interferencia entre los sitios activos. (Gadd. 1988).

En contra de esta hipótesis atribuyendo la responsabilidad de la disminución específica de la adsorción a la escasez de la concentración del metal en la solución.

La eficiencia de la adsorción del Fe (III) aumenta con el aumento de la cantidad de masa hasta llegar a un valor óptimo donde el índice de eliminación del metal no aumenta más. (Selatnia 2004).

2.2.4.5. Equilibrio e isothermas de Adsorción.

La adsorción en forma general consiste en la transferencia de un material desde una fase líquida hasta una superficie sólida, donde se enlaza mediante fuerzas intermoleculares. La sustancia que se concentra en la superficie se define como adsorbato y el material sobre el cuál éste se acumula se define como adsorbente (resina, carbón, etc.).

Cuando seleccionamos un adsorbente para cualquier uso, consideramos el área superficial, el tipo de soluto y solvente que actúan en el proceso de adsorción, ya que estos se relacionan con los tipos de enlaces que se forman entre el sólido y el fluido. Dependiendo de dichos enlaces, la adsorción se describe ya sea como una adsorción física o como una adsorción química. La adsorción física se presenta cuando el adsorbato se adhiere a la superficie mediante fuerzas de Vander Waals (o sea, mediante fuerzas de dispersión o coulómbicas).

Puede presentar un desplazamiento de electrones, estos no se comparten entre el adsorbente y el adsorbato y se libera calor llamado calor de adsorción. La principal diferencia entre la adsorción física y la de tipo químico es la naturaleza del enlace que se forma entre la molécula adsorbida y la superficie adsorbente. La adsorción química se caracteriza por una compartición de electrones entre el adsorbente y el adsorbato que da por resultado la liberación de una cantidad de calor que es casi igual al calor de reacción. A causa de la compartición de electrones con la superficie, los materiales químicamente adsorbidos se restringen la formación de una monocapa.

La adsorción logra el equilibrio cuando la concentración del soluto retenido por el adsorbente (q) y la del soluto en solución (c) no sufren mayores variaciones en el tiempo para las condiciones del proceso. (Smedley 2002).

❖ **Isoterma de adsorción**

Los estudios de equilibrio de la adsorción, que corresponden a la transferencia de masa neta entre fases, se emplean para determinar la distribución del ión entre la fase del fluido en el seno del sistema y la fase adsorbida sobre la superficie de un adsorbente sólido. La distribución de equilibrio por lo general se mide a temperatura constante y se conoce como isoterma de equilibrio de adsorción.

$$q = \frac{V * (C_i - C_f)}{W} \quad (2 - 2)$$

Donde:

- q : Capacidad de adsorción (mg/g).
- C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).
- C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).
- V : Volumen de la solución (L).
- W : Cantidad de adsorbente utilizada (g).

Así mismo el porcentaje de adsorción cálculo con la siguiente ecuación:

$$\%A = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (2 - 3)$$

Donde:

- $\%A$: Porcentaje de adsorción (mg/g).
- C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).
- C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).

Las isotermas de Langmuir y Freundlich son los modelos teóricos más extensamente utilizados para describir la adsorción de un único componente. Ambos modelos son válidos solamente bajo ciertas condiciones y sus resultados

no pueden ser extrapolados cuando se varían las condiciones del medio. (Volesky B. 2003).

a) Isoterma de langmuir

Langmuir (1918). Propuso un modelo que describe en forma cuantitativa el volumen adsorbido sobre una superficie abierta como la mica, se caracteriza por una aproximación monótona hasta una capacidad de adsorción límite que corresponde a la formación de una monocapa completa. Este tipo se encuentra en sistemas en los que el adsorbato se adsorbe en forma química, es aplicado a adsorbentes microporosos como la resina quelante en los que los capilares tienen un ancho de solo unos cuantos diámetros moleculares. Su modelo puede clasificarse de los demás modelos propuestos por su aplicación a la adsorción localizada en forma de recubrimiento de monocapa, tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

- ✓ Todos los sitios del sólido tienen la misma actividad para la adsorción.
- ✓ No hay interacción entre las moléculas adsorbidas.
- ✓ Toda la adsorción se presenta por medio del mismo mecanismo y cada complejo del adsorbente tiene la misma estructura.
- ✓ El grado de adsorción, es de una capa monomolecular sobre la superficie.
- ✓ La adecuación de la isoterma de Langmuir se puede efectuar escribiendo por separado las velocidades de adsorción y desorción del adsorbato sobre la superficie.

La ecuación matemática de Langmuir se muestra (Davis et al., 2003).

$$q_e = \left(\frac{q_{max} * C_e * b}{1 + b * C_e} \right) \quad (2 - 4)$$

Para poder determinar experimentalmente los valores de q_{max} y b para cada pareja adsorbato y adsorbente se linealiza la ecuación (2 - 4) obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} * b} + \frac{1}{q_{max}} * C_e \quad (2 - 5)$$

Donde:

- q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g).
- C_e : Concentración final del adsorbato en el equilibrio (mg/L).
- Q_{max} : Capacidad máxima de adsorción (mg/g).
- b : Constante de Langmuir relacionada con la afinidad del adsorbente por el adsorbato.

La isoterma de Langmuir tiene la siguiente forma:

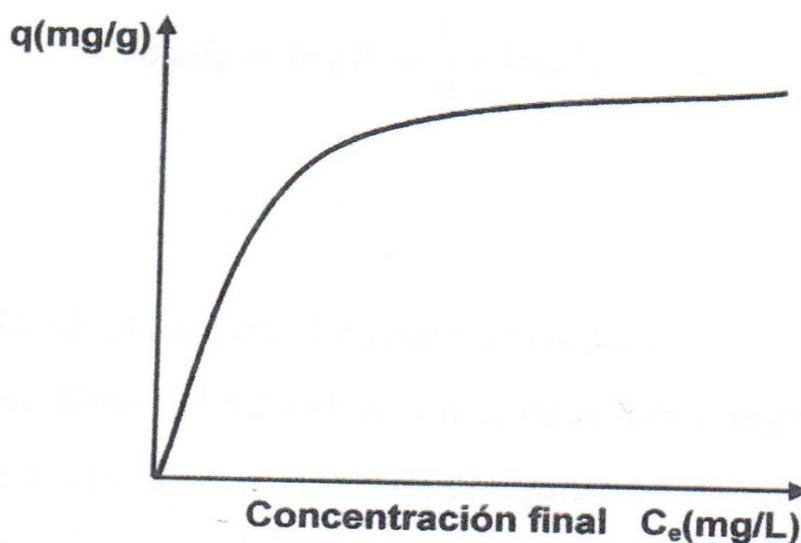


Figura 5. Isotherma de Langmuir

Fuente: Villanueva (2007).

b) Isotherma de freundlich

En 1926, Freundlich manifestó que la adsorción está en función de la concentración de equilibrio, sin tener en cuenta la presencia de otros iones en la disolución de equilibrio, sin tener en cuenta la presencia de otros iones en la disolución o variaciones del pH. Este modelo supone que la superficie del adsorbente es heterogénea y que las posiciones de adsorción tienen distintas afinidades, en primer lugar se ocupan las oposiciones de mayor afinidad y posteriormente se van ocupando el resto, de acuerdo a las siguientes hipótesis. (Volesky B. 1995).

- ✓ No hay asociación de moléculas después de ser adsorbidas en la superficie del material.
- ✓ No hay quimisorción.

La isoterma de Freundlich será válida cuando la adsorción sea solamente un proceso físico y no haya un cambio en la configuración de las moléculas, cuando han sido adsorbidas según la ecuación. (Davis et al. 2003).

$$q_e = K * C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2 - 6)$$

La ecuación (2 – 6) se linealiza a partir de su expresión en forma de logaritmos.

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} * \log C_e \quad (2 - 7)$$

Donde:

- q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g).
- C_e : Concentración final del adsorbato en el equilibrio (mg/L).
- K : Constante de Freundlich, es un indicador del equilibrio de adsorción.
- n : intensidad de adsorción ($n > 1$).

Esta linealización permite determinar la constante K y el valor $1/n$. Este modelo representa adecuadamente la adsorción para concentraciones bajas de metal ya que no admite fenómenos de saturación. (Davis et al. 2003).

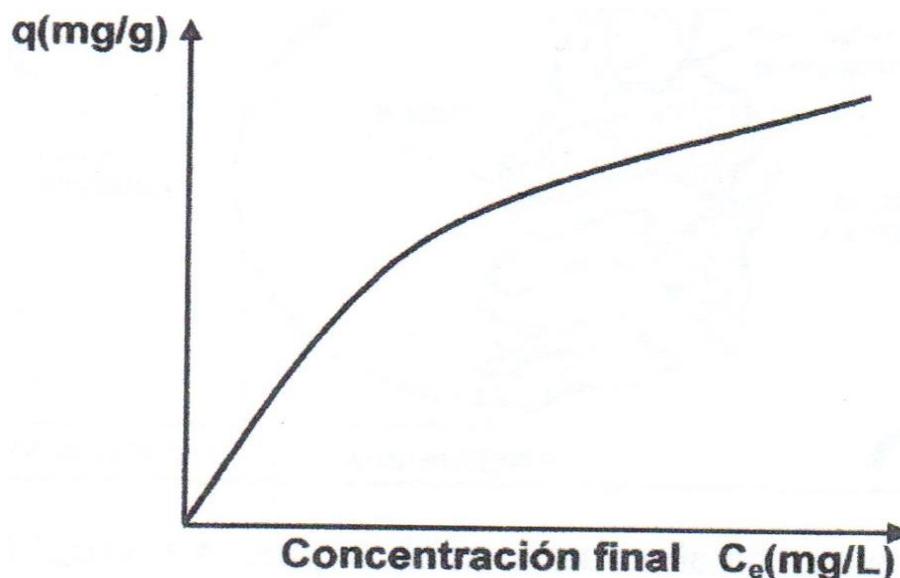


Figura 6. Isoterma de Freundlich

Fuente: Villanueva (2007).

2.2.4.6. Cinética de adsorción.

En adsorción, tanto la resistencia de película externa y la difusión interna dentro de la partícula contribuyen a la velocidad de la captación del soluto. A pesar de que los procesos de adsorción son estrictamente reacciones heterogéneas que involucran dos fases, la mayoría de ellas cumplen con una cinética de reacción homogénea de segundo orden. Sin embargo, una reacción de intercambio representada por:



Puede ser considerada como si sucediera en una serie de etapas:

- ✓ Transporte de iones M^+ desde la solución acuosa hasta la capa exterior alrededor de la partícula.
- ✓ Difusión externa, desplazamiento desde la capa exterior hasta la superficie del adsorbente.
- ✓ Difusión superficial, cuando el soluto se desplaza desde la superficie externa hasta los sitios activos. Puede ser difusión de poro o difusión de superficie homogénea.

- ✓ Finalmente la adsorción del soluto en la superficie interna del adsorbente

Las tres primeras etapas son de adsorción física de transferencia de masa, en cambio la última es de carácter químico.

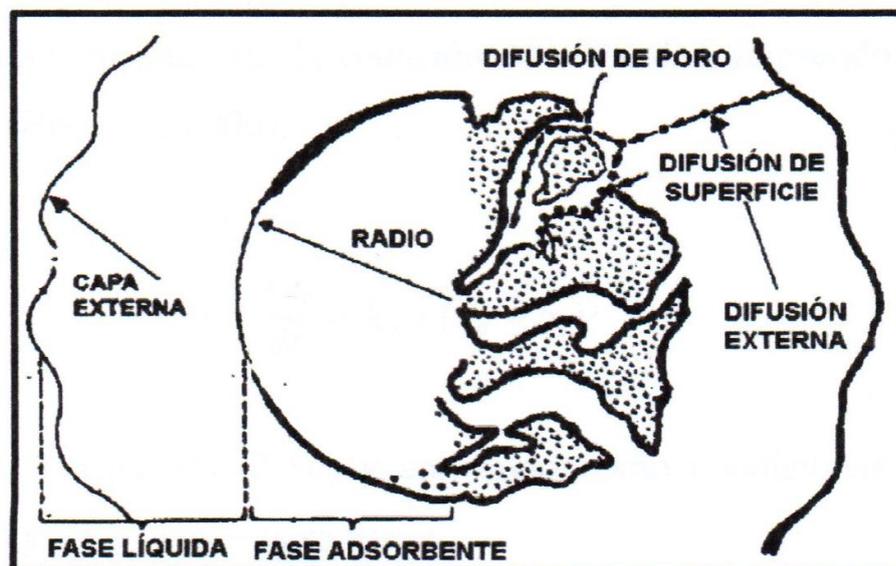


Figura 7. Etapas de la cinética de adsorción.

Fuente: Seki y Susuki (2002).

Dentro de la fase de la resina la difusión no es solamente debido a los efectos restrictivos de la red de polímeros debido a la distribución de carga asociado con los iones fijos de los grupos funcionales, la fase resina es consecuentemente tomada como un sólido poroso y las difusividades efectivas de los iones de metal en la fase de la resina pueden variar, pero son significativamente menores que en la fase acuosa externa.

a. Modelo de Pseudo primer orden

El modelo cinético de Pseudo primer orden ha sido ampliamente utilizado para predecir la cinética de adsorción. El modelo dado por (Langergren. 1988):

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 * (q_e - q_t) \quad (2 - 9)$$

Integrando la ecuación (2 - 9) con respecto a las condiciones límites $q_t = 0$ a $t = 0$ y $q_t = q_t$ a $t = t$, que obtiene:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \quad (2 - 10)$$

Donde

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

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

t : Tiempo (min).

K_1 : Constante Cinética de Pseudo primer orden (L/min).

b. Modelo de Pseudo segundo orden

El modelo cinético de Pseudo orden está basado en la capacidad de adsorción de la fase sólida, donde el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la masa, en este caso la ecuación de velocidad de Pseudo segundo orden se expresa (Ho et al., 2000).

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 * (q_e - q_t)^2 \quad (2 - 11)$$

Integrando la ecuación (2 - 11) y aplicando como condiciones de contorno a $t=0$, $q_t=0$ y a $t=t$ y $q_t=q_t$ se tiene:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (2 - 12)$$

Donde

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

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

t : Tiempo (min).

K_2 : Constante Cinética de Pseudo Segundo orden (g/mg.min).

c. Modelo de Elovich

El modelo de Elovich tiene aplicación general en procesos de quimiadsorción, supone que los sitios activos del adsorbente son heterogéneos y por ello exhiben diferentes energías de activación. La ecuación de Elovich se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación. (Chien S. 1980).

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha * (e)^{-\beta * q_t} \quad (2 - 13)$$

Integrando la ecuación (2 - 13) y aplicando como condiciones de contorno a $t=0$, $q_t=0$ y a $t=t$ y $q_t=q_t$ se tiene:

$$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(\alpha * \beta) + \frac{1}{\beta} * \ln(t) \quad (2 - 14)$$

Donde:

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

α : Velocidad inicial de adsorción de Elovich (mg/g.min).

β : Está relacionado con la energía de activación por quimiadsorción (g/mg).

d. Modelo de difusión intraparticular.

El mecanismo de difusión intraparticular ésta basado en el transporte del adsorbato a través de la estructura interna de los poros de adsorbente y la difusión propiamente dicha es la que conlleva a que el adsorbente posea una estructura porosa homogénea. El modelo de difusión intraparticular se expresa. (Weber 1963).

$$\%A = k_{id} * (t)^a \quad (2 - 15)$$

Una forma lineal de la ecuación (2 - 15) es aplicando logaritmos.

$$\log \%A = \log k_{id} + a * \log(t) \quad (2 - 16)$$

Donde:

a : Descriptor del mecanismo de adsorción.

k_{id} : Constante de velocidad de difusión intrapartícula (min^{-1})

t: Tiempo (min).

A: Porcentaje de adsorción (%).

e. Modelo reversible de primer orden

El modelo reversible de primer orden, indica que las difusividades de los iones en la masa están controladas por una difusión superficial de película. (Vinod 2001):

$$\ln(1 - \theta) = -K_e * t \quad (2 - 17)$$

Donde:

t: Tiempo (min).

θ : Fracción de la capacidad de adsorción (q_t/q_e) en un tiempo t.

K_e : Constante de cinética global de equilibrio (min^{-1}).

2.2.5. ARCILLA CHACKO (*Hidralgirita*).

En el Perú, tenemos la bendición de contar con la arcilla de *Hidralgirita* (silicato de aluminio hidratado), llamada chacko por los nativos quechuas de Puno, Provincia de Azángaro. Esta arcilla fue consumida históricamente por los locales, quienes hasta hoy aderezan las papas con una salsa de chacko (*Hidralgirita*) y sal. No es solo una medicina incuestionable del altiplano, sino que también forma parte de la canasta diaria de alimentos. (Browman 2013).



Figura 8. Extracción de Arcilla Chacko (*Hidralgirita*)

2.2.5.1. Distribución geográfica.

En nuestro país el chacko (*Hidralgirita*) es una arcilla orgánica comestible, que ha sido encontrado en la sierra sur, mayormente en el departamento de Puno, en los distritos de Asillo, Acora, Azángaro y Tiquillaca. (Aranibar 2008).

En el altiplano al chaco se le conoce con los siguientes nombres según el lugar donde se encuentre: chiquiche, chaqo, chacko, chachako, pasa, pasalla, ñeke, kollpa, lillu, llinqui, ñinki, etc. (Chacón 2011).

2.2.5.2. Usos del chacko (*Hidralgirita*).

El chacko gris tradicionalmente, se emplea, para tratar las úlceras, la acidez estomacal, contra los parásitos y como emplasto externo. Esta arcilla realiza una gradual higiene intestinal, desintoxica y a la vez mineraliza. (Ramírez 2010).

El chacko gris se usa exitosamente en el tratamiento de diarreas infecciosas y otros tipos de diarreas agudas, es sumamente alcalino y rápidamente puede neutralizar la acidez estomacal y puede usarse como medicina de primeros auxilios en casos de ardor epigástrico. (Barrio 2009).

2.2.5.3. Fuente de minerales del chacko (*Hidralgirita*).

Los factores que hace del chacko un elemento interesante desde el punto de vista terapéutico es el aporte al organismo de minerales cuando se utiliza externamente (como cataplasma, por ejemplo) o internamente (disuelta en agua y bebida). (Rodenas 2008).

- ✓ El alto contenido de óxido de silicio, le imparte un elevado poder cicatrizante y también el color gris.
- ✓ El óxido de aluminio le imparte la propiedad antiácida, absorbente y astringente, el cual se emplea en la ulcera péptica.
- ✓ El óxido de calcio tiene propiedades antidiarreicas.
- ✓ El óxido de magnesio tiene propiedades antiácidas y laxantes.
- ✓ El óxido de sodio regula la presión osmótica.

El chacko (*Hidralgirita*) especialmente ingerido presenta otras cualidades que la convierten en una interesante alternativa que llegaría a complementar la nutrición humana, para recuperar o mantener la salud. (Aranibar 2008).

Porque contienen en su bioquímica los minerales y oligoelementos indispensables para todo ser vivo, desempeñando importantes funciones en el cuerpo:

- **Silicio:** Agente remineralizante y antitóxico importante en los terrenos óseo, vascular, nervioso y respiratorio que además actúa sobre las fibras elásticas y en la regeneración de los tendones y la piel.
- **Magnesio:** Fundamental para el crecimiento de los huesos al permitir la correcta asimilación del calcio drena además el hígado, estimula la bilis, es antiséptico y antioxidante, activa la regeneración celular.
- **Calcio:** Importante en la formación y conservación de los huesos, dientes, tendones e imprescindible en la coagulación sanguínea y en la regulación del sistema nervioso.
- **Sodio:** Junto al potasio regula el equilibrio de líquidos en el organismo.
- **Potasio:** Complementa la función del sodio.
- **Hierro:** Produce glóbulos rojos en la sangre, favorece la circulación y oxigenación del organismo e interviene en la generación de energía.

2.2.5.4. Chacko (*Hidralgirita*) en adsorción.

Sea cual fuere el origen de la arcilla, su elevada proporción de sílice y alúmina es constante y ello le otorga las características propiedades como eficiente.

La manera en que actúa la arcilla es por medio de un doble proceso de adsorción y absorción. Estas dos palabras son parecidas pero su modo de actuar es diferente. En la adsorción una sustancia se adhiere en la superficie externa, la arcilla tiene enlaces iónicos no satisfechos en la superficie adherente externa y naturalmente busca satisfacer estos enlaces, encontrando con carga opuesta, se conoce que las partículas de arcilla se llevan carga eléctrica negativa, mientras que las impurezas y toxinas llevan carga eléctrica positiva

La arcilla interactúa con diversas sustancias en especial con sustancias polares con el agua y las toxinas. Debido a esta propiedad, históricamente la arcilla ha sido empleada para recoger impurezas de la cerveza, vino y cidra. El proceso de absorción es similar al de una esponja, en este caso las sustancias ingresan dentro de la estructura interna de la arcilla, el geólogo del Massachusetts Institute of Technology, Robert Martin, nos dice que una dosis de un gramo de arcilla, mayor capacidad de recoger partículas cargadas positivamente o toxinas (Barrio S. 2011)

2.2.5.5. Propiedades físicas y químicas de las arcillas

La arcilla cambia sus propiedades físicas y químicas al ser expuesta al calor extremo convirtiéndose en lo que conocemos como cerámica o material cerámico, de hecho, al calentarse por arriba de los 200°C las arcillas se transforman tornándose incapaces nuevamente a formar parte de una suspensión coloidal y con ello a su plasticidad y ductibilidad. Mientras sigamos incrementando el momento térmico irán surgiendo nuevos cambios físicos y químicos como la pérdida total de agua, encogimiento, y la formación de las diferentes fases de ordenamiento molecular que se producen hasta llegar a su punto máximo de fusión de 1700°C. Una vez transformada se ha creado una materia estable e insoluble que en lo general se podría definir molecularmente de la siguiente manera $Al_6Si_2O_{13}$, en su fase alotrópica de la arcilla, esto es

conocido como mullita o porcelanita, obtenida de 900 a 1000°C. (Aranibar; García; Suarez 2008).

Las propiedades físicas de las arcillas están determinadas por el tamaño de sus granos. El tamaño común de grano de arcillas y arenas es el siguiente: Arenas: de 2.00 a 0.05 mm de diámetro, Arcillas: menores de 0.002 mm de diámetro. Dado a que existe un variado margen en el tamaño del grano en las arcillas, sus propiedades físicas en tanto a este tamaño también variarían. Muchas arcillas tienen un porcentaje elevado de partículas de forma delgada, plana y alargada, la combinación del tamaño de las partículas y su forma hace que la arcilla tenga un área superficial por unidad de volumen muy grande. En algunos casos en combinación con los granos diminutos de algunas arcillas se encuentran mezclados fragmentos de mayor tamaño, estos granos de mayor tamaño pueden ser de Feldespato inalterado, cuarzo u algún otro mineral que se ha unido a la arcilla durante el transporte o la sedimentación. La mayoría de los caolines cuenta con un elevado número de este tipo de granos los cuáles deben ser eliminados con agua a presión.

Aunque el tamaño del grano determina algunas de las propiedades de la arcilla, existen otros factores que controlan las propiedades de la arcilla, como el agua que junto con otros aditivos modifican la plasticidad de la mezcla. Las principales propiedades de la arcilla son: (Aranibar 2008).

a) Plasticidad

La arcilla es esencialmente maleable, esto significa que puede deformarse bajo cargas de compresión, dicha cualidad se debe a la estructura laminar de las partículas de la arcilla en el agua. Entre más plástica es una arcilla, podrá el material que la conforma estar en suspensión coloidal de forma muy uniforme con mayor cantidad de agua, aumentando su volumen, esta relación de capacidad de suspensión coloidal y aumento de volumen es la causa primigenia de la plasticidad, sin embargo, si el agua es demasiada la plasticidad se pierde convirtiéndose en una materia pegajosa gracias a que las partículas de la arcilla pierden adherencia entre sí. (Aranibar 2008).

b) Encogimiento

La arcilla húmeda o pasta se endurece al estar en contacto con el aire, al desecarse pierde volumen. La arcilla encoje en dos etapas: durante el secado donde se genera el encogimiento más importante y notorio; y en una segunda etapa durante la primera cocción (llamada bizcochado).

Se considera que las piezas están totalmente secas hasta que estas estén dentro del horno a una temperatura de 100°C, sin embargo, no es sino hasta los 550°C cuando podría decirse que el agua desaparece de su constitución química, es cuando la arcilla se vuelve dura y compacta. (Aranibar 2008).

c) Baja conductividad térmica

La capacidad de funcionar como aislante térmico se debe primordialmente a su composición química, aunque también a su estado físico de sólido. Como bien se sabe los sólidos solo pueden compartir o adquirir calor por conducción, esto es que sus partículas adquirirán energía u otorgarán esta al estar en contacto con otras de otro material. Ya sea en su estado de arcilla seca o húmeda, así como en su estado de material cocido o cerámico se les considera materiales termo-aislantes por su baja capacidad de conducción de calor lo que produce una resistencia notoria a las variaciones de temperatura, todas las arcillas tienen esta propiedad, pero algunas la presentan en mayor grado, ello gracias al contenido químico de alúmina y sílice, entre más alto sea el porcentaje de estos compuestos mayor será su propiedad. (Aranibar 2008).

d) Capacidad de Intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes: (Aranibar 2008).

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

e) Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso. (Aranibar 2008).

2.2.6. OTROS TIPOS DE ARCILLAS ESPECIALES

También pueden considerarse arcillas especiales las halloysitas, compuestas fundamentalmente por halloysita, Las arcillas halloysíticas también pueden considerarse caolines, y las hectoritas un tipo de bentonitas. Ambos tipos son muy escasos en el mundo.

Recientemente el termino arcilla especial ha sido restringido aún más por algunos autores y lo reservan para arcillas raras como la sepiolita o hectorita, y bentonitas blancas. También lo usan para arcillas modificadas químicamente como las bentonitas activadas con tratamientos ácidos o organofílicas, quedando fuera de la denominación de arcillas especiales los caolines, bentonitas y, por supuesto la *Hidralgirita*. (Aranibar 2008).

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

El chacko (*Hidralgirita*) natural con alto contenido de óxidos minerales tiene la propiedad de adsorber arsénico en aguas subterráneas contaminadas del distrito de Taraco, Provincia de Huancané – Departamento de Puno.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

1. A mayor tiempo de contacto metal – chacko (*Hidralgirita*) natural existe mayor adsorción de ión arsénico en el agua antes y después.
2. A pH neutro, temperatura y tiempo de contacto con chacko (*Hidralgirita*) natural tiene comportamiento fisicoquímico de adsorber el ión arsénico.
3. El chacko (*Hidralgirita*) natural con contenido de minerales de sílice, aluminio y hierro son adecuados para la adsorción de arsénico.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada es Chacko (*Hidralgirita*). La cual proviene del Departamento de Puno, distrito de Azángaro, La cual se ha ido al lugar mismo para muestrear y traer la materia prima.

3.1.2. MATERIAL DE LABORATORIO, EQUIPOS Y REACTIVOS

A continuación, se detallan los materiales, equipos y reactivos empleados:

a) Materiales de laboratorio.

- ✓ Vasos de precipitados
- ✓ Frascos de vidrio de 50 mL
- ✓ Matraz Erlenmeyer: 250 mL
- ✓ Probetas
- ✓ Pipetas
- ✓ Embudo de vidrio y soporte de embudo.
- ✓ Espátula
- ✓ Papel filtro Whatman N°42
- ✓ Tubo de ensayos
- ✓ Termómetro.

b) Equipos

- ✓ Balanza analítica (METTLER TOLEDO).
- ✓ Juego de Tamices, (TYLER ASTM 200)
- ✓ Agitador magnético.
- ✓ Equipo de absorción atómica
- ✓ Espectrofotómetro.
- ✓ pH-metro (ORION tipo 42 A)

c) Reactivos e Insumos

- ✓ Muestra de agua contaminada con arsénico
- ✓ Adquisición de Chacko natural
- ✓ Hidróxido de sodio
- ✓ Agua destilada y bidestilada.

3.2. METODOLOGÍA

La parte experimental se realizó de acuerdo a las siguientes experiencias:

- 3.3.1. Caracterización de la arcilla chacko (*Hidralgirita*)
- 3.3.2. Tratamiento de chacko (*Hidralgirita*)
- 3.3.3. Caracterización de agua subterránea contaminada con arsénico.
- 3.3.4. Proceso de adsorción/precipitación del ion arsénico.
- 3.3.5. Diseño experimental de la adsorción/precipitación del ion arsénico.
- 3.3.6. Isoterma de adsorción
- 3.3.7. Cinética de adsorción.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE CHACKO (*Hidralgirita*)

3.2.1.1. Sitio de extracción de la arcilla Chacko (*Hidralgirita*).

Para la extracción se ha ido al lugar donde hay arcilla chacko (*Hidralgirita*) que está ubicado en C.C. Punta Sahuacasi – Chacocunca del distrito de Azángaro, Geográficamente se halla ubicado en las siguientes coordenadas.

Norte : 8357406.

Este : 377277

Altitud : 3825 m.s.n.m.

Accesibilidad

La vía de acceso principal a la zona de estudio, es la carretera Asfaltada Puno – Juliaca – Azángaro, con 95.00 Km. Aproximadamente de Puno hasta Azángaro, y los accesos locales se distribuyen en lo siguiente:

Tabla 5. Accesibilidad para la extracción de la arcilla chacko (*Hidralgirita*).

LUGAR DE ORIGEN.	DESTINO.	TIPO DE VÍA.	KM.	TIEMPO APROX.
Puno	Juliaca	Asfaltada	42	45 minutos
Juliaca	Azángaro	Asfaltada	49	55 minutos
Azángaro	cc. Sahuacasi-Chacocunca	Trocha carrózable	15	30 minutos

Fuente: Elaboración Propia.

En la caracterización de la arcilla chacko (*Hidralgirita*) se han determinado sus características organolépticas y seguidamente se han analizado sus características químicas.

3.2.1.2. Determinación de las características organolépticas

- Aspecto
- Estado físico
- Color
- Olor
- Sabor
- Forma

3.2.1.3. Análisis de las características químicas

Para la determinación de composición química de óxidos tanto como elementos se han enviados para su análisis al laboratorio de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA (UNI), FACULTAD DE CIENCIAS. Seguidamente se ven los resultados.

Tabla 6. Composición química expresada como óxidos de Chacko (*Hidralgirita*) natural de la zona Asillo – Puno.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Trióxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	37.833	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	46.451	
Trióxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.877	
Óxido de Potasio (K ₂ O)	1.659	
Óxido de Magnesio (MgO)	4.871	
Óxido de Calcio (CaO)	4.152	
Óxido de Estroncio (SrO)	0.091	
Trióxido de Azufre (SO ₃)	1.945	
Óxido de Bario (BaO)	0.615	
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.948	
Óxido de Cobre (CuO)	0.414	
Óxido de Zinc (ZnO)	0.054	

Fuente: (LABICER) Laboratorio N° 12 – Facultad de ciencias, de la universidad Nacional de Ingenierías (2017).

Tabla 7. Composición química expresada como elementos de Chacko (*Hidralgirita*) natural de la zona Asillo – Puno

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Silicio (Si)	54.176	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Aluminio (Al)	24.916	
Hierro (Fe)	1.422	
Potasio (K)	0.877	
Magnesio (Mg)	2.811	
Calcio (Ca)	7.444	
Estroncio (Sr)	0.338	
Azufre (S)	2.681	
Bario (Ba)	1.549	
Sodio (Na)	3.176	
Cobre (Cu)	0.548	
Zinc (Zn)	0.062	

Fuente: (LABICER) Laboratorio N° 12 – Facultad de ciencias, de la universidad Nacional de Ingenierías (2017).

3.2.2. TRATAMIENTO DE CHACKO (*Hidralgirita*).

Para utilizar el Chacko (*Hidralgirita*) como material adsorbente se le aplicaran previamente un tratamiento físico.

3.2.2.1. Tratamiento físico

Para el tratamiento físico de Chacko (*Hidralgirita*) se realizó las siguientes operaciones: Materia prima, selección, secado, molienda y tamizado.

a) Extracción de la materia prima

Se ha ido al lugar donde se encuentra la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) Asillo – Azángaro.

b) Selección

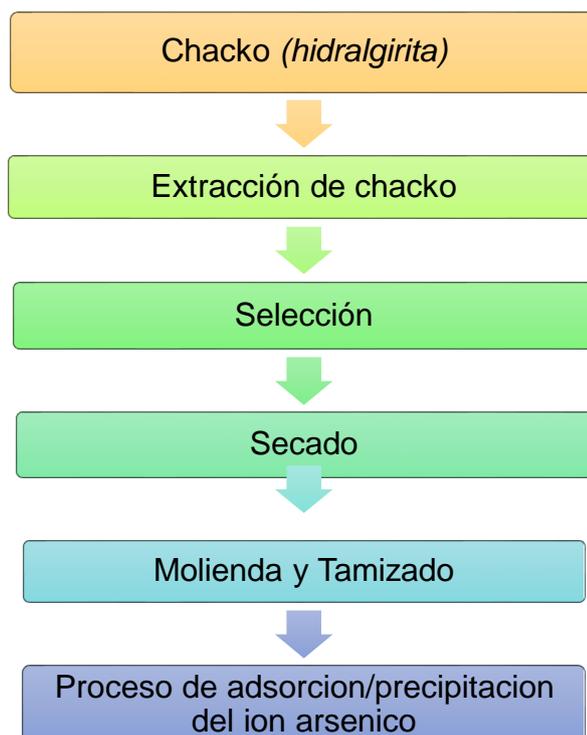
Se procedió a seleccionar el Chacko (*Hidralgirita*) de otras impurezas como restos de otras arcillas si es que hubiera y otros.

c) Secado

Seguidamente se dejaron secar la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) a temperatura ambiente por 3 días hasta que estuvieron completamente sin contenido de humedad.

d) Molienda y Tamizado

Se realizó utilizando un molino manual. Luego se procedió a tamizar en un juego de tamices de N° 8, 10, 40, 60, 70, 80 y 200 de las cuales se seleccionó el N° malla 60 para obtener tamaño de partícula de 0.25 mm de la arcilla Chacko (*Hidralgirita*).



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama 1. Proceso de adsorción del ion arsénico utilizando la arcilla Chacko (*Hidralgirita*).

3.2.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUBTERRRANEA CONTAMINADA CON ARSENICO.

3.2.3.1. Sitio de muestreo de agua subterránea

Para el diagnóstico se ha zonificado los pozos subterráneos aledaños a la cuenca del Río Ramis y del distrito de Taraco Provincia de Huancané del departamento de Puno, Geográficamente se halla ubicado en las siguientes coordenadas.

Latitud del sur : 15°18'00"

Longitud del oeste : 69°59'00"

Altitud : 3820 m.s.n.m.

Aprox. : 14050 Habitantes según INEI.

Accesibilidad

La vía de acceso principal a la zona de estudio, es la carretera Asfaltada Puno – Juliaca - Taraco - Huancané, con 85.00 Km. Aproximadamente de Puno hasta el Puente Ramis, y los accesos locales se distribuyen en lo siguiente:

Tabla 8. Accesibilidad para muestreo de agua subterránea contaminada con arsénico.

LUGAR DE ORIGEN.	DESTINO.	TIPO DE VÍA.	KM.	TIEMPO APROXIMADO.
Puno	Juliaca	Asfaltada	42	45 minutos
Juliaca	Taraco	Asfaltada	20	25 minutos

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.2. Características Físico – Químicas

Para este análisis físico químicas se envió la muestra para su análisis al laboratorio de seda Juliaca.

Tabla 9. Características físico - químicas

PARAMETROS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031 – 2010 SA.	VALORES OBTENIDOS
Turbidez	NTU	5	2.58
Potencial de Hidrogeno	pH	6.5-8.5	7.872
Conductividad eléctrica	uS/cm	1500	1441
Solidos Totales Disueltos	mg/L	1000	695
Temperatura	°C	-	11.5
Arsénico	mg/L	0.01	0.050

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de SEDA JULIACA SA. (2017).

3.2.4. PROCESO DE ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN DEL ION ARSÉNICO.

Procedimiento para las pruebas de adsorción de arsénico se desarrolló el siguiente procedimiento:

- 1) Se midió volumen de 100 ml de agua con contenido de arsénico con una concentración inicial de (0.05 mg/l) en matraces Erlenmeyer.

- 2) Se añadió una cantidad determinada del adsorbente de arcilla Chacko (*Hidralgirita*).
- 3) A la solución obtenida se le ajustó el pH de inicio mediante la adición de NaOH 0.075 N.
- 4) El contenido de los matraces se etiquetó y se agitaron con un agitador magnético de 200 rpm a temperatura 25 °C.
- 5) Después del proceso de adsorción/precipitación se dejó precipitando por 30 min.
- 6) Después de la decantación, se filtraron las soluciones sobrenadantes en papel filtro Whatman desechándose el adsorbente.
- 7) Finalmente, las muestras se enviaron al laboratorio de **SEDA JULIACA** para su previo análisis de contenido de arsénico.

3.2.4.1. Evaluación de las variables más influyentes

Se evaluaron las variables más influyentes de la adsorción/precipitación de As mediante la arcilla chacko (*Hidralgirita*) con la finalidad de obtener sus condiciones favorables y seleccionar las variables independientes para su posterior aplicación en el diseño experimental de estudio.

➤ Efecto de la cantidad de adsorbente.

En ocho matraces Erlenmeyer se colocaron un volumen de 100 ml de solución de agua con contenido de (As) 0.05 mg/L en las cuales se añadió diferentes cantidades de adsorbente de arcilla chacko (*Hidralgirita*) (0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 7, 10 g) y se trabajó con temperatura de 25 °C con agitación de 200 rpm durante 70 min. El contenido de cada matraz se dejó precipitar durante 30 min y seguidamente se filtró y se llevó para su análisis de arsénico a laboratorio de SEDA JULIACA.

Tabla 10. Efecto de la cantidad de adsorbente.

N° Muestras	[As] mg/L	Masa (g)	Malla (N°)	Volumen (mL)	pH	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
8	0.05	0.1-10	60	100	7.5	70	25

Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Efecto de pH**

En seis matraces Erlenmeyer se colocaron un volumen de 100 ml de solución de agua con contenido de (As) 0.05 mg/L y se añadió a cada uno 0.2 g de adsorbente y se reguló el pH de 7.05, 7.50, 8.05, 9.05, 9.50 y 10.14 a temperatura de 25 °C con agitación de 200 rpm durante 70 min. El contenido de cada matraz de dejo precipitar durante 30 min y seguidamente se filtró y se llevó para su análisis de arsénico a laboratorio de SEDA JULIACA.

Tabla 11. Efecto de pH.

N° Muestras	[As] mg/L	Masa (g)	Malla (N°)	pH	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
6	0.05	0.2	60	7.05 – 10.14	70	25

Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Efecto de la temperatura**

En cinco matraces Erlenmeyer se colocaron un volumen de 100 ml de solución de agua con contenido de (As) 0.05 mg/L y se añadió a cada uno 0.2 g de adsorbente y se reguló el pH de 7.5 a temperatura de 15, 20, 25, 30 y 35 °C con agitación de 200 rpm durante 70 min. El contenido de cada matraz de dejo precipitar durante 30 min y seguidamente se filtró.

Tabla 12. Efecto de la temperatura.

N° Muestras	[As] mg/L	Masa (g)	Malla (N°)	Ph	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
5	0.05	0.2	60	7.5	70	15 – 35

Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Efecto del tiempo de contacto**

El efecto del tiempo de contacto se realizó para encontrar el tiempo de equilibrio que se alcanza entre el adsorbato (As) con el adsorbente (arcilla chacko (*Hidralgirita*)). Se colocaron en 6 matraces de Erlenmeyer un volumen de 100 ml

de la solución de agua con contenido de (As) 0.05 mg/L y se añadió 0.2 g de adsorbente con tamaño de partícula N° Malla 60 a cada uno pero se trabajó con diferentes tiempos (20; 30; 50; 70; y 90 minutos) a temperatura de 25 °C y agitación de 200 rpm, el contenido de cada matraz se dejó precipitando por 30 min y luego se filtró y se llevó para su análisis de arsénico a laboratorio de SEDA JULIACA.

Tabla 13. Efecto de tiempo de contacto.

N° Muestras	[As] mg/L	Masa (g)	Malla (N°)	Volumen (mL)	pH	Tiempo (min)
6	0.05	0.2	60	100	7.5	20-90

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN/PRECIPITACIÓN DEL ION ARSÉNICO.

3.2.5.1. Diseño experimental central compuesto ortogonal

El diseño experimental central compuesto ortogonal es de segundo orden, se consideraron como variables independientes a la cantidad de adsorbente (g) pH y temperatura (°C). Este diseño tiene la forma de un cubo con centros en las caras, en la práctica se requieren de 2 a 3 puntos centrales para la estimación del error experimental. Los diseños de segundo orden requieren de cinco niveles en cada factor, codificados como $-\infty$; -1; 0; +1; $+\infty$ en donde los puntos estrellas son -1.4 y 1.4 para K=3 factores (Montgomery, 2004).

➤ Determinación de los parámetros y rangos

Tabla 14. Niveles de las variables independientes a estudiar.

Símbolo	Variables Independientes	Niveles				
		$-\infty$	-1	0	+1	$+\infty$
X ₁	Cantidad de adsorbente (g), W	0.13	0.15	0.2	0.25	0.27
X ₂	pH	6.85	7.05	7.55	8.05	8.25
X ₃	Temperatura (°C) T	11.47	15	25	35	38.53

Fuente: Elaboración Propia.

La variable respuesta o de salida es la que depende de las variables independientes, la cual se presentó según tabla 14.

Tabla 15. Variable respuesta.

Símbolo	Variable dependiente	Unidad
Y	Capacidad de adsorción de As	mg/g

Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Transformación de las variables**

Los cálculos de la transformación de variables se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Transformación de variables.

Variable	Promedio	Diferencia	Cambio de variable	Variable codificada	
Cantidad de adsorbente (g) W	$\bar{w} = \frac{0.25 + 0.15}{2} = 0.2$	$D = \frac{0.25 - 0.15}{2} = 0.05$	$X_1 = \frac{W - 0.2}{0.05}$	W= 0.15 W= 0.25 W= 0.2 W= 0.13 W= 0.27	X ₁ = - X ₁ = + X ₁ = 0 X ₁ = -1,4 X ₁ =1,4
pH	$\overline{pH} = \frac{8.05 + 7.05}{2} = 7.55$	$D = \frac{8.05 - 7.05}{2} = 0.5$	$X_2 = \frac{pH - 7.55}{0.5}$	pH = 7.05 pH = 8.05 pH = 7.55 pH = 6.85 pH = 8.25	X ₂ = - X ₂ = + X ₂ = 0 X ₂ = -1,4 X ₂ =1,4
Temperatura (°C) T	$T = \frac{35 + 15}{2} = 25$	$D = \frac{35 - 15}{2} = 10$	$X_3 = \frac{T - 25}{10}$	T = 15 T= 35 T= 25 T= 11.47 T = 38.53	X ₃ = - X ₃ = + X ₃ = 0 X ₃ = -1,4 X ₃ =1,4

Fuente: Elaboración Propia.

➤ **Numero de experimentos**

El número de experimentos se calculó según la ecuación (Montgomery, 2004).

$$N = 2^k + 2 * k + n_0 \quad (3 - 1)$$

Donde:

N: es el número de experimentos.

K: es el número de factores.

No: es el número de puntos centrales.

Reemplazando en la ecuación () tenemos.

$$N = 2^3 + 2(3) + 3 \rightarrow N = 17 \text{ Experimentos.}$$

Se colocaron en 17 matraces Erlenmeyer un volumen de 100 mL de agua subterránea contaminada con arsénico 0.05 mg/L y se añadió cantidad de adsorbente con variación de 0.1g y 1g; se reguló el pH con NaOH 0.075 N a valores de 7.05 y 10.14 con variación de temperatura de 15°C – 35°C. Se agitaron todos los ensayos a 200 rpm durante 70 min, como indica la matriz de diseño de la tabla 14. Los valores de la capacidad de adsorción se calcularon mediante la siguiente ecuación.

$$Y = \frac{V * (C_i - C_f)}{W} \quad (3 - 2)$$

Donde:

C_i y C_f: Concentración inicial y final del adsorbato (mg/L).

V: Volumen de la solución (L).

W: Cantidad de adsorbente utilizada (g).

Tabla 17. Matriz del diseño central compuesto ortogonal

N°	Variables codificadas			Respuesta
	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	-	-	-	
2	+	-	-	
3	-	+	-	
4	+	+	-	
5	-	-	+	
6	+	-	+	
7	-	+	+	
8	+	+	+	
9	-1.4	0	0	
10	+1.4	0	0	
11	0	-1.4	0	
12	0	+1.4	0	
13	0	0	-1.4	
14	0	0	+1.4	
15	0	0	0	
16	0	0	0	
17	0	0	0	

Fuente: Montgomery (2004).

➤ **Ecuación de regresión**

La formulación estará dada por la ecuación:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 \quad (3 - 3)$$

Donde:

Y: variable respuesta.

X₁, X₂, X₃: variables Codificadas.

b₀, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆, b₇, b₈, b₉: Coeficientes de regresión lineal.

3.2.6. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Se colocaron en 5 matraces Erlenmeyer se colocaron un volumen de 100 ml de solución de agua con contenido de (As) 0.05 mg/L en las cuales se trabajaron con los valores óptimos del diseño experimental de cantidad de adsorbente, pH y temperatura de 25 °C, con agitación de 200 rpm durante 70 min. El contenido de cada matraz de dejo precipitar durante 30 min y seguidamente se filtró y se llevó para su análisis de arsénico a laboratorio de SEDA JULIACA.

Para calcular la capacidad de adsorción se empleó la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{V * (C_i - C_f)}{W} \quad (3 - 4)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción (mg/g).

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).

C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).

V: Volumen de la solución (L).

W: Cantidad de adsorbente utilizada (g).

Para el cálculo del porcentaje de adsorción se empleó la siguiente ecuación:

$$\%A = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (3 - 5)$$

Donde:

%A: Porcentaje de adsorción (%).

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).

C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).

3.2.6.1. Ajuste a una isoterma de equilibrio

Los datos experimentales se representaron de acuerdo con las isotermas de adsorción mostrados en la tabla 18

Tabla 18. Isotermas de adsorción.

Isoterma	Ecuación
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} * b} + \frac{1}{q_{max}} * C_e$
Freundlich	$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} * \log C_e$

Fuente: Davis et al (2003).

Donde:

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

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

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

b : Constante de Langmuir relacionada con la afinidad del adsorbente por el adsorbato.

K : Constante de Freundlich, es un indicador del equilibrio de adsorción.

n : intensidad de adsorción.

3.2.7. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

En la cinética de adsorción se colocaron en 5 matraces Erlenmeyer un volumen de 100 mL de solución de agua contaminada con As 0.05 mg/L a cada uno se trabajó con los valores óptimos del diseño experimental de cantidad de adsorbente, pH y temperatura variando el tiempo (20, 30, 50, 70 y 90 minutos) con agitación de 200 rpm. Al final del proceso los matraces se dejaron precipitando por 30 min y después se filtraron y se enviaron para su previo análisis de contenido de As al laboratorio de SEDA JULIACA. Para el cálculo de la capacidad de adsorción y el porcentaje de adsorción se emplearon las siguientes ecuaciones:

Capacidad de adsorción:

$$q_t = \frac{V * (C_i - C_f)}{W} \quad (3 - 6)$$

Donde:

q_t : Capacidad de adsorción (mg/g).

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).

C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).

V : Volumen de la solución (L).

W : Cantidad de adsorbente utilizada (g).

Porcentaje de adsorción:

$$\%A = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100 \quad (3 - 7)$$

Donde:

$\%A$: Porcentaje de adsorción (%).

C_i : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).

C_f : Concentración final del adsorbato (mg/L).

3.2.7.1. Ajuste a un modelo cinético

Los resultados de las pruebas experimentales se evaluaron según los modelos cinéticos en la tabla 19

Tabla 19. Modelos cinéticos de adsorción.

Modelo cinético	Ecuación
Pseudo primer orden	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} * t$
Pseudo segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t$
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(\alpha * \beta) + \frac{1}{\beta} * \ln(t)$
Difusión intraparticular	$\log\%A = \log k_{id} + a * \log t$

Fuente: Lagergren (1988); Chilen y Clayton (1980); Vinod y Anirudhan (2001).

Donde:

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

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

t : Tiempo (min).

K_1 : Constante Cinética de Pseudo primer orden (L/min).

K_2 : Constante cinética de Pseudo segundo orden (g/mg.min).

h : $k_2 * q_e^2$ siendo la velocidad inicial de adsorción (mg/g.min).

α : Velocidad inicial de adsorción de Elovich (mg/g.min).

β : Está relacionado con la energía de activación por quimiadsorción (g/mg).

A : Porcentaje de adsorción (%).

a : Descriptor del mecanismo de adsorción.

k_{id} : Constante de velocidad de difusión intraparticular (min^{-1})

θ : Fracción de la capacidad de adsorción (q_t/q_e) en un tiempo t .

K_e : Constante de cinética global de equilibrio (min^{-1}).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos del capítulo anterior, a través de tablas y figuras, la interpretación de los mismos y la discusión basada en el marco teórico, marco conceptual y en los antecedentes de este trabajo.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ARCILLA CHACKO (*HIDRALGIRITA*).

4.1.1. CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS

- Aspecto: Firme o lisa, granulado.
- Estado físico: Sólido.
- Color: Plomo.
- Olor: Arcilla
- Sabor: Semi dulce
- Forma: Variable.

4.1.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

En las tablas 20 y 21 se reportan los resultados del análisis de composición química de la arcilla Chacko (*Hidralgirita*).

Tabla 20. Análisis de la composición química expresada como óxidos de Chacko (*Hidralgirita*) natural de la zona Azángaro – Puno.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Trióxido de Aluminio (Al_2O_3)	37.833	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Dióxido de Silicio (SiO_2)	46.451	
Trióxido de Hierro (Fe_2O_3)	0.877	
Óxido de Potasio (K_2O)	1.659	
Óxido de Magnesio (MgO)	4.871	
Óxido de Calcio (CaO)	4.152	
Óxido de Estroncio (SrO)	0.091	
Trióxido de Azufre (SO_3)	1.945	
Óxido de Bario (BaO)	0.615	
Óxido de Sodio (Na_2O)	0.948	
Óxido de Cobre (CuO)	0.414	
Óxido de Zinc (ZnO)	0.054	

Fuente: (LABICER) Laboratorio N° 12 – Facultad de ciencias, de la universidad Nacional de Ingenierías (2017).

Los resultados de la arcilla Chacko (*Hidralgiritita*) de la tabla 20, como óxidos, contiene alto en dióxido de silicio 46.451%, trióxido de aluminio 37.833%, óxido de magnesio 4.871%, óxido de calcio 4.152% entre otros óxidos, estos óxidos facilitan la adsorción del ion arsénico.

Tabla 21. Análisis de la composición química expresada como elementos de Chacko (*Hidralgiritita*) natural de la zona Azángaro – Puno.

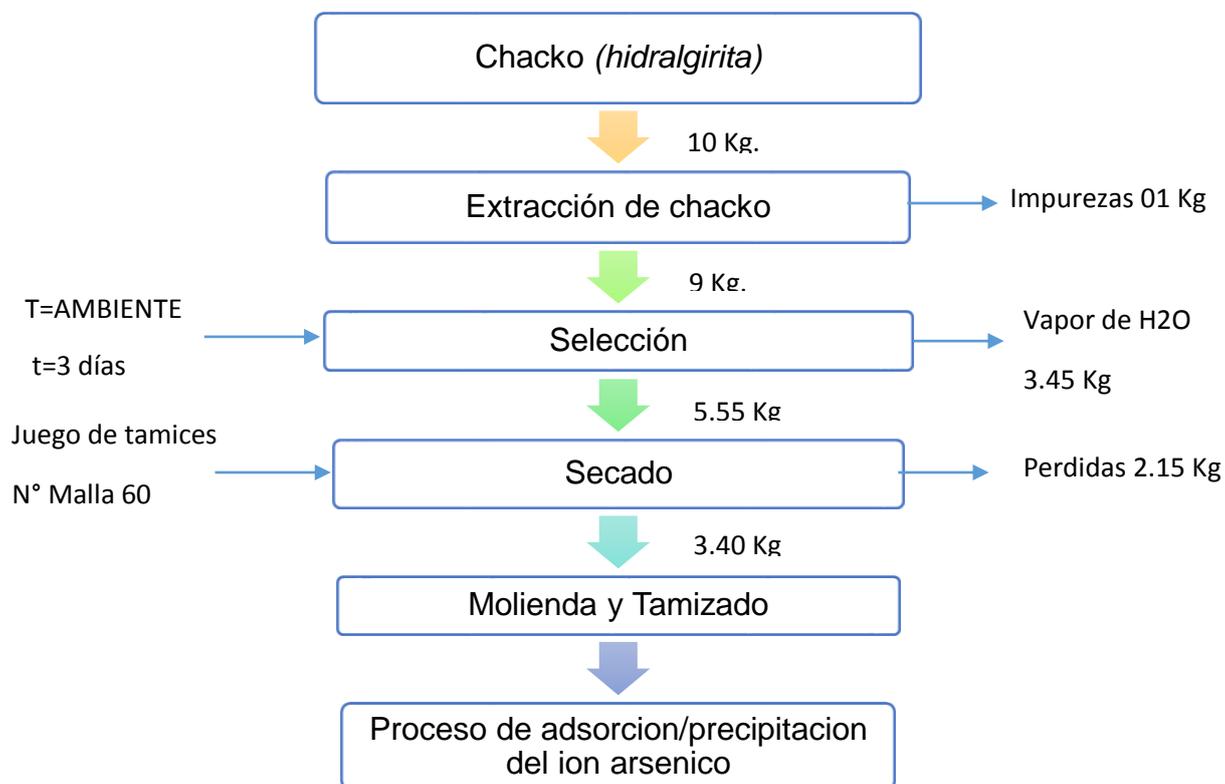
COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Silicio (Si)	54.176	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Aluminio (Al)	24.916	
Hierro (Fe)	1.422	
Potasio (K)	0.877	
Magnesio (Mg)	2.811	
Calcio (Ca)	7.444	
Estroncio (Sr)	0.338	
Azufre (S)	2.681	
Bario (Ba)	1.549	
Sodio (Na)	3.176	
Cobre (Cu)	0.548	
Zinc (Zn)	0.062	

Fuente: (LABICER) Laboratorio N° 12 – Facultad de ciencias, de la universidad Nacional de Ingenierías (2017).

Los resultados de la arcilla Chacko (*Hidralgiritita*) de la tabla 21, como elementos y óxidos, contiene alto contenido de sílice 54.176%, aluminio 24.916%, Hierro 1.422%, Magnesio 2.811%, Calcio 7.444% entre otros elementos, estos elementos nos ayudaran a mejorar la calidad del agua. La presencia de cationes como Ca y Mg pueden facilitar la adsorción de especies de As (V) negativamente cargadas en la fase sólida. Efectos similares pueden tener el Al en aguas ácidas y el Fe²⁺ en aguas reductoras. Los procesos evaporativos en ambientes áridos permiten el mantenimiento de valores altos de pH, así como concentraciones altas en Cl, F y U. En general, este mecanismo no explicaría las concentraciones altas de arsénico observadas en ambientes reductores, ya que estos suelen tener un pH próximo al valor neutro.

4.2. TRATAMIENTO DE LA ARCILLA CHACKO (*HIDRALGIRITA*).

Los tratamientos que se aplicaron a la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) fueron un tratamiento físico que incluyo las siguientes operaciones: Extracción, selección, secado, molienda y tamizado.



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama 2. Balance de Materia de tratamiento físico de la Arcilla Chacko (*Hidralgirita*).

En el diagrama 2 se muestra el balance de materia del tratamiento físico que se le otorgó a la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) con sus respectivas operaciones, se observa el rendimiento de la masa respecto al peso inicial de la arcilla Chacko (*Hidralgirita*).

$$R_1 = \frac{3.40}{10} * 100 = 34\% \quad (4 - 1)$$

Este valor indica la cantidad de arcilla Chacko (*Hidralgirita*) que ha sido transformada en masa (polvo).

4.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUBTERRANEA CONTAMINADA CON ARSENICO (As).

4.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS

Para este análisis físico químicas se envió la muestra para su análisis al laboratorio de seda Juliaca.

Tabla 22. Características de Análisis físico - químicas.

PARAMETROS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031 – 2010 SA.	VALORES OBTENIDOS
Turbidez	NTU	5	2.58
Potencial de Hidrogeno	pH	6.5-8.5	7.872
Conductividad eléctrica	uS/cm	1500	1441
Solidos Totales Disueltos	mg/L	1000	695
Temperatura	°C	-	11.5
Arsénico	mg/L	0.01	0.05

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de SEDA JULIACA S.A. (2017).

En la tabla 22, se puede observar que la calidad del agua subterránea del distrito de Taraco, Provincia de Huancané del Departamento de Puno, con respecto a la norma **D.S. 031 – 2010 SA**. Excepto para el Arsénico (As) el cual rebasa el valor límite máximo permisible de la norma cuatro veces, por lo que resulta importante tratar el agua de dicho lugar.

4.4. PROCESO DE ADSORCIÓN DEL ION ARSENICO As

4.4.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES MÁS INFLUYENTES

4.4.1.1. Efecto de cantidad de adsorbente

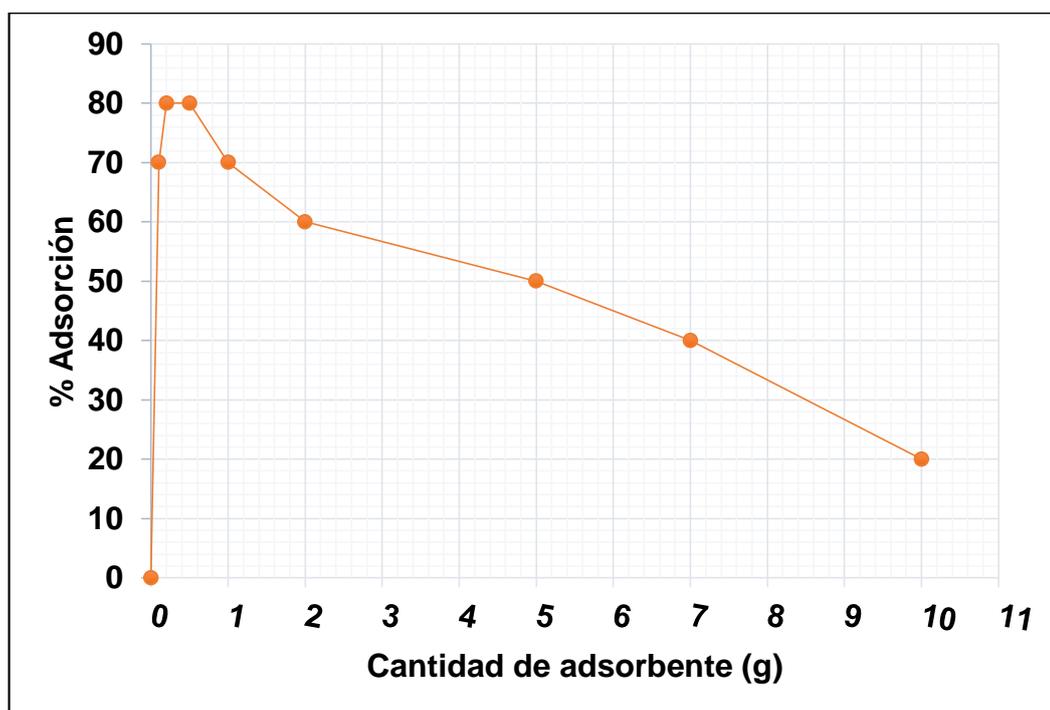
La Tabla 23 muestra los resultados del porcentaje de adsorción a diferentes cantidades de adsorbente de arcilla Chacko en la adsorción del As para condiciones de trabajo: Agua subterránea con contenido de As 0.05 mg/L, volumen de 100 ml, tiempo de contacto de 70 min, temperatura de 25 °C Y pH de 7.5.

Tabla 23. Adsorción de As a diferentes cantidades de adsorbente.

N°	W (g)	C ₀ (mg/L)	C _f (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	0.1	0.05	0.015	0.035	70
2	0.2	0.05	0.010	0.02	80
3	0.5	0.05	0.010	0.008	80
4	1	0.05	0.015	0.0035	70
5	2	0.05	0.020	0.0015	60
6	5	0.05	0.025	0.0005	50
7	7	0.05	0.03	0.000286	40
8	10	0.05	0.04	0.0001	20

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 9, se muestra el porcentaje de adsorción de As frente a la cantidad de adsorbentes de arcilla Chacko.

**Figura 9.** Efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de As.

En la Figura 9, se aprecia que el porcentaje de adsorción de As se incrementa con el aumento de la cantidad de adsorbente hasta 0.2 g con un porcentaje de 80% después de este valor el porcentaje de adsorción disminuye. Esto significa que el porcentaje de adsorción se incrementa hasta llegar a su punto máximo de interacción entre los iones metálicos y los grupos funcionales de la arcilla Chacko, después de su punto óptimo la eliminación del metal no aumenta más.

El efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de As estudiadas con otros materiales adsorbentes se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Tiempos de equilibrio en la adsorción de As.

Adsorbente	W (g)	%A	Autor
Zeolita	5.5	98.41	Flerida Mejía Z. (2009)
Goethita	01	97.72	Juan L. Pérez R. (2012)
Maracuyá	01	90.91	
Dióxido de titanio (DOW)	01	93.18	

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.1.2. Efecto del pH

La tabla 25, presenta los resultados del efecto del pH en la adsorción de As con arcilla Chacko a temperatura de 25 °C, agua subterránea con contenido de As 0.05 mg/L, volumen 100 mL, cantidad de adsorbente 0.2 g y tiempo de contacto 70 minutos. Con pH de (7.05, - 10.14).

Tabla 25. Adsorción de As con un pH.

N°	pH	C ₀ (mg/L)	C _f (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	7.05	0.05	0.01	0.02	80
2	7.50	0.05	0.008	0.021	84
3	8.05	0.05	0.01	0.02	80
4	9.05	0.05	0.02	0.015	60
5	9.50	0.05	0.03	0.01	40
6	10.14	0.05	0.04	0.005	20

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 10, se observa el porcentaje de adsorción de As frente a valores de pH

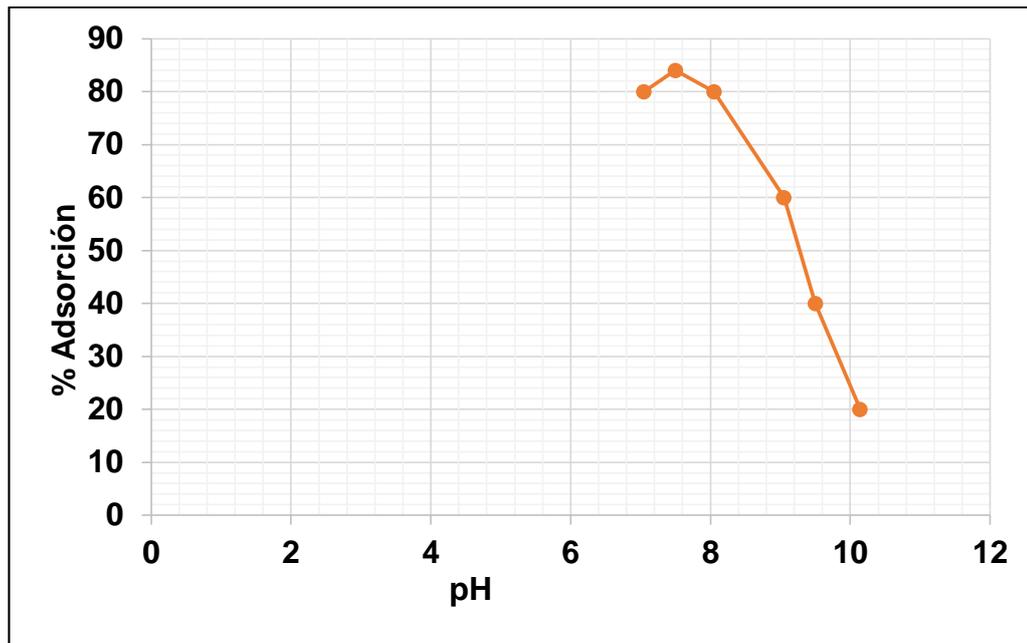


Figura 10. Efecto del pH en la adsorción de As.

De la figura 10, se observa que el menor porcentaje de adsorción se encuentra a un pH de 7.05 pero al incrementar el pH a 7.5 aumenta el porcentaje de adsorción, esto indica que a valores bajos de pH de 7.05 se encuentra mayor cantidad de iones H_3O^+ en el agua con contenido de arsénico los cuales compiten con los iones de As para ingresar a los sitios activos del adsorbente, con el incremento del pH a 7.5 se reduce la cantidad de iones H_3O^+ de la solución acuosa esta disminución permite el ingreso de los iones As^{+5} a los sitios activos de adsorbente (arcilla Chacko (*Hidralgirita*)).

El máximo porcentaje de adsorción se obtiene a un pH a 7.5 sin embargo al subir el pH 8.05 el porcentaje de adsorción disminuye.

Los pH óptimos en la adsorción de As con diversos adsorbentes se presentan en la tabla 26.

Tabla 26. pH óptimos en la adsorción de As con diversos Adsorbentes.

Adsorbente	pH	%A	Autor
Zeolita	7.0	98.41	Flerida Mejía Z. (2009)
Goethita	7.05	97.72	Juan L. Pérez R. (2012)
Maracuyá	5.0	90.91	
Dióxido de titanio (DOW)	7.0	93.18	

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.1.3. Efecto de la temperatura

La tabla 27, presenta los resultados del efecto de la temperatura en la adsorción de As con arcilla Chacko a pH 7.5, agua subterránea con contenido de As 0.05 mg/L, volumen 100 mL, cantidad de adsorbente 0.2 g y tiempo de contacto 70 minutos. Con temperatura de (15 – 35 °C).

Tabla 27. Adsorción de As con temperatura.

N°	Temperatura °C	C ₀ (mg/L)	C _f (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	0	0.05	0.00	0.00	0
2	15	0.05	0.02	0.015	60
3	20	0.05	0.015	0.0175	70
4	25	0.05	0.01	0.02	80
5	30	0.05	0.015	0.0175	70
6	35	0.05	0.015	0.0175	70

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 11, se observa el porcentaje de adsorción de As frente a valores de temperatura.

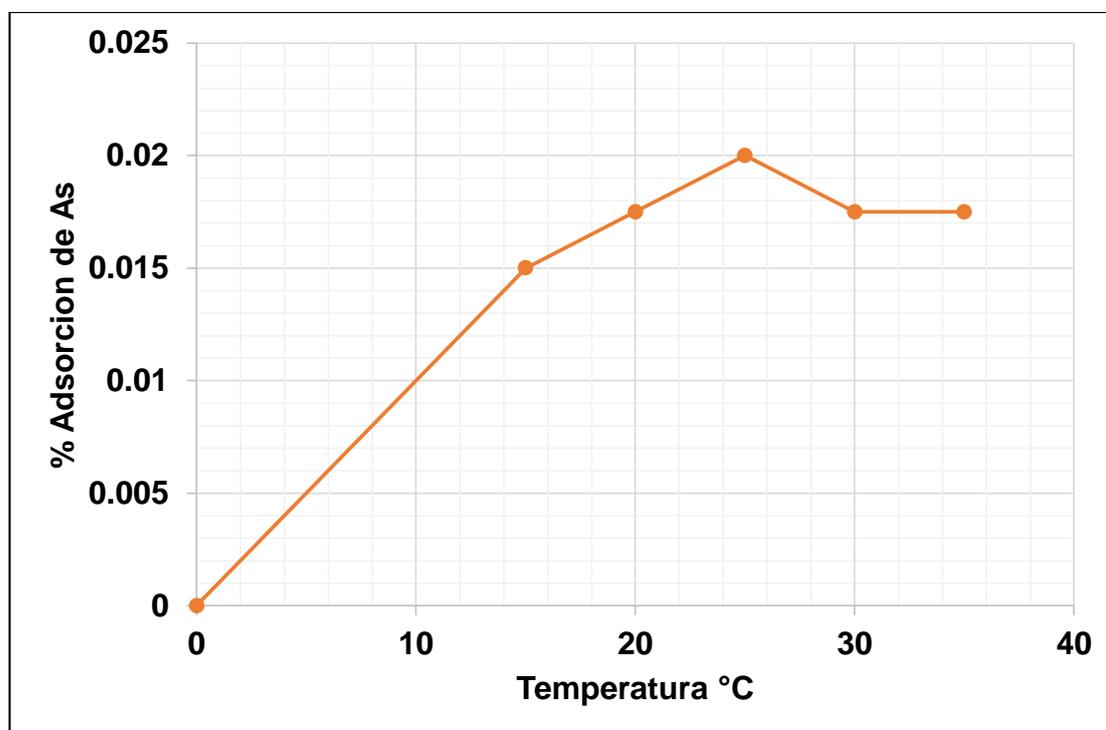


Figura 11. Efecto de la temperatura en la adsorción de As.

Los pH óptimos en la adsorción de As con diversos adsorbentes se presentan en la tabla 28.

Tabla 28. Temperaturas óptimos en la adsorción de As con diversos Adsorbentes.

Adsorbente	Temperatura ° C	%A	Autor
Zeolita	25	98.41	Flerida Mejía Z. (2009)
Goethita	25	97.72	Juan L. Pérez R. (2012)
Maracuyá	25	90.91	
Dióxido de titanio (DOW)	25	93.18	

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.1.4. Efecto de tiempo de contacto

El tiempo de contacto se realizó para encontrar el tiempo de equilibrio que se obtiene al mantener en contacto el adsorbato (As) con el adsorbente (arcilla chacko (*Hidralgirita*)), para lo cual se prepararon 5 ensayos: volumen 100 mL, solución de As 0.05 mg/L y cantidad de adsorbente 0.2 g a temperatura 25 °C con agitación constante 200 rpm y pH de 7.05 los resultados se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Adsorción de As a diferentes tiempos de contacto.

N°	t (min)	C ₀ (mg/L)	C _f (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	20	0.05	0.020	0.015	60
2	30	0.05	0.015	0.0175	70
3	50	0.05	0.015	0.0175	70
4	70	0.05	0.010	0.020	80
5	90	0.05	0.008	0.021	84

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 12, se muestra la capacidad de adsorción de As frente a diferentes tiempos de contacto.

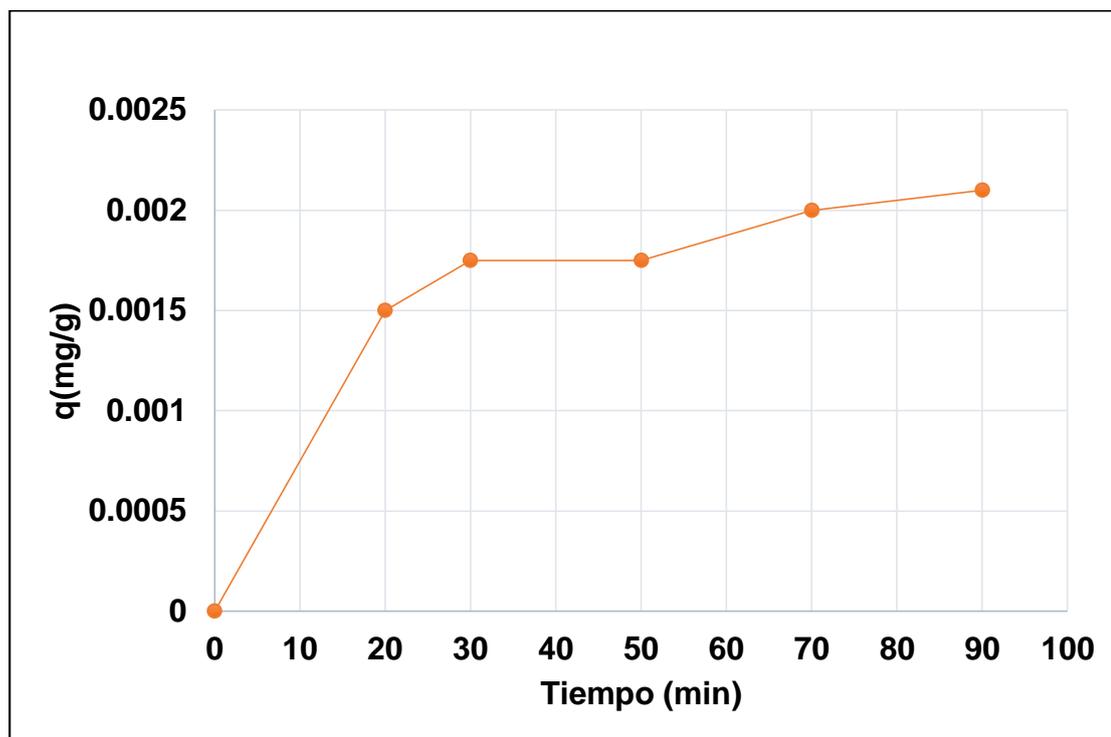


Figura 12. Efecto del tiempo de contacto en la adsorción de As.

En la Figura 12, se observa que en los primeros contactos a medida que avanza el tiempo aumenta la cantidad de iones As^{+5} adsorbidos en la arcilla chacko pero a partir de 70 minutos la arcilla queda saturada de los iones As^{+5} con una capacidad de adsorción 0.002 mg/g, después de los 70 minutos la capacidad de adsorción no aumenta, se mantiene constante lo cual indica que se alcanzó el equilibrio entre el adsorbato y el adsorbente. Cuando el tiempo de adsorción es corto y la capacidad de adsorción es alta significa que podría estar presente un mecanismo de adsorción a nivel superficial (Maldonado, 2006).

Tabla 30. Tiempos de equilibrio en la adsorción de As.

Adsorbente	t (min)	q (mg/g)	Autor
Zeolita	32.5	0.5	Flerida Mejía Z. (2009)
Goethita	30	0.263	Juan L. Pérez R. (2012)
Maracuyá	150	0.190	
Dióxido de titanio (DOW)	90	0.205	

Fuente: Elaboración Propia.

4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCION DEL ION As

El diseño experimental central compuesto de los niveles mínimos y máximo de las variables, de los puntos estrella y de las réplicas en el centro de los experimentos para determinar el modelo matemático que represente a la variable respuesta. En la tabla 31, se presentan los resultados de la variable respuesta que es la capacidad de adsorción de As (Y), la cual se calculó según la ecuación (3-2) del capítulo III de acuerdo a la matriz del diseño central compuesto ortogonal a condiciones de trabajo: Volumen de 100 mL de agua subterránea contaminada con As 0.05 mg/L con agitación constante de 200 rpm durante 70 min.

Tabla 31. Resultados de la variable respuesta.

N°	W(g)	pH	T(°C)	Y(mg/g)
1	0.15	7.05	15	28.00
2	0.25	7.05	15	14.00
3	0.15	8.05	15	16.80
4	0.25	8.05	15	14.00
5	0.15	7.05	35	27.33
6	0.25	7.05	35	16.40
7	0.15	8.05	35	27.00
8	0.25	8.05	35	16.20
9	0.1	7.5	25	40.00
10	1	7.5	25	3.5
11	0.2	6.5	25	22.5
12	0.2	9.05	25	15.00
13	0.2	7.5	11.47	17.50
14	0.2	7.5	38.53	21.00
15	0.2	7.5	25	20.00
16	0.2	7.5	25	21.00
17	0.2	7.5	25	20.00

Fuente: Statigraphis (2011).

4.5.1. ANALISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO

El análisis del diseño experimental se realizó empleando el paquete estadístico Software STATIGRAPHICS Centurión XV.

Tabla 32. Resumen del diseño de experimentos.

Clase del diseño	Superficie respuesta
La clase del diseño	Diseño central compuesto:2*3 estrella
Características del diseño	Ortogonal
Nombre del archivo	Adsorción de As

Fuente: Statigraphics (2011).

Tabla 33. Resumen de las bases del diseño de experimentos.

Numero de factores experimentales	3
El número de bloques	1
El número de respuestas	1
El número de corridas	17, incluyendo a 6 puntos estrella, 3 puntos centrales
Grados de libertad para el error	7
Aleatorio	No

Fuente: Statgraphics (2011).

Tabla 34. Efectos estimados de las variables e interacciones.

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	20.505	0.533	
A: Cantidad de adsorbente (g)	-3.484	0.576	1
B: pH	6.958	0.576	1
C: Temperatura (°C)	-1.942	0.576	1
AA	-9.624	0.696	1
AB	-0.368	0.654	1
AC	-0.273	0.654	1
BB	-6.825	0.696	1
BC	-0.293	0.654	1
CC	-5.833	0.696	1

Fuente: Statgraphics (2011).

En la tabla 34 se muestran los efectos estimados de las variables en forma individual y las interacciones entre ellas, los signos de la cantidad de adsorbente y temperatura son negativos, significa que se encuentran en su punto máximo y deben mantenerse como constantes sin embargo el signo del pH es positivo indica que está en su punto mínimo y debe maximizarse, los signos de las cuadraturas de las variables son negativos lo cual significa que existe curvatura para todas las variables y los signos de las interacciones de las variables son negativa. (Palacios, 2004).

También se muestra el error de estándar de cada uno de estos efectos el cual mide su error de muestreo. Se observa que el factor de inflación de varianza (V.I.F) más grande es igual a 1. Para un diseño perfectamente ortogonal todos los factores serian igual a 1.

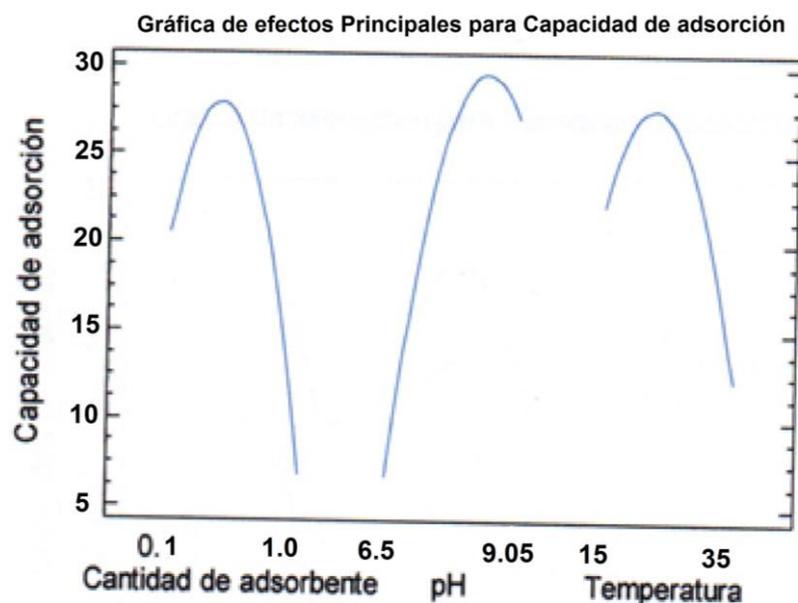


Figura 13. Grafica de los efectos principales.

En la figura 13 presenta la capacidad de adsorción frente a los efectos principales de las variables independientes, en él se observa que la variable más significativa es el pH seguido de la cantidad de adsorbente y de la temperatura, las cuales se describen en forma individual a continuación.

La cantidad de adsorbente tiene comportamiento cuadrático sobre la capacidad de adsorción de As con pendiente negativo eso quiere decir que al disminuir la cantidad del adsorbente de 01g hasta 0.2g aumenta en mayor proporción la

capacidad de adsorción de As de 7.55 mg/g a 27.52 mg/l. sin embargo al disminuir la cantidad de adsorbente de 0.2g hasta 0.1g baja pero en menor proporción la capacidad de adsorción es 24.53 mg/l.

El pH tiene comportamiento cuadrático sobre la capacidad de adsorción de As, con pendiente positiva eso indica que al aumentar el pH de 6.5 hasta pH de 7.5 se incrementa la capacidad de adsorción de 7.50 mg/g a 28.05 mg/g a valores superiores de pH 9.05 tiende a bajar ligeramente la capacidad de adsorción en 26.92 mg/g.

Tabla 35. Análisis de Varianza para Capacidad de adsorción de As.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: W (g)	6.3041	1	6.3041	67.1586	0.0000
B: pH	67.5236	0	67.5236	115.9154	0.0000
C: T (°C)	3.5201	1	3.5201	7.2235	0.0000
AA	10.5281	1	10.5281	120.0345	0.0000
AB	0.2229	1	0.2229	0.7651	0.4483
AC	0.1979	1	0.1979	0.3822	0.2165
BB	14.7979	1	14.7979	72.4567	0.0000
BC	0.1256	1	0.1256	0.18305	0.4256
CC	1.8831		1.8831	70.7140	0.0000
Error Total	2.7445	7	0.6180		
Total (corr.)	988.116	16			

Fuente: Statgraphics (2011).

R-cuadrada = 96.3465 porciento

R-cuadrada (ajustada por g/l.) = 95.693 porciento

Error estándar del est. = 0.86672

Error absoluto medio = 0.39235

Estadístico Durbin-Watson = 2.36799 (P=0.940)

Autocorrelación residual de Lag 1 =- 0.315076.

El StatAdvisor

Este panel resume los resultados del ajuste a un modelo estadístico relacionando Capacidad de adsorbente de los factores experimentales. La tabla ANOVA particiona la variabilidad de la capacidad de adsorción de As entre los valores de respuesta observados en varias componentes. En este caso 6 efectos tienen un P-valor menor o igual que 0.05, el modelo es estadísticamente significativo al 5% de nivel de significación.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.3465% de la variabilidad en Capacidad de adsorción de As. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.693%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.86672. El error medio absoluto (MAE) de 0.39235 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

En la tabla 35 se aprecia que el error total del cuadrado medio $0.6180 < 1$ lo cual comprueba que el trabajo está bien desarrollado (Palacios, 2004)

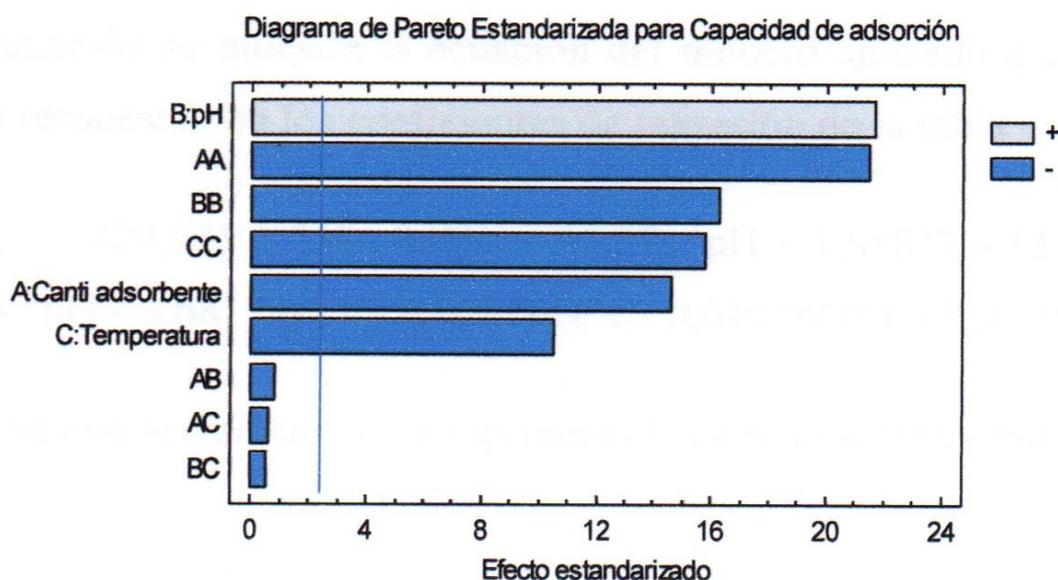


Figura 14. Diagrama de Pareto estandarizado.

La figura 14 muestra diagrama de Pareto que es una representación gráfica del análisis de varianza, en él se describió los factores más influyentes en su respectivo orden sobre la adsorción de As. Los efectos de color plomo son directamente proporcionales a la variable respuesta (capacidad de adsorción de As), mientras que los de color azul son inversamente proporcionales. El diagrama incluye una línea vertical cuya ubicación depende de intervalo de confianza determinado (94 %). todo efecto sobrepase la línea será de considerable significancia para el proceso. Del diagrama se observa claramente que el pH es la variable de mayor influencia, seguido de las cuadraturas de cantidad de adsorbente, pH y temperatura, luego sigue la cantidad de adsorbente, temperatura y por ultimo las interacciones de las variables.

Tabla 36. Coeficiente de regresión del modelo ajustado.

Fuente	Estimado
Constante	-129.675
A: W (g)	132.841
B: pH	3.691
C: T (°C)	1.201
AA	-6526.865
AB	-3.468
AC	-0.058
BB	-1.832
BC	-0.0091
CC	-0.0126

Fuente: Statgraphics (2011).

A continuación se muestra la ecuación del modelo ajustado que presenta a la variable respuesta con los coeficientes de regresión de la tabla 36.

$$Y(\text{mg/l}) = -129.675 + 132.841 \cdot W + 3.691 \cdot \text{pH} + 1.201 \cdot T - 6526.865 \cdot W^2 - 3.468 \cdot W \cdot \text{pH} - 0.058 \cdot W \cdot T - 1.832 \cdot \text{pH}^2 - 0.0091 \cdot \text{pH} \cdot T - 0.0126 \cdot T^2 \quad (4 - 2)$$

Se observa que la ecuación está representada en sus variables naturales.

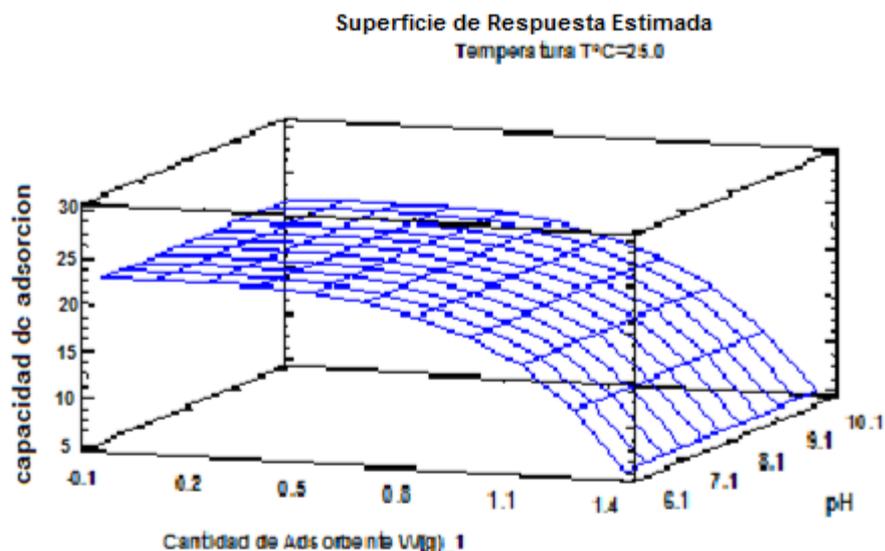


Figura 15. Grafica de superficie de respuesta estimada.

En la figura 15 se presenta la gráfica de superficie de respuesta estimada en forma tridimensional, la cual indica que se alcanza la máxima capacidad de adsorción cuando se disminuye la cantidad de adsorbente hasta 0.195 g y se incrementa el pH hasta 7.52 manteniendo constante la temperatura a 25 °C.

4.5.2. RESPUESTA OPTIMIZADA.

Meta: maximizar capacidad de adsorción.

Valor optimo: 29.12 mg/g.

Tabla 37. Resultados de las variables óptimas.

Factor	Bajo (- ∞)	Alta (+ ∞)	Óptimo
Cantidad de adsorbente (g)	0.1	1.0	0.195
pH	6.5	9.05	7.52
Temperatura (°C)	11.47	38.53	22.46

Fuente: Statgraphics (2011).

En la tabla 37 se muestra la combinación de los valores bajos y altos de los puntos estrella de las variables independientes con el fin de obtener los valores óptimos que maximicen la capacidad de adsorción cuyo valor dio como resultado 29.12 mg/g significa que 0.2g de adsorbente puede adsorber 29.12 mg/g de arsénico en agua subterránea contaminada con arsénico.

4.6. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

Para la evaluación de la cinética de adsorción de As con arcilla chacko se realizaron 6 experimentos con diferentes tiempos, se colocó a cada un volumen 100 mL de concentración inicial (C_0) 0.05 mg/L, se trabajó con los valores óptimos del diseño experimental de cantidad de adsorbente de 0.2 g; pH 7.5 y temperatura 25 °C. Para calcular los valores de la capacidad de adsorción se empleó la ecuación (3 - 6) del capítulo III, sus resultados se presentan en la tabla 38.

Tabla 38. Resultados de la cinética de adsorción.

N°	t (min)	C_0 (mg/L)	C_f (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	0	0.05	0.00	0.00	00
2	20	0.05	0.02	0.015	60
3	30	0.05	0.015	0.0175	70
4	50	0.05	0.015	0.0175	70
5	70	0.05	0.01	0.02	80
6	90	0.05	0.008	0.021	84

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 16 se Muestra la evolución d la cinética de adsorción de As.

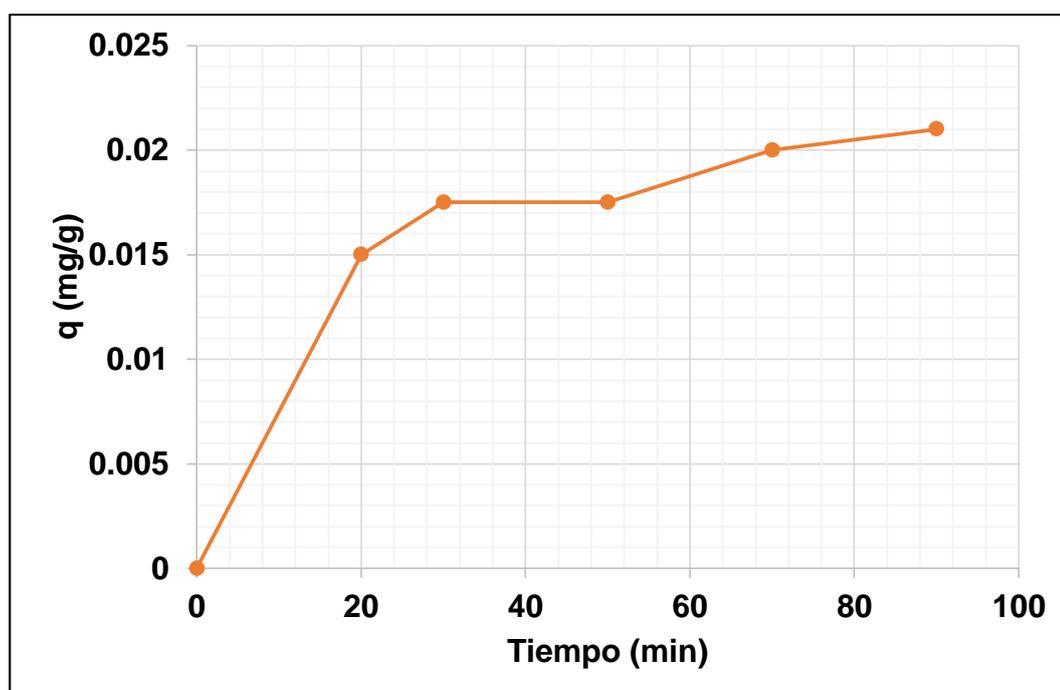


Figura 16. Cinética de adsorción de As.

En la figura 16 se muestra la capacidad de adsorción de As en función del tiempo, en él se define la velocidad en la que son adsorbidos los iones As por el adsorbente de arcilla Chacko, se observa que la velocidad de adsorción se incrementa en los primeros 70 minutos después disminuye su velocidad hasta llegar a una estabilidad total a los 90 minutos, debido a que para tiempos superiores la capacidad de adsorción no aumenta y permanece constante lo cual indica la finalización del proceso.

4.6.1. AJUSTE A UN MODELO CINÉTICO

Los resultados experimentales se evaluaron en los modelos de Pseudo primer orden; Pseudo segundo orden, Elovich y reversible de primer orden con el fin de predecir el modelo que mejor describa la cinética de adsorción de As.

4.6.1.1. Modelo de Pseudo primer orden

El modelo de Pseudo primer orden refiere que el ion metálico se adsorbe en un sitio activo sobre la superficie del adsorbente y puede ser formulado a partir de la siguiente ecuación (Lagergren, 1988)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \quad (4 - 2)$$

Tabla 39. Resultados del modelo de Pseudo primer orden.

N°	t (min)	q _t (mg/g)	ln(q _e - q _t)
1	0	0.00	0
2	20	0.015	-5.298
3	30	0.0175	-5.991
4	50	0.0175	-5.991
5	70	0.02	-
6	90	0.021	-

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 17 se aprecia el ajuste de los datos experimentales al modelo de Pseudo primer orden en su expresión lineal.

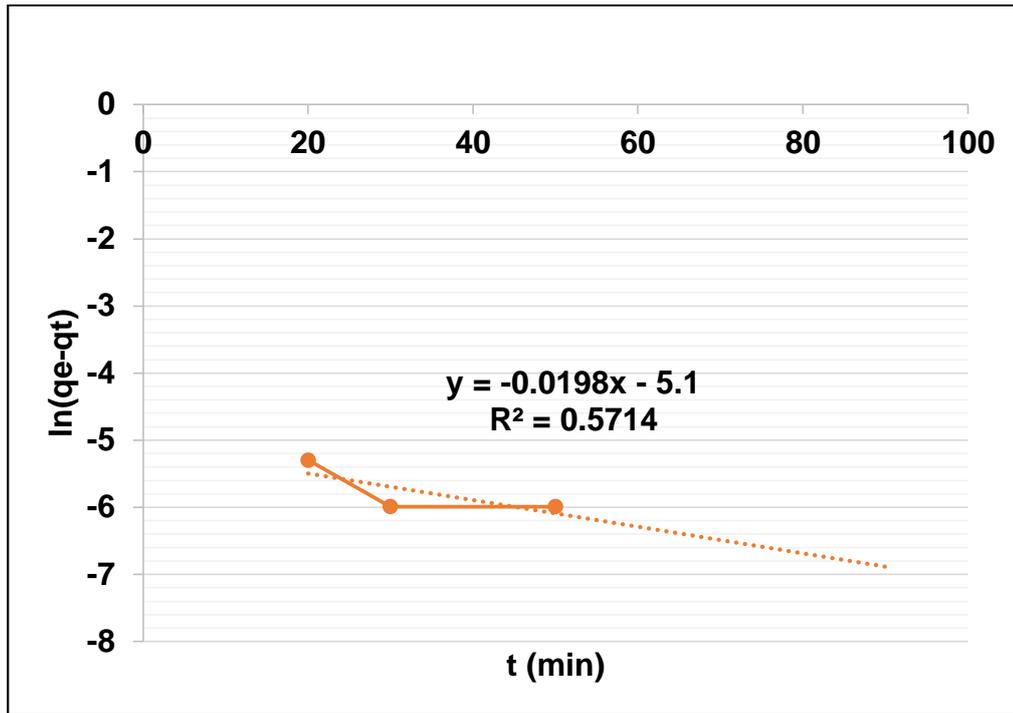


Figura 17. Ajuste de datos al modelo de Pseudo primer orden.

La capacidad de adsorción de As en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de Pseudo de primer orden (k_1) se determinaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica de $\ln(q_e - q_t)$ versus t como se muestra en la ecuación (4 – 2). Para la ecuación de Pseudo de primer orden, la capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e) indica que se adsorbieron 29.80 mg/g de iones de As por gramo de adsorbente de arcilla chacko en el equilibrio y la constante cinética de Pseudo primer orden $k_1 = 0.02 \text{ min}^{-1}$ señala la velocidad en la que son adsorbidos los iones As^{+5} por la arcilla Chacko. El coeficiente de correlación $R^2 = 0.571$.

4.6.1.2. Modelo de Pseudo segundo orden

El modelo cinético de Pseudo segundo orden está basado en la capacidad de adsorción de la fase sólida, donde el adsorbato se adsorbe en dos sitio activos de la masa arcilla Chacko (*Hidralgirita*). La ecuación de Pseudo segundo orden en su expresión lineal esta designada (Ho et al.; 2000).

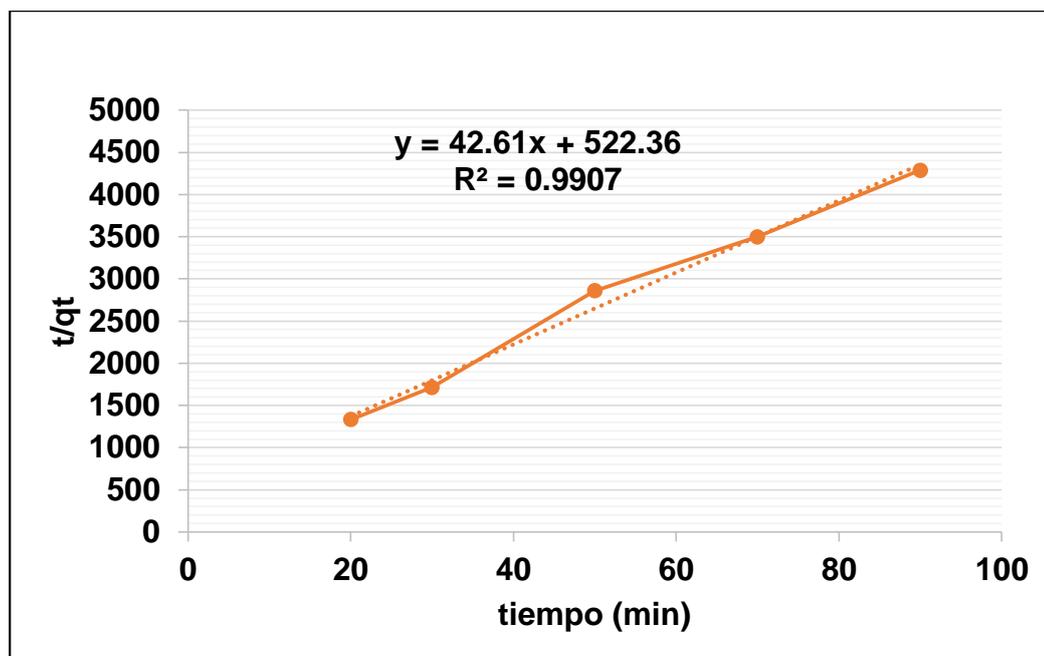
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (4 - 3)$$

Tabla 40. Resultados del modelo de Pseudo segundo orden.

N°	t (min)	q (mg/g)	t/q _t
1	0	0	0
2	20	0.015	1333.33
3	30	0.0175	1714.286
4	50	0.0175	2857.143
5	70	0.02	3500
6	90	0.021	4285.714

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 18 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de Pseudo segundo orden en su expresión lineal.

**Figura 18.** Ajuste de datos al modelo de Pseudo segundo orden.

La capacidad de adsorción de As en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de Pseudo de segundo orden (k_2) se determinaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica de t/q_t versus t como se muestra en la ecuación (4 – 3). Siendo el valor de $q_e = 0.02$ mg/g que representa iones de As por gramo de adsorbente y el valor de $k_2 = 42.61$ g/mg*min está relacionado con la velocidad total de la adsorción de As por arcilla chacko. El coeficiente de correlación $R^2 = 0.9907$.

4.6.1.3. Modelo de Elovich

El modelo de Elovich tiene la aplicación general en procesos de quimiadsorción, supone que los sitios activos del adsorbente son heterogéneas y por ello exhiben diferentes energías de activación. La ecuación de Elovich se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación (Chien y Clayton, 1980).

$$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(\alpha * \beta) + \frac{1}{\beta} * \ln(t) \quad (4 - 4)$$

Tabla 41. Resultados del modelo de Elovich.

N°	t (min)	ln(t)	qt (mg/g)
1	0	0	0
2	20	3.00	0.015
3	30	3.40	0.0175
4	50	3.91	0.0175
5	70	4.25	0.02
6	90	4.50	0.021

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 19 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de Elovich en su ecuación lineal.

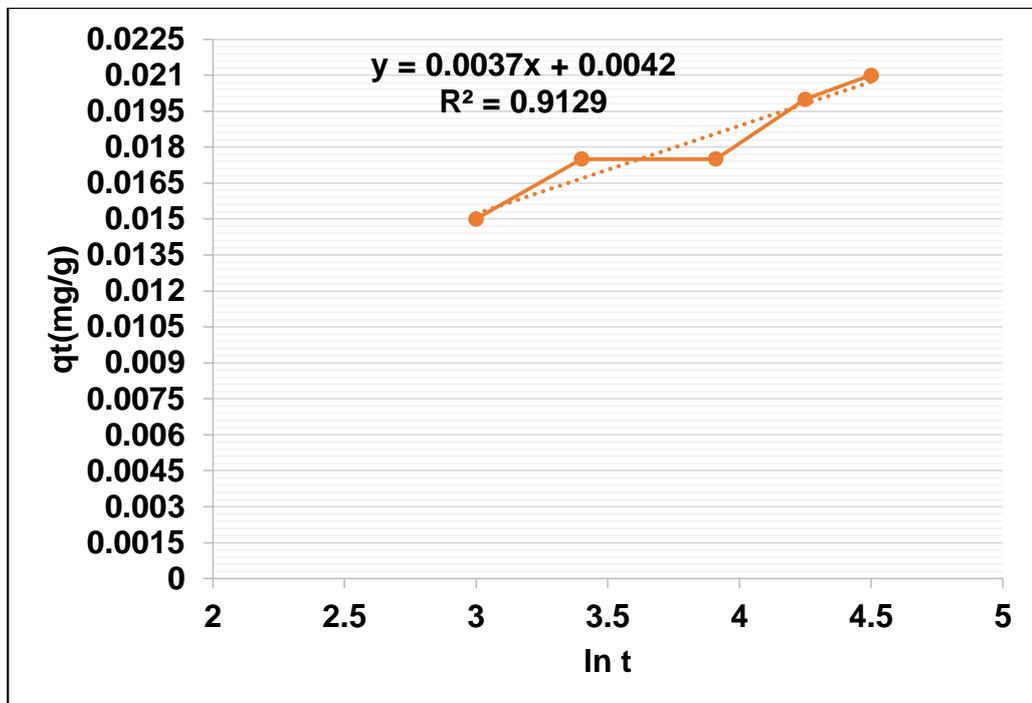


Figura 19. Ajuste de datos al modelo de Elovich.

En la figura 19. Se registran las constantes de Elovich α y β las cuales se determinaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica de q_t versus $\ln(t)$ de la ecuación (4 – 4). Siendo el valor de $\alpha = 0.0079 \text{ mg/g}^*\text{min}$ indica la velocidad inicial en la que son adsorbidos los iones As por gramo de adsorbente y el valor de $\beta=0.000031 \text{ g/mg}$ está relacionado con la superficie cubierta del adsorbente por los iones As y la energía de activación por adsorción química del proceso. El coeficiente del coeficiente de correlación $R^2=0.913$.

4.6.1.4. Modelo de difusión intraparticular

El mecanismo de difusión intraparticular está basado en el transporte del adsorbato a través de la estructura interna de los poros del adsorbente y la difusión propiamente dicha es la que conlleva a que el adsorbente posea una estructura porosa homogénea, el modelo de difusión intraparticular se presenta (Weber y Morris, 1963).

$$\log\%A = \log k_{id} + a * \log t \quad (4 - 5)$$

Tabla 42. Resultados del modelo de difusión intraparticular.

N°	t (min)	%A	log (t)	log %A
1	0	0	0	0
2	20	60	1.30	1.78
3	30	70	1.48	1.85
4	50	70	1.70	1.85
5	70	80	1.85	1.90
6	90	84	1.95	1.92

Fuente: Elaboración Propia.

El ajuste de los datos experimentales al modelo de difusión intraparticular en su expresión lineal se aprecia en la figura

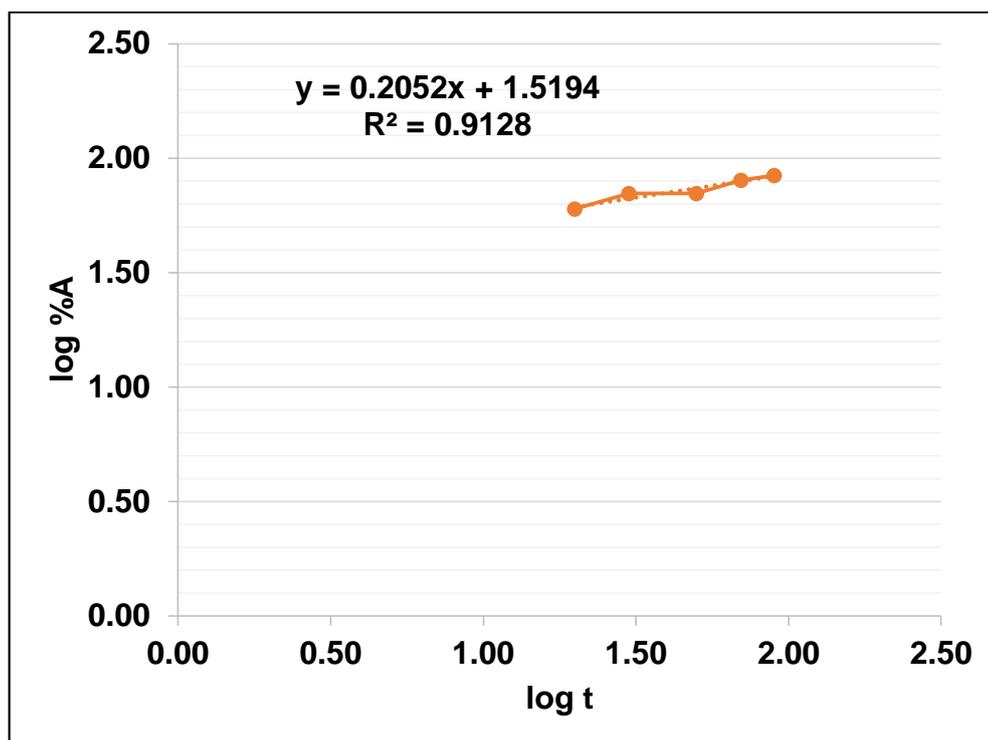


Figura 20. Ajuste de datos al modelo de difusión intraparticular.

Las constantes del modelo de difusión intraparticular K_{id} y a se determinaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica $\log \%A$ versus $\log t$. Indica la velocidad de difusión intraparticular y el valor de $a=0.205$ está relacionado con el mecanismo de adsorción con $R^2=0.913$.

V. CONCLUSIONES

En la caracterización de la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) se determinaron sus propiedades químicas como óxidos y también como elementos con los siguientes resultados: estos resultados muestran un alto contenido de silicio, aluminio y hierro en la arcilla Chacko, indicando que su pared celular tiene mayor cantidad de grupos funcionales para formar ligandos con los iones de As.

Existen métodos convencionales y no convencionales para la remoción de arsénico a partir de aguas contaminadas. Los métodos no convencionales muestran mayor capacidad de adsorción de arsénico. Los adsorbentes con alto contenido de óxido de hierro, óxido de manganeso muestra mayor capacidad de adsorción de arsénico. En la evaluación de las variables más influyentes de la adsorción de As, se obtuvieron condiciones favorables: tiempo de contacto 70 min, cantidad de adsorbente 0.2 g; pH 7.5 y temperatura 25 °C, de las cuales se seleccionaron como variables independientes a la cantidad de adsorbente, pH y Temperatura para su aplicación en el diseño experimental de la cual se obtuvo la siguiente ecuación del modelo ajustado.

$$Y(\text{mg/l}) = -129.675 + 132.841 * W + 3.691 * \text{pH} + 1.201 * T - 6526.865 * W^2 - 3.468 * W * \text{pH} - 0.058 * W * T - 1832 * \text{pH}^2 - 0.0091 * \text{pH} * T - 0.0126 * T^2$$

En la cinética de adsorción se evaluaron los cinéticos de Pseudo primer orden, Pseudo segundo orden, Elovich y Difusión intraparticular. Los datos cinéticos indicaron que el modelo de Pseudo orden describió mejor la velocidad de adsorción del ion As con constante de velocidad de Pseudo segundo orden: $k_2 = 42.61 \text{ g/mg.min}$ y $R^2 = 0.9907$ para variación de tiempos de 20 – 90 min. Se llegó a una máxima porcentaje de capacidad adsorción de As con Chacko (*Hidralgirita*) al 84%.

VI. RECOMENDACIONES

Evaluar la desorción de As sobre la superficie de la masa de arcilla Chacko (*Hidralgirita*) con diferentes ácidos y diferentes concentraciones para obtener parámetros adecuados en la recuperación del arsénico y reutilizar el material adsorbente en la adsorción de As.

Realizar un análisis de los grupos funcionales que presenta la arcilla Chacko (*Hidralgirita*) mediante la técnica Espectrofotometría de Infrarrojo por transformada e Fourier.

Empelar la masa de arcilla Chacko (*Hidralgirita*) para adsorber otros metales pesados como Pb, Zn, Cd y Cr en solución de aguas contaminas por relaves mineros y comparar los resultados.

Ampliar el estudio de adsorción de As con otros recursos naturales.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aguilar L, Karla j. (2005). Tesis de maestría “Remoción de arsénico en aguas subterráneas de la comarca lagunera.

Álvarez, B. (2012). Propiedades Farmacológicas del Aluminio y Magnesio. <http://www.minsa.gob.pe/portalebiblioteca2/biblio/plm/PLM/productos/52360.htm>.

Anawar, H. & S. Kikuo (2003). “Geoquímica aparición de arsénico en las aguas subterráneas de Bangladesh: fuentes y procesos de movilización, Pág. 77, 109-131”.

Araníbar M, García R, Suárez M. (2007). “Arcillas Comestibles (arcilla 3A-T). Revista Agro noticias Perú, Pág. 48”.

Aranibar, M.J. (2008). Capacidad Secuestrante de Micotoxinas de la Arcilla Chacko.Macla.

http://www.ehu.es/index.php.sem/macla.articulo/macla6/Macla6_.pdf

Aranibar, M.J., García, E. y Suarez, M. (2009). Arcilla Chacko en la Alimentación Animal. Trabajo de Investigación Escuela de Post Grado Universidad Nacional del Altiplano – Perú, Universidad Complutense – España y Universidad de Salamanca – España. (p. 120).

Al-Asheh, S., and Duvnjak, Z. (1998). Binary metal sorption by pine bark: study of equilibrium and mechanisms. Separation science and technology. 33(9): 1303-1329.

Auge M. (2006). “Aguas subterráneas en México contaminados con arsénico”.

Alos, R. y Juvina, J. (2005). “Monitorización potenciométrica de la biosorción del ion cobre (II) en raspo de uva. Proyecto final de la carrera. Barcelona. España.

Barrio, S. (2011). Propiedades Terapéuticas de la Arcilla Chaco. Saludbio.com.<http://saludbio.com/index/articulo/arcilla-propiedades.indicaciones>

Barrio, S. (2009). La Milagrosa Arcilla de Chaco. La Geofagia y la Salud Intestinal. <http://sachabarrio.blogspot.com/2009/02/la-milagrosa-arcilla-de-chaco-la.html>

Baur I. & onishi j. (1969). Minerales de arsénicos más frecuentes.

Bournod, L. y Cabezas, E. (2010). “composición química de arsénico” en España.

Boyle R. W. & Jonasson I. R. (1973). “La geoquímica del arsénico y su uso como un elemento indicador en la prospección geoquímica”.

Berg M., Tran H. C., Nguyen T. C. (2001). “La contaminación por arsénico de las aguas subterráneas y el agua potable en Vietnam: una amenaza para la salud humana”.

Browman D. (2013). Tierras Comestibles de la Cuenca del Titicaca. Estudios Ataqueños.http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071810432004002800011

Brookins j. (1988). “influencias del variable pH en adsorción”.

Castillo O, Castro R, Capatinta C, López P, Yasuda M. (2014). “Evaluación de la capacidad antiácida in vitro de la arcilla del altiplano peruano "chacko”.

Chacón, M. (2011). Chaco Arcilla Orgánica Comestible. http://greensthecuisine.blogspot.com/2011_10_01_archive.html

Chien, S. and Clayton, W. (1980). Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption on soils. *SoilSci. Soc. Am. J.* 44:265-268.

Davis, T. A.; Volesky, B. and Mueel, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research.* 37 (18): 4311 – 4330.

Dinesh M. & Charles U. (2007). “La eliminación de Arsénico de las aguas residuales usando adsorbentes”.

Duffus, J. H. (2002). Heavy metals-a meaningless term. Pure and applied chemistry. 74: 793-807.

Florida. (2009). "Adsorción de arsénico por zeolita .Enviromentinternat natural, Pág. 25, 217, 227".

Gadd, G. (1988). Accumulstion of metals by microorganisms and algae. *Biotechnology special microbial process: 401-433*.

Gao S. Goldberg & M. Herbel (2006). "Los procesos de absorción que afectan a la solubilidad del arsénico en los sedimentos superficiales oxidados de Tulare Lake Bed. Geología química, Pág. 228, 33 – 43".

García Romero Emilia & Suárez Barrios Mercedes (2008). "Las Arcillas: propiedades y Usos. Geología de Arcillas. Universidad de Salamanca, Pág. 201-204".

Gonzales, U.A. (2001). Cinética química. Editorial síntesis S.A. España.

Gupta. (2005). "La adsorción de As (III) a partir de soluciones acuosas de hierro - arena recubierta de óxido. Coloides Interfaces, Pág. 288, 55 – 60".

Ho, Y.; Mckay, G.; Wase D. and Foster, C, (2000). Study of the sorption of divalent metal ions on to peat. Adsorp. Sci. Technol. 18:639-650.

Huaming G. & Yuan L. (2010). "El arseniato de eliminación de la solución acuosa mediante la siderita sintético. Los materiales peligrosos, Pág. 176, 174 – 180".

Huaming G. & Doris S. (2008). "La adsorción de especies de arsénico del agua utilizando la siderita activado - filtros de la columna de hematita. Los materiales peligrosos, Pág. 151, 628 – 635".

Juan L. Paredes R. (2012). "Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción Tesis para maestro en ingeniería ambiental"

Katherine Lizama A. & Fletcher Guangzhi S. (2011). "Los procesos de eliminación de arsénico en el humedal construido. *Chemosphere*, Pág. 84, 1032-1043".

Kumar A.R. & P. Riyazuddin, (2008). "Determination of arsenic (III) and total inorganic arsenic in water samples using variable tetrahydroborate (III) and acid concentrations by continuous-flow hydride-generation atomic absorption spectrometry, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, Pag. 88, 255-266".

Kumar-Mandal, B., Suzuki, T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*. Vol. 58, pág. 201-235.

Maldonado Farfan, A. (2006). Capacidad de adsorción de soluciones acuosas, por la biomasa residual de yuca en procesos continuos y discontinuos. Tesis para optar doctorado en ciencias ambientales.

Marta I. L. & María E. M. (2010). "Posible Tratamiento para la eliminación de arsénico en aguas de América Latina para el consumo humano. *La contaminación ambiental*, Pág. 158, 1105-1118".

Martin Lara, A. (2008). Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. Tesis para grado de doctorado. Universidad Granada. Colombia.

Martins, R. J. E.; Pardo, R. and Boaventura (2004). Cadmium (II) and Zinc (II) adsorption by the aquatic moss *Fontinalis antipyretic*: effect of temperature, pH and water hardness. *Water Research*. 38 (3): 693-699.

Manning B.A. & Suárez, D. L. (2000). "Modelado de arsénico (III) de adsorción y cinética de oxidación en suelos heterogéneos. *Soil Science Society of America Journal*, Pág. 128-137".

Manning B. A. & Goldberg S. (1997). "La adsorción y la estabilidad de arsénico (III) en la interfaz de arcilla mineral - agua. *Reinar Technol*. Pág. 31, 2005-2011".

Miller A. (1997) "Strip Plot Configurations of Fractional Factorials" Technometrics. Vol. 39, No. 2.

Ministerio del ambiente. (2008). D.S. N°002-2008-MINAM – Aprueban estándares nacionales de calidad ambiental para el agua. Lima. Perú.

Montgomery D. C. (2004) "Diseño y Análisis de experimentos. Editorial Limusa S.A: México. Ed. 2da.

Juveña, J. & Alos, R. (2005). Monitorización potenciómetro de la biosorción del ion cobre (II) en raspo de uva. Proyecto final de carrera. Barcelona. España.

OMS, Criterios de Salud (2001). "Environmental 224: Los compuestos de arsénico 2ª edición. Organización Mundial de la Salud, Ginebra".

Palacios C. S. (2004). "Diseño experimental: aplicado a ciencias y tecnología. Edición CONCYTEC. Lima - Perú".

Pierce M. L. & Moore C. B. (1982). "La adsorción de arsenito y arseniato de hidróxido de hierro amorfo en Agua Residuales, Pág. 16, 1247-1253".

Ramírez, Y. (2010). Arcilla Medicinal.

http://www.aquaspamagazine.com/articulo_item.php?numero=42

Raven K.P., Jain A. y Loeppert R. H. (1998). "El arsenito y arseniato de adsorción en ferrihydrate: cinética, equilibrio y sobrecargas de adsorción. Environmental Ciencia y Tecnología, Pág. 32, 344-349".

Rodenas, P. (2008). Propiedades de la Arcilla.

http://boliviarural.org/index.php?option=com_zoo&task=item_id=281&Itemid=51

Selatnia, A.; Boukazoula, A.; Kechid N. and Chergui, A. (2004). Biosorption of Fe³⁺ from aqueous solution by a bacterial dead Streptomyces rimosus biomass. Process biochemistry 39: 1643 – 1651.

Smedley P. y Kinniburgh J., (2002). "Arsénico en el agua y problemas en el ambiente" Pag. 45, 55".

Smedley, P. I. y Kinninbeurg, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. Vol. 17 pp 517-568.

Smith, J.M. (1991). *Ingeniería de la cinética química*. Editorial Continental S.A. Sexta impresión, México.

Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. Editorial Mc Graw-Hill, 2da. Edición. México

Velásquez Zuñiga Y. (2014). "Bioadsorción del ion Cobre II en solución acuosa utilizando la vaina de arveja (*Pisum sativum*)".

Villaescusa, I.; Fiol, N.; Martinez, M.; Miralles, N.; Poch, J. and Serarols, J. (2004). Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes water research. 38:992-1002.

Vinod, V. and Anirudhan, T. (2001). Sorption of tannic acid zirconium pillared clay. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77: 92-101.

Volesky, B. (2003). Biosorption proces simulation tools. *Hydrometallurgy*.71: 1-2

Volesky, B. and Holan, Z.R. (1995). Biosorption of heavy metals. *Biotechnology progress*. 11 (3): 253-250.

Weber, W. and Morris, J. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 89: 31-60.

Welch A. H., Westjohn D. B., Helsel D. R., Wanty R. B. (2000). "Arsénico en el agua subterránea de los Estados Unidos: ocurrencia y geoquímica. *Agua Subterránea*, Pág. 38, 589, 604".

Yannick M., Charlotte H., Nicolas M. (2011). “Arsenico (V) la adsorción de la solución acuosa sobre geotita, hematita, magnetita y cero – Valente hierro. Desalinización, Pág. 93-99, 281”.

Yoon Y.C., Seung M.L., Jae K.Y. (2009). “La eliminación de As (III) y As (V) por óxidos metálicos naturales y sintéticas. Coloides y superficies A: físico-química y la ingeniería de aspecto, Pág. 346, 202- 207”.

ANEXOS

ANEXO A

CUADRO 01:LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS DE CALIDAD
ORGANOLÉPTICA

PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	L.M.P
Olor	----	Aceptable
Sabor	----	Aceptable
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
Conductividad (25°C)	µm/cm	1500
Sólidos totales disueltos	mg/L	1000
Cloruros	mg/L	250
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁼	250
Dureza total	mg/L CaCO ₃	500
Amoniaco	mg/L N	1,5
Hierro	mg/L Fe	0,3
Manganeso	mg/L Mn	0,4
Aluminio	mg/L Al	0,2
Cobre	mg/L Cu	2,0
Zinc	mg/L Zn	3,0
Sodio	mg/L Na	200

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental Ministerio de Salud, DS N° 031-2010-SA.Reglamento de la calidad del agua para consumo humano 2010.

UCV = Unidad de color verdadero, **UNT** = Unidad nefelométrica de turbiedad

CUADRO 02:**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS QUÍMICOS
INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS**

Parámetro Inorgánicos	Unidad de medida	L.M.P
Antimonio	mg/L Sb	0.020
Arsénico	mg/L As	0.010
Bario	mg/L Ba	0.700
Boro	mg/L B	1.500
Cadmio	mg/L Cd	0.003
Cianuro	mg/L CN	0.070
Cloro	mg/L	5.0
Clorito	mg/L	0.7
Clorato	mg/L	0.7
Cromo total	mg/L Cr	0.050
Flúor	mg/L F ⁻	1.00
Mercurio	mg/L Hg	0.001
Níquel	mg/L Ni	0.020
Nitratos	mg/L NO ₃	50.00
Nitritos	mg/L NO ₂	0.20
Plomo	mg/L Pb	0.010
Selenio	mg/L Se	0.010
Molibdeno	mg/L Mo	0.07
Uranio	mg/L U	0.015

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental Ministerio de Salud, DS N° 031-2010-SA.Reglamento de estándares de calidad del agua para consumo humano 2010.

CUADRO 03:**NIVELES DE PARAMETROS DE pH**

pH	CLASIFICACIÓN
4.5	Muy fuerte acido
4.6-5.2	Fuertemente acido
5.3-5.9	Moderadamente acido
6.0-6.5	Débilmente acido
6.6-7.0	Neutro
7.1-7.5	Débilmente alcalino
7.6-8.0	Moderadamente alcalino
8.1-9.0	Fuertemente alcalino
9.0	Muy fuertemente alcalino

Fuente: Serruto (1987)

CUADRO 04:

NORMAS DE CALIDAD DE LAS AGUAS DESTINADAS A USOS AGROPECUARIOS

Características	Concentración Máxima Permissible
Residuos flotantes	Ninguno
Radioactividad alfa global	3.0 PCi/L
Radioactividad beta global	30.0 PCi/L
Aluminio	1.0 mg/L
Arsénico	0.05 mg/L
Berilio	0.5 mg/L
Cadmio	0.005 mg/L
Cromo hexavalente	0.05 mg/L
Cobre	0.20 mg/L
Litio	5.0 mg/L
Manganeso	2.0 mg/L
Mercurio	0.001 mg/L
Molibdeno	0.005 mg/L
Níquel	0.50 mg/L
Plomo	0.05 mg/L
Selenio	0.01 mg/L
Vanadio	10.0 mg/L
Zinc	5.0 mg/L

Fuente: Reglamento parcial N° 4 de la ley orgánica del ambiente 1978.
Organización panamericana de la salud – Lima 2006

CUADRO 05.

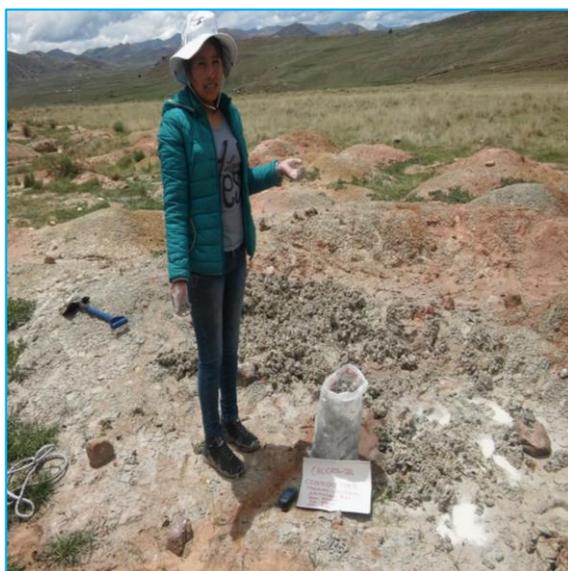
Criterios referenciales de calidad para aguas subterráneas, considerando un suelo con contenido de arcilla entre (0-25,0) % y de materia orgánica entre (0 - 10) %.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo Permissible
Arsénico (total)	As	mg/l	0.035
Bario	Ba	mg/l	0.338
Cadmio	Cd	mg/l	0.32
Cianuro (total)	CN-	mg/l	7.53
Cobre	Cu	mg/l	0.045
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,00018
Níquel	Ni	mg/l	0.045
Plomo	Pb	mg/l	0.045
Zinc	Zn	mg/l	0.433

Fuente: Reglamento de estándares de calidad del agua para consumo humano 2010.

ANEXO B

IMÁGENES DE LOS TRATAMIENTOS APLICADOS A LA ARCILLA CHACKO (*Hidralgirita*)



Extracción



Selección



Secado



Molienda



Tamizado



N° Malla 60

ANEXO C

IMÁGENES DEL SITIO DE MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA



Agua subterránea (pozo)



Agua muestreada

ANEXO D

IMÁGENES DEL PROCESO DE ADSORCION/PRECIPITACION DEL ION ARSENICO CON LA ARCILLA CHAKO (*Hidralgirita*).



Peso del adsorbente (g)



Volumen de H₂O en (mL).



Regulación a diferentes pH.



Contacto de Agua con arcilla chacko



Agitación



Muestras en Agitación a diferentes pesos.



Filtración de las muestras de diferentes pesos



Agitación a diferentes pH.

Filtración de muestras a diferentes pH.



Muestras en agitación a diferentes tiempos



Filtración de muestras a diferentes tiempos.



Envasado de las muestras para su envío al laboratorio SEDA JULIACA

ANEXO E

CERTIFICADOS DEL ANALISIS DE ARCILLA CHAKO (*Hidralgirita*).



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



INFORME TECNICO N° 0307 – 17 – LAB. 12

1. **DATOS DEL SOLICITANTE**
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
 - 1.2 DNI : 70399860
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
 - 2.1 FECHA DE RECEPCIÓN : 27/ 03/ 2017
 - 2.2 FECHA DE ENSAYO : 30/ 03/ 2017
 - 2.3 FECHA DE EMISIÓN : 31/ 03/ 2017
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA
4. **DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA**
 - 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE CHAKO
 - 4.2 CODIFICACIÓN : M1
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN** : LABORATORIO N° 12 – FACULTAD DE CIENCIAS
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 28.0 °C; Humedad relativa 73%
7. **EQUIPO UTILIZADO** : espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X. SHIMADZU, EDX 800-HS
8. **RESULTADOS**
 - 8.1 **COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADA COMO ÓXIDOS**

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Trióxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	37.833	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	46.451	
Trióxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.877	
Óxido de Potasio (K ₂ O)	1.659	
Óxido de Magnesio (MgO)	4.871	
Óxido de Calcio (CaO)	4.152	
Óxido de Estroncio (SrO)	0.091	
Trióxido de Azufre (SO ₃)	1.945	
Óxido de Bario (BaO)	0.615	
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.948	
Óxido de Cobre (CuO)	0.414	
Óxido de Zinc (ZnO)	0.054	

*El porcentaje de error del equipo es de ±0.02



Lidia Rut Tapia Callata

8.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADA COMO ELEMENTOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADO (%)	MÉTODO UTILIZADO
Silicio (Si)	54.176	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
Aluminio (Al)	24.916	
Hierro (Fe)	1.422	
Potasio (K)	0.877	
Magnesio (Mg)	2.811	
Calcio (Ca)	7.444	
Estroncio (Sr)	0.338	
Azufre (S)	2.681	
Bario (Ba)	1.549	
Sodio (Na)	3.176	
Cobre (Cu)	0.548	
Zinc (Zn)	0.062	

*El porcentaje de error del equipo es de ± 0.02

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.

Quim. Julio R. Barrios
Analista Químico
LABICER - UNI



Otilia Acha de la Cruz
Responsable del análisis
Jefe de Laboratorio
CQP 202

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

ANEXO F

CERTIFICADOS DEL PROCESO DE ADSORCION/PRECIPITACION DEL ION ARSENICO CON LA ARCILLA CHAKO (Hidralgirita).



DIVISION DE PROMOCION, CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE
AREA DE CONTROL DE CALIDAD

Nº 012 - 17

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
RECIBO : 002-00132393
Nº de Solicitud : 00355851

LOCALIZACION Y/O PUNTO DE MUESTREO : Región : Puno
Provincia : Huancane
Distrito : Taraco

TIPO DE AGUA : Agua Subterránea (03 metros de profundidad)

FECHA DE MUESTREO : 06/06/2017
HORAS DE MUESTREO : 11:00 a.m
MUESTREO POR : Interesado
FECHAS DE ANALISIS : 06/06/2017

2. CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS

PARAMETROS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031-2010 SA.	VALORES OBTENIDOS
Turbidez	NTU	5	2.58
Potencial de Hidrógeno	pH	6,5 - 8,5	7.872
Conductividad Eléctrica	uS/cm	1500	1441
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	1000	695
Temperatura	° C	-	11.5
Arsenico	mg/l	0.01	0.050

Julaca, Junio 2017



E.P.S. SEDAJULIACA S.A.

Bigo. Wilber R. Ordoñez Pico
C.B.P. 8709
Analista de Laboratorio

OFICINA PRINCIPAL: Av. San Martín Nº 2011-Telefax: 051-321933 / 051-327400
OFICINA COMERCIAL: Jr. Tumbes Nº 628-Tel.: 051-321288
EMERGENCIAS Y RECLAMOS: 051-328568 ATENCIÓN AL CLIENTE: 051-321402
<http://www.sedajuliaca.com>



DIVISION DE PRODUCCION, CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE
AREA DE CONTROL DE CALIDAD

N° 020 - 17

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
 RECIBO : 002-00133768
 N° de Solicitud : 00358879

LOCALIZACION Y/O PUNTO DE MUESTREO : Región : Puno
 Provincia : Huancané
 Distrito : Taraco
 Lugar : Taraco

TIPO DE AGUA : Agua Subterránea (03 metros de profundidad)

FECHA DE MUESTREO : 12/07/2017
 HORAS DE MUESTREO : 08:00 a.m
 MUESTREADO POR : Interesado
 FECHAS DE ANALISIS : 12/07/2017

2. CARACTERISTICAS QUIMICAS ARSENICO

N° DE MUESTRAS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031-2010 SA.	VALORES OBTENIDOS (mg/l)
Muestra N° 01 W de Chacko 0.2 gr pH= 7.50	mg/l	0.01	0.008
Muestra N° 03 W de Chacko 0.2 gr pH= 8.05	mg/l	0.01	0.01
Muestra N° 05 W de Chacko 0.2 gr pH= 9.05	mg/l	0.01	0.02
Muestra N° 06 W de Chacko 0.2 gr pH= 9.50	mg/l	0.01	0.03
Muestra N° 08 W de Chacko 0.2 gr pH= 10.14	mg/l	0.01	0.04

Juliaca, Julio 2017



E.P.S. SEDAJULIACA S.A.
Ing. Rodolfo Incacari Sancho
 C.P. N° 90354
 (e) EN CONTROL DE CALIDAD

OFICINA PRINCIPAL: Av. San Martín N° 2011-Telefax: 051-321933 / 051-327400
 OFICINA COMERCIAL: Jr. Tumbes N° 628-Telf.: 051-321288
 EMERGENCIAS Y RECLAMOS: 051-328568 ATENCIÓN AL CLIENTE: 051-321402
<http://www.sedajuliaca.com>



DIVISION DE PRODUCCION, CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE
AREA DE CONTROL DE CALIDAD

N° 015 - 17

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
 RECIBO : 002-00133295
 N° de Solicitud : 00358016

LOCALIZACION Y/O PUNTO DE MUESTREO : Región : Puno
 Provincia : Huancané
 Distrito : Taraco
 Lugar : Taraco

TIPO DE AGUA : Agua Subterránea (03 metros de profundidad)

FECHA DE MUESTREO : 04/07/2017
 HORAS DE MUESTREO : 08:00 a.m
 MUESTREADO POR : Interesado
 FECHAS DE ANALISIS : 04/07/2017

2. CARACTERISTICAS QUIMICAS ARSENICO

N° DE MUESTRAS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031-2010 SA.	VALORES OBTENIDOS (mg/l)
Muestra N° 01 W de Chacko 0.1 gr a 60 min	mg/l	0.01	0.015
Muestra N° 02 W de Chacko 0.2 gr a 60 min	mg/l	0.01	0.010

Juliaca, Julio 2017



E.P.S. SEDAJULIACA S.A.
 Ing. Rodolfo Incañari Sancho
 CIP. N° 90534
 (e) EN CONTROL DE CALIDAD

OFICINA PRINCIPAL: Av. San Martín N° 2011-Telefax: 051-321933 / 051-327400
 OFICINA COMERCIAL: Jr. Tumbes N° 628-Telf.: 051-321288
 EMERGENCIAS Y RECLAMOS: 051-328568 ATENCIÓN AL CLIENTE: 051-321402
<http://www.sedajuliaca.com>



DIVISION DE PRODUCCION, CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE
AREA DE CONTROL DE CALIDAD

N° 013 - 17

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
 RECIBO : 002-00133295
 N° de Solicitud : 00358016

LOCALIZACION Y/O PUNTO DE MUESTREO : Región : Puno
 Provincia : Huancané
 Distrito : Taraco
 Lugar : Taraco

TIPO DE AGUA : Agua Subterránea (03 metros de profundidad)

FECHA DE MUESTREO : 26/05/2017
 HORAS DE MUESTREO : 08:00 a.m
 MUESTREADO POR : Interesado
 FECHAS DE ANALISIS : 26/05/2017

2. CARACTERISTICAS QUIMICAS ARSENICO

N° DE MUESTRAS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031-2010 SA.	VALORES OBTENIDOS (mg/l)
Muestra N° 01 W de Chacko 0.5 gr	mg/l	0.01	0.010
Muestra N° 02 W de Chacko 1 gr	mg/l	0.01	0.015
Muestra N° 03 W de Chacko 2 gr	mg/l	0.01	0.020
Muestra N° 05 W de Chacko 5 gr	mg/l	0.01	0.025
Muestra N° 06 W de Chacko 7 gr	mg/l	0.01	0.030
Muestra N° 08 W de Chacko 10 gr	mg/l	0.01	0.040

Juliaca, Junio 2017



E.P.S. SEDAJULIACA S.A.
 Bto. Wilber H. Cornejo Pilco
 C.B.P. 9709
 Analista de Laboratorio

OFICINA PRINCIPAL: Av. San Martín N° 2011 - Telefax: 051-321933 / 051-327400
 OFICINA COMERCIAL: Jr. Tumbes N° 828 - Telf.: 051-321288
 EMERGENCIAS Y RECLAMOS: 051-328568 ATENCIÓN AL CLIENTE: 051-321402
<http://www.sedajuliaca.com>



DIVISION DE PRODUCCION, CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE
AREA DE CONTROL DE CALIDAD

N° 014 - 17

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE : LIDIA RUT TAPIA CALLATA
 RECIBO : 002-00133295
 N° de Solicitud : 00358016

LOCALIZACION Y/O PUNTO DE MUESTREO : Región : Puno
 Provincia : Huancané
 Distrito : Taraco
 Lugar : Taraco

TIPO DE AGUA : Agua Subterránea (03 metros de profundidad)

FECHA DE MUESTREO : 04/07/2017
 HORAS DE MUESTREO : 08:00 a.m.
 MUESTREADO POR : Interesado
 FECHAS DE ANALISIS : 04/07/2017

2. CARACTERISTICAS QUIMICAS ARSENICO

N° DE MUESTRAS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031-2010 SA.	VALORES OBTENIDOS (mg/l)
Muestra N° 02 W de Chacko 0.2 gr a 20 min	mg/l	0.01	0.020
Muestra N° 03 W de Chacko 0.2 gr a 30 min	mg/l	0.01	0.015
Muestra N° 04 W de Chacko 0.2 gr a 50 min	mg/l	0.01	0.015
Muestra N° 05 W de Chacko 0.2 gr a 70 min	mg/l	0.01	0.010
Muestra N° 06 W de Chacko 0.2 gr a 90 min	mg/l	0.01	0.008

Juliacca, Julio 2017



E.P.S. SEDAJULIACA S.A.
 Ing. Rodolfo Incacari Sancho
 CIP N° 90554
 (e) EN CONTROL DE CALIDAD

OFICINA PRINCIPAL: Av. San Martín N° 2011-Telefax: 051-321933 / 051-327400
 OFICINA COMERCIAL: Jr. Tumbes N° 628-Telf.: 051-321288
 EMERGENCIAS Y RECLAMOS: 051-328568 ATENCIÓN AL CLIENTE: 051-321402
<http://www.sedajuliaca.com>