



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

T E S I S

**EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE CLORURO FÉRRICO Y
VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y REMOCIÓN DE ARSÉNICO
(III) EN AGUA CONTAMINADA, AÑO 2021**

PRESENTADA POR

BACHILLER KARINA RUTH AYCACHE ZAPATA

ASESOR:

MGR. ERIK EDWIN ALLCCA ALCA

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

MOQUEGUA - PERÚ

2023

CONTENIDO

	Pág.
Página de jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
CONTENIDO.....	iv
CONTENIDO DE TABLAS	vii
CONTENIDO DE FIGURAS	ix
CONTENIDO DE APÉNDICES	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2. Definición del problema	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación	4
1.4.1 Económica.....	4
1.4.2 Social	4

1.4.3 Ambiental.....	4
1.5. Alcances y limitaciones	5
1.5.1 Alcance	5
1.5.2 Limitaciones	5
1.6. Variables	5
1.6.1 Variable independiente	5
1.6.1 Variable dependiente	5
1.6.2 Operacionalización de variables	5
1.7 Hipótesis de la investigación	6
1.7.1 Hipótesis general.....	6
1.7.2 Hipótesis derivadas.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación.....	7
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	7
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3 Antecedentes regionales.	9
2.2 Bases teóricas	9
2.2.1 Arsénico.	9
2.2.7 Normativa legal.	28
2.3 Definición de términos	29

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación.....	31
------------------------------------	----

3.2. Diseño de la investigación	31
3.3. Población y muestra	33
3.3.1. Población.....	33
3.3.2. Muestra.	33
3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos	33

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados.....	37
4.1.1. Características físicas y químicas del estado inicial del agua.....	37
4.1.2. Aplicación del tratamiento propuesto.	38
4.2. Contratación de hipótesis	46
4.3. Discusión de resultados	47

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	50
5.2. Recomendaciones.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÉNDICES	57
MATRIZ DE CONSISTENCIA	66

CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de variables.....	6
Tabla 2 Propiedades físicas y químicas del arsénico	10
Tabla 3 Resultados del parámetro arsénico de los monitoreos de calidad de agua cuenca Moquegua – Ilo, 2018 - 2019.....	16
Tabla 4 Comparación de tecnologías para la remoción de arsénico del agua.	20
Tabla 5 Ficha de registro para la remoción de arsénico.....	35
Tabla 6 Ficha de registro de los parámetros fisicoquímicos	36
Tabla 7 Resultados de las características físicas y químicas del estado inicial del agua contaminada con arsénico.....	37
Tabla 8 Análisis de varianza para pH.....	38
Tabla 9 Prueba LSD Fisher de la velocidad de agitación (rpm) en relación al pH.....	39
Tabla 10 Análisis de varianza para conductividad eléctrica	40
Tabla 11 Análisis de varianza para turbidez.....	41
Tabla 12 Prueba LSD Fisher del coagulante (cloruro férrico) en relación a la turbidez.....	41
Tabla 13 Prueba LSD Fisher de las velocidades de agitación en relación a la turbidez.....	42
Tabla 14 Prueba LSD Fisher de interacción entre dosis de coagulante y velocidad de agitación.....	44
Tabla 15 Análisis de varianza para remoción de arsénico (III).....	45

Tabla 16 Prueba LSD Fisher de velocidad de agitación sobre la remoción de arsénico.....	45
---	----

CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructuras comunes del arsénico	9
Figura 2. Especies de arsénico (III) en relación al pH.....	13
Figura 3. Especies de arsénico (V) en relación al pH.....	13
Figura 4. Mapa con los principales problemas de contaminación por arsénico en Latinoamérica.....	15
Figura 5. Modelo del proceso de coagulación.....	23
Figura 6. Coagulación por adsorción	24
Figura 7. Coagulación por barrido	25
Figura 8. Diseño de la investigación	31
Figura 9. Diseño del tratamiento propuesto	32
Figura 10. Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y parámetro de pH.....	39
Figura 11. Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de dosis de coagulante (cloruro férrico) y parámetro de turbidez.....	42
Figura 12. Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y parámetro de turbidez.....	43
Figura 13. Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm), dosis de coagulante (cloruro férrico) y parámetro de turbidez.....	44
Figura 14. Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y remoción de arsénico.....	46

CONTENIDO DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A. Tablas	61
Tabla A1 Resultados de los parámetros fisicoquímicos	57
Apéndice B. Panel fotográfico	63
Fotografía B1. Oxidación de Arsénico (III) con el 10 % de solución de hidróxido de sodio (NaOH)	59
Fotografía B2. Pesaje del coagulante (Cloruro férrico)	59
Fotografía B3. Prueba de jarras para las muestras de arsénico con adición de cloruro férrico.....	60
Fotografía B4. Medición de parámetros físico - químicos de las muestras.....	60
Fotografía B5. Envasado y rotulado de muestras para análisis de laboratorio.....	61
Apéndice C. Ensayo de laboratorio.....	66

RESUMEN

La presente investigación titulada “Evaluación de la adición de cloruro férrico y velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (III) en agua contaminada, año 2021”, tuvo como objetivos: Determinar el contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) del agua. Evaluar la adición cloruro férrico (0, 50 y 100 mg/L) y velocidad de agitación (0, 100 y 200 rpm) en las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) en el agua con arsénico (III). Evaluar la adición del cloruro férrico (0, 50, 100 mg/L) y la velocidad de agitación (0,100, 200 rpm) en la remoción de arsénico (III) en el agua. Para lo cual se trabajaron con nueve tratamientos por tres repeticiones, siendo un total de 27 tratamientos, distribuidos en 1 L cada uno, a los cuales se le añadieron las diferentes dosis de coagulante (cloruro férrico) y fueron sometidas distintas velocidades de agitación. Los resultados para los parámetros fisicoquímicos fueron con una dosis de 100mg/L y una velocidad de 0 rpm se obtuvo pH de: 10,03, con una dosis de 100 mg/L y una velocidad de 0 rpm se obtuvo una conductividad eléctrica de: 573,5 μ S/cm, con una dosis de 0 mg/L y una velocidad de 200 rpm se obtuvo una turbidez de,05 UNT. En cuanto a la remoción de arsénico se obtuvo el mejor resultado con una dosis de 50 mg/L y una velocidad de agitación de 0 rpm, obteniendo un nivel de arsénico de 1,647 mg/L.

Palabras clave: cloruro férrico, velocidad de agitación, remoción de arsénico, tratamiento de aguas.

ABSTRACT

The present research work entitled "Evaluation of the addition of ferric chloride and stirring speed on the physicochemical properties and removal of arsenic (III) in contaminated water, year 2021", had the following objectives: To determine the arsenic (III) content and physicochemical properties (pH, electrical conductivity and turbidity) of water. To evaluate the addition of ferric chloride (0, 50 and 100 mg/L) and stirring speed (0, 100 and 200 rpm) on the physicochemical properties (pH, electrical conductivity and turbidity) of water containing arsenic (III). To evaluate the addition of ferric chloride (0, 50, 100 mg/L) and stirring speed (0,100, 200 rpm) on the removal of arsenic (III) in water. For this purpose, nine treatments with three replicates were used, for a total of 27 treatments, distributed in 1 L each, to which different doses of coagulant (ferric chloride) were added and different agitation speeds were used. The results for the physicochemical parameters were: with a dose of 100 mg/L and a speed of 0 rpm, a pH of 10.03 was obtained; with a dose of 100 mg/L and a speed of 0 rpm, an electrical conductivity of 573.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ was obtained; with a dose of 0 mg/L and a speed of 200 rpm, a turbidity of 0.05 UNT was obtained. As for arsenic removal, the best result was obtained with a dose of 50 mg/L and an agitation speed of 0 rpm, obtaining an arsenic level of 1.647.

Key words: ferric chloride, stirring speed, arsenic removal, water treatment.

INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de la población durante en los últimos periodos está ocasionando el aumento del consumo de agua con la finalidad de lograr la satisfacción de las necesidades básicas de la misma, sin embargo, se debe tener en cuenta que proporcionar el recurso hídrico conlleva a cumplir estrictamente los límites máximos permisibles que se encuentran establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano establecido según el Decreto Supremo N° 031-2010-SA; en el que señala que el nivel de arsénico debe ser de 0,01 mg/L (Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA], 2010).

Ciertamente, entre uno de las complicaciones de la contaminación del agua con el que principalmente nos vemos enfrentados en la actualidad, es la contaminación por metales pesados, entre ellos el arsénico en su forma orgánica (V) e inorgánica (III) debido a que es un contaminante altamente presente en aguas superficiales y subterráneas.

Según Bundschuh, Pérez y Litter (2013), en Latinoamérica la distribución del arsénico en las diferentes fuentes de agua empleados en el consumo poblacional se da a raíz de componentes naturales de principio geológico como también de origen antropogénico tales como la explotación minera y refinación de metales por fundición, entre los países más afectados se encuentran Ecuador, Colombia, Argentina, Uruguay, Perú, Chile y Bolivia.

En el Perú, la presencia del arsénico en fuentes de agua superficiales y subterráneas es de origen natural, las poblaciones rurales son las más afectadas al consumir agua sin ningún tratamiento y desconocer la toxicidad del arsénico; en la zona sur del Perú se encontró en el río Locumba trazas de 0,5 mg/L de arsénico; en

la ciudad de Tacna en los poblados de Sama, Inclán y Amopaya se encontraron niveles entre 0,14 y 0,23 mg/L de arsénico trivalente y pentavalente (Bundschuh, Pérez y Litter, 2013).

Frente a esta problemática, se han ido desarrollando diversas tecnologías para la remoción de arsénico del agua entre las más conocidas tenemos: oxidación, floculación – coagulación, adsorción, sorción biológica, intercambio iónico, tratamiento con bio-organismos, electrocoagulación (Ghosh, Debsarkar y Dutta, 2019).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema

El agua, es un pilar estratégico para el desarrollo, multifuncional y escaso por ello se convierte en un recurso necesario en la calidad de vida de las personas. Debido a esto uno de los principales problemas es el abastecimiento de agua en cantidad y calidad adecuada.

El artículo 7-A de la Constitución Política del Perú (1993) reconoce el derecho de toda persona a acceder de forma progresiva y universal al agua potable, garantiza este derecho priorizando el consumo humano sobre otros usos. Sin embargo, un porcentaje importante de la población rural del país no cuenta con acceso a este servicio básico debido a que el agua que consumen se deriva de fuentes subterráneas que afloran a la superficie la cual no recibe ningún tipo de tratamiento para consumo. Así mismo, es importante resaltar que las aguas subterráneas pueden sufrir de modificaciones en sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas que pueden ser ocasionados por procesos naturales (en su mayoría procesos geoquímicos) o antropogénicos derivando en su contaminación entre los cuales el arsénico (As) en su forma inorgánica (III) ocupa un lugar relevante debido a la facilidad que tiene para movilizarse entre el rango de valores de pH de las

aguas subterráneas.

Al consumir agua contaminada por arsénico (III) los órganos que se ven involucrados con la absorción, acumulación y/o excreción (sistema digestivo, sistema circulatorio, hígado, riñón y los tejidos) son los más afectados. El tiempo de duración del As (III) en el organismo suele ser de diez horas del cual aproximadamente el 95 % se absorbe en el tracto digestivo y el restante se excreta por vía urinaria (Fernández, 2015).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) indica que el resultado de una exposición prolongada a largo plazo, a niveles altos de arsénico inorgánico (III) pueden ocasionar enfermedades en la piel (alteración en la pigmentación, lesiones epidérmicas, endurecimientos y callosidades en manos y pies) lo que pueden ser predecesores en cáncer a la piel, vejiga y pulmón.

Una tecnología de tratamiento y conseguir la remoción de arsénico es el método de coagulación. Esta tecnología tiene como referencia los estudios realizados en el Proyecto de Agua y Saneamiento Urbano DPHE – Danida en Bangladesh que tenían como objetivo principal optimizar las condiciones de salud de la población, concientizando sobre el arsénico y la obtención de agua potable (Departamento de Ingeniería y Salud Pública, 1998).

En base a lo mencionado el presente estudio busca proponer un tratamiento combinando la coagulación – floculación adicionando cloruro férrico, para su evaluación sobre las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (III) en el agua de consumo.

1.2. Definición del problema

1.2.1. Problema general.

¿Se podrá evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas y la remoción de arsénico (III) en agua contaminada en relación a la legislación vigente?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Se podrá determinar el contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas del agua?

¿Es posible evaluar la adición cloruro férrico y velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas en el agua con arsénico (III)?

¿Es posible evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en la remoción de arsénico (III) en el agua?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas y la remoción de arsénico (III) en agua contaminada en relación a la legislación vigente.

1.3.2. Objetivos específicos.

Determinar el contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) del agua.

Evaluar la adición de cloruro férrico (0, 50 y 100 mg/L) y velocidad de agitación (0, 100 y 200 rpm) en las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) en agua contaminada.

Evaluar la adición de cloruro férrico (0, 50, 100 mg/L) y velocidad de agitación (0,100, 200 rpm) en la remoción de arsénico (III) en el agua contaminada.

1.4. Justificación

1.4.1 Económica.

El cloruro férrico es un coagulante considerado económicamente de bajo costo; lo que permite que se pueda costear con mayor facilidad para ser empleado en el tratamiento de agua potable para consumo humano en zonas rurales de la región; donde el consumo de agua subterránea es algo frecuente.

1.4.2 Social.

Al ser una región directamente afectada por la contaminación de arsénico y no habiendo en la actualidad estudios, trabajos de investigación, tesis, que abarquen el estudio de esta problemática, la presente investigación puede ser considerada como antecedente para futuros estudios que se puedan realizar en beneficio de la población.

1.4.3 Ambiental.

De ser factible la presente investigación permitirá reducir la contaminación del agua por arsénico (III), luego de haber realizado el tratamiento correspondiente en plantas de tratamiento de agua potable, permitiendo explorar soluciones a los problemas de contaminación por arsénico.

1.5. Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcance.

El presente proyecto de investigación presenta como alcance determinar la eficiencia del tratamiento de agua contaminada con arsénico (III) a nivel de laboratorio.

Los detalles del presente estudio están específicamente relacionados a la remoción de arsénico (III) del agua, a la influencia en los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, turbidez); así mismo, en referencia al coagulante se considerará la dosis y la velocidad de agitación.

1.5.2 Limitaciones.

Debido a la falta de estudios preliminares en la región (trabajos de investigación, tesis de pregrado, tesis de posgrado), no se aplicará esta investigación en campo bajo condiciones naturales de la región Moquegua.

1.6. Variables

1.6.1 Variable independiente.

Adición del cloruro férrico y velocidad de agitación.

1.6.1 Variable dependiente.

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (III).

1.6.2 Operacionalización de variables.

La operacionalización de variables se observa a continuación en la tabla 1.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variable	Dimensión	Indicador	Niveles	Unidades	Instrumento de medición
Independiente	Cloruro férrico	Dosis	0, 50, 100	mg/L	Gravimetría
	Velocidad de agitación	Revoluciones por minuto	0, 100, 200	rpm	Pruebas de jarras
	Parámetros fisicoquímicos de la calidad de agua	pH	-	unidad	pH metro
Dependiente	Remoción de arsénico	Turbidez	-	UNT	Turbidímetro
		Conductividad eléctrica	-	μS/cm	Conductímetro
Interviniente	Temperatura	Temperatura	-	°C	Termómetro

1.7 Hipótesis de la investigación

1.7.1 Hipótesis general.

La adición de cloruro férrico y velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite mantener las propiedades fisicoquímicas dentro a la legislación vigente, además de remover en alto porcentaje el arsénico (III).

1.7.2 Hipótesis derivadas.

La determinación del contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas permite conocer el estado inicial del agua.

La adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite mejorar las propiedades fisicoquímicas.

La adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite remover el alto porcentaje de arsénico (III).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales.

Ge et al. (2020) realizaron una investigación cuyo objetivo fue el de evaluar la remoción de arsénico del agua empleando dos coagulantes cloruro férrico y alumbre. La investigación se desarrolló en dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en New Jersey, Estados Unidos, ambos coagulantes fueron utilizados en las dos plantas de tratamiento cuyas concentraciones iniciales de arsénico fueron de 0,00284 y 0,00269 mg/L para ambas plantas de tratamiento respectivamente, así mismo se emplearon diferentes dosis de 2, 5, 8, 12, 20 y 40 mg/L correspondientemente, en una muestra de 1 L, la cual fue mezclada por 1 min a 120 rpm, posteriormente se realizó otro mezclado de 4 min a 40 rpm y finalmente se dejó reposar por una hora. En cuanto a los resultados que obtuvieron, para una dosis de 8 mg/L de cloruro férrico la remoción optima llegó a 0,00192 y 0,00158 mg/L según a la concentración de arsénico inicial correspondiente, respecto a la dosis de alumbre pudieron determinar que las remociones se dieron con mayor efectividad en las dosis de 20 y 40 mg/L, logrando resultados de 0,00063 y 0,00052 mg/L respectivamente.

Francisca y Carro (2014), en su investigación tuvieron el objetivo de realizar una evaluación de la eficiencia de la eliminación del arsénico con procesos de coagulación-floculación empleando cloruro férrico y sulfato de aluminio. En los ensayos realizados se empleó 50 mg/L de coagulante por cada uno respectivamente, la concentración inicial de arsénico fue de 0,5 y 2 mg/L. Con lo cual alcanzaron los siguientes resultados 95 % de remoción al agregar cloruro férrico y del 80 % con sulfato de aluminio en soluciones con arsénico (V) con una concentración inicial de 0,5 mg/L.

2.1.2 Antecedentes nacionales.

Ayros y Coaquira (2015), en su investigación realizada cuya finalidad fue evaluar la remoción de la concentración de arsénico a distintas dosis de cloruro férrico en el proceso de coagulación – floculación en la planta de tratamiento de agua potable Hernán Perochena, Mollendo; para lo cual utilizaron dosis de coagulante de 20, 45 y 70 mg/L con un tiempo de 10, 20 y 30 min y una gradiente de 20, 50 y 80 revoluciones por minuto (RPM), asimismo la concentración de arsénico inicial fue de 0,23 mg/L. Al finalizar su investigación concluyeron que la remoción de arsénico en su rango óptimo fue del 97,4 % aplicando 45 mg/L, con 50 RPM por un periodo de 30 min del coagulante, obteniendo el valor de arsénico final de 0,006 mg/L.

2.1.3 Antecedentes regionales.

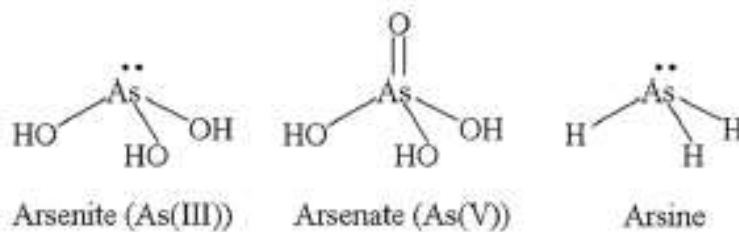
2.2 Bases teóricas

2.2.1 Arsénico.

Polya y Lawson (2016), refieren que el arsénico al ser un elemento químico que se encuentra en el centro del bloque *p* del grupo VA de la tabla periódica, un bloque donde se ubican elementos como metales, gases, no metales reactivos y peligrosos, así como no metales estables, se convierte en el elemento intermedio, adoptando tanto adoptando tanto comportamientos de un metal como de un no metal, posee múltiples estados valencia que se encuentran en el rango de -3, 0, 3 y 5 de acuerdo al contenido de moléculas de arsénico natural, en las siguiente figura 1 podemos observar las estructuras del arsénico.

Figura 1

Estructuras comunes del arsénico



Nota: Henke y Hutchison (2009)

La OMS (2018), señala que el arsénico se encuentra distribuido ampliamente por toda la corteza terrestre, entre el medio ambiente, agua, aire y suelo. La distribución del arsénico incluye 60 % de arsenatos, 20 % de sulfitos y sulfosales y en cantidades menores arseniuros, óxidos, silicatos y arsénico en forma nativa. Así mismo, es posible encontrarlo en 200 formas de minerales, es ubicuo en las rocas y en varias materias primas; se libera en el medio ambiente desde dos

vías principales: los procesos naturales y las actividades industriales (Nriagu et al., 2007).

a. Fuentes naturales.

Están relacionadas a todos aquellos procesos de origen geológico, tal como la meteorización la cual se origina a partir rocas parentales o las emisiones volcánicas, las aguas termales, los geiseres y actividades biológicas también son considerados fuentes naturales, sin embargo, se considera que las emisiones volcánicas representan entre el 30 – 40 % (Bundschuh, Pérez y Litter, 2013).

b. Fuentes antropogénicas.

Directamente relacionadas a los procesos industriales, mineros, fundición de metales, pesticidas entre otros.

Las propiedades físicas y químicas del arsénico, las podemos visualizar a continuación en la siguiente tabla 2.

Tabla 2

Propiedades físicas y químicas del arsénico

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³) a 25 °C y 1 bar de presión	5,75 (forma romboédrica)
Electronegatividad, As ³⁺	2,0
Electronegatividad, As ⁵⁺	2,2
Primer potencial de ionización (Ev)	9,7886
Lustre en superficie fresca	metálica (forma romboédrica)
Tesón	quebradizo (forma romboédrica)

Nota: Henke y Hutchison (2009)

2.2.1.1 Compuestos comunes de arsénico.

a. Arsenito.

Los dos arsenitos naturales más frecuentes son los polimorfos arsenolitas (As₂O₃, isométrico) y claudetita (As₂O₃, monoclinico), la estructura de la arsenolita consiste

en jaulas isométricas de As_4O_6 y la estructura de la claudetita, cada átomo de arsénico está rodeado por tres átomos de oxígeno. Ambos arsenitos pueden meteorizarse a partir del arsénico elemental y de varios minerales de arseniuro y arsenosulfuro, así mismo son moderadamente solubles en agua (alrededor de 20,5 g l⁻¹, a 25°C; y forman ácido arsenioso (H_3AsO_3^0) y sus aniones de disociación (Henke y Hutchison, 2009).

b. Arsenatos.

La mayoría de los minerales de arseniato son el resultado de la oxidación extensiva del arsénico elemental, los arseniuros o los arsenosulfuros en la meteorización de depósitos hidrotermales y rocas ígneas metamórficas e intrusivas. El óxido de arsénico (V) (As_2O_5) no es muy común en la naturaleza. Sin embargo, el compuesto se sintetizaba a menudo y en su momento se utilizó ampliamente en diversos procesos de fabricación. La síntesis de As_2O_5 suele implicar la oxidación de As_2O_3 o As (0) con ácido nítrico u otros oxidantes. En el agua, puede disolverse y formar H_3AsO_4^0 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} dependiendo de las condiciones de pH (Henke y Hutchison, 2009).

2.2.1.2 Especies de arsénico.

Según Polya y Lawson (2016) definen los estados del arsénico como gaseoso, sólido y líquido; los cuales pasaremos a detallar a continuación:

a. Especies en fase gaseosa.

Este tipo de especies están presentes en gases geotérmicos naturales, emisiones de lodos de aguas residuales, emisiones de plantas y suelos. La arsina es una especie de arsénico inorgánico muy tóxica, sin embargo, al entrar en contacto con el oxígeno también permite que otras especies prevalezcan.

b. Especies en fase mineral.

Los grupos de minerales cuyo componente principal es el arsénico son los óxidos, sulfuros y sulfosales, además, el arsénico se puede presentar como un componente traza en otros minerales de forma sustitutoria a nivel molecular o como adsorbato.

c. Especies de fase acuosa.

En las aguas subterráneas las especies predominantes son los oxianiones inorgánicos As (III) conocido como arsenito, también hay presencia de As (V) denominado arsenato.

d. Especies en medios biológicos.

Podemos encontrar arsenicolina, arsenobetaína entre las especies de arsénico metilados, además de arsenato y arsenito.

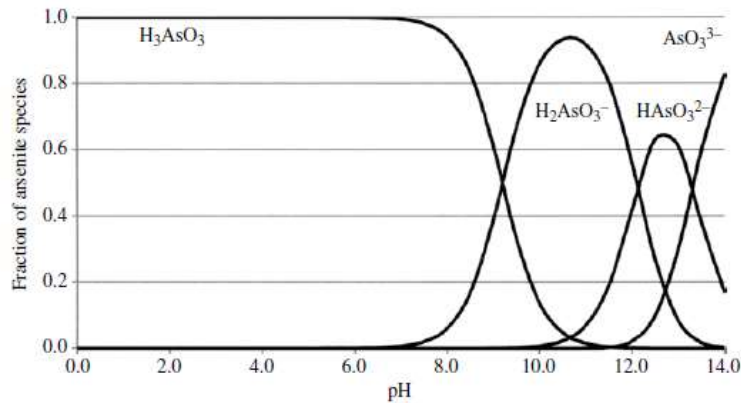
2.2.2 Contaminación de agua por arsénico.

El agua, es un elemento vital en el crecimiento de los países debido a que en la actualidad se la considera como un recurso de primera necesidad, multifuncional y escaso, es por ello que se convierte en un elemento decisivo en la calidad de vida de las personas y debe garantizarse su calidad y abastecimiento (Bundschuh, Pérez y Litter, 2013).

Weeb y Davis (2016) mencionan que la estabilidad del arsénico disuelto en el agua es variable, en condiciones oxidantes se observa mayor presencia de As (V) y en condiciones reductoras se observa la prevalencia del As (III). En las figuras 2 y 3 se puede observar el porcentaje de especies de arsénico en relación al pH.

Figura 2

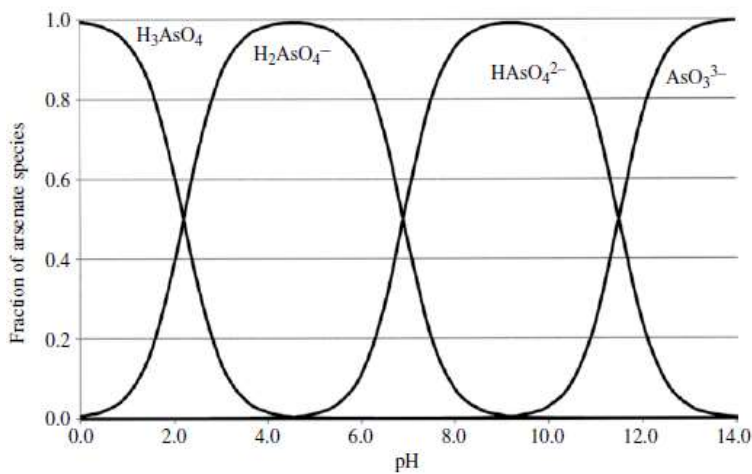
Especies de arsénico (III) en relación al pH



Nota: Webb y Davis (2016)

Figura 3

Especies de arsénico (V) en relación al pH



Nota: Webb y Davis (2016)

a. Aguas naturales.

En general se encuentra en forma disuelta, formado por oxianiones. Los estados de oxidación predominantes son As (III) y As (V). El arsénico orgánico (V) aparece como H_3AsO_4 , mientras que el arsénico inorgánico (III) aparece como H_3AsO_3 . El estado de oxidación del As y su movimiento dependen principalmente de las condiciones redox y el pH (Henke, 2009).

b. Aguas superficiales.

En los ríos y lagos, el valor de arsénico puede variar dependiendo de diferentes causas tales como el tipo de recarga (origen subterráneo o superficial), el drenaje de áreas con contenido mineral, clima, actividad minera y vertidos industriales y urbanos.

En el agua de mar, la concentración en áreas de estuarios es voluble, en consecuencia, del aporte de aguas y sedimentos continentales, y de la variación local de salinidad y gradiente redox.

c. Aguas subterráneas.

Las concentraciones elevadas de arsénico se presentan en acuíferos con una condición oxidante y de pH elevado, y con circulación geotermal, con depósitos minerales, con procesos antropogénicos, sin embargo, son los de procesos geoquímicos naturales los que representan en su gran mayoría los acuíferos con un contenido elevado de arsénico (Henke, 2009).

En Latinoamérica la contaminación por arsénico en el agua para consumo poblacional se presenta en distintos países entre ellos Ecuador, Colombia, Argentina, Uruguay, Perú, Chile y Bolivia, a continuación, visualizaremos en la figura 4.

Figura 4

Mapa con los principales problemas de contaminación por arsénico en Latinoamérica



Nota: Henke (2009)

2.2.2.1 Situación de la contaminación de agua por arsénico en el Perú.

Larios-Meño, Gonzáles y Morales (2015), indican que en la zona sur del Perú, se hallan áreas semidesérticas donde la población bebe agua directamente de los ríos que provienen en los Andes y que discurren con orientación al Océano Pacífico. En algunos de estos ríos se han descubierto trazas de arsénico como por ejemplo el río Locumba que discurre entre los departamentos de Tacna y Moquegua.

George et al. (2014), señalan que la OMS realizó un estudio cuyo fin fue determinar el nivel de contaminación de arsénico en aguas superficiales y subterráneas en el Perú, para esto obtuvieron 151 muestras de diferentes fuentes de agua en 12 distritos, determinando así que el 86 % de las muestras de agua de subterránea y el 50 % de las muestras de agua superficial tenían el nivel de arsénico superior a 10 µg/L, este límite es indicado como recomendación por la Organización Mundial de la Salud.

En la ciudad de Moquegua se realizan diversos monitoreos participativos para realizar la evaluación de la calidad del agua y que esta cumpla con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente, mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM; en los resultados obtenidos en el parámetro de arsénico de los monitoreos participativos realizados en la cuenca Moquegua – Ilo durante los años 2018 y 2019 (ver Tabla 3), se destaca el punto de monitoreo 13172RChill, en el río Chilligua aguas abajo, con el grado de mayor concentración de As.

Tabla 3

Resultados del parámetro arsénico de los monitoreos de calidad de agua cuenca Moquegua – Ilo, 2018 - 2019

Punto de monitoreo	Descripción	Año 2018	Año 2019	
		Niveles de As (mg/L) en época de avenida	Niveles de As (mg/L) en época de avenida	Niveles de As (mg/L) en época de estiaje
13172RTora1	Río Torata, estación Arondaya.	0,00479	0,00446	0,00567
13172RTora2	Río Torata, estación Ichupampa.	0,00417	0,00406	0,00404
13172RTora3	Río Torata, estación Torata.	0,01702	0,01540	0,01054

13172RTora5	Río Torata, puente Coplay.	0,01262	0,01271	0,00987
13172RTora6	Quebrada Chuntacola.	0,00828	0,00437	0,00524
13172RChill	Río Chilligua, aguas abajo.	0,03526	0,01641	0,01557
13172ROtor	Río Otorá, bocatoma Otorá.	0,01817	0,01203	0,01146
13172RMoqu1	Río Moquegua, puente Montalvo.	0,01295	0,01330	0,01160
13172RMoqu2	Río Moquegua, Rinconada – espejos.	0,00785	0,01102	0,00570
13172ROsmo1	Río Osmore – estación el Canuto	0,00828	0,01431	0,00424
13172ROsmo2	Río Osmore – Ilo puente Pacocha aguas arriba.	0,00862	0,01317	0,00789

Nota: Autoridad Local del Agua Moquegua (2019)

2.2.3 Toxicidad del arsénico.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2004), indica que la toxicidad del As es compleja, debido a varios factores entre ellos la estructura química (inorgánica u orgánica), el estado de la valencia y las vías de exposición. El arsénico inorgánico es el causante principal del envenenamiento en individuos, en referencia a las especies oxidadas el As (III) son más tóxicas que las de As (V), la significación toxicológica de los dos estados de oxidación consiste en que las formas pentavalentes son por lo general menos tóxicas que las formas trivalentes de arsénico. El arsénico se une covalentemente al oxígeno, al azufre, al hidrógeno y a sí mismo para formar arsenicales inorgánicos y al carbono para formar arsenicales orgánicos (Hughes, Thomas y Kenyon, 2009).

El arsénico está catalogado como carcinógeno humano del grupo uno según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). La arsenicosis es una

condición de salud crónica como consecuencia del consumo arsénico por sobre los niveles permitidos durante más de seis meses, la exposición se puede presentar por diferentes vías entre ellas tenemos inhalación, ingesta y dérmica las cuales desarrollaremos a continuación:

2.2.3.1 Toxicidad del arsénico en la piel.

Según Sarma (2016) la piel es esencialmente sensible al efecto tóxico del arsénico siendo las células madre las que reciben el deterioro principal. Si la exposición es a través de agua potable los cambios pigmentarios pueden presentarse entre seis a diez años de exposición continua.

a. Alteraciones pigmentarias.

Estas pueden ser puntuales o difusas, de tamaño variable desde un punto a 1 cm, se pueden presentar zonas con hipopigmentación y/o hiperpigmentación, por lo general aparecen en el tronco, muslos y brazos, pero también pueden brotar por toda la piel.

b. Queratosis.

Son los cambios cutáneos más característicos de la arsenicosis se presentan en las palmas de las manos y los pies; su peligro se clasifica según su tamaño leve (< 2 mm), moderado (2 -5 mm) y grave (> 5 mm).

c. Otros cambios cutáneos no malignos.

Tenemos la enfermedad del pie negro producido por cambios isquémicos y gangrena.

d. Cambios malignos.

La exposición crónica al arsénico promueve diversos tipos de cánceres de piel como la enfermedad de Bowen, carcinoma de células basales y carcinoma de células

escamosas, es posible desarrollar diferentes y múltiples cánceres de piel en un mismo individuo.

2.2.3.2 Toxicidad del arsénico en el sistema digestivo.

La vía principal de exposición del arsénico es a través del sistema digestivo, su continua exposición trae como consecuencias anomalías hepáticas las cuales incluyen hepatomegalia, fibrosis portal no cirrótica, cirrosis e hipertensión portal; así mismo también se ha relacionado con neoplasias hepáticas, como el angiosarcoma hepático y el carcinoma hepatocelular (Arteel, 2016).

2.2.4 Tratamiento de agua contaminada arsénico.

El agua es esencial para el desarrollo de la calidad de vida de las poblaciones a nivel mundial debido a su alta demanda y consumo, sin embargo, debido a esto se ha transformado en el origen principal de ingreso de arsénico en el cuerpo humano.

Durante años se han investigado las formas de tratamiento para la remoción del arsénico del agua (Visoottiviseth y Amhed, 2008).

Actualmente existen diversos métodos de tratamiento convencional para la remoción de arsénico del agua que pueden ser aplicados en condiciones de laboratorio como en campo. Las tecnologías convencionales están basadas principalmente en el proceso de tratamiento fisicoquímico entre los cuales tenemos:

- Oxidación.
- Coagulación y floculación.
- Absorción y filtración.
- Membranas.

Todos los métodos tienen el principio de reducción de la oxidación, adsorción y precipitación de la coagulación acompañada por la filtración, en tabla 4 podemos ver la comparación de las distintas tecnologías.

Tabla 4

Comparación de tecnologías para la remoción de arsénico del agua.

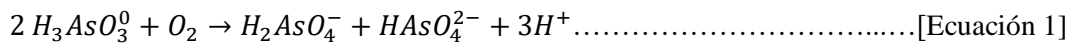
Tecnología	Tipo	Ventajas	Desventajas
Oxidación	Por aire	Proceso simple y lento de remoción, de bajo costo.	Ambos procesos solo retiran una parte de la concentración de arsénico
	Química	Proceso simple y rápida remoción, de bajo costo. Oxida otras impurezas y elimina microbios.	
Coagulación - floculación	Por alumbre	Gastos de capital bajos. Operación del proceso relativamente simple.	Produce lodos. Se puede requerir pre-oxidación.
	Por hierro	Coagulantes de fácil acceso.	Lenta remoción de As (III).
Adsorción	Alúmina activada		Produce residuos sólidos tóxicos.
	Arena cubierta por hierro	Relativamente conocidos y comercialmente disponibles. Técnica bien definida.	Requiere de un reemplazo o regeneración.
	Intercambio iónico	Muchas posibilidades de alcanzar su desarrollo.	Alto costo de operación y mantenimiento.
	Otros sorbentes		Implementación de alto costo.
Membrana	Nano filtración	Proceso bien definido, retiro de arsénico de eficacia alta. No produce ningún residuo tóxico.	Operación de alta tecnología y mantenimiento.
	Osmosis inversa		Costo alto de implementación.
	Electrocoagulación	Capaz de retirar otros contaminantes.	

Nota: Visoottiviseth y Amhed (2008)

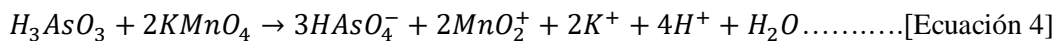
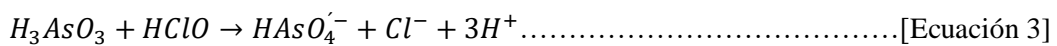
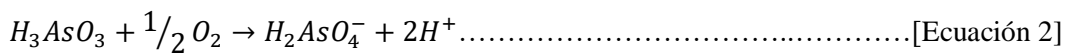
2.2.5 Pre-tratamiento.

2.2.5.1 Oxidación.

Henke y Hutchison (2009), señalan que la oxidación del arsénico está relacionada con el aumento del estado de valencia hasta +5 mediante reacciones químicas que hacen que el arsénico pierda electrones de valencia, por ejemplo, el As (0) puede oxidarse a As(III) y As(III) a As(V), en este proceso, los oxidantes químicos reciben los electrones del arsénico y se reducen. En condiciones de oxidación y pH casi neutro, el As(III) inorgánico podría oxidarse lentamente a As(V) mediante la siguiente reacción:



La presencia del arsénico en aguas subterráneas como As (III) y As (V), en distinta cuantía, las tecnologías de tratamiento permiten la eliminación de forma eficaz del arsénico en su estado pentavalente por lo que se debe realizar una fase de pretratamiento de oxidación de As (III) a As (V), mediante oxígeno, ozono, cloro libre, hipoclorito, permanganato, peróxido de hidrógeno entre otros reactivos, las siguientes reacciones describen la oxidación por oxígeno, hipoclorito y permanganato (Visoottiviseth y Amhed, 2008).



2.2.6 Tratamiento por coagulación – floculación.

2.2.6.1 Coagulación.

CEPIS (2004) señala que para este proceso generalmente se debe adicionar sales de aluminio y hierro; así mismo este proceso es la consecuencia de dos fenómenos:

- El inicial es un principio químico que reside en la reacción del coagulante con el agua y la posterior creación de especies hidrolizadas con carga positiva. Siendo factores fundamentales el pH final de la muestra y la concentración del coagulante.
- El segundo de carácter físico reside en la movilidad de las especies hidrolizadas que entran en contacto con las contaminaciones del agua.

El tiempo de este proceso es rápido se estima un tiempo de aproximadamente 100 segundos de acuerdo con las demás particularidades del agua.

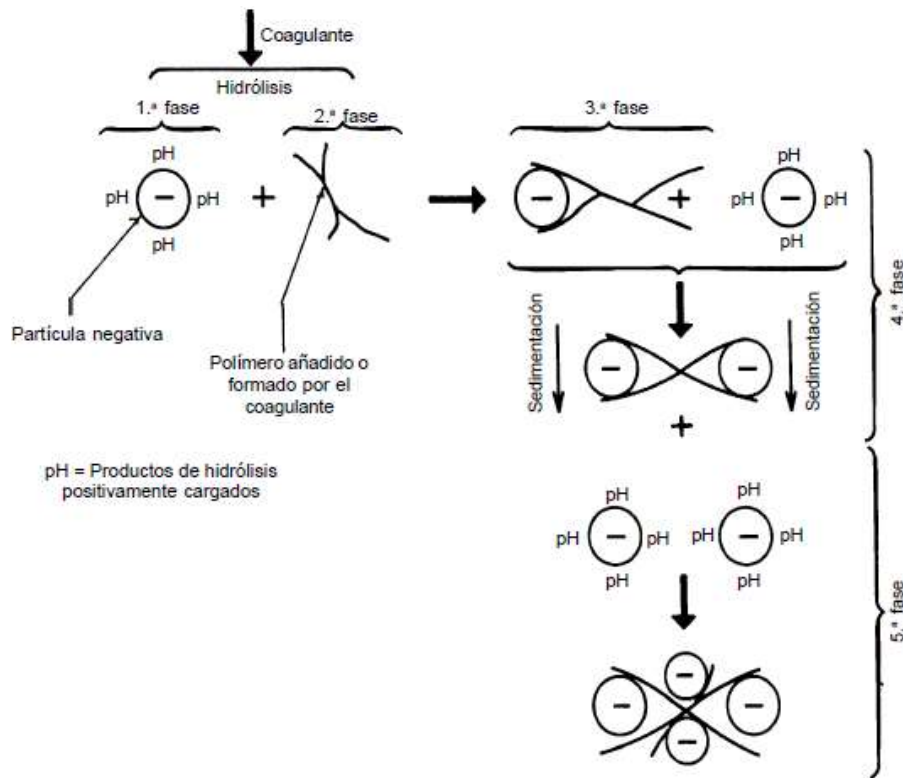
a. Etapas en la coagulación

Según CEPIS (2004), se han identificado diferentes etapas dentro del proceso de coagulación a continuación detallamos las etapas en la coagulación:

- Hidrólisis de los iones metálicos polivalentes y su subsiguiente polimerización hasta alcanzar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para conseguir desestabilizar al coloide.
- La acumulación de las partículas que fueron desestabilizadas a través de un puente entre las partículas que implican la transferencia de estas y las interrelaciones químicas.
- Acumulación de las partículas desestabilizadas mediante la movilidad y las fuerzas de Van der Waals.
- Creación de los flóculos.
- Precipitación del hidróxido metálico.

Figura 5

Modelo del proceso de coagulación



Nota: Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (2006)

b. Tipos de coagulación.

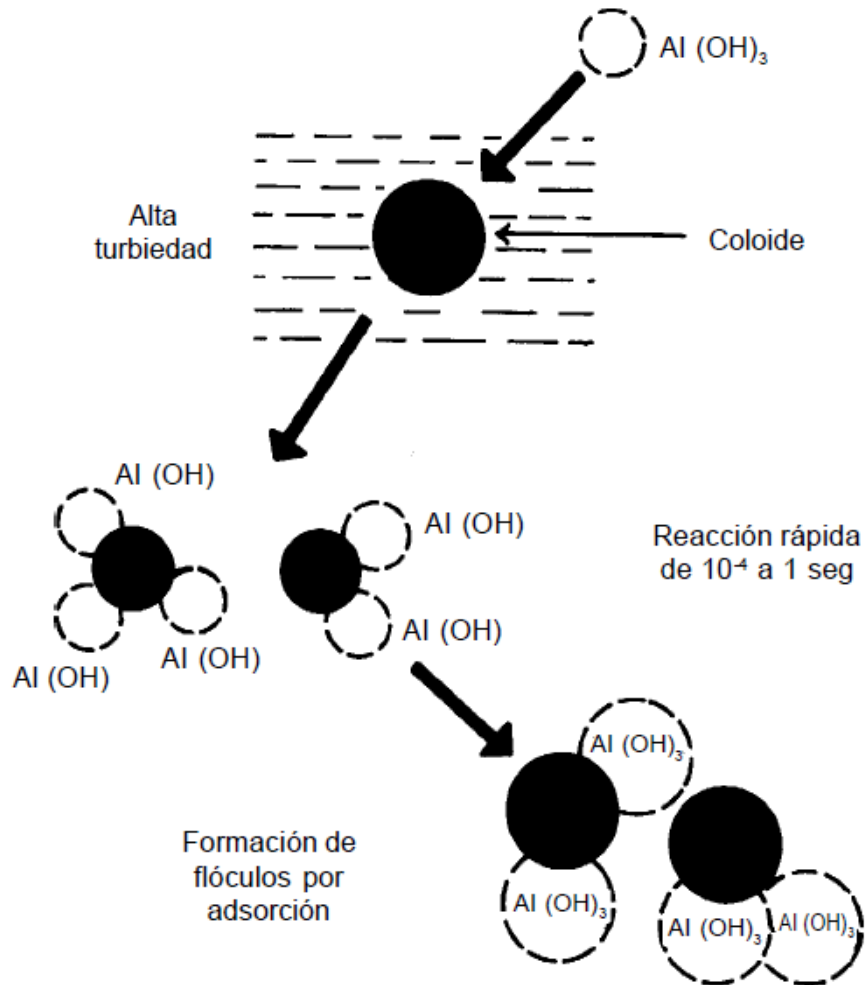
- Coagulación por adsorción.

Se da por la adición en el agua de sulfato de aluminio o sales de hierro, en dosis de coagulante y pH, originando una formación de especies solubles hidrolizadas.

En relación del sulfato de aluminio, las especies hidrolizadas que se originan son Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ y $Al(OH)_4$, las cuales son consideradas para la representación de todo el sistema (ver figura 5) (Henke, 2009).

Figura 6

Coagulación por adsorción



Nota: Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (2006)

Según Henke (2009), estas especies hidrolizadas se incorporan o conforman complejos de tipo superficial con los grupos Silanol ($= \text{SiOH}$) y el coloide; es desestabilizado, lo que permite el origen de los flóculos. Se denomina neutralización de carga, conocido también como desestabilización-adsorción, a este mecanismo. Cuando existe una gran presencia de cantidad de coloides en el agua, la distancia que existe entre ellos es menor. Es decir que la energía requerida y la fuerza de atracción es mayor para lograr su desestabilización menor, así como el potencial zeta resultante.

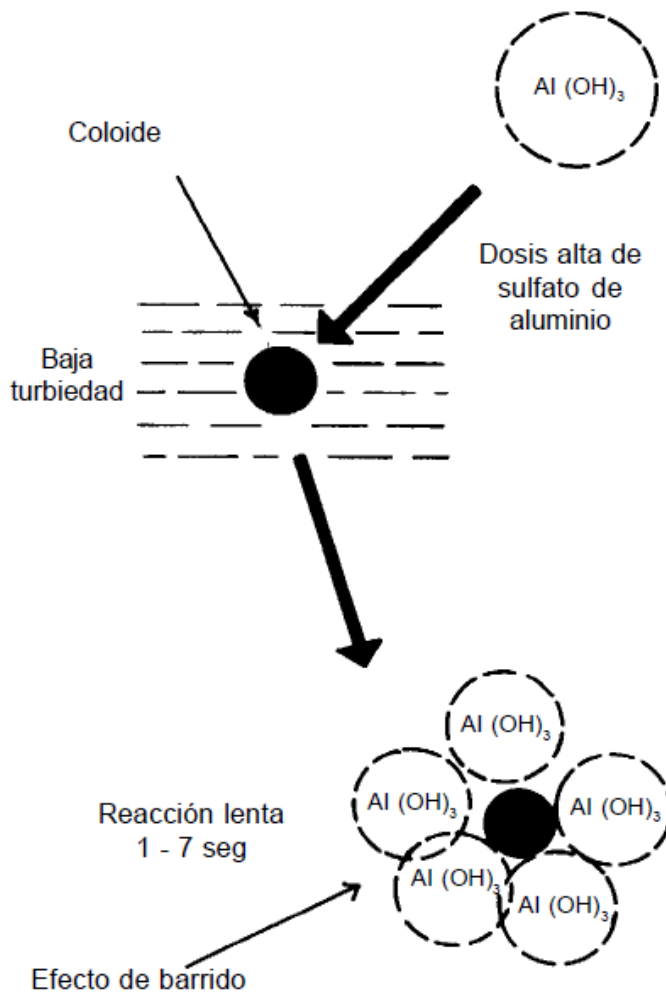
- *Coagulación por barrido.*

Se da con dosis de alúmina en cantidades altas, se conforma un precipitado de hidróxido de aluminio que de manera física arrastra a la suspensión de las partículas coloidales, denominándose a este proceso coagulación por barrido.

En la siguiente figura se muestra de forma esquemática, donde se puede evidenciar que en el tratamiento de agua la coagulación de partículas coloidales es controlada de manera principal por la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas antecesoras (Henke, 2009).

Figura 7

Coagulación por barrido



Nota: Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (2006)

Cuando el porcentaje de las partículas coloidales es menor y el agua presenta una coloración clara, las partículas son atrapadas al ocasionar una sobresaturación de precipitado de hidróxido de aluminio, es ahí donde se presenta este tipo de coagulación (Henke, 2009).

Siendo que cuando la distancia es mayor entre las partículas, las fuerzas de atracción que existe es menor y se necesita una mayor cantidad de dosis de coagulante y energía para lograr la desestabilización, lo que genera un aumento en el potencial zeta y el tiempo de reacción, el cual puede alcanzar incluso hasta siete segundos.

c. Coagulantes.

- *Sulfato de aluminio.*

Se puede encontrar en presentación sólida o líquida; de forma sólida se exhibe en placas compactas, gránulos de diferentes tamaño y polvo, su fórmula química es la siguiente: $Al_2(SO_4)_3$.

La concentración esta definida, por su contenido en alúmina, se expresa como Al_2O_3 , la densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es de 1000 kg/m^3 , además el contenido de alúmina en forma líquida oscila entre 8 y 8,5 %, es decir equivalente en su presentación de polvo al 48 y 49 % por litro de solución acuosa.

El sulfato de aluminio es una sal procedente del hidróxido de aluminio que es una base débil y del ácido sulfúrico que es un ácido fuerte, por ende, las soluciones acuosas son muy ácidas; con una variación en el pH de entre 2 y 3,8, es por ello que su acopio se debe dar en un ambiente seco y sin humedad.

- *Cloruro férrico $FeCl_3$.*

Tiene dos presentaciones forma sólida o líquida; siendo esta última la que se emplea con mayor frecuencia en el tratamiento de agua.

La forma sólida se caracteriza por ser cristalina, de coloración parda, delicuescente, su fórmula teórica es FeCl_3 . Es necesario protegerla del calor debido a su fácil cristalización en agua a una temperatura de $34\text{ }^\circ\text{C}$. La forma líquida comercial posee en promedio 40 % de FeCl_3 . Se recomienda expresar las dosis de coagulante en Fe equivalente, es decir, 20,5 % para la fórmula sólida y 14 % aproximadamente para la solución acuosa comercial, esto para evitar cualquier confusión entre los contenidos de producto puro o de producto comercial.

Las soluciones de cloruro férrico presentan una rápida reducción a cloruro ferroso FeCl_2 en presencia de hierro, presenta un gran poder corrosivo en relación con el acero.

2.2.6.2 Floculación.

Andía (2000), señala que la floculación es un proceso subsecuente a la coagulación, el cual reside en el movimiento ondulatorio de la masa coagulada, esta da cabida al crecimiento y la acumulación de los flóculos recientemente formados con el propósito de acrecentar el peso y tamaño que son necesarios para lograr una sedimentación con mayor facilidad.

Este proceso también puede ser facilitado por el mezclado lento que propicia que los flóculos se junten poco a poco; con un mezclado rápido se rompen y es muy poco probable que su formación se de en su condición óptima de fuerza y tamaño. El proceso de floculación puede presentar una mejoría con la adición de un reactivo o ayudante de floculación (Andía, 2000).

a. Tipos de floculación.

- *Floculación pericinética.*

Es conocido como el movimiento browniano, se origina por el movimiento natural de las moléculas del agua y que es presenta influencia de la energía térmica.

- *Floculación ortocinética.*

Se origina en los choques de las partículas a causa del movimiento del agua, que es proporcionado por una energía externa a la masa de agua, de naturaleza mecánica o hidráulica.

Posteriormente a la coagulación del agua es necesario que se origine la acumulación de los microfloculos; y para que se sucedo ocurra se debe producir primero la floculación pericinética y seguidamente debe producirse la floculación ortocinética.

2.2.7 Normativa legal.

2.2.7.1 Normativa internacional.

- La OMS establece en la Guías para la calidad del agua de consumo humano, publicada en el año 2011 en Ginebra, establece como valor referencial para el arsénico de origen natural 0,01 mg/L o 10 µg/L.
- La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), en el año 2001 estableció un cambio en la concentración máxima de arsénico en agua potable de 50 µg/L a 10 µg/L.

2.2.7.2 Normativa nacional.

- A nivel nacional contamos con el D.S N°031-2010-SA, Reglamento de la calidad del agua para consumo humano, donde se establece el límite máximo permisible de arsénico en 0,010 mg/L.

2.3 Definición de términos

a. Arsénico (III).

Es un elemento químico que se encuentra en el centro del bloque *p* del grupo VA de la tabla periódica, un bloque donde se ubican elementos como metales, gases, no metales reactivos y peligrosos, así como no metales estables (Polya y Lawson, 2016).

b. Cloruro férrico.

Es un compuesto químico cuya fórmula es FeCl_3 , un aproximado del 60 % de cloruro de hierro elaborado es empleado en el tratamiento de aguas residuales o de consumo humano debido a su característica de ser un floculante excelente (Amoquimicos, 2022).

c. Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica del agua, también conocida como conductancia específica o solamente conductividad, su medición puede ser de manera rápida con equipos de laboratorio o equipos portátiles a fin de proveer una valoración de la concentración total de iones disueltos (Boyd, 2017).

d. Turbidez.

La turbidez se caracteriza por la ausencia de la transparencia en el agua, esto debido a la presencia de partículas en suspensión, cuanto mayor cantidad de sólidos en suspensión se encuentren en el agua, su apariencia es más sucia, por lo tanto, el valor de turbidez es más elevado (Lenntech, 2022).

e. pH.

El pH es una medida para la concentración de iones hidrógeno (H^+) en una solución de agua. Existe una relación directa entre la concentración de iones de hidrógeno y

la concentración de iones de hidróxido (OH^-), por lo tanto, se considera al pH como una medida de concentración de iones de hidróxido.

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativa ya que emplea la recolección de datos para determinar si es efectiva o no la solución a un problema en específico, en relación a la finalidad es de tipo aplicada.

3.2. Diseño de la investigación

Para el presente trabajo de investigación se empleó un diseño experimental, cuya finalidad fue la de evaluar el efecto de dos variables independientes como: adición del cloruro férrico (A) y velocidad de agitación (B), en relación a las variables dependientes: evaluación de las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (III).

A continuación, se presenta el diseño de la investigación según la figura 8:

Figura 8

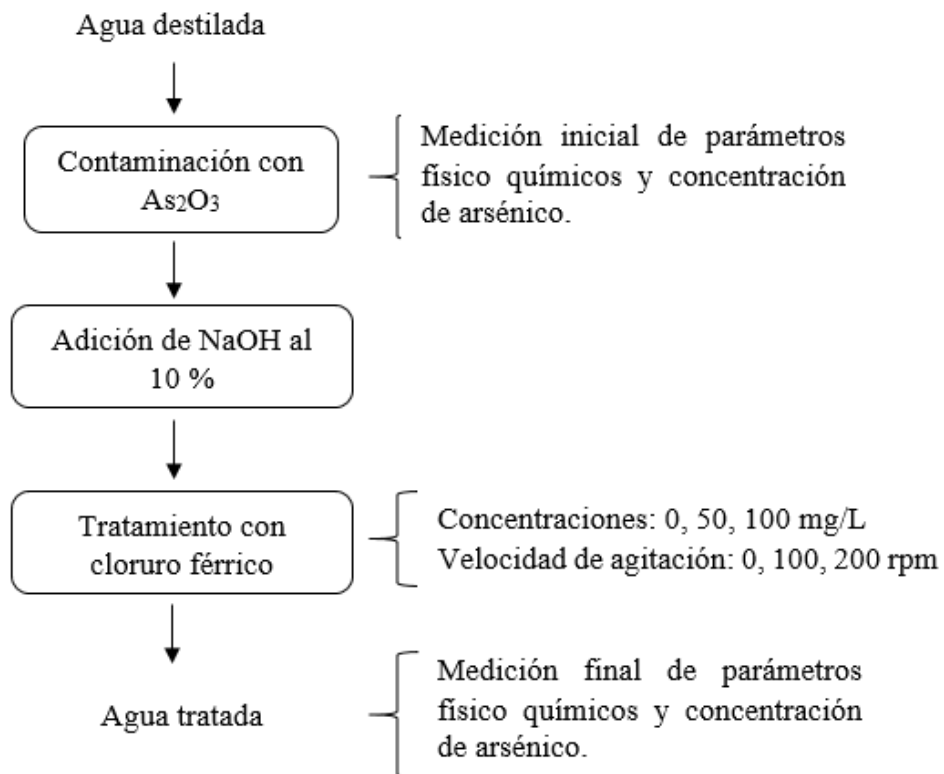
Diseño de la investigación

A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃
A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃
A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃

En la siguiente figura 9, se presenta el diagrama de flujo de la investigación realizada.

Figura 9

Diseño del tratamiento propuesto



La investigación realizada tuvo como finalidad la evaluación de la adición del cloruro férrico en tres distintas concentraciones (0, 50 y 100 mg/L) y a diferentes velocidades de agitación (0, 100 y 200 rpm), en agua destilada que previamente ha sido contaminada con As_2O_3 , para posteriormente evaluar las propiedades fisicoquímicas (pH, turbidez, conductividad eléctrica y remoción de As). Se empleó el diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial de 3x3 con tres repeticiones con un total de 27 muestras, de haber existido diferencias significativas

se evaluaron los resultados mediante la prueba LSD Fisher con un nivel de significancia al 5 %, cuyo diseño y modelo estadístico se detalla a continuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 5}]$$

Dónde:

Y_{ij} : es la valor u observación de las características i-esima de cloruro férrico e i-esima velocidad de agitación

i: 0, 50, 100 mg/L

j: 0, 100, 200 rpm

μ : Media general.

τ_i : Efecto de la i-esima de cloruro férrico

β_j : Efecto de la i-esima velocidad de agitación

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción de cloruro férrico y velocidad de agitación

ε_{ij} : Error residual

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población.

Agua contaminada con As (III), a partir del uso de agua destilada y la adición de As_2O_3 .

3.3.2. Muestra.

La muestra corresponde a 27 L los cuales fueron distribuidos en nueve muestras con tres repeticiones, el contenido de cada muestra fue de 1 L.

3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos

a. *Preparación de muestras en laboratorio.*

Se emplearon 27 muestras en total (nueve muestras con tres repeticiones) de 1 L cada una, para los cuales se utilizó agua destilada la misma que previamente fue contaminada con óxido de arsénico (III) con fórmula química As_2O_3 , debido a la complejidad de la remoción del As (III) este debe ser oxidado por una solución al 10 % de hidróxido de sodio (NaOH) hasta convertirse en As (V), de dichas muestras se tomaron las mediciones iniciales de los parámetros: pH, conductividad eléctrica, turbidez.

b. Efecto del cloruro férrico en la remoción de As (III).

Se preparó un equipo de test de jarras donde se realizó los experimentos, colocándose 1 L de agua contaminada en cada jarra y aplicando las dosis de cloruro férrico previamente pesados lo cuales han sido agitados por 0, 100, 200 rpm por un periodo de 30 minutos, posteriormente se realizó la toma del registro de los parámetros finales: turbidez, conductividad eléctrica, pH y remoción de arsénico; se realizó las dos repeticiones faltantes siguiendo el mismo procedimiento para poder obtener los datos finales.

c. Medición de arsénico (III).

La medición de arsénico fue medida en Bhios Laboratorios de la ciudad de Arequipa, para ello el laboratorio empleo el método Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Part 3000. Method 3114-C. Arsenic and Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method. 23rd Ed. 2017.

El agua tratada será un total de 27 muestras, la remoción porcentual será determinada por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ remoción} = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) * 100\% \dots \dots \dots [Ecuación 6]$$

Los datos obtenidos serán recopilados en la ficha de registro según lo detallado a continuación.

Tabla 5

Ficha de registro para la remoción de arsénico (referencial)

Velocidad de agitación	Dosis de coagulante	Arsénico residual			Remoción de arsénico		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	0						
100	0						
200	0						
0	50						
100	50						
200	50						
0	100						
100	100						
200	100						

d. Medición de parámetros fisicoquímicos.

La medición de parámetros fisicoquímicos se realizará de acuerdo a lo detallado a continuación:

Medición de pH: Norma NMX-AA-008-SCFI-2000, utilizando el pH-metro, el cual se realizará introduciendo el electrodo en un vaso de precipitado de 1L

Medición de la conductividad eléctrica: norma NMX-AA-093-SCFI-2000, utilizando un equipo multiparámetro, el cual se realizará introduciendo el electrodo en un vaso de precipitado de 1 L.

Medición de la turbidez: Norma NMX-AA-038-SCFI-2001 en la que 10 ml de la muestra serán colocadas en la porta muestra de turbidímetro.

Los datos obtenidos serán recopilados en la ficha de registro según lo detallado a continuación.

Tabla 6

Ficha de registro de los parámetros fisicoquímicos (referencial)

Velocidad de agitación	Dosis de coagulante	pH			Conductividad eléctrica			Turbidez		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	0									
100	0									
200	0									
0	50									
100	50									
200	50									
0	100									
100	100									
200	100									

e. Procesamiento de datos estadísticos.

Los datos obtenidos de las 27 muestras realizadas fueron procesados a través del software estadístico Infostat.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Características físicas y químicas del estado inicial del agua.

Se presente en la siguiente tabla 7 lo resultados de las características físicas y químicas del estado inicial del agua contaminada con As (III).

Tabla 7

Resultados de las características físicas y químicas del estado inicial del agua contaminada con arsénico

Parámetro	Unidad	Valor
pH	pH	11,89
Conductividad eléctrica	μS/cm	2915
Turbidez	UNT	0,18
Arsénico (III)	mg/L	4,598

Nota: Bhios Laboratorios (2022)

Según la tabla 7, los resultados obtenidos para la caracterización inicial del agua contaminada con As (III), presento lo siguiente para el parámetro de pH es de 11,89, para la conductividad eléctrica es de 2915 μS/cm, para la turbidez es de 0,18 UNT y finalmente para el contenido de arsénico es de 4,598 mg/L.

4.1.2. Aplicación del tratamiento propuesto.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la adición de cloruro férrico y la velocidad de agitación sobre el pH, en la tabla 8 se presentan los resultados del análisis de varianza a partir de los datos obtenidos en el Apéndice A, donde existe diferencia estadística significativa en el factor de velocidad de agitación, siendo que el p-valor es menor de 0,05. Por lo que se realizó la prueba LSD Fisher.

Tabla 8

Análisis de varianza para pH

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Velocidad de Agitación	4,93	2	2,46	18,23	<0,0001	**
Dosis	0,79	2	0,39	2,91	0,0801	NS
Velocidad de Agitación*Dosis de coagulante	0,83	4	0,21	1,54	0,2341	NS
Error	2,43	18	0,14			
Total	8,98	26				

Nota: F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = media cuadrática; F = F calculada; ** (<0,01) = altamente significativo; NS = no significativo; CV (coeficiente de variación) = 3,23.

En la Tabla 9, se visualiza la prueba de medias LSD Fisher para la velocidad de agitación sobre el pH con un 95 % de confianza, en la que se observa que con velocidad de 0 rpm el valor de pH es de 10,81; con una velocidad de 100 rpm el valor de turbidez es de 11,5 y finalmente con una velocidad de 200 rpm el valor de pH es de 11,83.

Tabla 9

Prueba LSD Fisher de la velocidad de agitación (rpm) en relación al pH

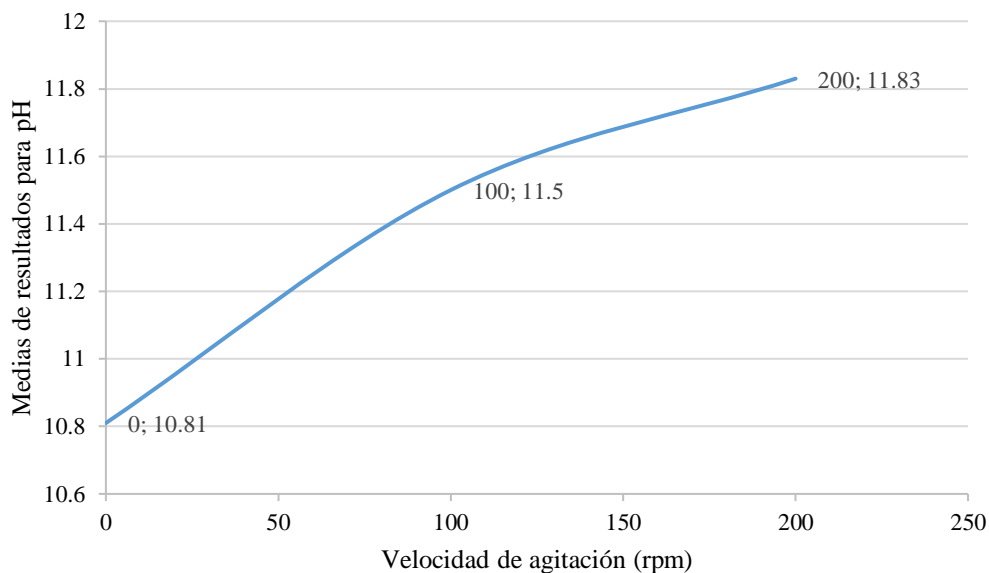
Velocidad de Agitación	Medias	n	E.E.	Sig.
0	10.81	9	0,12	a
100	11.5	9	0,12	b
200	11.83	9	0,12	b

Nota: E.E. = error estándar.

De acuerdo a la figura 10, y según lo observado en la tabla 9, a una velocidad de agitación de 0 rpm se obtuvo un pH de 10,81; siendo este el menor valor obtenido, sin embargo, no se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la normativa vigente.

Figura 10

Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y parámetro de pH



En cuanto al parámetro de conductividad eléctrica referente a la adición del coagulante (cloruro férrico) y la velocidad de agitación, los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla 10 estos datos fueron obtenidos del Apéndice A, para posteriormente realizar el análisis de varianza; pudiendo determinar que

no existe diferencia estadística significativa en los valores de la dosis de cloruro férrico, velocidad de agitación y la interacción dosis*velocidad de agitación, a partir de que el p-valor no es menor de 0,05, por lo tanto no se realizó la prueba de LSD Fisher.

Tabla 10

Análisis de varianza para conductividad eléctrica

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Velocidad de Agitación	6632322,19	2	3316161,09	2,88	0,0821	NS
Dosis	7484721,38	2	3742360,69	3,25	0,0623	NS
Velocidad de Agitación*Dosis de coagulante	11293861,3	4	2823465,34	2,45	0,0831	NS
Error	20713267,5	18	1150737,09			
Total	46124172,5	26				

Nota: F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = media cuadrática; F = F calculada; NS = no significativo; CV (coeficiente de variación) = 44,43.

En la tabla 11 se puede visualizar los resultados de análisis de varianza, sobre el parámetro de turbidez en relación a la adición de cloruro férrico y la velocidad de agitación, es así que podemos indicar que existe diferencia estadística altamente significativa tanto en la dosis, velocidad de agitación y la interacción dosis*velocidad de agitación, a partir de que el p-valor es menor de 0,0001; por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher para los factores y sus interacciones respectivamente.

Tabla 11*Análisis de varianza para turbidez*

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Velocidad de Agitación	18,98	2	9,49	31,3	<0,0001	**
Dosis	15,63	2	7,82	25,79	<0,0001	**
Velocidad de Agitación*Dosis de coagulante	17,17	4	4,29	14,16	<0,0001	**
Error	5,46	18	0,3			
Total	57,23	26				

Nota: F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = media cuadrática; F = F calculada; ** (< 0,01) = altamente significativo; CV (coeficiente de variación) = 61,94.

La tabla 12 se visualiza la prueba de medias LSD Fisher para la dosis del coagulante (cloruro férrico) en la que se observa que con una dosis de 0 mg/L el nivel de turbidez es de 0,13 UNT; dosis de 50 mg/L el nivel de turbidez es de 0,61 UNT y con una dosis de 100 mg/L el nivel de turbidez es de 1,93 UNT.

Tabla 12*Prueba LSD Fisher del coagulante (cloruro férrico) en relación a la turbidez*

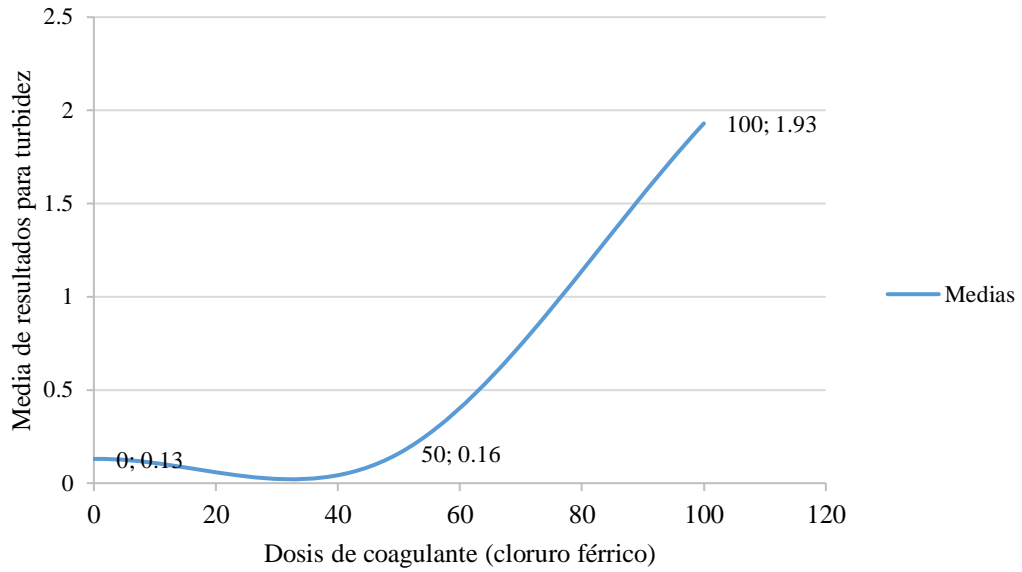
Dosis de coagulante	Medias	n	E.E.	Sig.
0	0,13	9	0,18	a
50	0,61	9	0,18	a
100	1,93	9	0,18	b

Nota: E.E. = error estándar.

De acuerdo a la figura 11, y según lo observado en la tabla 12, al emplear una mayor dosis de coagulante (cloruro férrico) se produce un mayor nivel de turbidez en el agua, sin embargo, dichos valores se encuentran dentro de lo establecido por la legislación vigente.

Figura 11

Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de dosis de coagulante (cloruro férrico) y parámetro de turbidez



A continuación, en la tabla 13 se visualiza la prueba LSD Fisher en el parámetro de turbidez a distintas velocidades de agitación (rpm), obteniendo que a una velocidad de agitación de 200 rpm, el nivel de turbidez es de 0,29 UNT; a una velocidad de 100 rpm el nivel de turbidez es de 0,3 UNT y a una velocidad de agitación de 0 rpm el nivel de turbidez es de 2,07 UNT.

Tabla 13

Prueba LSD Fisher de las velocidades de agitación en relación a la turbidez

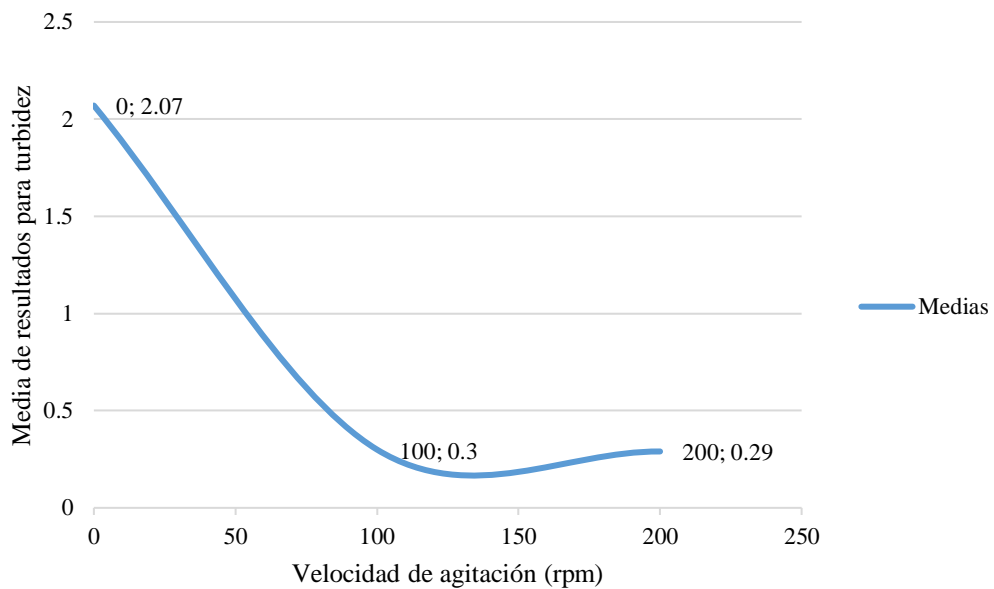
Velocidad de Agitación	Medias	n	E.E.	Sig.
200	0,29	9	0,18	a
100	0,3	9	0,18	a
0	2,07	9	0,18	b

Nota: E.E. = error estándar.

De acuerdo a la figura 12, y según lo observado en la tabla 13, al emplear una velocidad de agitación de 200 rpm se obtuvo un nivel de turbidez menor de 0,29 UNT.

Figura 12

Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y parámetro de turbidez



La tabla 14 muestra la interacción entre la dosis del coagulante * velocidad de agitación, siendo que el uso de 0 y 50 mg/L de dosis de coagulante y una velocidad de agitación de 0, 200 y 100 rpm se obtuvo como resultados valores entre 0,11 y 0,19 UNT, el mayor valor se obtuvo a una velocidad de agitación de 0 rpm y una dosis de 100 mg/L de coagulante con un valor de 4,62 UNT.

Tabla 14

Prueba LSD Fisher de interacción entre dosis de coagulante y velocidad de agitación

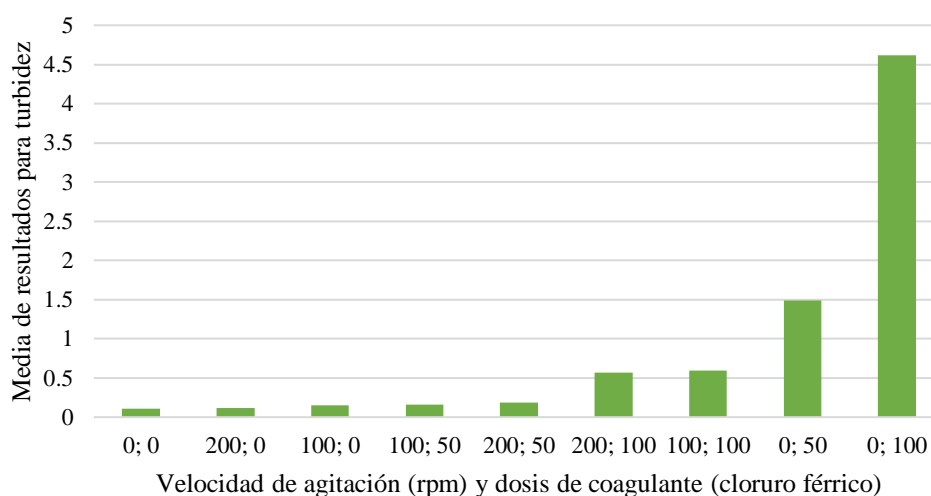
Velocidad de Agitación	Dosis de coagulante	Medias	n	E.E.	Sig.	
0	0	0,11	3	0,32	a	
200	0	0,12	3	0,32	a	
100	0	0,15	3	0,32	a	
100	50	0,16	3	0,32	a	
200	50	0,19	3	0,32	a	
200	100	0,57	3	0,32	a	b
100	100	0,59	3	0,32	a	b
0	50	1,49	3	0,32		b
0	100	4,62	3	0,32		c

Nota: E.E. = error estándar.

En la figura 13 se observa los promedios obtenidos tanto para la dosis de coagulante cloruro férrico (0, 50 y 100 mg/L) a diferentes velocidades de agitación (0, 100 y 200 rpm), por lo cual se puede determinar que a menores dosis de coagulante existe niveles bajos de turbidez.

Figura 13

Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm), dosis de coagulante (cloruro férrico) y parámetro de turbidez



Nota: valores del lado izquierdo 0, 100, 200 = representan la velocidad de agitación; valores del lado derecho 0,50, 100 = representan dosis de coagulante.

En la tabla 15, se muestra el análisis de varianza para la remoción de As (III), cuyos datos fueron obtenidos del Apéndice C, donde se observa que existe diferencia estadística significativa, a partir de que el p-valor obtenido es menor de 0,05, por lo se procedió a realizar la prueba de medias LSD Fisher.

Tabla 15

Análisis de varianza para remoción de arsénico (III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Velocidad de Agitación	1021,93	2	510,97	89,8	<0,0001	**
Dosis	40,43	2	20,21	3,55	0,0501	*
Velocidad de Agitación*Dosis de coagulante	35,97	4	8,99	1,58	0,2224	NS
Error	102,42	18	5,69			
Total	1200,75	26				

Nota: F.V. = fuente de variación; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = media cuadrática; F = F calculada; ** (< 0,01) = altamente significativo; * (< 0,05) = significativo; NS = no significativo; CV (coeficiente de variación) = 4,67.

En la tabla 16 que se presenta a continuación muestra la prueba LSD Fisher para la velocidad de agitación sobre la remoción de arsénico, siendo que a una velocidad de agitación de 100 rpm el porcentaje de remoción de arsénico es de 46,6 %, a una velocidad de 200 rpm la remoción de arsénico es de 46,93 % y finalmente a una velocidad de 0 rpm la remoción de arsénico es de 59,81 %.

Tabla 16

Prueba LSD Fisher de velocidad de agitación sobre la remoción de arsénico

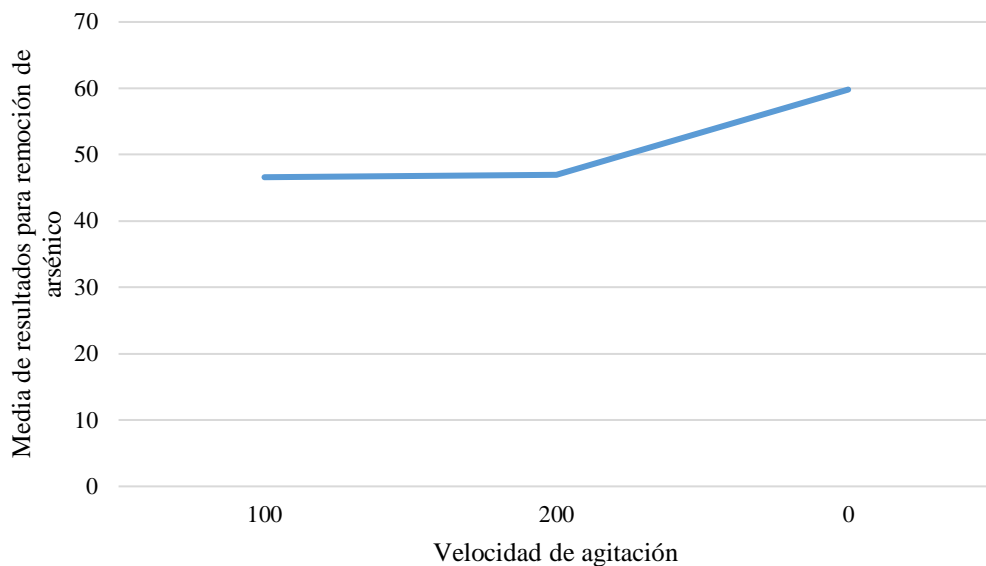
Velocidad de Agitación	Medias	n	E.E.	Sig.
100	46,6	9	0,8	a
200	46,93	9	0,8	a
0	59,81	9	0,8	b

Nota: E.E. = error estándar.

Según la figura 14, de los datos obtenidos de la tabla 16 se puede indicar lo siguiente de las muestras empleadas, a una velocidad de agitación de 0 rpm es la que presenta mayor remoción de arsénico.

Figura 14

Prueba de medias LSD Fisher en la interacción de velocidad de agitación (rpm) y remoción de arsénico



4.2. Contrastación de hipótesis

Después de haber realizado el experimento y haber obtenido los resultados de la evaluación de parámetros fisicoquímicos y la remoción de arsénico respectivamente, se puede indicar que, la velocidad de agitación y la dosis del coagulante generan una influencia en los parámetros de pH, turbidez y remoción de arsénico con un p-valor $<0,05$ por lo que se acepta la hipótesis alterna (H_a) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).

Sin embargo, en el parámetro de conductividad eléctrica no existe una diferencia significativa con un p-valor $>0,05$ por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la alterna (H_a).

En la tabla 7, se muestra las características iniciales del agua contaminada con arsénico (III) en sus diferentes parámetros tanto físicos como químicos (pH, turbidez, conductividad eléctrica y niveles de arsénico). Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna (H_a) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).

En el tratamiento propuesto para este estudio se empleó factores de velocidad de agitación y adición de dosis de coagulante (cloruro férrico), las cuales exponen que, de la evaluación de parámetros fisicoquímicos entre ellos los de pH y turbidez si existe diferencia significativa con un p-valor $<0,05$; por lo que se acepta la hipótesis alterna (H_a) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).

En el parámetro de conductividad eléctrica no existe una diferencia significativa con un p-valor $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la alterna (H_a).

En lo referente a la remoción de arsénico cuyos resultados se visualizan en la tabla 15, se indica que existe diferencia significativa con un p-valor $<0,05$ por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_a).

4.3. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos de la caracterización inicial física y química del agua contaminada con arsénico (III) expusieron que está presentaba un pH de 11,89, conductividad eléctrica de 2915 $\mu\text{S}/\text{cm}$, turbidez de 0,18 UNT y un nivel de arsénico de 4,598, donde los valores de los parámetros de pH, conductividad eléctrica y arsénico exceden los valores establecidos en la normativa establecida en el D.S N°031-2010-SA, Reglamento de la calidad del agua para consumo humano (Dirección General de Salud Ambiental, 2010).

Del tratamiento de agua propuesto, los resultados obtenidos para el parámetro de pH (ver Apéndice A) el valor inicial es de 11,89, el valor mínimo es de 10,03 pH y el mayor valor obtenido es de 11,99; los valores recomendados por el reglamento de calidad de agua para consumo humano vigente es 6,5 a 8,5 pH (Dirección General de Salud Ambiental, 2010), por lo cual se puede indicar que la adición del cloruro férrico genera cambios significativos en el pH con respecto a los valores permitidos en la normatividad, según el estudio realizado por Ayros y Coaquira (2015) la variación del pH en el tratamiento se da en dosis de entre 50 a 80 mg/L, el pH se encuentra en un rango de 6,5 a 7, logrando una mayor remoción de arsénico. Francisca y Carro (2015) en su estudio indica que si el pH se encuentra entre 2 y 6 el porcentaje de remoción de arsénico será mayor al 80 %. Ge et al. (2020), en su estudio para la eliminación de As, determinó que a mayor cantidad de dosis de coagulante utilizado el pH tuvo una tendencia a elevarse, con una dosis de 2 mg/L el pH fue de 6,38 y con una dosis de 8 mg/L el pH fue de 6,44.

De los resultados para conductividad eléctrica obtenidos (Apéndice A), el valor inicial es de 2915 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el valor más alto obtenido es de 7417 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el menor valor obtenido es de 573,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores recomendados por el reglamento de calidad de agua para consumo humano vigente es 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Dirección General de Salud Ambiental, 2010).

De los resultados para turbidez obtenidos (Apéndice A), el valor inicial es de 0,18 UNT, el mayor valor obtenido es de 6,1 UNT y el menor valor obtenido es de 0,05 UNT, los valores recomendados por el reglamento de calidad de agua para consumo del humano vigente es 5 UNT (Dirección General de Salud Ambiental, 2010). Ayros y Coaquira (2015) el nivel de turbidez al iniciar su estudio fue de 2,40

UNT con una dosis de coagulante de 70 mg/L y una velocidad de 50 rpm consiguieron una turbidez final de 0,26 UNT.

De los resultados de la remoción arsénico obtenidos (apéndice C), el valor inicial es 4,598 mg/L, y el menor valor obtenido es de 1,647 mg/L con una dosis de 50 mg/L y 0 rpm, los valores recomendados por el reglamento de calidad de agua para consumo del humano vigente es 0,010 mg/L (Dirección General de Salud Ambiental, 2010). Ge et al. (2020) en su tratamiento realizado en dos plantas de tratamiento inicio con una concentración de arsénico inicial de 0,00284 y 0,00269 mg/L, con una dosis de 20 y 40 mg/L y una velocidad de agitación de 120 rpm por 1 minuto y posteriormente 40 rpm por 4 minutos, logrando resultados de una concentración de arsénico final de 0,00063 y 0,00052 mg/L respectivamente. Francisca y Carro (2014), en su investigación la concentración inicial de arsénico fue de 0,5, se empleó 50 mg/L de coagulante (cloruro férrico, alcanzando una remoción de hasta 95 %. Ayros y Coaquira (2015), en su investigación la concentración de arsénico inicial fue de 0,23 mg/L. 45 mg/L de coagulante (cloruro férrico), con una velocidad de 50 rpm por un periodo de 30 min, obteniendo el valor de arsénico final de 0,006 mg/L.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Primera. De los factores evaluados, en las propiedades fisicoquímicas y la remoción de arsénico (III) en agua contaminada, se determinó que dos parámetros no se encuentran dentro de los valores recomendados por el D.S. N°031-2010-SA, Reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

Segunda. Se determinó las características iniciales físicas y químicas del agua contaminada con arsénico (III) a través de un análisis realizado a dichos parámetros, conociéndose que el agua contaminada presentó un pH de 11,89 considerado como básico, conductividad eléctrica de 2915 $\mu\text{S}/\text{cm}$, turbidez de 0,18 UNT y una concentración de arsénico de 4,598.

Tercera. De la evaluación de la adición cloruro férrico en dosis de 0, 50 y 100 mg/L y velocidad de agitación de 0, 100 y 200 rpm, en las propiedades fisicoquímicas. Para pH no existe diferencia estadística significativa, el

valor pH inicial fue de 11,89 pH, utilizando una dosis de 100 mg/L y una velocidad de agitación de 0 rpm, donde el pH resultante fue de 10,03 pH. Para la conductividad eléctrica no existe diferencia estadística significativa, con una dosis de 50 mg/L y una velocidad de 0 rpm, la conductividad eléctrica resultante fue de 573,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para la turbidez existe diferencia estadística altamente significativa, con una dosis de 0 mg/L y una velocidad de 200 rpm se obtuvo una turbidez de 0,05 UNT.

Cuarta. De la evaluación de la adición cloruro férrico en dosis de 0, 50 y 100 mg/L y velocidad de agitación de 0, 100 y 200 rpm, en la remoción de arsénico (III), se pudo determinar que en el factor de velocidad de agitación existe una diferencia estadística altamente significativa ($<0,001$), el menor valor obtenido se presentó con una dosis de 50 mg/L y una velocidad de 0 rpm con un nivel de arsénico de 1,647.

5.2. Recomendaciones

Primera. Se recomienda comprobar la eficiencia de remoción de As mediante ensayos a nivel de pruebas piloto.

Segunda. De los resultados presentados dos parámetros cumplen con lo dispuesto por el reglamento de calidad de agua de consumo, sin embargo, pH y arsénico no cumplen con lo indicado por el reglamento, por lo que se debe buscar alternativas que permitan la rectificación del pH para proporcionar una mayor remoción del As.

Tercera. Realizar distintas pruebas con el cloruro férrico o combinaciones con otro coagulante, a fin de determinar la mejor forma para la remoción de As, como alternativa de coagulantes tenemos al sulfato de aluminio, óxido de titanio, sulfato ferroso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amoquimicos. (2022). *Cloruro férrico: características, usos y medidas de seguridad*. Recuperado de <https://www.amoquimicos.com/propiedades-del-cloruro-ferrico>
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Recuperado de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Arteel, G. (2016). Hepatotoxicity. En States, J. (Ed.) *Exposure sources, health risks, and mechanisms of toxicity*. Louisville, Kentucky, Estados Unidos.
- Autoridad Local del Agua. (2018a). *Resultado del 11avo monitoreo participativo de la calidad del agua superficial en el ámbito de la cuenca Moquegua - Ilo, 2018*. Moquegua, Perú.
- Autoridad Local del Agua. (2018b). *Resultado del 12avo monitoreo participativo de la calidad del agua superficial en el ámbito de la cuenca Moquegua - Ilo, época estiaje, 2018*. Moquegua, Perú.
- Autoridad Local del Agua. (2019). *Resultado del 13avo monitoreo participativo de la calidad del agua superficial en el ámbito de la cuenca Moquegua - Ilo, 2019*. Moquegua, Perú.
- Ayros, E., y Coaquira, A. (2015). *Optimización del proceso coagulación – floculación para la eliminación de arsénico en la planta de tratamiento de agua potable Hernán Perochena – Mollendo*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3843>
- Boyd, E. (2017). *Conductividad eléctrica del agua*. Recuperado de

<https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>

Bundschuh, J., Pérez, A. y Litter, M. (2013). Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9).

Carbotecnia. (2022). *pH ¿Qué es y como afecta en el agua?*. Recuperado de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-es-el-ph-del-agua/#:~:text=Considerando%20la%20definici%C3%B3n%20del%20pH,de%20iones%20hidr%C3%B3geno%2010%20veces.>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano plantas de filtración rápida*. Lima, Perú. Recuperado de http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf

Constitución Política del Perú. (1993). *Artículo 7-A* (22 de junio 2017). Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/ley-de-reforma-constitucional-que-reconoce-el-derecho-de-acc-ley-n-30588-1536004-1>

Departamento de Ingeniería y Salud Pública. (1998). *Guideline for arsenic*. Bangladesh.

Dirección General de Salud Ambiental. (2010). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano*. Lima, Perú.

Fernández, B. (2015). *Ecotoxicología del arsénico: movilización en suelos y aguas, relevancia clínica y método*. (Tesis pregrado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

- Francisca, F. y Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 177–190.
- Ge, J., Guha, B., Lippincott, L., Cach, S., Wei, J., Su, T. L., y Meng, X. (2020). Challenges of arsenic removal from municipal wastewater by coagulation with ferric chloride and alum. *Science of the Total Environment*, 725.
- George, C., Sima, L., Jahuira, M., Mihalic, J., Cabrera, L., Danz, D., Checkley, W. y Gilmar, R. (2014). Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bull World Health Organ*, 92, 565–572. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.13.128496>
- Ghosh, S., Debsarkar, A., y Dutta, A. (2019). Technology alternatives for decontamination of arsenic-rich groundwater - A critical review. *Environmental Technology and Innovation*, 13, 277–303. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.003>
- Henke, K. (2009). *Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment*. Estados Unidos.
- Henke, K. y Hutchison, A. (2009). *Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment*. Estados Unidos.
- Larios-Meño, F., González, C., y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL*, 2(1991), 9–25. Recuperado de <http://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/115>
- Lenntech. (2022). *Turbidez*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/turbidez.htm>
- Nriagu, J., Bhattacharya, P., Mukherjee, A., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., y

- Loeppert, R. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Trace metals and other contaminants in the environment*, 9(06), 3–60. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/s0927-5215\(06\)09001-1](https://doi.org/10.1016/s0927-5215(06)09001-1)
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Arsénico: fuentes de exposición*. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Polya, D. y Lawson, M. (2016). Eogenic and anthropogenic arsenic hazard in groundwaters and soils: distribution, nature, origin and human exposure routes. En States, J. (Ed.) *Exposure sources, health risks, and mechanisms of toxicity*. Louisville, Kentucky, Estados Unidos.
- Sarma, N. (2016). Skin manifestations of chronic arsenicosis. En States, J. (Ed.) *Exposure sources, health risks, and mechanisms of toxicity*. Louisville, Kentucky, Estados Unidos.
- Visoottiviseth, P. y Amhed, F. (2008). Technology for remediation and disposal of arsenic. En Whitacre, D. (Ed.) *Reviews of environmental contamination and toxicology*. Summerfield North, Carolina, Estados Unidos.
- Webb, C. y Davis, A. (2016). Remediation of arsenic in drinking water. En States, J. (Ed.) *Exposure sources, health risks, and mechanisms of toxicity*. Louisville, Kentucky, Estados Unidos.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE CLORURO FÉRRICO Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y REMOCIÓN DE ARSÉNICO (III) EN AGUA CONTAMINADA, AÑO 2021

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método
<p>Problema general: ¿Se podrá evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas y la remoción de arsénico (III) en agua contaminada en relación a la legislación vigente?</p> <p>Problemas específicos: ¿Se podrá determinar el contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas del agua? ¿Es posible evaluar la adición cloruro férrico y velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas en el agua con arsénico (III)? ¿Es posible evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en la remoción de arsénico (III) en el agua?</p>	<p>Objetivo general: Evaluar la adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación en las propiedades fisicoquímicas y la remoción de arsénico (III) en agua contaminada en relación a la legislación vigente.</p> <p>Objetivos específicos: Determinar el contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) del agua. Evaluar la adición cloruro férrico (0, 50 y 100 mg/L) y velocidad de agitación (0, 100 y 200 rpm) en las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y turbidez) en el agua con arsénico (III). Evaluar la adición del cloruro férrico (0, 50, 100 mg/L) y la velocidad de agitación (0,100, 200 rpm) en la remoción de arsénico (III) en el agua.</p>	<p>Hipótesis general: La adición de cloruro férrico y velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite mantener las propiedades fisicoquímicas dentro a la legislación vigente, además de remover en alto porcentaje el arsénico (III).</p> <p>Hipótesis específicas: La determinación del contenido de arsénico (III) y las propiedades fisicoquímicas permite conocer el estado inicial del agua. La adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite mejorar las propiedades fisicoquímicas. La adición del cloruro férrico y la velocidad de agitación utilizado en el tratamiento de agua contaminada permite remover en alto porcentaje el arsénico (III).</p>	<p>Variable independiente: Adición del cloruro férrico y velocidad de agitación.</p> <p>Variable dependiente: Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y remoción de arsénico (III).</p> <p>Variable interviniente: Temperatura</p>	<p>Tipo de investigación: Cuantitativa</p> <p>Diseño de investigación: Experimental</p> <p>Población:</p> <p>Muestra: 27 L los cuales se distribuirán en nueve muestras con tres repeticiones, el contenido de cada muestra será de 1 L.</p>