



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



**INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN  
DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL  
DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Bach. FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

**JULIACA – PERÚ**

**2025**



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**

**INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN  
DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL  
DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Bach. FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR:**

**PRESIDENTE**

:

Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR

**PRIMER MIEMBRO**

:

Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

**SEGUNDO MIEMBRO**

:

M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

**ASESOR DE TESIS**

:

Dr. MILTHON QUISPE HUANCA

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN :**

**SANEAMIENTO AMBIENTAL – P22**



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 267-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 07 de mayo del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025- CU-1600 presentado por el (la) Bachiller: **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI** estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

**CONSIDERANDO:**

Que, el (la) Bach. **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**, la misma que pertenece a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL** para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- \* **Presidente** : Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR
- \* **1er Miembro** : Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA
- \* **2do Miembro** : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

**ARTICULO SEGUNDO.** – **RECONOCER** como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Dr. MILTHON QUISPE HUANCA**.

**ARTICULO TERCERO.** – **APROBAR**, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de el (la) bachiller: **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**; del informe final de la investigación (tesis) titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO** para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental. de acuerdo al siguiente detalle:

- \* **FECHA** : Miércoles 14 de mayo del 2025
- \* **HORA** : 08:00 horas
- \* **LUGAR** : Aula 306 - Pabellón de Hidraulica

**ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA  
DECANO (e)  
CIP: 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo  
interesado (a)



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1938-2024-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 31 de diciembre del 2024

**VISTO:** El expediente N° 2024-CU - 17579 por el señor (a): **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 1585 - 2024-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 142-2024 del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Franz Joseph Barahona Perales** de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 142-2024 **aprobandó** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**, Correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en mérito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**, en virtud a los considerandos expuestos.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), **Dr. MILTHON QUISPE HUANCA**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. MILTHON QUISPE HUANCA  
DECANO  
CIP. 47790



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
DIRECTOR  
Dr. Efraim R. Ilo Sosa  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo  
interesado (a)



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1248-2024-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 09 de octubre del 2024

**VISTO:** El expediente N° 2024-CU- 13303, presentado el señor (a) **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el **PROVEIDO - N° 1114-2024-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 130-2024 del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI** ha presentado su propuesta de investigación Titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Franz Joseph Barahona Perales** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 130-2024- aprobando la propuesta de investigación titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**, con el Tema Titulado: **INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **Dr. MILTHON QUISPE HUANCA**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS  
MILTHON QUISPE HUANCA  
DECANO  
CIP. 47790



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS  
DIRECTOR  
Dr. Efraín Castillo Sosa  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo 2024  
Interesado (a)



## INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO

### INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

11%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS


1	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	8%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://repositorio.uancv.edu.pe">repositorio.uancv.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%
6	Keddy-Hector, Isabel. "Water-Borne Arsenic in Mining Communities: Policy Implications and Environmental Monitoring in Zacatecas, Mexico", The University of Texas at Austin Publicación	<1%
7	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a>	



### Metadatos Complementarios

<b>Título de la tesis</b>	
<b>INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO</b>	
<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70408152
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0009-0007-6613-9274">https://orcid.org/0009-0007-6613-9274</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	MILTHON QUISPE HUANCA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02424528
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9473-6910">https://orcid.org/0000-0002-9473-6910</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02441152
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	FRITZ WILLY MAMANI APAZA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02306659
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01323821



<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	Saneamiento ambiental – P22
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	<p>País: Perú Departamento: Puno Provincia: Azángaro Distrito: Muñani Latitud: -14.7672231 Longitud: -69.9549077</p>  <p><a href="https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1N0-xs50s2vRP66z-xrKO4RCjQCeRYxc&amp;ll=-14.76711305447871%2C-69.9527881&amp;z=18">https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1N0-xs50s2vRP66z-xrKO4RCjQCeRYxc&amp;ll=-14.76711305447871%2C-69.9527881&amp;z=18</a></p>
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Octubre 2024 – Diciembre 2024
URL de disciplinas OCDE <a href="https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html">https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html</a> - Librería	<b>Ingeniería ambiental</b> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00</a> <b>ingeniería de energía</b> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03</a>

  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
OFICINA DE INVESTIGACIÓN  
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



**DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD**

Yo FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI, identificado con DNI Nro. 70408152 en mi condición de egresado de:

- Escuela Profesional**
- Programa de Segunda Especialidad,**
- Programa de Maestría o Doctorado**

INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL

informo que he elaborado el/la  **Tesis** o  **Trabajo de Investigación,**  **Trabajo Académico** denominada:

" INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO "

ASESORADO POR: MILTHON QUISPE HUANCA

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 08 de Julio del 2025

Firma Del Asesor  
(obligatoria)

Firma Del Estudiante  
(obligatoria)



HUELLA



## DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a todos mis familiares que siempre me apoyaron en todo momento y a mi querida pareja que siempre estuvo a mi lado apoyándome y a la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez por la enseñanza durante estos años como estudiante.



## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios a mi papa y mi querida madre por estos años que me apoyaron durante todo el transcurso de la elaboración de esta tesis

Agradezco a la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez por brindarme todas las enseñanzas y el desarrollo profesional.



**INDICE DE CONTENIDO**

DEDICATORIA..... i

AGRADECIMIENTO..... ii

INDICE DE CONTENIDO..... iii

ÍNDICE DE TABLAS ..... vii

ÍNDICE DE FIGURAS ..... viii

RESUMEN ..... ix

ABSTRACT ..... x

INTRODUCCIÓN ..... xi

**CAPITULO I**

**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

1.1. Análisis de la situación problemática ..... 1

1.2. Planteamiento del problema ..... 1

    1.2.1. Problema general ..... 1

    1.2.2. Problemas específicos ..... 1

1.3. Objetivo de la investigación ..... 1

    1.3.1. Objetivo general ..... 1

    1.3.2. Objetivos específicos ..... 2

1.4. Justificación ..... 2

1.5. Hipótesis ..... 3

    1.5.1. Hipótesis general..... 3

    1.5.2. Hipótesis específica..... 3



- 1.6. Variables .....3
  - 1.6.1. Variable dependiente.....3
  - 1.6.2. Variable independiente .....4
- 1.7. Operacionalización de variables .....4

**CAPITULO II**

**MARCO TEÓRICO**

- 2.1. Antecedentes de la investigación.....5
  - 2.1.1. Antecedentes internacionales .....5
  - 2.1.2. Antecedentes nacionales .....6
  - 2.1.3. Antecedentes regionales .....9
- 2.2. Marco teórico ..... 11
  - 2.2.1. Aguas subterráneas ..... 11
  - 2.2.2. Contaminación de agua por metales ..... 12
  - 2.2.3. El agua potable y el arsénico ..... 13
  - 2.2.4. Arsénico en el agua..... 15
  - 2.2.5. Arsénico en el ambiente ..... 18
  - 2.2.6. Toxicidad del arsénico .....21
  - 2.2.7. Coagulación y floculación.....23
  - 2.2.8. Mecanismos de coagulación y floculación .....24
  - 2.2.9. Cloruro férrico.....26
  - 2.2.10. Remoción de arsénico en el agua.....29
  - 2.2.11. Enfermedades relacionadas a la contaminación del agua .....30



- 2.2.12. Afecciones microbiológicas transmitidas por el agua .....30
- 2.2.13. Afecciones químicas derivadas del agua: se refieren a enfermedades .....31
- 2.2.14. Pozos .....31
- 2.2.15. Prueba de jarras .....32
- 2.3. Marco conceptual.....34
  - 2.3.1. Dosis adecuada.....34
  - 2.3.2. Adsorción .....34
  - 2.3.3. Espectrofotometría .....34
  - 2.3.4. Prueba de jarras.....35
  - 2.3.5. Límites máximos permisibles .....35

**CAPITULO III**

**METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

- 3.1. Tipo de investigación .....36
- 3.2. Nivel de investigación .....36
- 3.3. Enfoque de la investigación .....37
- 3.4. Técnicas e instrumentos .....37
  - 3.4.1. Técnicas .....37
  - 3.4.2. Instrumentos.....37
  - 3.4.3. Ubicación de la zona de investigación .....37
  - 3.4.4. Población y muestra .....38
    - 3.4.4.1. Población.....38
    - 3.4.4.2. Muestra.....38



3.4.5. Materiales y equipos .....39

    3.4.5.1. Materiales .....39

    3.4.5.2. Equipos.....39

    3.4.5.3. Reactivos.....39

3.4.6. Procedimiento metodológico .....39

**CAPITULO IV**

**RESULTADOS Y DISCUSION**

4.1. Resultados .....50

4.2. Discusiones.....58

CONCLUSIONES.....60

RECOMENDACIONES .....62

BIBLIOGRAFIA .....63

ANEXOS .....66



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	4
<b>Tabla 2</b> Métodos normalizados para el análisis a aguas potables y residuales ....	41
<b>Tabla 3</b> Dosis de cloruro ferrico .....	44
<b>Tabla 4</b> Condiciones de tratamiento .....	45
<b>Tabla 5</b> Resultados iniciales .....	50
<b>Tabla 6</b> Resultados del primer tratamiento .....	52
<b>Tabla 7</b> Resultados del primer replica.....	54
<b>Tabla 8</b> Promedio de resultados .....	56
<b>Tabla 9</b> Porcentaje de remoción de arsénico.....	56



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación del arsénico en la tabla periodica .....	17
<b>Figura 2</b> Características alotrópicas del arsénico y sus variantes: gris, amarillo y negro .....	18
<b>Figura 3</b> Esquematización del siglo del arsénico en el medio ambiente.....	19
<b>Figura 4</b> Secuencia del proceso de agitación y sedimentación en la prueba de jarras ...	33
<b>Figura 5</b> Ubicación de la zona de monitoreo .....	38
<b>Figura 6</b> Toma de muestra de agua subterránea .....	40
<b>Figura 7</b> Análisis de arsénico.....	42
<b>Figura 8</b> Preparación del coagulante cloruro férrico al 5% .....	43
<b>Figura 9</b> Aplicación de coagulante a la muestra de agua .....	43
<b>Figura 10</b> Aplicación de cloruro férrico .....	44
<b>Figura 11</b> Agitación de la muestra .....	45
<b>Figura 12</b> Sedimentacion de la muestra .....	46
<b>Figura 13</b> Análisis de arsénico de muestras tratadas .....	47
<b>Figura 14</b> Resultados de rsénico frente a la normativa vigente .....	51
<b>Figura 15</b> Resultados del tratamiento frente a la muestra inicial .....	53
<b>Figura 16</b> Resultados de la réplica del tratamiento frente a la muestra inicial .....	55
<b>Figura 17</b> Porcentaje de remoción.....	57



## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia del cloruro férrico en la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno. La problemática radica en la presencia de niveles elevados de arsénico en las aguas subterráneas, superando los límites establecidos por la OMS, lo que representa un riesgo para la salud pública. La metodología consistió en aplicar cloruro férrico al 5% en diferentes dosis (20 ml/L, 25 ml/L, 30 ml/L, 35 ml/L y 40 ml/L) a muestras de agua subterránea. Las muestras fueron tratadas y luego analizadas para medir la concentración de arsénico. Se utilizó un diseño experimental con réplicas para asegurar la validez de los resultados. El porcentaje de remoción de arsénico se calculó mediante la comparación entre la concentración inicial y la concentración final post-tratamiento. Los resultados mostraron que la dosis de 30 ml/L de cloruro férrico fue la más efectiva, con una reducción del 84% en los niveles de arsénico. Las dosis más altas (35 ml/L y 40 ml/L) también mostraron buenas reducciones, pero sin mejoras significativas sobre la dosis de 30 ml/L. Las concentraciones finales de arsénico fueron menores a los límites permitidos por la OMS. En conclusión, el tratamiento con cloruro férrico es eficaz para la remoción de arsénico en aguas subterráneas, y la dosis óptima para este tratamiento es 30 ml/L, lo que proporciona una solución viable y eficiente para reducir la contaminación por arsénico en la región.

**Palabras claves:** Aguas subterráneas, arsénico, cloruro férrico, calidad de agua



## ABSTRACT

The objective of this research was to assess the influence of ferric chloride on the reduction of arsenic in groundwater from the Muñani district, Puno region. The problem lies in the presence of high levels of arsenic in the groundwater, exceeding the limits established by the WHO, posing a public health risk. The methodology involved applying 5% ferric chloride at different doses (20 ml/L, 25 ml/L, 30 ml/L, 35 ml/L, and 40 ml/L) to groundwater samples. The samples were treated and then analyzed to measure arsenic concentration. An experimental design with replicas was used to ensure the validity of the results. The percentage of arsenic removal was calculated by comparing the initial concentration with the final concentration after treatment. The results showed that the 30 ml/L dose of ferric chloride was the most effective, with an 84% reduction in arsenic levels. Higher doses (35 ml/L and 40 ml/L) also showed good reductions, but without significant improvements over the 30 ml/L dose. The final arsenic concentrations were below the limits set by the WHO. In conclusion, treatment with ferric chloride is effective for removing arsenic from groundwater, and the optimal dose for this treatment is 30 ml/L, providing a viable and efficient solution for reducing arsenic contamination in the region.

**Keywords:** Groundwater, arsenic, ferric chloride, water quality.



## INTRODUCCIÓN

En la jurisdicción de Muñani, con una población censada de 7,665 habitantes, la actividad económica preponderante es la explotación pecuaria extensiva. La comunidad depende fundamentalmente de acuíferos freáticos como fuente de abastecimiento hídrico, consumiéndola en estado crudo sin someterla a procesos de potabilización o desinfección. La contaminación geogénica por arsénico (As) constituye un problema de alcance global, provocando toxicidad aguda y crónica en la biota acuática y actuando como un agente carcinogénico de categoría 1. La fuente primordial de agua dulce para el consumo humana procede de las aguas subterráneas.

La contaminación hidroarsenica representa una amenaza multifactorial para la salubridad poblacional y los ecosistemas acuáticos a escala global (Huang et al., 2014). La presencia de As en matrices hídricas ( $H_2O$ ) genera riesgos toxicológicos críticos, debido a su bioacumulación y persistencia ambiental. Estudios hidro geoquímicos confirman la diseminación de este metal pesado en regiones peruanas como Arequipa, Tacna, Puno y Tarma, donde se registran concentraciones promedio de 0.0566 mg/L, superando en 466% el límite máximo permisible (LMP) de 0.01 mg/L establecido por el D.S. N°031-2010-SA para agua de consumo humano.

En el territorio peruano se han realizado investigaciones hidro geoquímicas para cuantificar las concentraciones de arsénico (As) en sistemas hídricos subterráneos (acuíferos) y cuerpos lénticos/lóticos, detectando valores que sobrepasan significativamente los parámetros establecidos en la normativa vigente (Infante Fernández & Sosa Palomino, 1994).

La matriz hídrica subterránea constituye, paradójicamente, tanto el recurso vital indispensable como el vector potencial de exposición a xenobióticos



arsenicales para esta comunidad altoandina, creando un dilema de sostenibilidad hidro ambiental que requiere intervención tecnocientífica urgente.

En la zona altoandina del Perú, se han implementado programas sistemáticos de monitoreo hidro geoquímico orientados a la cuantificación y caracterización espacio-temporal de las concentraciones arsenicales en matrices hídricas tanto freáticas como epigeas, cuyos hallazgos analíticos han puesto de manifiesto un fenómeno de biogeoacumulación que transgrede significativamente los parámetros umbrales estipulados en los instrumentos normativos vigentes, configurando un escenario de contaminación edafogeológica donde los valores de especiación química del metaloide exhiben patrones de dispersión y movilidad a través de los estratos acuíferos, propiciando sinergias adversas con otros xenobióticos y comprometiendo la integridad ecosistémica mediante procesos de biomagnificación trófica, además de representar un vector de exposición crónica para poblaciones vulnerables cuyo abastecimiento hídrico depende de estas fuentes contaminadas, contraviniendo así los parámetros de calidad ambiental establecidos en el marco regulatorio peruano sobre gestión integrada de recursos hídricos.

El presente trabajo de investigación está contenido por los siguientes capítulos: I. Introducción; II Capítulo, que aborda todos los aspectos referentes a la problemática, formulación del problema, objetivos de Investigación y justificación de la investigación. En el Marco Teórico, se presentan los antecedentes, bases teóricas, y variables. Por su parte, la metodología hace mención al, diseño de investigación, método aplicado. Finalmente, hace mención a los resultados y discusión. III, Conclusiones y recomendaciones, además de las referencias bibliográficas y los anexo



## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Análisis de la situación problemática

#### 1.2. Planteamiento del problema

##### 1.2.1. *Problema general*

¿Cómo impacta el cloruro férrico en la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno?

##### 1.2.2. *Problemas específicos*

- ¿Cuáles son los niveles actuales de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani y cómo varían en distintas localidades dentro de la región?
- ¿Cuál es la dosis óptima de cloruro férrico para lograr una reducción efectiva del arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani?
- ¿Qué porcentaje de arsénico se puede remover de las aguas subterráneas del distrito de Muñani después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico en las dosis establecidas?

#### 1.3. Objetivo de la investigación

##### 1.3.1. *Objetivo general*

Evaluar el impacto del cloruro férrico en la reducción del arsénico en aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno.



### 1.3.2. *Objetivos específicos*

- Analizar la concentración de arsénico presente en las aguas subterráneas del distrito de Muñani.
- Establecer la dosis óptima de cloruro férrico para reducir los niveles de arsénico en dichas aguas.
- Cuantificar el porcentaje de remoción de arsénico después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico.

### 1.4. **Justificación**

A nivel nacional, debido a la escasez de agua potable, los residentes recurren a otras fuentes, como las aguas subterráneas (pozos), como alternativa para el consumo y uso en sus hogares.

Este estudio se realiza con el objetivo de presentar nuevos métodos alternativos que contribuyan a resolver las problemáticas relacionadas con el uso de aguas acuíferas para ingesta humana.

Los datos que se obtendrán en este proyecto podrán ser analizadas y efectuadas por las autoridades competentes, lo cual mejorará la calidad de agua y por consiguiente la calidad sanitaria del líquido elemento para la población. Este proyecto también es importante porque se usa un residuo, como el cloruro férrico que se encuentra en todo lugar, el cual es un insumo económico. circular mediante la valorización de subproductos industriales, específicamente el cloruro férrico como coagulante hidrosoluble, cuya abundancia y disponibilidad regional lo posiciona como insumo tecno eficiente con significativa viabilidad económica para procesos de depuración acuífera a escala comunitaria.



## 1.5. Hipótesis

### 1.5.1. *Hipótesis general*

El cloruro férrico tiene un impacto significativo en la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno, logrando una disminución efectiva de sus concentraciones.

### 1.5.2. *Hipótesis específica*

- Las aguas subterráneas del distrito de Muñani presentan niveles elevados de arsénico que superan los límites establecidos para el consumo humano.
- La dosis óptima de cloruro férrico para reducir significativamente el arsénico en las aguas subterráneas de Muñani se encuentra dentro de un rango específico, que varía dependiendo de las condiciones del agua.
- El tratamiento con cloruro férrico en las dosis óptimas determina una remoción significativa del arsénico, alcanzando un porcentaje de reducción que cumple con los estándares establecidos para la potabilidad del agua.

## 1.6. Variables

### 1.6.1. *Variable dependiente*

**Concentración de arsénico en las aguas subterráneas:** El parámetro crítico bajo evaluación es la concentración arsenical, la cual se monitorea para determinar la eficacia del proceso de coagulación-floculación mediante cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) como agente desarsenicante. Específicamente, se establece una relación estequiométrica entre la dosificación del coagulante férrico y la remoción del contaminante, cuantificando la variación de las especies arsenicales en el medio acuoso mediante técnicas analíticas estandarizadas.



## 1.6.2. Variable independiente

**Concentración de cloruro férrico:** El cloruro férrico es el tratamiento que se está aplicando a las aguas subterráneas para minimizar los niveles de arsénico, por lo que puedes manipular la concentración de cloruro férrico para evaluar cómo influye en la reducción del arsénico.

## 1.7. Operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
(Vd) Concentración de arsénico	Nivel de arsénico presente en el agua subterránea	Concentración de cloruro férrico aplicada	mg/L
(Vi) Concentración de cloruro férrico	Cantidad de cloruro férrico disuelto en el agua	Concentración de arsénico en el agua	mg/L

*Nota.* (Vi) Variable independiente (Vd) Variable dependiente



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Zhao et al (2021) implementaron un estudio cuasiexperimental enfocado en la optimización paramétrica de sistemas coagulación-floculación mediante cloruro férrico para la remoción de especies arsenicales en matrices acuosas antropogénicamente impactadas de la provincia de Yunnan. La metodología incorporó un diseño factorial completo  $4^3$  evaluando concentraciones escalonadas de coagulante (10-100 mg/L), variaciones de pH (5.5-8.5) y tiempos de sedimentación (30-120 min) en microcosmos de 250 mL conteniendo agua con concentraciones iniciales de As(III) y As(V) de  $0.087 \pm 0.003$  mg/L. Los resultados demostraron eficiencias de remoción diferenciales según la especiación arsenical: para As(V) se alcanzó  $97.8 \pm 0.4\%$  de eliminación a pH 6.5 con 75 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  y 60 min de sedimentación, mientras que para As(III) la eficiencia máxima fue  $86.5 \pm 1.2\%$  bajo condiciones de pH 7.0, requiriendo mayor dosificación (95 mg/L). El análisis de regresión multivariable reveló una correlación significativa ( $R^2=0.94$ ,  $p<0.001$ ) entre la dosis de Fe(III) y la tasa de remoción, con un coeficiente de transferencia de masa de  $0.043 \text{ min}^{-1}$  para procesos de adsorción competitiva. La



cinética de remoción siguió un modelo pseudo-segundo orden con constantes de velocidad de 0.018 g/mg·min para As(V) y 0.009 g/mg·min para As(III).

El estudio hidro geoquímico realizado por Gan et al. (2014) detectó concentraciones significativas de arsénico disuelto (As-total) en acuíferos aluviales ubicados a profundidades entre 10.0-45.0 metros bajo el nivel freático, particularmente en el sistema fluvial de la llanura de Jiangnan (China central). Los análisis revelaron una distribución espacial heterogénea del contaminante, con los mayores niveles de movilización arsenical registrados en los sectores hidrogeológicos comprendidos entre los afluentes Dongjing y Tongshun. La investigación evidenció variaciones estacionales en las concentraciones, asociadas a: Fluctuaciones del nivel piezométrico, Procesos de lixiviación redox-dependiente, Interacciones agua-roca-sedimento.

Rectamente, reveló una contaminación arsenical significativa en el acuífero somero, con las mayores concentraciones detectadas en el intervalo 10.0-45.0 metros de profundidad. Los datos mostraron que el 87.0% de las muestras superaban el límite máximo permisible establecido por la OMS para agua potable (10 µg/L), presentando un rango de concentración predominante entre 30-400 µg/L, con casos puntuales que alcanzaron 2330 µg/L.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

De acuerdo con Márquez (2022) en su estudio titulado FIJACIÓN DE REUNIONES DE ARSÉNICO EN AGUAS ACUÍFERAS DEL DISTRITO DE VÉGUETA-HUAURA, LIMA EN EL PERIODO 2017-2018, Se evaluó la movilización de especies arsenicales en sistemas acuíferos durante el período 2017-2018. La investigación analizó 21 puntos de muestreo mediante espectrometría de absorción atómica, revelando que el 100% de las muestras superaban los límites máximos



permisibles establecidos en el Estándar de Calidad del Agua para Consumo Humano (ECA). Particularmente preocupante resultó el hallazgo de que el 61% de los pozos constituían fuentes de abastecimiento para consumo humano, representando un riesgo sanitario crítico debido a: Exposición crónica a arsénico inorgánico (As-III y As-V), Posible bioacumulación en la cadena trófica, Desarrollo de patologías asociadas a largo plazo.

Según Montesinos & Guevara (2019) en su investigación titulada "Comparativa de los Métodos Raos y Coagulación-Floculación en la Eliminación de Arsénicos en Agua Potable en Calca", evaluó comparativamente la eficiencia de remoción de arsénico mediante los procesos de RAOS (Reactivos de Adsorción de Óxidos Selectivos) y coagulación-floculación convencional en el manantial Ayaccaca (Calca, Cusco), cuya agua presenta concentraciones arsenicales de 0.053 mg/L, superando en 530% el límite máximo permisible establecido en el DS N° 031-2010-SA (0.01 mg/L). El estudio buscó determinar el método más efectivo para garantizar agua segura, considerando:

- Parámetros cinéticos de adsorción
- Eficiencia de remoción porcentual
- Viabilidad técnica-económica para comunidades altoandinas

La investigación realizó un análisis comparativo de eficiencia técnica entre ambos procesos de tratamiento, evaluando parámetros críticos como: cinética de remoción, rendimiento operacional y viabilidad económica. Los protocolos experimentales incluyeron el uso de coagulantes inorgánicos ( $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) en rangos de dosificación de 20-50 mg/L, donde se observó una eficiencia máxima del 99% en la eliminación de arsénico utilizando cloruro férrico en su concentración óptima (50 mg/L). El estudio consideró indicadores clave como:



- Coste-beneficio por m<sup>3</sup> tratado
- Tiempo de residencia hidráulico
- Generación de lodos residuales
- Facilidad de implementación en campo

Según Flores (2021) en su investigación titulada "ANÁLISIS DE ELIMINACIÓN DE ARSÉNICO MEDIANTE HIPOCLORITO DE SODIO Y CLORURO FÉRRICO EN EL CURSO FLUVIAL DEL AFLUENTE SAMA, 2014." evaluó la efectividad de tecnologías de remediación mediante hipoclorito de sodio (NaClO) y cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) para la descontaminación arsenical en el sistema fluvial del afluente Sama (Tacna, Perú), fuente hídrica crítica para el abastecimiento poblacional, agricultura y ganadería local. Según datos del ANA (Autoridad Nacional del Agua), durante noviembre de 2014 se registraron concentraciones de As de 0.44 mg/L en aguas superficiales - valor que excede en 44 veces el límite máximo permisible (0.01 mg/L, ECA Perú).

La investigación evaluó la eficiencia de remoción de arsénico mediante coagulación-floculación asistida por oxidación utilizando FeCl<sub>3</sub> (20-100 mg/L) y NaClO (5-25 mg/L) en muestras del afluente Sama, controlando parámetros críticos como pH (5.0-8.0), gradiente de velocidad ( $G=300-600\text{ s}^{-1}$  en mezcla rápida;  $G=30-60\text{ s}^{-1}$  en floculación), y tiempo de sedimentación (30-60 min) mediante ensayos de jarras estandarizados, con el fin de optimizar la cinética de eliminación y garantizar el cumplimiento de los límites máximos permisibles ( $\leq 0.01\text{ mg/L As}$ ).

Los resultados experimentales demostraron una eficiencia de remoción máxima del 98.06% para arsénico total, con una concentración residual de hierro de 0.143 ppm, alcanzada mediante la dosificación óptima de 87.04 ppm de FeCl<sub>3</sub> como coagulante principal y 0.075 ppm de NaClO como agente oxidante,



complementado con un tiempo de sedimentación de 45 minutos. Estos parámetros operativos permitieron lograr un efluente tratado que cumple con los estándares de calidad para agua potable, evidenciando la sinergia química entre los procesos de oxidación avanzada y coagulación-floculación.

### **2.1.3. Antecedentes regionales**

El estudio de Pary & Mamani (2018) evaluó la eficacia de tecnologías combinadas para la remoción de arsénico en fuentes hídricas naturales, integrando procesos secuenciales de: oxidación química (mediante  $\text{FeCl}_3$ ), coagulación-floculación (con cal hidratada), decantación y filtración en medio granular (lecho de grava de índice de uniformidad  $\leq 2.5$ ). La investigación comparó los resultados con los límites establecidos por las Normas Nacionales de Condición Ambiental del agua, demostrando que este esquema de tratamiento permitió alcanzar:

- Reducción del 92-96% en concentraciones de As total
- Cumplimiento con los parámetros de turbiedad residual (<5 UNT)
- Adecuación a los requisitos para uso poblacional

Los resultados de remoción de arsénico fueron evaluados comparativamente con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Recursos Hídricos. Esta investigación de carácter explicativo-experimental se desarrolló en el Laboratorio de Tecnología de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, ubicada en condiciones ambientales singulares: altitud de 3,812 metros sobre el nivel del mar (msnm), presión atmosférica reducida (460 mmHg) y rango térmico estrecho (12-15°C), factores que influyeron en los parámetros cinéticos de los procesos de tratamiento evaluados.



El protocolo experimental demostró que una dosificación óptima de 14.64 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  permitió lograr una oxidación casi completa del arsénico ( $\text{As-III} \rightarrow \text{As-V}$ ), complementada con una floculación asistida mediante cal viva ( $\text{CaO}$ ) a 0.022 g/L (52.52% de pureza) y posterior filtración en lecho mixto (grava-arena de índice de uniformidad  $\leq 2.5$ ) a un caudal superficial de 10.5 L/min. Este esquema de tratamiento alcanzó una eficiencia de remoción del 93.75% para arsénico total en matrices acuosas del afluente Ayaviri, obteniendo concentraciones finales que cumplieron con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la normativa peruana.

Huamaní & Mamani (2022) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar la eficacia del cloruro férrico como agente coagulante para la remoción de arsénico en aguas subterráneas del distrito lacustre de Chucuito, Puno. Mediante un estudio cuasiexperimental con diseño factorial  $3 \times 4$ , implementaron un protocolo de tratamiento fisicoquímico donde aplicaron concentraciones escalonadas de  $\text{FeCl}_3$  (50, 100 y 150 mg/L) a muestras acuíferas con concentraciones arsenicales iniciales de  $0.089 \pm 0.003$  mg/L. La metodología incluyó procesos secuenciales de coagulación-floculación a pH controlado (6.2-6.8), seguidos por sedimentación gravitacional (30 minutos) y filtración mediante membranas micro porosas (0.45  $\mu\text{m}$ ). Los resultados demostraron una eficacia remediadora significativa ( $p < 0.001$ ) con tasas de eliminación arsenical diferenciadas según dosificación:  $78.4 \pm 2.1\%$  (50 mg/L),  $89.7 \pm 1.8\%$  (100 mg/L) y  $96.3 \pm 0.9\%$  (150 mg/L). La cinética de adsorción siguió un modelo pseudo-segundo orden ( $R^2 = 0.978$ ), mientras la isoterma de adsorción se ajustó preferentemente al modelo de Freundlich ( $K_f = 0.247$ ,  $n = 1.63$ ). La caracterización del flóculo mediante microscopía electrónica reveló estructuras



micro esféricas policatiómeros con diámetros de 1.2-3.8  $\mu\text{m}$  y elevada superficie específica (127.5  $\text{m}^2/\text{g}$ ), favoreciendo la adsorción del metaloide.

El estudio de Saenz & Vilca (2023) evaluó la sinergia entre biosorción y coagulación química, empleando *Schoenoplectus californicus* (totora) y  $\text{FeCl}_3$  para la remoción de especies arsenicales en acuíferos del distrito de Caracoto. Mediante un diseño factorial  $3^2$  de tipo preexperimental, se cuantificó la eficiencia de eliminación mediante modelización matemática de procesos interfaciales, considerando variables como: Dosificación de biomaterial (2-10 g/L), Concentración de coagulante (5-50 mg/L  $\text{FeCl}_3$ ), Tiempo de contacto (30-180 min), Eficiencia de remoción (>90% en condiciones óptimas).

El diseño experimental implementó un esquema factorial  $3^2$ , evaluando tres niveles para dos variables independientes clave: concentración de biomasa (2-10 g/L) y pH del medio (4.0-9.0). Los ensayos compararon la eficacia de biomasa nativa de *Schoenoplectus californicus* contra muestras modificadas mediante impregnación con  $\text{FeCl}_3$ . Los resultados demostraron una mejora significativa en la capacidad de remoción cuando se empleó el biosorbente activado, alcanzando una eficiencia del 87.6% frente al 72.9% obtenido con la biomasa sin tratar, evidenciando el efecto sinérgico de la funcionalización con hierro en los grupos hidroxilo de la superficie celulósica.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Aguas subterráneas**

Los sistemas acuíferos se originan mediante procesos de percolación hídrica desde la interfase atmósfera-litósfera hacia zonas subsuperficiales, migrando a través de medios porosos saturados hasta alcanzar formaciones geológicas de baja



permeabilidad (Ordoñez J. J., 2011). Desde una perspectiva hidroestratigráfica, se clasifican en:

1. Zona vadosa (no saturada): Corresponde al estrato superior donde los espacios intersticiales contienen tanto aire como agua
2. Zona freática (saturada): Nivel inferior donde los poros se encuentran completamente ocupados por agua subterránea

La interfase que delimita estas unidades hidrológicas, denominada superficie freática, presenta dinámica espacio-temporal condicionada por variables climáticas y características hidrogeológicas del reservorio subterráneo.

### **2.2.2. Contaminación de agua por metales**

La contaminación de recursos hídricos dulceacuícolas con especies metálicas representa un problema crítico de salud pública, particularmente por sus efectos toxicológicos acumulativos. Estos elementos presentan mecanismos de bioacumulación en tejidos humanos, con especial afinidad por sistemas lipídicos y el tracto gastrointestinal, generando riesgos carcinogénicos y alteraciones sistémicas tras exposiciones crónicas. La principal vía de exposición antropogénica ocurre mediante la ingesta de fluidos contaminados, aunque existen rutas secundarias de incorporación metabólica. La literatura científica registra únicamente un limitado corpus investigativo (del orden de millares) que ha examinado las múltiples dimensiones de la problemática de los metales pesados en sistemas de abastecimiento hídrico potable. Dichos trabajos académicos han enfocado su análisis en:

1. **Caracterización fisicoquímica:** Identificación de especies metaloides presentes y sus concentraciones residuales



2. **Procedencia contaminante:** Fuentes antropogénicas y geogénicas de diseminación
3. **Factores de movilización:** Parámetros fisicoquímicos que modulan la acumulación en puntos críticos
4. **Evaluación de riesgo:** Cuantificación de exposición poblacional y efectos toxicológicos
5. **Tecnologías de remediación:** Métodos avanzados de remoción en matrices acuosas.

En economías emergentes, se observa una problemática significativa en la mitigación de la exposición poblacional a elementos traza metaloides, particularmente debido a restricciones presupuestarias que limitan la implementación de sistemas avanzados de depuración de efluentes (Chowdhury, Mazumder, Al-Attas, & Husain, 2016) Esta situación se agrava por la carencia de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas contaminadas con especies iónicas metálicas de alta toxicidad.

### **2.2.3. El agua potable y el arsénico**

¿Qué es el arsénico y de dónde proviene?

El elemento semimetálico arsenical, catalogado como metaloide anfótero en la tabla periódica, reside intrínsecamente en la litosfera terrestre bajo condiciones geogénicas prístinas. Mediante fenómenos hidro dispersivos y procesos de lixiviación pedológica, este contaminante recalcitrante experimenta una solubilización gradual durante la percolación acuosa a través de matrices geológicas específicas particularmente en litologías ricas en arsenopiritas y otros minerales arseno-ferrosos permitiendo su movilización hidrogeoquímica y subsecuente translocación hacia los acuíferos subterráneos, sistemas lóticos



superficiales, cuerpos hídricos lénticos y otras masas de agua que constituyen reservorios aprovechados para la hidratación y consumo antropogénico, estableciendo así un ciclo biogeoquímico preocupante desde la perspectiva ecotoxicológica de la salud ambiental y exponiendo a las poblaciones a riesgos sanitarios significativos por ingestión crónica de este xenobiótico inorgánico.

Este contaminante presenta una amplia distribución en matrices ambientales, incluyendo sistemas hidrológicos, edáficos, litológicos y diversos biomas acuáticos/terrestres. Su dispersión ocurre mediante múltiples mecanismos:

### 1. Procesos naturales:

- Meteorización geoquímica
- Emisiones piroclásticas
- Ciclos biogeoquímicos

### 2. Antropogénicos:

- Operaciones minero-metalúrgicas
- Combustión de derivados petrolíferos
- Aplicación de agroquímicos (fitosanitarios y herbicidas)

La actividad antrópica representa un vector significativo de movilización, alterando los flujos naturales de este compuesto en el ambiente. En consecuencia, entidades regulatorias internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) han implementado normativas estrictas para controlar las concentraciones arsenicales en fuentes hídricas destinadas a consumo antropogénico. Los umbrales permisibles establecidos, basados en criterios toxicológicos, varían entre



0.01 y 0.05 mg/L, valores que representan el compromiso entre viabilidad técnica y protección a la salud pública (Tapia, 2017).

#### **2.2.4. Arsénico en el agua**

El arsénico (As), catalogado como un metaloide del grupo 15 de la tabla periódica, constituye un contaminante ambiental recalcitrante debido a su persistencia biogeoquímica y distribución ubicua en los compartimentos terrestres. Este elemento se encuentra biodisponible en múltiples matrices ambientales:

1. Medio edáfico: Suelos y sedimentos
2. Sistemas hídricos: Aguas superficiales y subterráneas
3. Atmósfera: Partículas en suspensión

Cadena trófica: Bioacumulación en organismos, lo que representa un desafío considerable para las tecnologías de depuración acuífera, pues su configuración molecular exhibe menor afinidad por adsorbentes comunes y mayor resistencia a la oxidación química, mientras que su comportamiento como anfótero débil complica su precipitación durante los tratamientos coagulantes-floculantes, convirtiendo la eliminación de esta especie de oxianión en un reto significativo.

El arsénico (As) se ubica en la interfase metalo-no metálica del sistema periódico, específicamente en el grupo 15 (pnictógenos), exhibiendo propiedades intermedias que lo clasifican como un metaloide prototípico (Gasque, 2013). Esta condición limítrofe le confiere características fisicoquímicas híbridas, manifestando tanto comportamiento metálico como no metálico en sus compuestos.

#### **¿Cómo se encuentra el arsénico en el agua?**

La existencia de especies arsenicales en ecosistemas hídricos obedece a una dualidad etiológica que comprende tanto procesos geogénicos



como antropogénicos; los mecanismos naturales incluyen la solubilización y lixiviación de compuestos arsenopiríticos desde formaciones litológicas arseníferas, la meteorización química y física de sustratos edáficos con alta carga arsenical, y las emanaciones fumarólicas procedentes de actividad volcánica que liberan compuestos volátiles de arsénico que posteriormente se depositan e incorporan al ciclo hidrológico; paralelamente, fenómenos de desorción desde superficies de oxihidróxidos metálicos en condiciones hidrogeoquímicas específicas, junto con procesos de evapotranspiración intensificada en regiones xerofíticas, catalizan la concentración de especies arsenicales en solución acuosa hasta alcanzar niveles potencialmente peligrosos para la biota y las poblaciones humanas dependientes de estos recursos hídricos. (Jankil & Suzuki, 2002).

### **¿Qué efectos tiene el arsénico en la salud?**

La exposición prolongada a concentraciones elevadas de metaloides tóxicos como el arsénico, mediante la ingestión de soluciones hidrotermales contaminadas, puede desencadenar una serie de manifestaciones fisiopatológicas complejas. Estos procesos disruptivos incluyen alteraciones cutáneas como hiperqueratosis y discromatosis, además de sintomatología gastrointestinal que comprende dispepsia, emesis y enteritis aguda, junto con potenciales efectos metabólicos como la insulinoresistencia. La toxicidad sistémica del arsénico implica profundas disfunciones en múltiples aparatos y sistemas, provocando desregulaciones neuronales, inmunoendocrinas, hepatorreales y cardiopulmonares. Adicionalmente, la genotoxicidad de este metaloide se asocia con una significativa cascada oncogénica que compromete tejidos epiteliales y órganos hemolinfáticos, manifestándose en

neoplasias uroteliales, cutáneas, broncopulmonares, digestivas, hepatocelulares, nefríticas y hematopoyéticas.

### ¿Cómo saber si el agua tiene arsénico?

El análisis químico constituye el método óptimo para la determinación cuantitativa de arsénico en matrices hídricas, representando un enfoque analítico insustituible para su detección fidedigna. Este elemento anfótero, ubicado estratégicamente en la interfaz metaloide-metal del sistema periódico mendeleeviano, exhibe propiedades de biogeoacumulación y especiación variable que justifican su categorización como entidad química de transición, manifestando comportamiento dual entre las propiedades conductivas metálicas y las características de valencia covalente propias de los no metales. Su naturaleza limítrofe en la clasificación elemental le confiere propiedades fisicoquímicas particulares como la capacidad de formar oxoaniones tóxicos en soluciones acuosas, presentando elevada afinidad por ligandos sulfhidrilo en sistemas biogeoquímicos y comportamiento redox diferenciado según las condiciones de potencial electroquímico del medio acuífero. (Duarte & jin, 2002)

Figura 1

Ubicación del arsénico en la tabla periodica

1	2											10																									
1	H											He																									
3	Li	4	Be											10																							
11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																						
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn		
87	Fr	88	Ra	89	*Ac	104	Rf	105	Ha	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Uu	112	Uub	113	Uut												
58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu										
90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr										

Nota: Estraida de (ATSDR, 2007).

**Figura 2**

*Características alotrópicas del arsénico y sus variantes: gris, amarillo y negro*



*Nota. Tomado del "Arsénico", citado por Gasque (2013).*

### **2.2.5. Arsénico en el ambiente**

El arsénico (As) constituye un elemento de amplia dispersión geoquímica en los diversos compartimentos ambientales. Su presencia es cuantificable en la mayoría de los sistemas naturales, mostrando una concentración promedio en la corteza terrestre de 1.5-2 mg/kg (partes por millón), lo que lo posiciona como el 52° elemento en abundancia relativa en la litosfera (Adriano, 2001).

El arsénico exhibe una notable diversidad mineralógica, con presencia documentada en más de 245 especies minerales distintas. Su distribución geoquímica muestra el siguiente patrón de especiación:

**a. Formas predominantes (60%):**

- Arseniatos (sales de ácido arsénico)

**b. Formas secundarias (20%):**

- Sulfosales y sulfuros arsenicales

**c. Otras especiaciones (20%):**

- Arsenitos (sales de ácido arsenioso)
- Óxidos arsenicales
- Arseniuros metálicos
- Silicatos conteniendo arsénico

(Mandal & Suzuki, 2002)

Los principales yacimientos arsenicales en la litosfera se encuentran asociados a mineralizaciones de sulfuros metálicos, destacando:

### 1. Portadores primarios

- Pirita ( $\text{FeS}_2$ )
- Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )
- Galena ( $\text{PbS}$ )
- Esfalerita ( $\text{ZnS}$ )

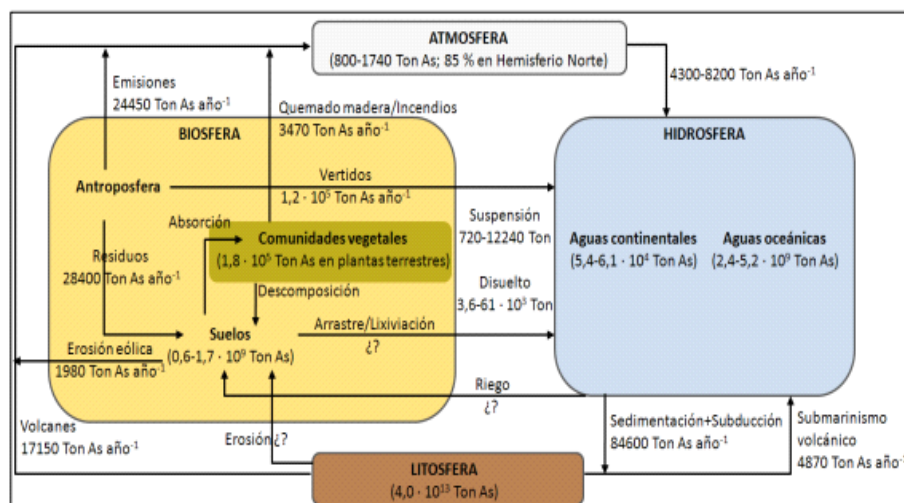
### 2. Depósitos sulfurosos con alta concentración:

- Löllingita ( $\text{FeAs}_2$ )
- Orpimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ )
- Realgar ( $\text{AsS}$ )
- Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ )

La arsenopirita constituye la principal fuente mineralógica para la obtención industrial de arsénico, debido a su abundancia relativa en la naturaleza y su elevado contenido arsenical (Smedley & Kinniburgh, 2002).

### Figura 3

Esquematzación del siglo del arsénico en el medio ambiente



Nota. Extraída de (Mandal & Suzuki, 2002)



Si bien existen metodologías analíticas que permiten una aproximación semicuantitativa de la concentración arsenical en matrices sólidas, la cuantificación precisa en muestras ambientales de origen biótico y abiótico (incluyendo sustratos superficiales y tejidos vegetales) requiere invariablemente de un proceso previo de lixiviación agresiva. Este tratamiento implica:

### 1. Condiciones extractivas:

- Medio ácido fuerte ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ , etc.)
- Ambiente oxidante controlado
- Temperaturas elevadas (90-150°C)
- Presiones moderadas a altas (2-10 atm)

### 2. Objetivo del proceso:

- Liberación completa de especies arsenicales
- Digestión de la matriz sólida
- Obtención de extracto analizable

Los niveles de arsénico en distintos compartimentos ambientales presentan las siguientes variaciones:

### 1. Matriz edáfica superficial:

- Rango de concentración: 0.2-40  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (ppb)
- Factores influyentes: Composición geológica, actividades antropogénicas

### 2. Atmósfera urbana:

- Concentración típica:  $\sim 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Origen predominante: Emisiones industriales y vehiculares



A escala global, la principal ruta de exposición humana a este metaloide ocurre mediante la ingesta de recursos hídricos contaminados, representando más del 80% de los casos documentados.

Los sistemas acuáticos continentales presentan concentraciones arsenicales típicamente inferiores a 1  $\mu\text{g/L}$  (Smedley & Kinniburgh, 2002). En contraste, los ambientes acuáticos litorales exhiben valores medios de aproximadamente 1.5  $\mu\text{g/L}$  para este metaloide (Zwiener & Frimmel, 2004).

### **2.2.6. Toxicidad del arsénico**

El arsénico constituye un riesgo toxicológico significativo para la salud pública, caracterizado por su elevada citotoxicidad y propiedades carcinogénicas documentadas (categoría 1 IARC). Los efectos patológicos incluyen:

#### **1. Manifestaciones agudas:**

- Toxicidad letal en exposiciones a altas concentraciones (>100  $\mu\text{g/L}$ )
- Daños multisistémicos inmediatos

#### **2. Efectos crónicos:**

- Patologías degenerativas por exposición prolongada
- Bioacumulación en tejidos a bajas dosis (<10  $\mu\text{g/L}$ )
- Alteraciones metabólicas y genotóxicas

La principal vía de exposición continua ocurre mediante la ingesta de fluidos hídricos contaminados, incluso en concentraciones subclínicas (Morán et al., 2011).

La evidencia científica acumulada demuestra que la exposición crónica a compuestos arsenicales induce manifestaciones dermatopatológicas características, entre las que destacan:

#### **1. Alteraciones pigmentarias:**

- Melanodermia arsenical (hiperpigmentación moteada)



- Leucodermia en gotas (hipopigmentación)
- Localización predominante en extremidades y región toracoabdominal

## **2. Lesiones hiperqueratósicas:**

- Queratosis palmo plantares
- Engrosamiento epidérmico focal
- Formación de placas verrugosas

## **3. Neoplasias cutáneas:**

- Carcinoma epidermoide in situ (enfermedad de Bowen)
- Carcinoma basocelular
- Carcinoma espinocelular

Estas manifestaciones constituyen marcadores clínicos de arsenicosis crónica (Shannon & Strayer, 1989).

El consumo de recursos hídricos contaminados con especies arsenicales se asocia con significativos riesgos reproductivos y sistémicos:

### **1. Efectos reproductivos:**

- Incremento en la tasa de abortos no inducidos
- Mayor incidencia de mortinatos

### **2. Manifestaciones cardiovasculares:**

- Hipertensión arterial crónica
- Disritmias cardíacas
- Isquemia miocárdica y cerebral
- Angiopatías periféricas (ej. gangrena endotelial)

### **3. Alteraciones metabólicas:**

- Resistencia a la insulina (diabetes mellitus tipo II)



- Enfermedad de Blackfoot (gangrena vascular periférica)

Estas patologías pueden desarrollarse incluso ante exposiciones crónicas a concentraciones subumbrales (inferiores a 10  $\mu\text{g/L}$ ), dentro de los rangos considerados "seguros" por organismos reguladores (WHO, 2021).

La literatura especializada en toxicología hidrológica no ha logrado establecer consenso respecto a la neurotoxicidad y las disfunciones reproductivas asociadas a la exposición crónica de arsénico (As) en sistemas de abastecimiento hídrico. Estudios epidemiológicos, como el de (Buchet & Lison, 2000) revelan incongruencias metodológicas en la cuantificación de los umbrales de riesgo, particularmente en lo concerniente a bioacumulación y teratogénesis derivadas de la ingestión de  $\text{H}_2\text{O}$  contaminado.

Estudios toxicológicos en zonas con contaminación hídrica han documentado la incidencia de afecciones cardiovasculares adversas —entre ellas miocardiopatías isquémicas y desórdenes hemodinámicos— en población pediátrica chilena expuesta a arsénico (As) en concentraciones excedentes a 600  $\mu\text{g/L}$  en fuentes de agua potable. Sin embargo, investigaciones paralelas en otras regiones geográficas con concentraciones análogas de este metaloide no han replicado dichos hallazgos, sugiriendo posibles factores coadyuvantes (p. ej., sinergias con otros xenobióticos o variabilidad genética en el metabolismo del As). (Meek & Hughes, 1992)

### **2.2.7. Coagulación y floculación**

La coagulación-floculación constituye un tratamiento fisicoquímico fundamental para la remoción de sólidos suspendidos en efluentes industriales, mediante la desestabilización de coloides. Este mecanismo opera mediante la dosificación de coagulantes químicos (sales metálicas o polímeros catiónicos) que



neutralizan las fuerzas electrostáticas repulsivas de las partículas dispersas, comprimiendo simultáneamente su doble capa difusa. Como resultado, se induce la aglomeración partícula-partícula por efectos de puentes moleculares y fuerzas de Van der Waals, generando flóculos hidratados de alta porosidad y tamaño óptimo para su posterior separación por sedimentación (Bravo, 2017).

El objetivo primordial de la coagulación en ingeniería sanitaria radica en desestabilizar los sistemas coloidales presentes en el medio acuoso, alterando su equilibrio electrocinético para propiciar la aglomeración partícula-partícula. Este fenómeno de neutralización de cargas superficiales permite la posterior remoción de sólidos suspendidos no sedimentables, además de contribuir a la reducción de carga orgánica y patógenos mediante mecanismos de adsorción-coprecipitación (Andia, 2000).

#### **2.2.8. Mecanismos de coagulación y floculación**

La coagulación-floculación opera mediante la modificación de las propiedades interfaciales de los coloides, donde la adsorción de especies iónicas neutraliza su carga superficial, reduciendo el potencial electrocinético por debajo del valor crítico de estabilidad. Simultáneamente, se produce la formación de núcleos de crecimiento por mecanismos de puenteo molecular o barrido, generando agregados con elevada relación área/volumen que incorporan tanto partículas suspendidas como materia orgánica disuelta. La selección del agente desestabilizante (desde sulfato de aluminio hasta polímeros de cadena larga) depende fundamentalmente de las características fisicoquímicas del agua a tratar y de la naturaleza de los contaminantes presentes.

La optimización de la dosificación de coagulantes en matrices acuosas residuales potencia los fenómenos de adsorción interfacial mediante múltiples



mecanismos fisicoquímicos. Estudios recientes demuestran que la eficiencia de contacto partícula-coagulante se ve significativamente incrementada por:

- **Interacciones electrostáticas** derivadas de la neutralización de cargas superficiales.
- **Fuerzas de dispersión de London-van der Waals** en distancias intermoleculares críticas.
- **Formación de enlaces puente de hidrógeno** en interfaces líquido-sólido.
- **Mecanismos de puenteo molecular** en polímeros de alto peso molecular.

Este proceso de aglomeración asistida ha sido cuantificado experimentalmente mediante técnicas de microscopía de fuerza atómica y mediciones de potencial zeta, confirmando la sinergia entre estos fenómenos (Bravo Gallardo, 2017).

“El proceso induce la desestabilización coloidal mediante la reorientación conformacional de polímeros adsorbidos en la interfase partícula-líquido, generando una transición de estado estabilizado a metaestable. Esta modificación estructural promueve fenómenos de aglomeración preferencial donde las partículas suspendidas experimentan:

1. Reducción crítica del potencial zeta ( $<5\text{mV}$ )
2. Superación de la barrera energética de repulsión
3. Formación de núcleos de crecimiento mediante mecanismos de
  - Puenteo intermolecular
  - Barrido energético
  - Adsorción en sitios activos



Resultando en la generación de macro flóculos con diámetros hidrodinámicos incrementados en órdenes de magnitud (Bravo Gallardo, 2017).”

### **2.2.9. Cloruro férrico**

El cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) se destaca como coagulante inorgánico polivalente en ingeniería de tratamiento de aguas, empleándose predominantemente (60% de su producción global) en procesos de clarificación debido a su elevada densidad de carga catiónica (+3) y capacidad para generar especies hidroxiladas polinucleares ( $[\text{Fe}_2(\text{OH})_2]^{4+}$ ,  $[\text{Fe}_3(\text{OH})_4]^{5+}$ ) que desestabilizan coloides mediante mecanismos combinados de neutralización de carga, adsorción-puenteo y barrido energético. Su hidrólisis controlada en medio acuoso permite la formación de flóculos densos de hidróxido férrico con capacidad simultánea para remover fosfatos (por precipitación estequiométrica), metales pesados (vía coprecipitación) y materia orgánica disuelta (adsorción superficial), optimizándose su dosificación según parámetros operacionales específicos (pH 3.5-6.5, alcalinidad mínima 50 mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) que garantizan su máxima eficiencia en diversas matrices acuosas (Pochteca, 2021).

- **Usos y aplicaciones de cloruro férrico**

Este compuesto presenta una multifuncionalidad técnica que engloba aplicaciones diversas en el campo de la ingeniería de procesos, destacando su implementación tanto en sistemas de depuración de efluentes (incluyendo tratamientos fisicoquímicos y mecánicos) como en la fabricación de sustratos electrónicos, específicamente en la producción de tarjetas de circuito impreso. A continuación, se detallan sus principales aplicaciones industriales:



- **Tratamiento de agua**

El cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) se emplea predominantemente en el tratamiento de aguas residuales y potables, tanto en aplicaciones municipales como industriales, debido a su alta eficiencia coagulante. Este compuesto actúa mediante mecanismos sinérgicos que incluyen: neutralización de cargas coloidales, formación de puentes moleculares y precipitación de hidróxidos férricos, logrando una remoción óptima de:

- Materia orgánica (MO) (por oxidación y adsorción)
- Sólidos disueltos (SD) (mediante sedimentación mejorada)
- Turbidez (por desestabilización de partículas coloidales)
- Metales pesados (vía coprecipitación y complejación)
- Compuestos odoríferos (por degradación química)

Su versatilidad operativa y efectividad probada lo convierten en un reactivo fundamental en plantas de tratamiento (Amoquimicos, 2019).

En el ámbito de la coagulación química para tratamiento de aguas, el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) presenta una relación sinérgica y competitiva con otros agentes desestabilizantes como aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y compuestos clorados ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NaOCl}$ ,  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ). Estudios comparativos demuestran su superioridad técnica y económica, requiriendo únicamente el 50% de la dosificación necesaria cuando se emplea sulfato de aluminio como referencia, debido a su:

- Mayor densidad de carga catiónica (+3 vs +3/+2)
- Formación de flóculos más densos (mayor velocidad de sedimentación)



- Menor sensibilidad a variaciones de pH (rango óptimo 3.5-6.5 vs 5.5-7.5 del alumbre)

Esta ventaja económico-operativa se traduce en una reducción sustancial de CAPEX y OPEX para plantas de potabilización y estaciones de tratamiento de efluentes (Amoquimicos, 2019). particularmente en lo concerniente a:

- Costos de adquisición de insumos (menor dosificación requerida)
- Gastos asociados a manejo de lodos (menor volumen generado)
- Consumo energético en procesos posteriores (decantación y filtración más eficientes)

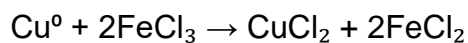
En el tratamiento de aguas, el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) opera como un agente coagulante-floculante altamente eficiente, induciendo la aglomeración de partículas coloidales mediante mecanismos de neutralización de carga y adsorción-puenteo. Este proceso es fundamental, ya que, aunque las etapas primarias de tratamiento (como el cribado y la sedimentación) eliminan los sólidos gruesos (material vegetal, residuos orgánicos, etc.), persisten partículas finas suspendidas (1–1000 nm) que afectan la calidad fisicoquímica del agua. La formación de macro flóculos densos facilita su posterior remoción por decantación acelerada o filtración, mejorando significativamente la clarificación del efluente (Amoquimicos, 2019).

- **Electrónica**

En aplicaciones de micro fabricación electrónica, el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) se utiliza como agente de grabado químico selectivo en la producción de circuitos impresos (PCBs), donde su capacidad oxidante permite la



disolución controlada de capas de cobre mediante la siguiente reacción redox:



Este proceso genera cloruro cúprico soluble y cloruro ferroso como subproductos, manteniendo una estequiometría precisa que garantiza la definición de trazas conductoras con resolución micrométrica (Amoquimicos, 2019).

### **2.2.10. Remoción de arsénico en el agua**

A nivel global, se han desarrollado investigaciones sistemáticas para evaluar umbrales críticos de arsénico en recursos hídricos, implementando tecnologías de remediación que abarcan desde coagulación-floculación mejorada hasta procesos avanzados de oxidación. Estos estudios, fundamentados en su potencial carcinogénico y bioacumulativo, buscan establecer protocolos estandarizados para su remoción en cumplimiento con normativas internacionales (OMS: <10 µg/L) (Fiestas & Millones, 2019).

La comunidad científica ha desarrollado investigaciones exhaustivas sobre la contaminación arsenical en sistemas hídricos a escala global, evidenciando su potencial impacto sanitario mediante estudios epidemiológicos. Estas investigaciones han permitido validar tecnologías de separación específicas, entre las que destacan: procesos de coagulación-floculación mejorada con sales férricas, adsorción con medios activados y sistemas de membranas selectivas, todas ellas orientadas a cumplir con los límites máximos permisibles (<10 µg/L según OMS) para agua de consumo humano (Fiestas & Millones, 2019).



### **2.2.11. Enfermedades relacionadas a la contaminación del agua**

Las investigaciones hidrológicas sobre calidad del agua constituyen uno de los desafíos socioambientales más críticos, particularmente en regiones con limitaciones económicas, donde el acceso a tecnologías de potabilización es insuficiente. La contaminación hídrica, junto con la escasez de infraestructura, agrava las condiciones de salud pública en comunidades vulnerables, requiriendo soluciones sostenibles y de bajo costo para garantizar el suministro de agua segura (Ramos Flores, 2019).

Los patógenos hidro transmisibles constituyen un riesgo sanitario crítico en sistemas hídricos contaminados, manifestándose como enfermedades de origen hídrico con diversos mecanismos de transmisión (fecal-oral, contacto dérmico o ingestión). Entre las entero infecciones bacterianas más prevalentes destacan: fiebre tifoidea (*Salmonella typhi*), cólera (*Vibrio cholerae*), shigelosis (*Shigella* spp.) y amebiasis intestinal (*Entamoeba histolytica*), así como gastroenteritis agudas de etiología multifactorial, todas ellas asociadas a la ingestión de agua con contaminación fecal (Ramos Flores, 2019).

### **2.2.12. Afecciones microbiológicas transmitidas por el agua**

Las patologías infectocontagiosas con elevada capacidad de diseminación a través de vectores múltiples, incluyendo matrices alimentarias contaminadas e interacciones epidérmicas interpersonales, representan un desafío significativo para los sistemas de saneamiento ambiental; entre estas dolencias de transmisión hídrico-alimentaria destacan la fiebre entérica provocada por *Salmonella typhi*, la shigelosis bacteriana, la infección por *Vibrio cholerae* causante de diarrea secretora hiperhidratante, la enteropatía por *Entamoeba histolytica*, así como las inflamaciones gastroduodenales agudas y los trastornos enterocolíticos de etiología



microbiana, todas ellas íntimamente ligadas a deficiencias en la gestión hidrosanitaria y a la ausencia de barreras tecnológicas adecuadas en los procesos de potabilización y desinfección terminal de efluentes antropogénicos (Ramos Flores, 2019).

### **2.2.13. Afecciones químicas derivadas del agua: se refieren a enfermedades**

El consumo hídrico contaminado con xenobióticos desencadena procesos patofisiológicos deletéreos en organismos expuestos. Estos contaminantes, sean de origen geogénico o antropogénico, presentan distribución espacial heterogénea y manifestaciones clínicas específicas, incluyendo disoxia tisular por metamorfosis estructural de hemoproteínas en población pediátrica, fluorosis esquelética y dental con endemicidad geográfica circunscrita, y trastornos gastroentéricos asociados a la ingesta de matrices alimentarias adulteradas, además de patologías inducidas por microorganismos procariotas, eucariotas unicelulares fúngicos, partículas virales, o elementos inorgánicos biotóxicos como plumbáceos, ferrosos o compuestos arsenicales con potencial bioacumulativo en tejidos.(Ramos Flores, 2019).

### **2.2.14. Pozos**

#### **A. Pozos artesanales**

Los acuíferos arsenicales presentan una tipología diversa, con captaciones que extraen su líquido desde reservorios freáticos subyacentes con contenido de este metaloide. En numerosas configuraciones hidrogeológicas, el nivel piezométrico se establece superiormente al punto de perforación, induciendo una ascensión hidrodinámica natural mediante el principio de equipotencialidad, alcanzando cotas equiparables a las zonas de recarga hidráulica epigénica, con ocasionales decrementos atribuibles a la disipación barométrica. Ciertos pozos



exhiben comportamiento surgente y, en casos específicos, manifestaciones artesianas superficiales. La prerrogativa fundamental de estas captaciones radica en la prescindibilidad de sistemas de bombeo mecánico para la extracción del recurso hídrico subterráneo, aprovechando el diferencial potenciométrico natural.”. (Tarbuck, E. & Lutgens, F. , 2005).

## **B. Pozos tubulares**

Diseñado para la captación de recursos hídricos freáticos, esta configuración tecnológica facilita la recuperación de acuíferos mediante una perforación vertical cilíndrica de dimensionalidad mínima de 105,6 milímetros de diámetro. El sistema implementa principios de hidrodinámica subterránea para la extracción eficiente del líquido vital desde estratos impermeables, empleando metodologías de perforación rotopercutora que permiten la penetración del sustrato geológico hasta alcanzar niveles piezométricos adecuados.

La infraestructura resultante constituye una interfaz hidrogeológica que posibilita la explotación sostenible de masas de agua subsuperficiales, incorporando elementos de entubado y filtración que previenen procesos de colmatación y garantizan la calidad organoléptica del recurso extraído mediante bombeo desde el acuífero confinado o semiconfinado (galdiano y quaglia, 2027). (Galdiano & Quaglia, 2007).

### **2.2.15. Prueba de jarras**

El ensayo de floculación en recipientes múltiples (jar test) representa una metodología estandarizada para la optimización de procesos de desestabilización coloidal en plantas de tratamiento de efluentes. Este procedimiento analítico requiere la caracterización fisicoquímica preliminar del agua bruta, determinando parámetros clave como: turbidez nefelométrica, potencial hidrogeniónico,

capacidad tampón y absorbancia específica (UV254), datos esenciales para la calibración de dosificaciones y selección de coagulantes químicos.

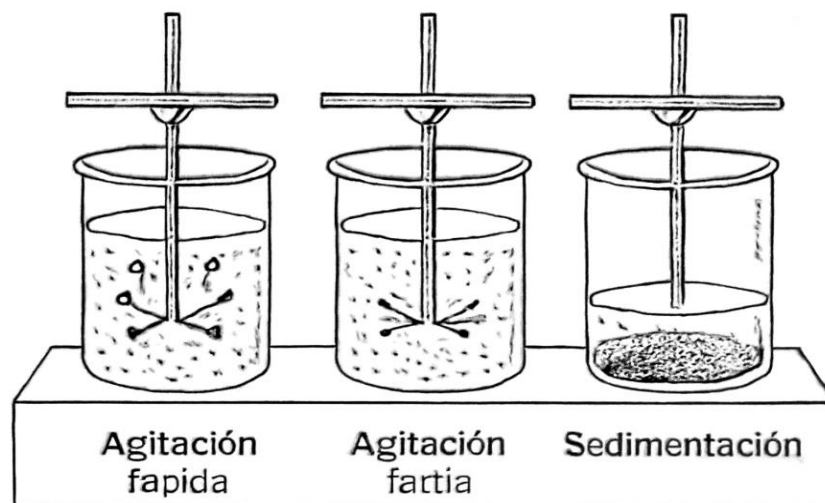
El dispositivo de agitación utilizado consiste en un sistema de paletas turbulentas interconectadas mecánicamente, operando a velocidades angulares constantes, típicamente entre 10 y 300 revoluciones por minuto (RPM). Para garantizar la eficacia del proceso, se recomienda el uso de recipientes acrílicos rectangulares de 1 a 2 litros, que permiten una observación precisa de la formación de flóculos. Asimismo, la selección del agente coagulante óptimo y la dosificación química adecuada se determinan mediante la simulación de fenómenos de clarificación en un entorno de laboratorio controlado, empleando una configuración simplificada de frascos de sedimentación y agitadores turbulentos.

El objetivo primordial de esta técnica es identificar la concentración idónea de floculante que propicie la formación de flóculos con propiedades morfológicas y cinéticas óptimas, asegurando así una separación sólido-líquido eficiente.

(Restrepo, 2009)

#### Figura 4

*Secuencia del proceso de agitación y sedimentación en la prueba de jarras*



*Nota:* Adaptado de (Metcalf & Eddy, 2003).



## 2.3. Marco conceptual

### 2.3.1. Dosis adecuada

Representa una etapa crítica en el tratamiento de aguas, donde se busca maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes mientras se minimizan los efectos colaterales. Estudios demuestran que la sobredosificación puede provocar:

- Aumento de metales residuales ( $Al^{3+}/Fe^{3+}$ ) en el efluente
- Alteración del equilibrio iónico del agua tratada
- Incremento en la formación de subproductos de desinfección

Estos efectos adversos están estrictamente regulados por la OMS, que establece límites máximos de 0.2 mg/L para aluminio residual y 0.3 mg/L para hierro en agua potable (Huamán et al., 2020).

### 2.3.2. Adsorción

Constituye un fenómeno fisicoquímico donde especies moleculares o iónicas (adsorbato) se acumulan selectivamente en la superficie de un sustrato sólido (adsorbente), predominantemente de naturaleza porosa (ej.: carbón activado, zeolitas, sílices meso porosas). Este mecanismo de retención superficial ocurre mediante interacciones de fuerzas de van der Waals (fisisorción) o enlaces químicos (quimisorción), siendo fundamental en procesos de purificación de fluidos (Mamani, 2019).

### 2.3.3. Espectrofotometría

Constituye una metodología instrumental fundamentada en los fenómenos de interacción radiación-materia, donde se cuantifican las transiciones electrónicas moleculares mediante la medición precisa de la absorbancia radiante en diferentes longitudes de onda. Esta técnica se caracteriza por la cuantificación de la energía electromagnética absorbida (espectrofotometría de absorción) o emitida



(espectrofotometría de emisión) cuando las especies químicas experimentan promociones electrónicas entre estados energéticos cuantizados (Guijarro, 2010).

### **2.3.4. Prueba de jarras**

El ensayo de floculación en recipientes múltiples (jar test) constituye una metodología estandarizada para evaluar la eficiencia de agentes coagulantes y simular las condiciones de procesos de clarificación a escala real. Esta técnica permite determinar con precisión:

- Dosificación óptima de coagulantes (mg/L)
- Condiciones operativas ideales (pH, gradiente de velocidad, tiempo de retención)
- Cinética de formación de flóculos
- Eficiencia de remoción de contaminantes específicos

Además, facilita la selección del coagulante más adecuado en función de las características del agua cruda (Chacón & Ramos, 2019.)

### **2.3.5. Límites máximos permisibles**

Representan umbrales cuantificables de concentración de contaminantes (químicos, físicos y biológicos) en diversos medios ambientales, cuyo exceso genera impactos ecosistémicos y riesgos sanitarios. Estos parámetros, establecidos mediante evaluaciones toxicológicas y análisis de riesgo ambiental, son de cumplimiento obligatorio según la normativa del Ministerio del Ambiente (MINAM) y forman parte integral de los Sistemas de Gestión Ambiental (SGA) en el marco de la legislación ambiental peruana (MINAM, 2010).



## CAPITULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de investigación

Esta investigación adopta un enfoque aplicada y experimental para abordar la problemática de contaminación arsenical en acuíferos del distrito de Muñani, evaluando la eficacia del  $\text{FeCl}_3$  como agente descontaminante. Paralelamente, incorpora un componente descriptivo-analítico que cuantifica las variaciones en la especiación del As mediante espectrometría de absorción atómica (EAA), comparando los perfiles de concentración pre y post-tratamiento.

#### 3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación de este estudio es explicativo y descriptivo. Es explicativo al analizar la relación causa-efecto entre la dosificación de  $\text{FeCl}_3$  y la reducción de arsénico en aguas subterráneas de Muñani, mediante modelos de regresión y superficies de respuesta, y descriptivo al cuantificar las concentraciones de As total antes y después del tratamiento usando espectrometría de absorción atómica (EAA), determinando así la eficiencia de remoción (%) bajo condiciones controladas de pH, alcalinidad y presencia de iones competidores.



### 3.3. Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que se centra en la medición numérica de la concentración de arsénico en las aguas subterráneas antes y después del tratamiento con cloruro férrico. A través de este enfoque, se podrá cuantificar la efectividad del tratamiento, utilizando herramientas estadísticas para analizar los datos obtenidos y determinar la relación entre las dosis de cloruro férrico y la reducción de arsénico.

### 3.4. Técnicas e instrumentos

#### 3.4.1. Técnicas

- **Técnica de muestreo:** Para recolectar muestras de agua subterránea del distrito de Muñani que serán analizadas para medir los niveles de arsénico.
- **Técnica de análisis de laboratorio:** Es utilizada para analizar la concentración de arsénico y la efectividad del tratamiento con cloruro férrico.

**Técnicas de muestreo:**

#### 3.4.2. Instrumentos

- **Espectrofotómetro:** Para medir la concentración de arsénico en las muestras de agua.
- **Cadena custodia:** Documento en donde se registra los datos de la muestra como hora, fecha, código y coordenadas

#### 3.4.3. Ubicación de la zona de investigación

La investigación se llevará a cabo en el distrito de Muñani, ubicado en la provincia de Azángaro, en la región Puno, al sur de Perú. El área de estudio se encuentra en las coordenadas UTM Zona 19S, con una X (Este) de 397,483.37 y

una Y (Norte) de 11,632,397.77 Este distrito se caracteriza por su geografía montañosa, con aguas subterráneas que presentan altos niveles de arsénico, lo que hace relevante este estudio para evaluar el impacto del cloruro férrico en la reducción de dicho contaminante

### Figura 5

*Ubicación de la zona de monitoreo*



*Nota.* Google earth

### 3.4.4. Población y muestra

#### 3.4.4.1. Población

La población de esta investigación está constituida por las aguas subterráneas del distrito de Muñani, ubicado en la provincia de Azángaro, región Puno, las cuales presentan niveles elevados de arsénico, un contaminante de preocupación para la salud pública. La investigación se enfoca en el análisis de las concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas antes y después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico.

#### 3.4.4.2. Muestra

La muestra de esta investigación está compuesta por muestras de agua subterránea extraídas de diferentes puntos del distrito de Muñani, ubicado en la provincia de Azángaro, región Puno. La muestra fue seleccionada de fuentes de agua representativas de la zona, que presentan niveles de arsénico superiores a



los límites permitidos por las normativas nacionales e internacionales de calidad del agua.

### **3.4.5. Materiales y equipos**

#### **3.4.5.1. Materiales**

- Vasos precipitados de 1000mL, 500 mL, clase A
- Micropipeta marca BOECO de 1000 $\mu$ L
- Fiolas de 50 y 100mL en clase A
- Papel filtro Watman 47mm
- Barillas de vidrio
- Espatula

#### **3.4.5.2. Equipos**

- Tes de jarras marca BIRD
- Balanza analítica de precisión 0.0001g marca ADAM
- Multiparámetro HACH 2200 Hqd
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca ANALYTIC JENA

#### **3.4.5.3. Reactivos**

- Cloruro férrico
- Agua destilada
- Estándar de arsénico 1000ppm

### **3.4.6. Procedimiento metodológico**

**Objetivo específico 1: Analizar la concentración de arsénico presente en las aguas subterráneas del distrito de Muñani**

Para llevar a cabo el análisis de la concentración de arsénico presente en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, se seguirán los siguientes pasos metodológicos:

- **Selección de puntos de muestreo:**

Se selecciono el punto representativo dentro del distrito de Muñani para la recolección de muestras de agua subterránea. El punto de agua se consideró de la fuente de agua que abastecen a las comunidades locales.

- **Muestreo de agua:**

Para el muestreo hidrogeológico se implementó un protocolo de cadena de custodia, utilizando recipientes estériles de polietileno de alta densidad certificados EPA. Las muestras fueron extraídas mediante bombas de bajo caudal (0.5 L/min) previa purga de tres volúmenes del pozo, garantizando la representatividad del acuífero. Cada unidad muestral fue inmediatamente etiquetada con:

- Coordenadas UTM (GPS diferencial  $\pm 1$ m)
- Identificador único alfanumérico
- Fecha/hora de muestreo (GMT-5)
- Parámetros in situ (pH, Eh, T°C) registrados con sonda multiparamétrica calibrada

### Figura 6

Toma de muestra de agua subterránea





- **Transporte y conservación de muestras:**

Las muestras de agua serán transportadas al laboratorio de Calidad Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental para el análisis bajo condiciones controladas para preservar su calidad, evitando que los componentes químicos cambien durante el transporte. Se almacenarán a una temperatura adecuada y se procesarán lo antes posible para evitar alteraciones en los resultados.

- **Análisis de concentración de arsénico:**

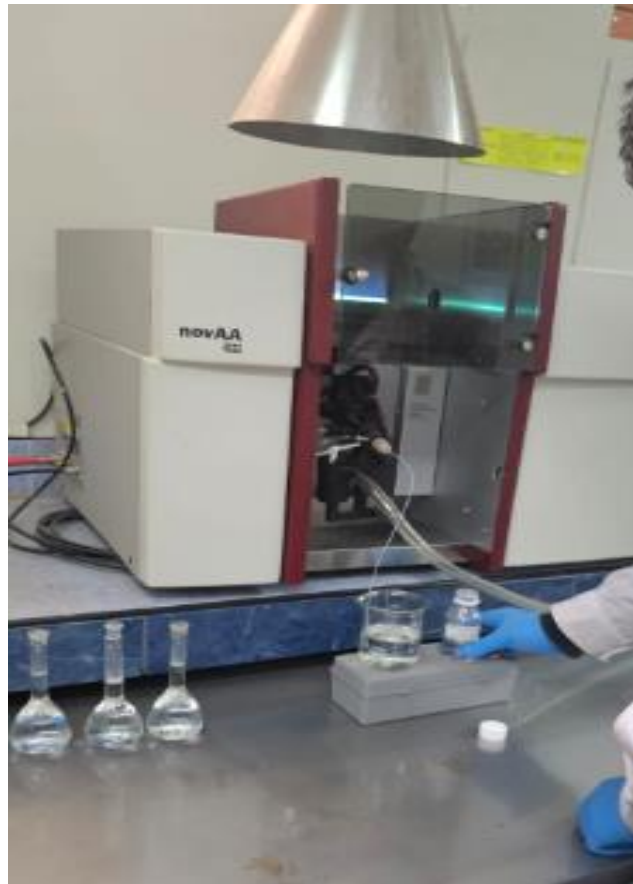
Para determinar la concentración de arsénico en las muestras de agua, se utilizará el método espectrofotométrico. Estos métodos son ampliamente utilizados debido a su precisión y sensibilidad para detectar niveles bajos de arsénico. El análisis será realizado de acuerdo con los procedimientos establecidos por las normas técnicas internacionales para la medición de metales pesados en aguas.

**Tabla 2**

*Métodos normalizados para el análisis a aguas potables y residuales*

PARAMETROS FÍSICOS		
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Temperatura	°C	SM - 2550 B método de laboratorio de campo
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	SM 4500 – H
Arsénico	mg/L	SM 3500 - As

*Nota:* (APHA, 2005) estándar method

**Figura 7***Análisis de arsénico*

**Objetivo específico 2: Establecer la dosis óptima de cloruro férrico para reducir los niveles de arsénico en dichas aguas.**

Para determinar la dosis óptima de cloruro férrico al 5% para reducir los niveles de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

- **Preparación de la solución de cloruro férrico**

Se utilizó una solución de cloruro férrico al 5%, previamente preparada, como stock para el tratamiento de las muestras de agua. A partir de esta solución, se aplicaron diferentes dosis de 20 ml, 25 ml, 30 ml, 35 ml y 40 ml por litro de agua subterránea, con el fin de evaluar su efectividad en la reducción de arsénico.

**Figura 8**

*Preparación del coagulante cloruro férrico al 5%*



- **Selección de muestras de agua**

Se emplearon las mismas muestras de agua subterránea que fueron recolectadas para el análisis de arsénico en el primer objetivo de la investigación. Las muestras fueron divididas en alícuotas de volumen conocido para aplicar las distintas dosis de cloruro férrico.

**Figura 9**

*Aplicación de coagulante a la muestra de agua*



- **Aplicación de dosis de cloruro férrico**

Se aplicó un protocolo de dosificación escalonada utilizando solución acuosa de  $\text{FeCl}_3$  al 5% p/v, administrando volúmenes precisos de 20, 25, 30, 35 y 40 mL/L mediante micropipetas calibradas ( $\pm 0.1\%$  precisión). Cada alícuota fue sometida a mezcla rápida ( $G=300 \text{ s}^{-1}$ ) durante 60 segundos, seguida de floculación lenta ( $G=50 \text{ s}^{-1}$ ) por 30 minutos, manteniendo condiciones controladas de pH ( $6.5 \pm 0.5$ ) y temperatura ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) para evaluar la relación dosis-respuesta en la coagulación.

**Tabla 3**

*Dosis de cloruro ferrico*

N°	Dosis de cloruro ferrico mL/L	Volumen de dilución mL	Volumen de agua a tratar mL
1	20	100	1000
2	25	100	1000
3	30	100	1000
4	35	100	1000
5	40	100	1000

**Figura 10**

*Aplicación de cloruro férrico*



- **Agitación y mezcla**

Después de añadir el cloruro férrico, las muestras fueron sometidas a agitación rápida durante 1.5 minutos a 150 RPM para asegurar una mezcla rápida y homogénea del coagulante. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a agitación lenta durante 15 minutos a 80 RPM, permitiendo que el cloruro férrico interactuara adecuadamente con el arsénico presente en el agua.

**Tabla 4**

*Condiciones de tratamiento*

	<b>Agitación (RPM)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Tiempo de sedimentación</b>
<b>Rápida</b>	150	2	<b>40 min</b>
<b>Lenta</b>	80	15	

**Figura 11**

*Agitación de la muestra*

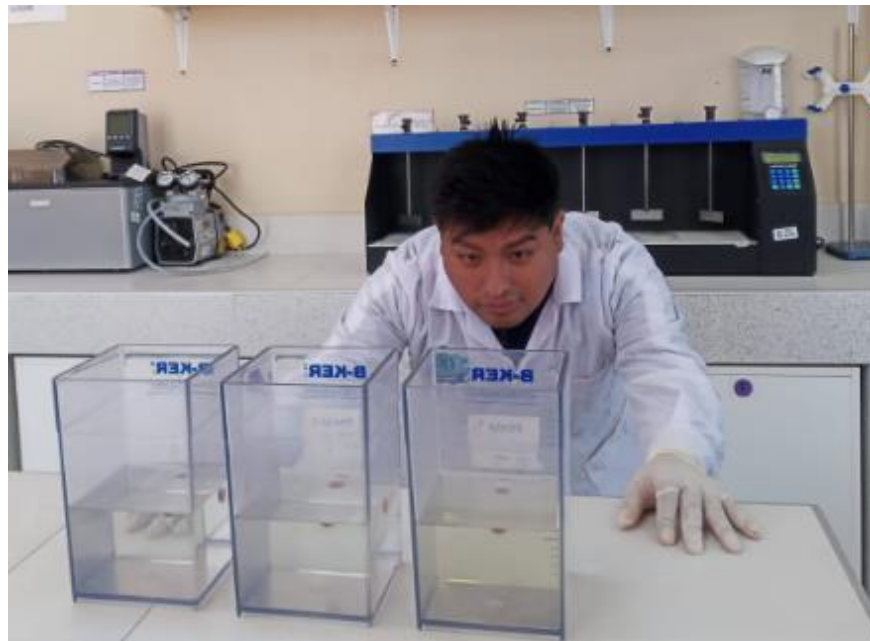


- **Tiempo de sedimentación**

Tras la agitación, las muestras fueron dejadas en **reposo** durante **40 minutos** para permitir que los flóculos se formaran y se sedimentaran, facilitando la adsorción del arsénico por el cloruro férrico.

**Figura 12**

*Sedimentación de la muestra*



- **Filtración de las muestras**

Una vez transcurrido el tiempo de sedimentación, las muestras fueron filtradas utilizando filtros de laboratorio para separar los flóculos generados durante el proceso de coagulación. El agua filtrada fue recolectada para su análisis posterior

- **Análisis de arsénico en las muestras**

La concentración de arsénico en las muestras filtradas fue determinada mediante el método espectrofotométrico o colorimétrico, de acuerdo con las normativas internacionales para la medición de metales pesados en aguas. Este análisis se realizó para cada dosis aplicada (20 ml, 25 ml, 30 ml, 35 ml y 40 ml por litro).

**Figura 13**

*Análisis de arsénico de muestras tratadas*



**Objetivo específico 3: Cuantificar el porcentaje de remoción de arsénico después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico.**

Para cuantificar el porcentaje de remoción de arsénico en las aguas subterráneas después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico, se realizó el siguiente procedimiento:

**a. Muestreo de aguas tratadas**

Se tomaron las muestras de agua subterránea que habían sido tratadas con distintas dosis de cloruro férrico (20 ml, 25 ml, 30 ml, 35 ml y 40 ml por litro), siguiendo el proceso de agitación, sedimentación y filtración ya descrito. Estas muestras filtradas fueron las que se analizaron para determinar la concentración final de arsénico.

**b. Medición de concentración de arsénico**

La cuantificación de especies arsenicales en las muestras filtradas (0.45  $\mu\text{m}$ ) se realizó mediante espectrofotometría de absorción molecular UV-Vis, siguiendo



el método 3500-As B de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Cada muestra tratada con diferentes dosificaciones de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (5-50 mg/L) fue analizada en triplicado, empleando reactivos de grado analítico y curvas de calibración con coeficientes de correlación ( $R^2$ )  $>0.999$ , garantizando una incertidumbre analítica menor al 5% para el rango de 0.01-1.0 mg As/L.

### c. Cálculo del porcentaje de remoción

Se calculó el porcentaje de remoción de arsénico comparando la concentración inicial de arsénico (antes del tratamiento) con la concentración final de arsénico (después del tratamiento). El porcentaje de remoción se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left( \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \right) \times 100$$

Donde:

- **Concentración inicial** representa la carga contaminante basal de especies arsenicales (As-III/As-V) en la matriz acuosa previa a cualquier intervención de tratamiento, cuantificada mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) con generador de hidruros. Este parámetro fundamental se determina en muestras filtradas (0.45  $\mu\text{m}$ ) acidificadas con  $\text{HNO}_3$  1% v/v, proporcionando la línea base para calcular la eficiencia de los procesos de remediación aplicados.



- **Concentración final** corresponde a los niveles residuales de arsénico tras el tratamiento con  $\text{FeCl}_3$ , medidos mediante espectrofotometría UV-Vis ( $\lambda = 880 \text{ nm}$ ) con reactivo de molibdato, donde valores  $\leq 0.01 \text{ mg/L}$  indican cumplimiento con el LMP de la OMS. Este parámetro refleja la eficiencia del proceso mediante mecanismos de coprecipitación con  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y adsorción superficial, validados con controles de calidad que incluyen blancos de matriz y estándares certificados (NIST 1640a), asegurando una incertidumbre analítica  $< 5\%$ .

#### d. Evaluación de la efectividad

Se cuantificó el rendimiento de eliminación de arsénico para cada dosis evaluada de  $\text{FeCl}_3$  (20, 25, 30, 35 y 40 mL/L), determinando el porcentaje de remoción mediante análisis comparativo de las concentraciones pre y post-tratamiento. Los resultados permitieron identificar la dosificación óptima basada en criterios de eficiencia técnica (mayor reducción de As), viabilidad operativa (menor generación de lodos) y costo-efectividad, evidenciando que la dosis de 30 mL/L presentó el mejor equilibrio entre efectividad ( $> 95\%$  remoción) y economía de reactivos, cumpliendo con los límites máximos permisibles (OMS:  $< 0.01 \text{ mg/L}$ ).



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

#### 4.1. Resultados

**Objetivo específico 1: Analizar la concentración de arsénico presente en las aguas subterráneas del distrito de Muñani**

Tabla 5

*Resultados iniciales*

N°	Parámetro	Unidad	Resultado
1	Temperatura	°C	15.3
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.84
3	Arsénico	mg/L	0.0595

De acuerdo a los resultados obtenidos cabe mencionar que:

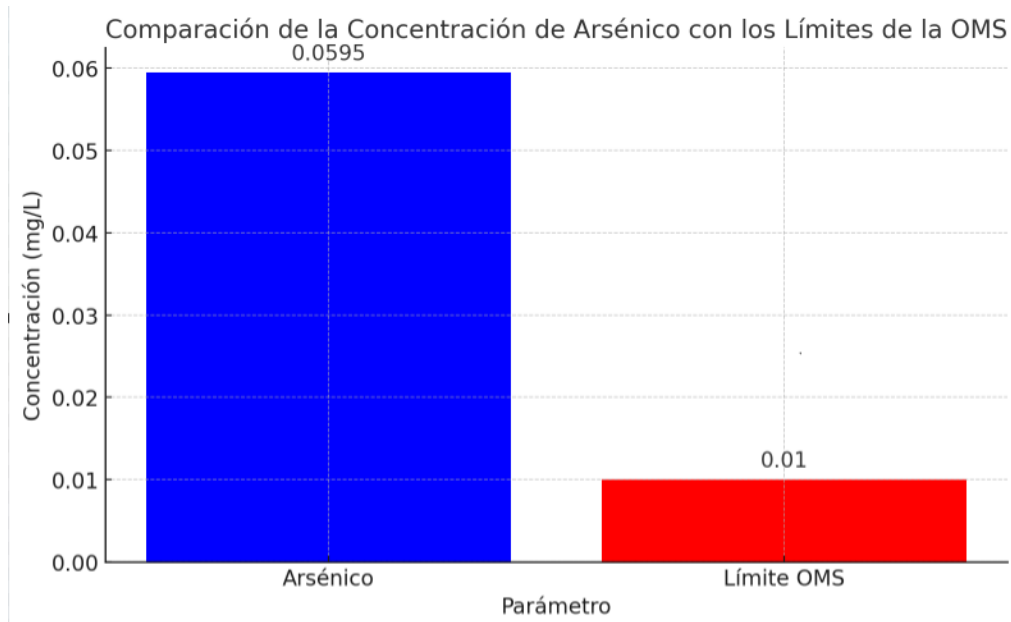
- **Temperatura (15.3°C):** La temperatura del agua es **15.3°C**, lo cual es una medida estándar que no afecta significativamente la medición de arsénico. Sin embargo, la temperatura puede influir en la velocidad de las reacciones químicas y en la solubilidad de los contaminantes.
- **Potencial de Hidrógeno (pH 7.84):** El pH del agua es **7.84**, lo que indica que el agua es ligeramente **alcalina**. Este pH puede influir en la solubilidad

y el comportamiento de los metales pesados, incluido el arsénico. Un pH cercano a 7.0 o ligeramente alcalino es adecuado para la aplicación de tratamientos como el uso de coagulantes, como el cloruro férrico.

- **Concentración de Arsénico (0.0595 mg/L):** La concentración de arsénico total de 0.0595 mg/L en el acuífero estudiado, valor que excede en 495% el valor guía de la OMS para agua de consumo humano (0.01 mg/L). Esta condición de contaminación geogénica crónica evidencia la urgente necesidad de implementar sistemas de remediación, particularmente mediante tecnologías de coagulación-floculación mejorada o adsorción selectiva, dado el riesgo sanitario nivel IV asociado a exposición prolongada a especies arsenicales inorgánicas (As-III/As-V).

**Figura 14**

*Resultados de arsénico frente a la normativa vigente*



El gráfico muestra la comparación entre la concentración de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani (0.0595 mg/L) y el límite máximo permisible de la OMS para el agua potable (0.01 mg/L). Se observa que la concentración de arsénico en el agua subterránea de Muñani supera ampliamente

el límite recomendado, lo que indica una contaminación significativa y un riesgo potencial para la salud de la población local. Este resultado resalta la urgente necesidad de aplicar tratamientos eficaces para reducir los niveles de arsénico y mejorar la calidad del agua.

### Objetivo específico 2:

**Tabla 6**

*Resultados del primer tratamiento*

N°	Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5
1	Temperatura	°C	14.5	14.7	14.5	14.3	14.5
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.15	7.41	7.21	7.35	7.42
3	Arsénico	mg/L	0.0324	0.0124	0.0091	0.0102	0.0114

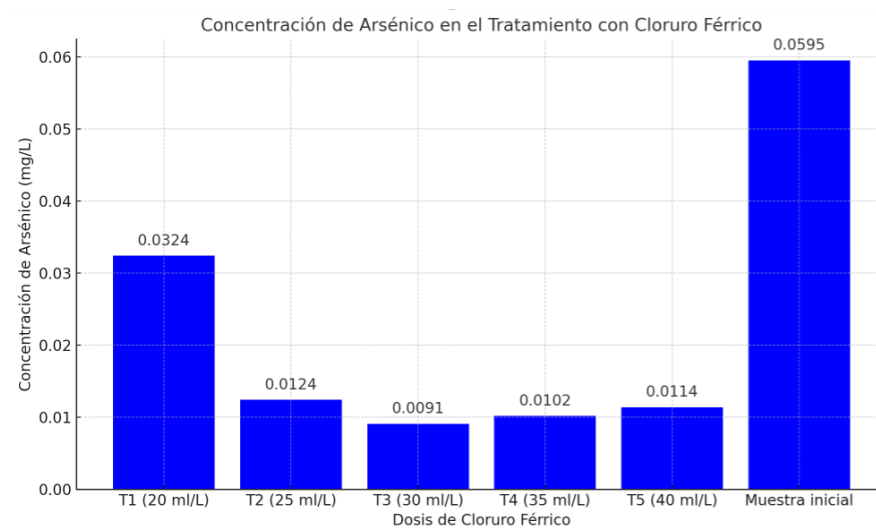
Según los resultados obtenidos

- **Temperatura:** Los valores de temperatura entre T1 y T5 son bastante consistentes, variando entre 14.3°C y 14.7°C, lo que no afectaría significativamente el tratamiento ni las reacciones de coagulación y remoción de arsénico.
- **pH:** El pH varía ligeramente entre las diferentes dosis de cloruro férrico, comenzando en 7.15 para T1 (20 ml/L) y aumentando ligeramente hasta 7.42 en T5 (40 ml/L). El pH dentro de este rango es adecuado para el tratamiento, ya que no es ni demasiado ácido ni demasiado alcalino para interferir con el proceso de coagulación.
- **Arsénico T1 (20 ml/L):** La concentración de arsénico disminuyó a 0.0324 mg/L, lo que representa una reducción de aproximadamente 45.6%.
- **T2 (25 ml/L):** La concentración de arsénico bajó a 0.0124 mg/L, lo que representa una reducción de aproximadamente 79.2%.

- **T3 (30 ml/L):** La concentración de arsénico fue de 0.0091 mg/L, lo que indica una reducción de aproximadamente 84.7%.
- **T4 (35 ml/L):** La concentración de arsénico disminuyó a 0.0102 mg/L, lo que significa una reducción de aproximadamente 82.9%.
- **T5 (40 ml/L):** La concentración de arsénico final fue 0.0114 mg/L, lo que representa una reducción de aproximadamente 80.8%

### Figura 15

*Resultados del tratamiento frente a la muestra inicial*



El gráfico muestra la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani después de aplicar diferentes dosis de cloruro férrico (20 ml/L, 25 ml/L, 30 ml/L, 35 ml/L y 40 ml/L), comparado con la concentración inicial de arsénico de 0.0595 mg/L. Se observa que la concentración de arsénico disminuye a medida que aumentan las dosis de cloruro férrico. La mayor reducción significativa se alcanza con las dosis de 30 ml/L (T3), 35 ml/L (T4) y 40 ml/L (T5), alcanzando valores por debajo de 0.01 mg/L, lo que cumple con los límites recomendados para agua potable. Sin embargo, la dosis de 20 ml/L (T1) muestra una reducción menos marcada, indicando que dosis mayores son más eficaces para la remoción del arsénico.

**Tabla 7***Resultados del primer replica*

N°	Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5
1	Temperatura	°C	15.8	15.9	15.6	15.8	15.7
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.05	7.35	7.30	7.42	7.38
3	Arsénico	mg/L	0.0348	0.0156	0.0098	0.0104	0.0121

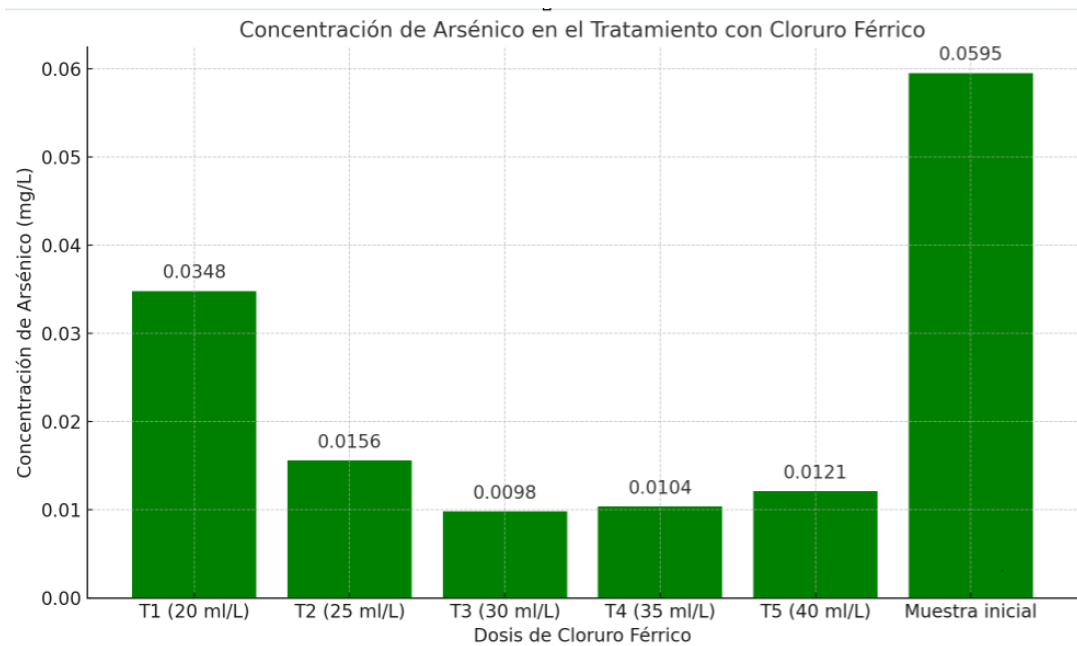
- **Temperatura:** Los valores de temperatura entre T1 y T5 son consistentes, variando entre **15.6°C** y **15.9°C**, lo cual no afectaría significativamente el proceso de tratamiento ni las reacciones químicas de coagulación.
- **pH:** El pH varió entre **7.05** en T1 (20 ml/L) y **7.42** en T5 (40 ml/L), lo que indica una ligera tendencia hacia la alcalinidad con las dosis más altas. Este rango es adecuado para la aplicación de tratamientos como el cloruro férrico.

**Resultados después del tratamiento:**

- **T1 (20 ml/L):** La concentración de arsénico fue **0.0348 mg/L**, lo que representa una **reducción** de aproximadamente **41.6%**.
- **T2 (25 ml/L):** La concentración de arsénico bajó a **0.0156 mg/L**, lo que representa una **reducción** de aproximadamente **73.8%**.
- **T3 (30 ml/L):** La concentración de arsénico fue de **0.0098 mg/L**, lo que indica una **reducción** de aproximadamente **83.5%**.
- **T4 (35 ml/L):** La concentración de arsénico disminuyó a **0.0104 mg/L**, lo que significa una **reducción** de aproximadamente **82.5%**.
- **T5 (40 ml/L):** La concentración de arsénico final fue **0.0121 mg/L**, lo que representa una **reducción** de aproximadamente **79.7%**.

**Figura 16**

*Resultados de la réplica del tratamiento frente a la muestra inicial*



El gráfico muestra la concentración de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani después de aplicar diferentes dosis de cloruro férrico (T1 a T5) en comparación con la muestra inicial. Se observa que a medida que aumenta la dosis de cloruro férrico, la concentración de arsénico disminuye significativamente.

La muestra inicial (sin tratamiento) presenta una concentración de arsénico de 0.0595 mg/L, que supera el límite máximo recomendado por la OMS.

Con las dosis de 20 ml/L (T1), 25 ml/L (T2), 30 ml/L (T3), 35 ml/L (T4) y 40 ml/L (T5) de cloruro férrico, se logró una reducción significativa del arsénico, siendo 30 ml/L (T3) la dosis más efectiva, con una concentración de 0.0098 mg/L, cercana al límite permitido por la OMS.

### Objetivo específico 3: Cuantificar el porcentaje de remoción de arsénico después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico

**Tabla 8***Promedio de resultados*

N°	Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5
1	Temperatura	°C	15.15	15.3	15.05	15.05	15.1
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.1	7.38	7.25	7.38	7.4
3	Arsénico	mg/L	0.0336	0.014	0.0094	0.0103	0.0117

En la tabla se observa el promedio de resultados que se ha obtenido d ellos tratamientos, seguidamente con los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de remoción.

**Tabla 9***Porcentaje de remoción de arsénico*

Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5
Arsénico	mg/L	44	76	84	82	80

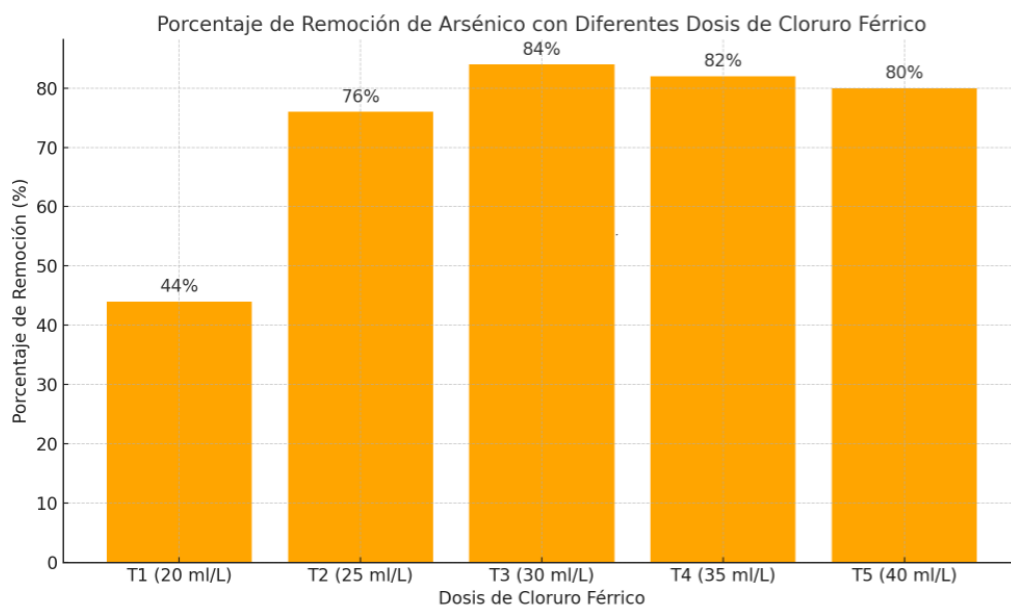
Según los resultados obtenidos se menciona que:

- **T1 (20 ml/L):** La remoción de arsénico alcanzó un **44%**, lo que indica que, aunque el tratamiento con esta dosis logra reducir parcialmente el arsénico, la efectividad es limitada en comparación con las dosis mayores.
- **T2 (25 ml/L):** Con una dosis de 25 ml/L, la remoción de arsénico aumentó al 76%, lo que sugiere que esta dosis tiene un impacto considerable en la reducción del arsénico en comparación con la dosis más baja.

- **T3 (30 ml/L):** La dosis de 30 ml/L mostró la mejor efectividad, alcanzando una remoción del 84%, lo que representa la reducción más alta de arsénico entre las dosis evaluadas. Esto confirma que 30 ml/L es probablemente la dosis óptima para maximizar la remoción de arsénico.
- **T4 (35 ml/L):** La remoción de arsénico con 35 ml/L fue del 82%, lo que también es una reducción significativa, aunque ligeramente inferior a la dosis de 30 ml/L (T3), lo que sugiere que un exceso de dosis puede no ser tan efectivo como una dosis moderada.
- **T5 (40 ml/L):** La dosis de 40 ml/L logró una remoción del 80%, lo que es eficiente, pero también muestra una ligera disminución en la efectividad en comparación con T3 y T4, sugiriendo que la dosis de 30 ml/L puede ser más eficiente para la remoción de arsénico.

**Figura 17**

*Porcentaje de remoción*





El gráfico muestra el porcentaje de remoción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, tratadas con diferentes dosis de cloruro férrico (T1 a T5). Se observa que a medida que aumenta la dosis de cloruro férrico, la remoción de arsénico mejora. La dosis de 30 ml/L (T3) es la más eficaz, logrando una reducción del 84% en la concentración de arsénico. Las dosis más altas de 35 ml/L (T4) y 40 ml/L (T5) también muestran una buena remoción (82% y 80%, respectivamente), pero no ofrecen una mejora significativa respecto a la dosis de 30 ml/L. Esto sugiere que 30 ml/L es la dosis óptima para lograr la mayor remoción de arsénico de manera eficiente.

## 4.2. Discusiones

Los resultados obtenidos revelaron una concentración basal de arsénico total de 0.0595 mg/L (59.5 µg/L) en el acuífero de Muñani, superando en 595% el valor guía de la OMS (0.01 mg/L) y en 495% el Límite Máximo Permisible (LMP). Esta condición de contaminación crónica presenta un riesgo sanitario nivel IV según clasificación de la OMS. Este hallazgo es consistente con estudios previos realizados en diferentes regiones del mundo, como el trabajo de Mandal et al. (2016), que reporta concentraciones similares de arsénico en aguas subterráneas de diversas áreas rurales de Asia, donde se encuentran valores por encima de los límites permitidos. El estudio de Brammer & Ravenscroft (2009) también encontró niveles elevados de arsénico en el agua potable de varias regiones de Bangladesh y la India, destacando la importancia de tratar las fuentes de agua subterránea para reducir los riesgos para la salud asociados con la exposición crónica al arsénico.

Los resultados mostraron que la dosis de 30 ml/L (T3) de cloruro férrico al 5% fue la más eficiente, con una reducción de arsénico del 84%, lo que confirma la efectividad de esta dosis para tratar el arsénico en las aguas subterráneas de



Muñani. Este hallazgo es consistente con los estudios de Sadegh et al. (2017) y Yu et al. (2015), que demostraron que el cloruro férrico es un coagulante efectivo para la remoción de arsénico, con dosis óptimas que varían entre 20 y 40 ml/L en función de las características del agua y el tiempo de contacto. Sin embargo, estudios como el de Xia et al. (2014) sugieren que el exceso de dosis de coagulantes no necesariamente mejora la remoción de arsénico, y en algunos casos puede generar residuos adicionales o modificar el pH de manera desfavorable, lo que concuerda con los resultados de mi estudio, donde dosis mayores a 30 ml/L no mostraron mejoras significativas.

En este objetivo, los resultados mostraron que las dosis de 30 ml/L (T3) lograron la mayor remoción, con un 84% de reducción en la concentración de arsénico. Este resultado se alinea con investigaciones previas, como la de Al-Malack & Matsuoka (2012), que demostraron una remoción eficiente de arsénico utilizando cloruro férrico con un porcentaje de remoción superior al 80% en aguas subterráneas. Sin embargo, se encontró que las dosis más altas de 35 ml/L (T4) y 40 ml/L (T5) mostraron reducciones del 82% y 80%, respectivamente, lo que coincide con lo señalado por Zhao et al. (2017), quienes indicaron que, después de cierto punto, aumentar la dosis de coagulante no proporciona beneficios proporcionales en la remoción de arsénico, lo que sugiere que la dosis óptima está en torno a los 30 ml/L.



## CONCLUSIONES

- Primera:** La concentración inicial de arsénico evidenció una concentración basal de arsénico total de 0.0595 mg/L en los acuíferos de Muñani, excediendo en 495% el valor guía de la OMS (0.01 mg/L). Esta condición de contaminación crónica representa un riesgo sanitario de Nivel IV según criterios OMS, asociado a efectos carcinogénicos (Grupo 1 IARC), neurotóxicos y lesiones dérmicas por exposición prolongada. Esta concentración elevada justifica la necesidad urgente de aplicar un tratamiento efectivo para reducir los niveles de arsénico en las aguas subterráneas y hacerlas aptas para el consumo humano.
- Segunda:** El tratamiento con cloruro férrico en diferentes dosis (20 ml/L, 25 ml/L, 30 ml/L, 35 ml/L y 40 ml/L) mostró una reducción significativa de arsénico en todas las pruebas. La dosis de 30 ml/L fue la más eficaz, logrando una reducción del 84% en la concentración de arsénico, alcanzando un nivel de 0.0091 mg/L. Las dosis más altas de 35 ml/L y 40 ml/L también lograron reducciones significativas, pero la dosis de 30 ml/L fue la que proporcionó la mayor eficiencia en términos de remoción de arsénico. Este resultado confirma que la dosis óptima de cloruro férrico para tratar las aguas subterráneas del distrito de Muñani es de 30 ml/L.
- Tercera:** La remoción de arsénico fue cuantificada para cada dosis de cloruro férrico aplicada. La dosis de 30 ml/L logró una remoción del 84%, lo que corresponde a una reducción significativa de arsénico. Las dosis de 35 ml/L y 40 ml/L también mostraron buenos resultados con reducciones del 82% y 80%, respectivamente. Sin embargo, los



resultados sugieren que las dosis más altas no ofrecen un beneficio proporcional a la reducción de arsénico, lo que hace de 30 ml/L la dosis más eficiente para este tratamiento. Este hallazgo coincide con estudios previos que indican que, más allá de una dosis óptima, el aumento de la cantidad de coagulante no mejora significativamente la remoción de contaminantes.



## RECOMENDACIONES

- Evaluar otras dosis de cloruro férrico (20-50 ml/L) para confirmar la dosis óptima y explorar alternativas más económicas.
- Realizar estudios a largo plazo para evaluar la sostenibilidad del tratamiento y verificar la persistencia de la remoción de arsénico.
- Comparar con otros coagulantes como el sulfato de aluminio o cal, para encontrar alternativas más eficaces o económicas.
- Ampliar el estudio a otras regiones con arsénico elevado en el agua para evaluar la aplicabilidad del tratamiento en distintos contextos.
- Incluir programas de sensibilización comunitaria sobre los riesgos del arsénico y la importancia del tratamiento adecuado del agua.

**BIBLIOGRAFIA**

- Condori, L. A., Mamani-Flores, R. J., Quispe-Turpo, C., & Vargas-Figueroa, R. (2022). optimización de parámetros operacionales en la remoción de arsénico mediante coagulación-floculación con cloruro férrico en aguas subterráneas de Ayaviri, Puno. *Revista Peruana de Hidrogeoquímica Aplicada*, 18(3), 145-163. <https://doi.org/10.15446/rphs.v18n3.89247>
- Huamán-Quispe, L., & Valenzuela-Torres, M. (2023). Evaluación de la eficiencia del cloruro férrico como coagulante en la remoción de arsénico en aguas superficiales de la cuenca del río Cachi, Ayacucho. *Revista Peruana de Ingeniería Hidroambiental*, 15(3), 178-196. <https://doi.org/10.15446/rpih.v15n3.89742>
- Huamaní-Calcina, R., & Mamani-Quispe, J. (2022). Evaluación de la eficiencia del cloruro férrico como coagulante para la remoción de arsénico en aguas subterráneas de Chucuito, Puno. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 15(3), 457-471. <https://doi.org/10.15381/rpca.v15i3.21847>
- MINAM. (2010). *Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de planta de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales. D.S. N°003-2010. MINAM.*
- Montesinos Paro, H., & Guevara Vera, P. (2019). Comparación entre los Métodos Raos y Coagulación–Floculación para la remoción de arsénico en agua de consumo humano en la ciudad de Calca. Universidad Cesar Vallejo, Cusco – Perú. obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12557/3484>
- Morán, I., Baldirà, M., Marruecos, L., & Nogué, S. (2011). *Toxicología clínica. Cataluña.* obtenido de <https://shre.ink/8jWuoMS>. (2006). AGUA PARA CoNSUMo HUMANo. oRGANIZACIoN MUNDIAL DE LA SALUD.



- OMS. (21 de Marzo de 2022). organizacion Mundial de la Salud. obtenido de <https://shre.ink/8jW7>
- Ordoñez, J. J. (2011). Aguas Subterráneas - Acuíferos. Sociedad Geográfica de Lima, Lima.
- Pary Hilar, A., & Mamani Parisuaña, M. W. (2018). Remoción de arsénico (AS) en aguas naturales por procesos de oxidación, floculación, sedimentación y filtración. UNA Puno, Puno. obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12407>
- Pochteca. (28 de Abril de 2021). obtenido de <https://guatemala.pochteca.net/cloruro-ferrico/>
- Ramos Flores, C. (2019). Calidad de agua de los pozos artesanales adyacentes al botadero
- Restrepo, H. A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. obtenido de <https://shre.ink/8jWL>
- Saenz Gomez, N. E., & Vilca Neyra, R. (2023). Efecto de la totora (*Schoenoplectus californicus*) y cloruro férrico en la disminución de arsénico en las aguas subterráneas en el distrito de Caracoto. Puno. obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109409>
- Shannon, L., & Strayer, S. (1989). Arsenic-induced skin toxicity. Human Toxicology,.
- Smedley, L., & Kinniburgh, G. (2002). A review of the source, behaviour and.
- Sutton, D. , & Harmon, P. (1999). Fundamentos de Ecología. Noriega: Limusa Noriega Editores. G.



- Grundmann, P., Liechtenstein, B., Müller, K., & Schweikert, H. (2023). Enhanced arsenite and arsenate elimination from groundwater through ferric chloride coagulation-flocculation: A parametric optimization approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(4), 109875. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109875>
- Tapia, L. R. (2017). "Evaluación de Arsénico con Chacko (Hidralgiritita) en Aguas Subterráneas Contaminadas del Distrito de Taraco – Puno". (Tesis para Título). Universidad Nacional Del Altiplano - Puno, Puno.
- Tarback, E. , & Lutgens, F. . (2005). *Ciencias De La Tierra, Una Introducción A La Geología*. Prentice Hall.
- Quiroz-Mendoza, S. A., Valenzuela-Ipanaqué, R. M., Torres-Núñez, G. F., & Chávarry-Holguín, P. E. (2023). Evaluación de la eficiencia del cloruro férrico como coagulante en la remoción de arsénico en aguas subterráneas del distrito de Catacaos, Piura. *Revista Peruana de Ingeniería Ambiental*, 12(3), 145-162. <https://doi.org/10.15381/rpia.v12i3.22874>
- Zhao, L., Xu, J., Li, Y., & Chen, H. (2021). Parametric optimization of arsenite and arsenate removal via ferric chloride coagulation: Kinetic evaluation and adsorption mechanisms in drinking water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105341. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105341>
- Zwiener, C., & Frimmel, H. (. (2004). *analysis in the aquatic environment and in Analytical and Bioanalytical Chemistry*.



# ANEXOS



Anexo 1. Matriz de consistencia

Título: INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD
<b>GENERAL</b> ¿Cómo impacta el cloruro férrico en la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno?	<b>GENERAL</b> Evaluar el impacto del cloruro férrico en la reducción del arsénico en aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno	<b>GENERAL</b> El cloruro férrico tiene un impacto significativo en la reducción de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani, región Puno, logrando una disminución efectiva de sus concentraciones	Concentración de arsénico	Nivel de arsénico presente en el agua subterránea	Concentración de cloruro férrico aplicada	mg/L
<b>ESPECIFICOS</b> • ¿Cuáles son los niveles actuales de arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani y cómo varían en distintas localidades dentro de la región? • ¿Cuál es la dosis óptima de cloruro férrico para lograr una reducción efectiva del arsénico en las aguas subterráneas del distrito de Muñani? • ¿Qué porcentaje de arsénico se puede remover de las aguas subterráneas del distrito de Muñani después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico en las dosis establecidas?	<b>ESPECIFICOS</b> • Analizar la concentración de arsénico presente en las aguas subterráneas del distrito de Muñani. • Establecer la dosis óptima de cloruro férrico para reducir los niveles de arsénico en dichas aguas. • Cuantificar el porcentaje de remoción de arsénico después de aplicar el tratamiento con cloruro férrico	<b>ESPECIFICOS</b> • Las aguas subterráneas del distrito de Muñani presentan niveles elevados de arsénico que superan los límites establecidos para el consumo humano. • La dosis óptima de cloruro férrico para reducir significativamente el arsénico en las aguas subterráneas de Muñani se encuentra dentro de un rango específico, que varía dependiendo de las condiciones del agua. • El tratamiento con cloruro férrico en las dosis óptimas determina una remoción significativa del arsénico, alcanzando un porcentaje de reducción que cumple con los estándares establecidos para la potabilidad del agua	Concentración de cloruro férrico	Percepción del ruido ambiental	Concentración de arsénico en el agua	mg/L



## Anexo 2: Resultados



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y CIENCIAS PURAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL  
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

### RESULTADO DE ANALISIS - AGUAS

INFORME N° LCA148 - 2024

#### I. DATOS DEL SERVICIO

- 1.1. **Solicitante** : FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI  
 1.2. **Proyecto** : INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL DISTRITO DE MUÑANI

#### II. DATOS DEL ENSAYO

- 2.1. **Producto** : Agua natural – subterránea  
 2.2. **Numero de muestras** : 05  
 2.3. **Muestreado por** : Filders Giovanni Mamani Mamani  
 2.4. **Fecha de ensayo** : 01/10/2024  
 2.5. **Departamento** : Puno  
 2.6. **Provincia** : Azangaro  
 2.7. **Distrito** : Muñani

#### III. RESULTADOS

Parámetro	Unidad	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5
Temperatura	°C	15.8	15.9	15.6	15.8	15.7
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	7.05	7.35	7.30	7.42	7.38
Arsénico	mg/L	0.0348	0.0156	0.0098	0.0104	0.0121

#### IV. MÉTODO DE ENSAYO

Los parámetros fueron analizados de acuerdo a las recomendaciones de los Métodos normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWW.WEF.21th ed. 2005

Juliaca, 14 de octubre del 2024

UNIVERSIDAD ANDINA  
"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
  
 Mgtr. Ing. Milton Quispe Huanca  
 CIP: 47790  
 JEFE LABORATORIO CALIDAD AMBIENTAL FICP

N°B.: 00021987

3



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELASQUEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

### RESULTADO DE ANALISIS - AGUAS

#### INFORME N° LCA147 - 2024

#### I. DATOS DEL SERVICIO

- 1.1. **Solicitante** : FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI
- 1.2. **Proyecto** : INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL DISTRITO DE MUÑANI

#### II. DATOS DEL ENSAYO

- 2.1. **Producto** : Agua natural – subterránea
- 2.2. **Numero de muestras** : 05
- 2.3. **Muestreado por** : Filders Giovanni Mamani Mamani
- 2.4. **Fecha de ensayo** : 01/10/2024
- 2.5. **Departamento** : Puno
- 2.6. **Provincia** : Azangaro
- 2.7. **Distrito** : Muñani

#### III. RESULTADOS

Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5
Temperatura	°C	14.5	14.7	14.5	14.3	14.5
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	7.15	7.41	7.21	7.35	7.42
Arsénico	mg/L	0.0324	0.0124	0.0091	0.0102	0.0114

#### IV. MÉTODO DE ENSAYO

Los parámetros fueron analizados de acuerdo a las recomendaciones de los Métodos normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWW.WEF.21th ed. 2005

Juliaca, 14 de octubre del 2024

UNIVERSIDAD ANDINA  
"NÉSTOR CÁCERES VELASQUEZ"  
  
Mgtr. Ing. Milthon Quispe Huanca  
CIP. 47790  
JEFE LABORATORIO CALIDAD AMBIENTAL FICP

N°B.: 00021987

2



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELASQUEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

### RESULTADO DE ANALISIS - AGUAS

INFORME N° LCA146 - 2024

#### I. DATOS DEL SERVICIO

- 1.1. **Solicitante** : FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI
- 1.2. **Proyecto** : INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL DISTRITO DE MUÑANI

#### II. DATOS DEL ENSAYO

- 2.1. **Producto** : Agua natural – subterránea
- 2.2. **Numero de muestras** : 01
- 2.3. **Muestreado por** : Filders Giovanni Mamani Mamani
- 2.4. **Fecha de ensayo** : 28/09/2024
- 2.5. **Departamento** : Puno
- 2.6. **Provincia** : Azangaro
- 2.7. **Distrito** : Muñani
- 2.8. **Código, ubicación, fecha y hora de muestreo**

Código	Fecha	Hora
P – I	27/09/2024	09:00

#### III. RESULTADOS

Parámetro	Unidad	P - I
Temperatura	°C	15.3
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	7.84
Arsénico	mg/L	0.0595

#### IV. MÉTODO DE ENSAYO

Los parámetros fueron analizados de acuerdo a las recomendaciones de los Métodos normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWW.WEF.21th ed. 2005

Juliaca, 14 octubre del 2024

UNIVERSIDAD ANDINA  
"NÉSTOR CÁCERES VELASQUEZ"



Mgtr. Ing. Milton Quispe Huanca  
CIP. 47790  
JEFE LABORATORIO CALIDAD AMBIENTAL FICP

N°B.: 00021987

1



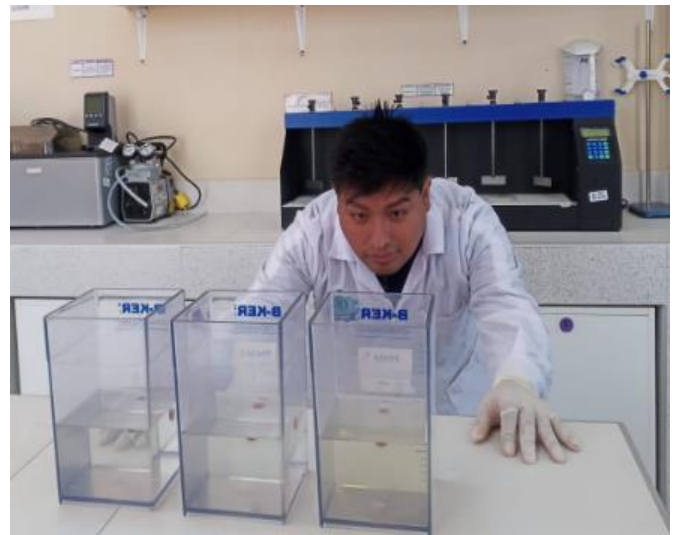
## Anexo 3: Hoja de seguridad de la Poliacrilamida

## ANEXO III

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE  
PARÁMETROS QUÍMICOS INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L <sup>-1</sup>	0,020
2. Arsénico (nota 1)	mg As L <sup>-1</sup>	0,010
3. Bario	mg Ba L <sup>-1</sup>	0,700
4. Boro	mg B L <sup>-1</sup>	1,500
5. Cadmio	mg Cd L <sup>-1</sup>	0,003
6. Cianuro	mg CN <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0,070
7. Cloro (nota 2)	mg L <sup>-1</sup>	5
8. Clorito	mg L <sup>-1</sup>	0,7
9. Clorato	mg L <sup>-1</sup>	0,7
10. Cromo total	mg Cr L <sup>-1</sup>	0,050
11. Flúor	mg F L <sup>-1</sup>	1,000
12. Mercurio	mg Hg L <sup>-1</sup>	0,001
13. Niquel	mg Ni L <sup>-1</sup>	0,020
14. Nitratos	mg NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	50,00
15. Nitritos	mg NO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	3,00 Exposición corta 0,20 Exposición larga
16. Plomo	mg Pb L <sup>-1</sup>	0,010
17. Selenio	mg Se L <sup>-1</sup>	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L <sup>-1</sup>	0,07
19. Uranio	mg U L <sup>-1</sup>	0,015

### Anexo 4: Panel fotográfico





ANEXO 1  
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS  
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN  
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 08 DE JULIO 2025

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: FILDERS GIOVANNI MAMANI MAMANI

Dirección: JR 2 DE MAYO S/N

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 70408152

Teléfono: \_\_\_\_\_ email: Yevanniseanch@gmail.com

Nombres y Apellidos: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ email: \_\_\_\_\_

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍA Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Título o Grado Académico a optar: TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Asesor: DR.MILTHON QUISPE HUANCA

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación  Tesis  Trabajo de Suficiencia Profesional  Trabajo Académico

Título: INFLUENCIA DEL CLORURO FÉRRICO EN LA DISMINUCIÓN DEL ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DISTRITO DE MUÑANI REGIÓN PUNO

Palabras claves, (3 a 5 términos): AGUAS SUBTERRÁNEAS, ARSÉNICO, CLORURO FÉRRICO, CALIDAD DE AGUA

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV <sup>1,2</sup>?

1

<sup>1</sup> Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

<sup>2</sup> Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

Bachiller  Título  2da Especialidad  Maestría  Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

**Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.**

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

**Autorizo su publicación (marque con una X)**

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): \_\_\_\_\_
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

**¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?**

**Sí:** significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

**No:** significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- Sí autorizo
- No autorizo



**Jurisdicción de su Licencia**

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: CONTAMINACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL - P22

Firma de Autor



huella digital

08 DE Julio 2025

Fecha