

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



“LA GOMA DE TARA COMO AGENTE FLOCULANTE EN LA OPTIMIZACION DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON FeCl_3 PRESENTE EN AGUA DE MINA”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

AUTORES:

GUSTAVO FERNANDO CASO RUPAY
LAURA LEONELA LAUREANO ESTRELLA

ASESOR:

MG. CARMEN ELIZABETH BARRETO PÍO

Callao, Noviembre,

2018 PERÚ

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a nuestros padres por el apoyo constante a lo largo de toda nuestra vida académica; en especial a nuestras madres, nuestra principal motivación para crecer y seguir adelante, por creer en nosotros cuando nosotros dejábamos de hacerlo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos salud, ganas de vivir por ser nuestro fiel compañero y darnos la fortaleza en los momentos difíciles.

A nuestros padres, por su cariño, por los valores inculcados, por darnos la oportunidad de tener una educación y todo apoyo incondicional brindado.

A nuestra asesora Ing. Carmen Barreto Pío por la confianza y disponibilidad.

Al investigador Javier Quino por su interés, paciencia y apoyo para realizar esta investigación.

A los miembros del instituto de investigación Científica (IDIC) de la Universidad de Lima por habernos brindado la oportunidad de hacer uso de las instalaciones del laboratorio para el desarrollo de la presente tesis profesional.

INDICE

TABLAS DE CONTENIDO	7
INTRODUCCIÓN	11
RESUMEN	14
ABSTRACT	16
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION.....	18
1.1. Identificación del problema	18
1.2. Formulación del Problema	19
1.3. Objetivos de la Investigación.....	19
1.4. Justificación.....	19
1.5. Importancia.....	21
1.6. Limitaciones	21
II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Antecedentes del Estudio.....	23
2.1.1 A nivel nacional:	23
2.1.2 A nivel Internacional	25
2.2. Bases Teóricas	26
2.2.1 Agua Residual Industrial en Minería.....	26
2.2.2 Tipos de Agua Residual Industrial en Minería	26
2.2.3 Contaminación del Agua a Causa de la Minería	27
2.2.4 Química del arsénico.....	27
2.2.5 El arsénico en el medio ambiente	27
2.2.6 Tecnologías para la Eliminación del Arsénico del Agua.....	28
2.2.7 Coagulación	28

2.2.8 Mecanismo de la coagulación	29
2.2.9 Fases de la coagulación.....	30
2.2.10 Factores que influyen en la coagulación	30
2.2.11 Influencia del pH.....	30
2.2.12 Análisis de pH (Método Electrométrico):	31
2.2.13 Influencia de las Sales Disueltas.....	31
2.2.14 Influencia de la Temperatura del Agua.....	31
2.2.15 Influencia de la Dosis del Coagulante	32
2.2.16 Influencia de Mezcla.....	33
2.2.17 Influencia de la Turbiedad	33
2.2.18 Análisis de la Turbidez	34
2.2.19 Tipos de coagulación	35
2.2.20 Coagulantes Utilizados.....	35
2.2.21 Coagulante Cloruro Férrico	36
2.2.22 Floculación	37
2.2.23 Tipos de floculación.....	37
2.2.24 Floculantes más usados.....	38
2.2.25 Mecanismo de Coagulante.....	39
2.2.26 Mecanismo de Floculante.....	40
2.2.27 Sedimentación.....	40
2.2.28 Tipos de Sedimentación	41
2.2.29 Prueba de Jarras.....	42
2.2.30 Gradiente de Velocidad.....	43
2.2.31 Polímeros naturales	44
2.2.32 Tara (Caesalpinia spinosa).....	44
2.2.33 Análisis por espectrometría de masas de plasma (ICP- MS.....	44
2.3. Bases Legales	45
2.3.1 Estándares de Calidad Ambiental del Agua	45
2.3.2 Límite Máximo Permisible para Efluente Mineros	

Metalúrgicos (LMP)	46
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	47
3.1 Variables de la Investigación	47
3.2 Operacionalización de variables	48
3.3 Hipótesis	50
IV. METODOLOGÍA	51
4.1 Tipo de Investigación	51
4.2 Diseño de la investigación	51
4.1.1. Elección del diseño del experimento	51
4.1.2. Determinación del punto de monitoreo y toma de muestra del efluente minero sin tratamiento.....	52
4.1.3. Caracterización inicial del efluente generado por la mina de oro ubicada en el departamento de la Libertad.	52
4.1.4. Selección del tipo de tratamiento a emplear.....	53
4.1.5. Criterio para la selección de valores de concentración de cloruro férrico (FeCl ₃) y goma de tara.....	54
4.1.6. Prueba preliminares test de jarra entre el coagulante (FeCl ₃) y el agua de mina.	55
4.1.7. Descripción de la prueba de jarra.....	55
4.3 Población y muestra	57
4.3.1 Población.....	57
4.3.2 Muestra.....	58
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	58
4.4.1 Técnica de recolección de datos	58
4.4.2 Métodos y equipos de recolección de datos.....	59
4.5 Procedimiento de recolección de datos	59
4.5.1 Estudio preliminares	59
4.5.2 Experiencia del Test de Jarra	59

4.5.3 Preparación de muestras y análisis	60
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	60
V. RESULTADOS	62
5.1 Objetivo 1: Determinar la concentración de arsénico total presente en el agua de mina en estudio.	62
5.2 Objetivo 2: Evaluar las variables que intervienen en el proceso de coagulación con FeCl ₃ y floculación con Goma de Tara.	67
5.3 Objetivo 3: Optimizar el proceso de remoción de arsénico que emplea FeCl ₃ , mediante la adición de goma de tara.....	69
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados	74
6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares	74
VII. CONCLUSIONES	78
VIII. RECOMENDACIONES.....	80
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APENDICE	85
ANEXOS	87

TABLAS DE CONTENIDO

• LISTADO DE FIGURAS:

FIGURA N° 2.1	FASES DE LA COAGULACIÓN
FIGURA N° 1.2	EXPLICACIÓN GRÁFICA DE LA FORMACIÓN DE FLÓCULOS POR ADSORCIÓN.
FIGURA N° 2.3	EXPLICACIÓN GRÁFICA COAGULACIÓN POR BARRIDO.
FIGURA N° 4.1	FOTOGRAFÍA DE LA BOCAMINA BALCÓN (JNG) DE CONSORCIO MINERO HORIZONTE
FIGURA N° 4.2	4G PLATYPUS JAR TESTER
FIGURA N° 4.3	PREPARACIÓN DE LAS 5 CONCENTRACIONES DE Fe+3
FIGURA N° 4.4	ETAPA DE AGITACIÓN CON PASTILLA IMANTADA DE CADA VASO CON 25 ML DE SOLUCIÓN DE GOMA DE TAR
FIGURA N° 4.5	PROCESO DE MADURACIÓN DE LA GOMA DE TARA.
FIGURA N° 4.6	UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA CONSORCIO MINERO HORIZONTE.

• LISTADO DE TABLAS:

TABLA N° 2.1	TECNOLOGÍAS PARA LA ELIMINACIÓN DEL ARSÉNICO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS
--------------	--

TABLA N° 2.2	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE PARA EFLUENTE MINEROS METALÚRGICOS.
TABLA N° 3.1	DESCRIPCIÓN DE VARIABLES CON SUS RESPECTIVOS INDICADORES
TABLA N° 4.1	DISEÑO COMPUESTO CENTRAL DE BOX-WILSON CUANDO $K=2$
TABLA N° 4.2	RESULTADOS HISTORICOS DE ARSENICO TOTAL EN EL AGUA DE MINA
TABLA N° 4.3	DISEÑO COMPUESTO CENTRAL DE BOX-WILSON
TABLA N° 4.4	RELACIÓN DE MASA VOLUMEN DE $Fe+3$
TABLA N° 4.5	PESOS DE GOMA DE TARA
TABLA N° 4.6	REQUISITOS DE TOMA DE MUESTRA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA
TABLA N° 4.7	MÉTODOS Y EQUIPOS
TABLA N° 5.1	RESULTADOS HISTORICOS DE ARSENICO TOTAL EN EL AGUA DE MINA
TABLA N° 5.2	RESULTADOS HISTORICOS DE SST EN EL AGUA DE MINA
TABLA N° 5.3	RESULTADOS HISTORICOS DE pH EN EL AGUA DE MINA
TABLA N° 5.4	RESULTADOS PROMEDIOS DE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA DE MINA A ESTUDIAR
TABLA N° 5.5	RESULTADOS PRUEBAS JARRAS INICIAL COMPORTAMIENTO DIFERENTES CONCENTRACIONES DE COAGULANTE $FeCl_3$ CON EL AGUA DE MINA
TABLA N° 5.6	TABULACION DE POSICIONAMIENTO PARA DETERMINACION DE CONCENTRACION DE CLORURO

	FERRICO POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
TABLA N° 5.7	CONCENTRACION DE CLORURO FERRICO POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
TABLA N° 5.8	TABULACION DE POSICIONAMIENTO PARA DETERMINACION DE CONCENTRACION DE GOMA DE TARA POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
TABLA N° 5.9	CONCENTRACION DE GOMA DE TARA POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
TABLA N° 5.10	DISTRIBUCION FINAL DE LAS CONCENTRACIONES DE CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA ANTES DE LOS EXPERIMENTOS
TABLA N° 5.11	RESULTADOS FINALES DEL FINAL DE LAS CONCENTRACIONES DE CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA ANTES DE LOS EXPERIMENTOS

• LISTADO DE GRAFICAS:

GRAFICO N° 5.1	CONCENTRACION HISTORICA DEL ARSENICO TOTAL 2011-2017
GRAFICO N° 5.2	CONCENTRACION HISTORICA DE SST 2011-2017
GRAFICO N° 5.3	CONCENTRACION HISTORICA DEL pH 2011-2017

- GRAFICO N° 5.4 RELACION HISTORICA ENTRE EL ARSENICO TOTAL Y LOS SST 2011-2017
- GRAFICO N° 5.5 RELACION HISTORICA ENTRE EL ARSENICO TOTAL Y pH 2011-2017
- GRAFICO N° 5.6 RESULTADOS DE ESPECIACIÓN DE ARSÉNICO
- GRAFICO N° 5.7 CONCENTRACION Y DOSIS DE CLORURO FERRICO POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
- GRAFICO N° 5.8 CONCENTRACION Y DOSIS DE GOMA DE TARA POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA
- GRAFICO N° 5.9 RESULTADOS FINALES DEL ARSENICO TOTAL DESPUES DE LOS EXPERIMENTOS
- GRAFICO N° 5.10 CONCENTRACIONES FINALES DEL CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA VS ARSENICO TOTAL DESPUES DE LOS EXPERIMENTOS

INTRODUCCIÓN

El Perú es un país de antigua tradición minera, tradición que mantiene y cultiva hasta la actualidad; a nivel mundial y latinoamericano el Perú se ubica entre los primeros productores de diversos metales, (oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, entre otros), debido al enorme potencial geológico como la presencia de la Cordillera de los Andes a lo largo del territorio, lo cual constituye su principal fuente de recursos minerales (INGEMMET, 2007).

Caso particular es el Batolito de Patáz, donde se han explotado desde la época incaica y durante los últimos 100 años más de 16 minas subterráneas distribuidas entre las provincias de Patáz, Parcoy y Buldibuyo, que han producido 6 millones de onzas de oro y se estima que sus reservas ascienden a 40 millones considerando la totalidad del batolito (Universidad de Ginebra, 2006).

El oro se encuentra mezclado físicamente con la calcita, cuarzo, pirita, arsenopirita, galena, entre otros; no en forma de combinación química, encontrándose mayormente al estado nativo, rellenando las microfracturas y porosidades de los sulfuros.

Consorcio Minero Horizonte (CMH) en adelante denominada como “La empresa” es una organización privada de capitales peruanos que realiza labores de exploración, explotación, extracción y beneficio de los recursos minerales auríferos, en la zona norte del Perú, específicamente en la provincia de Pataz, distrito de Parcoy, anexo Retamas. (CMH.com)

CMH, dentro de su proceso de explotación de mineral, rompe las estructuras rocosas, fraccionando de esa manera los diferentes

minerales de conformación, entre ellos tenemos a la arsenopirita (FeAsS), que, al mezclarse con el agua subterránea retenida entre las rocas, hace que su concentración de arsénico se eleve a valores por encima de los Límites Máximos Permisibles, generando aguas de mina con presencia de arsénico total.

Actualmente la empresa hace uso de tratamientos químicos para el control de arsénico presente en agua de mina. Sin embargo este tratamiento tiene relativas desventajas, entre una de ellas podríamos resaltar grandes cantidades de FeCl₃ como coagulante y amplios intervalos de tiempo para sedimentar los lodos formados. La tara (*caesalpinia spinosa*) es una especie forestal nativa, asimismo el Perú es el principal productor de tara en el mundo, aportando al mercado un 80% de los taninos naturales procedentes de la tara. Esta especie se ubica tanto en la vertiente occidental del pacífico entre los 800 – 2800 msnm y en los valles interandinos entre los 1600 – 2800 msnm.

Sus principales productores son los departamentos de Cajamarca, La Libertad, Ayacucho, Huancavelica, Apurímac, Ancash Y Huánuco.

La Goma de Tara es un polímero de origen natural que se obtiene a partir de la semilla de la Tara, es de tipo polisacárido, presenta elevado peso molecular y se ha encontrado muchas aplicaciones en la industria como coagulante para el tratamiento de aguas.

La coagulación y floculación son dos procesos de la etapa de clarificación del agua; la coagulación es un proceso de desestabilización de las partículas suspendidas a través de la disminución de las fuerzas de repulsión entre ellas y se logra mediante la introducción al sistema de iones coaguladores, los cuales producen la compresión de la doble capa eléctrica y la disminución del valor del potencial zeta o electrocinética; la floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste

en la aglutinación de sustancias coloidales permitiendo incrementar el tamaño de los flocs. (Aguilar, 2002)

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación, pueden ser de origen sintéticos o naturales, para este caso los floculantes naturales son polímeros cuyas moléculas poseen a lo largo de su estructura cientos de grupos funcionales (ácidos o básicos) permitiendo unir a las partículas coloidales a lo largo de la cadena polimérica, produciendo un aumento de la masa (polímero más partículas coloidales), que conduce a una sedimentación o floculación rápida del sistema coloidal. (Bravo G. 2016)

Por ello en los últimos años se viene aplicando el uso de polímeros naturales en el tratamiento de la calidad de aguas.

La propuesta de esta investigación comprende en evaluar el comportamiento del polímero natural Goma de Tara como agente floculante para la remoción de arsénico total con FeCl_3 presente en aguas de mina. De esta manera se pretende obtener porcentajes de remoción de arsénico total en un determinado tiempo y que el arsénico residual resulte con valores menores a 0.1 mg/L, según normativa ambiental vigente (MINAM, 2010).

Por lo que en la presente tesis se pretende evaluar la capacidad de la goma de tara como agente floculante frente al proceso de remoción de arsénico con FeCl_3 presente en agua de mina.

RESUMEN

Actualmente las aguas residuales de origen minero con presencia de metales totales vienen presentando impactos negativos hacia el medio ambiente, por ello las empresas generadoras de estos residuos líquidos implementan sistemas de tratamiento para el control y remoción de elementos contaminantes como el arsénico total mediante los procesos de coagulación y floculación haciendo uso de compuestos sintéticos convencionales como cloruro férrico y magnafloc 351 respectivamente.

En el presente estudio se plantea el uso de la goma de tara como floculante natural en el tratamiento de aguas de la mina ubicada en sierra de La Libertad, la cual posee alta concentración de arsénico total. La presente tesis se desarrolló haciendo uso de la metodología del diseño experimental de tipo superficie respuesta el cual permitió combinar dos factores, distintas concentraciones de FeCl_3 con distintas concentraciones de goma de tara, estos como coagulante y floculante respectivamente, en el proceso de remoción de arsénico presente en aguas de mina.

Durante la etapa experimental se realizó las pruebas con muestras de agua de las actividades de la mina a escala de laboratorio bajo las mismas condiciones ambientales. Se determinó la capacidad de la goma de tara como agente floculante, obteniendo resultados favorecedores de remoción 0.00021 mg/L de arsénico total en un 99% con respecto a la concentración inicial.

De la investigación se demuestra que mediante el uso de la goma

de tara podemos obtener concentraciones de arsénico total por debajo de los límites máximos permisibles (<0.1 mg/l) según la normativa ambiental vigente DS 010-2010-MINAN, esto permitirá que podamos plantear a la minera generadora de estas aguas con presencia de arsénico total, tener como alternativa el uso de un floculante natural dentro de su proceso eficiente de tratamiento de aguas de mina.

ABSTRACT

Currently, wastewater of mining origin with the presence of an environmental climate, for example, the companies that generate this waste, the implementation of treatment systems for the control and elimination of contaminating elements, such as the total process through the coagulation and flocculation processes making use of conventional synthetic compounds such as ferric chloride and magnafloc 351 respectively.

In the present research test an alternative is proposed for the use of the natural flocculant derived from the forest species Tara (*caesalpinia spinosa*). By means of its hydration, the Tara gum is obtained, which is used as a flocculant in the treatment of mine water to optimize the process of removal of total arsenic previously dosed with ferric acid that has the function of destabilizing the colloids for when the gum of the mouth is added other suspended particles as the total suspended solids.

During the experimental stage, tests were carried out on the water samples of the mine activities on a laboratory scale under the same environmental conditions. The capacity of tara gum as a flocculating agent was determined, obtaining results that favored the removal of 0.00021 mg / L of total arsenic by 99% with respect to the initial concentration.

The research shows that with the use of tara gum can obtain the maximum permissible levels (<0.1 mg/l) according to the current environmental regulations DS 010-2010-MINAN, this allows you to

raise the mining generator of these waters with the presence of total arsenic, having as an alternative the use of a natural flocculant within its efficient mine water treatment process.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Identificación del problema

La explotación minera en el Perú es considerada un aspecto ambiental, potencial de causar daño ambiental a los recursos naturales (agua, suelo, flora y fauna), es decir, la alteración o cambios en sus propiedades originarias, provocando insostenibilidad a mediano y largo plazo.

CMH, dentro de sus operaciones, realiza actividades de explotación de minerales mediante el rompimiento de la roca maciza, fraccionando de esta manera los diversos minerales, entre ellos, la arsenopirita que, al mezclarse con las aguas de filtración retenidas entre las rocas, generan aguas de mina con presencia de arsénico, en concentraciones mayores a 0.1 mg/L.

Estas aguas ingresan a un sistema de tratamiento de sedimentación primaria por medio de la aplicación de grandes dosis de FeCl_3 como coagulante y floculantes sintéticos, reduciendo de esta manera los niveles altos de sólidos totales en suspensión y concentración de arsénico total presente; sin embargo, a fin de hacer más eficiente este sistema de tratamiento surge la necesidad de incorporar una nueva alternativa que optimice el proceso de remoción de arsénico total, reduciendo su concentración presente en las aguas generadas en mina, hasta el nivel aceptable según lo establece la normativa ambiental peruana, y optimizando el

tiempo empleado para la sedimentación total.

1.2. Formulación del Problema

¿En qué medida el uso de la goma de tara como agente floculante optimizará el proceso de remoción de arsénico total con FeCl_3 presente en aguas de mina?

1.3. Objetivos de la Investigación

Objetivo general:

Determinar la capacidad de la goma de tara como agente floculante en la optimización del proceso de remoción de arsénico total con FeCl_3 , presente en aguas de mina.

Objetivos específicos:

- Determinar la concentración arsénico total presente en el agua de mina en estudio.
- Evaluar las variables que intervienen en el proceso de coagulación con FeCl_3 y floculación con Goma de Tara.
- Optimizar el proceso de remoción de arsénico que emplea FeCl_3 , mediante la adición de goma de tara.

1.4. Justificación

El Perú aún mantiene y cultiva la tradición minera, en donde la generación de aguas minas producto de las excavaciones, hacen que el mineral puesto al descubierto y en contacto con las aguas de infiltración sean fuentes potenciales de generación de aguas residuales con presencia de minerales e

impurezas como lo es el arsénico total.

Ante esto es necesario plantear una nueva alternativa en el tratamiento de las aguas de origen minero, que incorpore a un polímero natural (Goma de Tara) como agente floculador que sustituya el uso de productos químicos (Magnafloc 351, MT 6506, MT 4302), acelere el proceso de sedimentación de sólidos totales suspendidos y arsénico total, y además reduzcan el costo de operación.

Justificación Ambiental

- Remover el arsénico total de aguas de mina, con la finalidad de mejorar la calidad del agua, por ende, minimizar el impacto negativo en los recursos naturales (agua, suelo, flora y fauna) generados por los floculantes químicos.
- Las características de los residuos generados posterior a la remoción del arsénico total, mediante la aplicación del agente floculante Goma de Tara, es menos tóxico a diferencia de los floculantes químicos que son potencialmente tóxicos y/o peligrosos.

Justificación Legal

El uso del Polímero natural Goma de Tara como agente floculante en el proceso de remoción de arsénico con FeCl_3 en aguas de mina, permitirá dar cumplimiento según el DS N° 010-2010-MINAM (LMP's aguas provenientes de actividades minero-metalúrgicas), a la concentración del arsénico total por debajo de 0,1 mg/L, antes de su descarga.

Justificación Económica

El uso de la Goma de Tara como floculante natural, reducirá los

costos de operación, a diferencia de los sistemas convencionales para la remoción de arsénico de aguas de mina.

Otra justificación económica es el aprovechamiento de la creciente producción de la Goma de Tara en el Perú y en un futuro industrializarla para su uso como floculante.

1.5. Importancia

Importancia Social, Ambiental y Económico

El uso de la goma de tara como agente floculante en el tratamiento de aguas residuales de origen minero, permitirá que los productores de esta sustancia continúen produciendo cada vez en mayor cantidad por ser económico a comparación de los floculantes sintéticos y por ser más amigable con el medio ambiente ya que los residuales obtenidos no representan un aspecto potencial de generar impactos ambientales significativos.

Mediante la remoción del arsénico total presentes en las aguas de mina, permitirá mejorar la calidad del agua en el cuerpo receptor del río Parcoy, de esa manera aguas abajo las comunidades aledañas podrán utilizar esta agua para el riego de sus áreas agrícolas sin existir riesgo de contaminación por el arsénico total.

1.6. Limitaciones

Una de las limitaciones que se presentó durante el desarrollo de la investigación fue el envío de las muestras de agua desde

la unidad minera ubicada en La Libertad hasta el laboratorio de Lima, no hubo facilidades para este traslado por ello se tuvo que gestionar directamente con la empresa para que nos puedan habilitar mediante vía aérea Parcoy – Lima, para que estas muestras preservadas puedan ser tratadas y analizadas en el tiempo establecido en los Protocolos de Monitoreo y Análisis de Agua; otra lado se planeó en un inicio realizar el análisis de arsénico haciendo uso del equipo milleniuns del laboratorio de la Universidad de Lima sin embargo se presentó inesperadas fallas con el equipo lo que conllevó a contratar el servicio de otro laboratorio encargado del análisis de metales que se requerían como parte de los experimentos planeados y reducir el número de experiencias por excesivos gastos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Estudio

2.1.1 A nivel nacional:

Entre los estudios revisados podemos citar la tesis "Utilización de Semilla de Tara (Caesalpinia Spinosa) como Ayudante de Coagulación en el Tratamiento de Aguas" realizado por Edwar Alejandro Aguilar Ascon, en el cual evalúa a la goma de tara como ayudante de coagulación en el tratamiento de las agua con alta turbidez. El resultado obtenido de la turbidez que tuvo como valor inicial 390 UNT, haciendo uso solo del sulfato de aluminio fue de 3.4 UNT, mientras que adicionando la goma de tara fue de 1.9 UNT. (Aguilar Ascon, 2010)

Otra tesis revisada fue "Remoción de Sólidos Suspendidos y Materia Orgánica de las Aguas del Río Pollo en Otuzco empleando Semillas de Caesalpinia Spinosa" realizado por Milagros Bravo Guerrero y Jorge Gutiérrez López, donde se evaluó el uso de las semillas de Caesalpinia Spinosa como floculante para descontaminar las aguas del río Pollo, los resultados obtenidos fueron la reducción de DBO5 en un 43.52%, DQO 38% y SST 17% (Bravo Guerrero & Gutierrez López, 2016).

La investigación "Nueva tecnología para Eliminación de

Arsénico de los Efluentes Mineros”, realizado por Asociación Brasileña de Metalurgia, Materiales y Minería, en donde se propuso un proceso de tratamiento innovador para lograr reducir el arsénico a concentraciones menores a 0.2 mg/L según legislación brasileña. Las pruebas fueron a escala de laboratorio y la técnica adoptada fue de co-precipitación mediante el uso de coagulantes y floculantes aniónicos y un agente de remoción, el resultado obtenido en la remoción de arsénico fue de 0.18 mg/L. (Langsch, 2012)

Otra de las investigaciones revisadas fue “Biocoagulación de Aguas Residuales de Industria Textilera Mediante Extractos de *Caesalpinia Spinosa*” realizado por Andrés Revelo, Diego Proaño y Carlos Banchón, en donde se evaluó como alternativa de tratamiento de las aguas residuales de textileras con alta carga orgánica mediante un proceso de remediación de biocoagulación utilizando extractos de la planta *Caesalpinia Spinosa*, el cual tiene el mismo efecto estadístico que aplicando un coagulante químico (policloruro de aluminio 15%). La coagulación natural produjo 85% menos lodo que el policloruro de aluminio, y removió altos contenidos de materia orgánica en el agua residual (1050 mg/L) en un 52%. (Revelo, Proaño, & Banchón, 2015)

Entre los estudios revisados podemos citar la tesis “Remoción de arsénico (As) de efluente minero en la unidad de producción de Maraón de Compañía Minera Poderosa, mediante la adición de cloruro férrico” realizado por Filimon Alejandro, en el cual evalúa el uso de cloruro férrico como coagulante en el tratamiento de efluentes mineros con alta concentración de arsénico cuyos resultados fueron tanto para el efluente con alta

concentración de arsénico se necesita dosificar 12.05 mg/L de cloruro férrico y pH 8.23 para bajar de 0.6563 mg/L a 0.0815 mg/L de arsénico y para el efluente con baja concentración de arsénico se requiere 8.34 mg/L y pH 7.95 para bajar de 0.3989 mg/L hasta 0.0186 mg/L; para ambos casos los resultados el cloruro férrico logra bajar la concentración de arsénico. (Quispe Coica, 2016)

2.1.2 A nivel Internacional

Otro de los estudios revisados podemos citar la investigación “Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric ions and coarse calcite” realizado por S. Song , A. Lopez-Valdieso, D.J. Hernandez-Campos, C. Peng, M.G Monroy-Fernández, I. Razo-Soto, en el cual hacen uso del sulfato férrico como coagulante así como el efecto de partículas gruesas de calcita para mejorar el proceso de coagulación, con la finalidad de eliminar la alta concentración de arsénico en las aguas de la mina ubicada en Matehuala, México. La remoción de arsénico sin el uso de calcita gruesa fue de solo el 85%, mientras que con la adición de la calcita gruesa la remoción de arsénico aumentó en un 99%. (Song, Lopez Valdivieso, Hernandez Campos, Monroy Fernandez, & Razo Soto, 2006)

Adicionalmente se revisó la investigación “Arsenic Removal with Iron (II) and Iron (III) in Waters with High Silicate and Phosphate Concentrations”, realizado por Linda C. Roberts, Stephan J. Hug, thomas Ruettmann, MD Morsaline Billah, Abdul Wahad Khan and Mohammad Tariqur Rahman, en el cual se evaluó la eliminación del arsénico mediante la aplicación del ion hierro (II) en lugar del hierro (III) ya que es

más ventajosa debido a la oxidación del hierro (II) por oxígeno disuelto provocando la oxidación parcial y co-precipitación de los óxidos de arsénico (III) presente en el agua. El resultado obtenido para la remoción del arsénico fue del 98.1%. (Roberts, Hug, Ruettimnn, Billah, Wahab Khan, & Tariqur Rahman, 2004)

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 Agua Residual Industrial en Minería

Es cualquier flujo regular o estacional de sustancia líquida, que proviene de cualquier labor, excavación o movimiento de tierras efectuado en el terreno cuyo propósito es el desarrollo de actividades mineras o actividades conexas, incluyendo exploración, explotación, beneficio, transporte o cierre de minas (MINAM, 2010).

2.2.2 Tipos de Agua Residual Industrial en Minería

Agua residual industrial minera: Cualquier agua proveniente de las actividades de exploración y explotación (MINAM, 2010).

Agua residual industrial metalúrgica: Cualquier agua proveniente del procesamiento de minerales, incluyendo procesos de trituración, molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, amalgamación, reducción, tostación, sinterización, fundición, refinación, lixiviación, extracción por solventes, electrodeposición y otros (MINAM, 2010).

Agua residual doméstica: Cualquier agua proveniente de los

campamentos, sistemas de abastecimiento de agua o energía, talleres, almacenes (MINAM, 2010).

2.2.3 Contaminación del Agua a Causa de la Minería

Uno de los principales contaminantes del agua es por la presencia de metales pesados como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, la plata y el zinc total, contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina, debido al contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa (Galindo, 2005).

2.2.4 Química del arsénico

El arsénico pertenece al grupo VA (N, P, As, Sb, Bi) de la tabla periódica, es un elemento no metálico con la estructura electrónica elemental $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^3$, y se sabe que es tóxico para las plantas y los animales.

Hay cuatro estados de oxidación en el que el arsénico forma compuestos inorgánicos: V, III, 0, -III. (Scott, 1991).

2.2.5 El arsénico en el medio ambiente

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en el ambiente. Suele ser detectable en casi todos sus compartimentos y generalmente aparece en la litosfera en concentraciones entre 1,5 y 2 mg/L, ocupando el puesto 52 en abundancia (Adriano, 2001). Forma parte de más de 245 minerales en forma de arseniatos (60%), sulfuros y sulfosales

(20%) y otras formas como arseniuros, arsenitos, óxidos y silicatos (20%) (Mandar y Suzuki, 2002). Los mayores depósitos de As presente en la corteza terrestre se encuentran en forma de pirita, galena, calcopirita, y esfalerita. Es por esta razón que la arsenopirita ha sido utilizada para la obtención de arsénico a lo largo de la historia, al ser el As un mineral muy abundante en la naturaleza (Smedley and Kinniburgh, 2002) (Smedley P.L., 2002).

2.2.6 Tecnologías para la Eliminación del Arsénico del Agua

Existen varias tecnologías disponibles para la eliminación de arsénico total del agua. Muchas de estas tecnologías requieren etapas de pre tratamiento para reducir químicamente la contaminación. Ver en anexo, la Tabla N° 2.1 Tecnologías para la eliminación del Arsénico, ventajas y desventajas (Mohan & Pittman, 2007)

2.2.7 Coagulación

“La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas, de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas, debido a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) al agua, originando productos insolubles. El reactivo químico agregado al agua debe de ser capaz de, en fracciones de segundo, neutralizar la carga de los coloides generalmente electronegativos, presente en el agua, y formar un precipitado.” (Apaza Asqui, 2015)

“La coagulación es un proceso común en el tratamiento de

aguas aplicado para la desestabilización de impurezas coloidales y disueltas, produciendo agregados de flóculos grandes que pueden ser removidos por subsiguientes procesos de filtración/clarificación”. (Caldera, Mendoza, Briceño, Garcia, & Fuentes, 2007).

Los coagulantes más utilizados son el sulfato férrico, sulfato de aluminio y cloruro férrico, sin embargo, muchos estudios han relacionado el Aluminio en el agua tratada con el mal de Alzheimer y demencia senil (Langsch, 2012).

Los coagulantes pueden ser tanto orgánicos como polielectrolitos o inorgánicos como la alúmina. Pueden usarse solos o en conjunto con un floculante, para reducir la cantidad. Los coagulantes inorgánicos, especialmente sales de hierro y aluminio han sido los más utilizados en la clarificación de aguas y eliminación de DQO de aguas residuales. Forman especies hidratadas complejas cargadas positivamente. Sin embargo, presentan dificultades ante la variación de pH, ya que, al no estar dentro del rango correcto, la clarificación será irrelevante o incluso solubilizar al Fe o Al. (Serrano, 2013)

2.2.8 Mecanismo de la coagulación

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

- Compresión de la doble capa
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

2.2.9 Fases de la coagulación

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas:

Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.

Formación de Compuestos químicos poliméricos. Ver en anexo, la figura N° 2.1 Fases de la coagulación (BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.)

2.2.10 Factores que influyen en la coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación. Las interrelaciones entre cada uno de ellos permiten predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua. (Díaz Claros, 2014)

2.2.11 Influencia del pH.

El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución, y es igual a: $\text{pH} = - \log [\text{H}^+]$.

El pH es la variable más importante para tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades. (Aguilar, 2002, págs. 84-86)

2.2.12 Análisis de pH (Método Electrométrico).

El principio básico de la medida electrométrica del pH se fundamenta en el registro potenciométrico de la actividad de los iones hidrógeno por el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo combinado. La fuerza electromotriz (fem) producida por el sistema electroquímico varía linealmente con el pH y puede verificarse por la obtención de una gráfica de pH vs. fem para diferentes soluciones de pH conocido. El pH de la muestra se determina por interpolación. El potencial entre los electrodos es proporcional a la concentración de iones hidrógeno en solución. (American Public Health Association, 1999)

2.2.13 Influencia de las Sales Disueltas

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las siguientes influencias sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente. (Sanchez, 2015)

2.2.14 Influencia de la Temperatura del Agua

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la

formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc. (Sanchez, 2015)

2.2.15 Influencia de la Dosis del Coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los micros flóculos es muy escaso, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada.
- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de micro flóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra.
- La selección del coagulante y la dosis juegan un rol muy importante sobre la buena o mala calidad del agua clarificada o el buen o mal funcionamiento de los decantadores. (Sanchez, 2015)

2.2.16 Influencia de Mezcla

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecha y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente. (Juberzay, 2011)

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg, máx.) llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los micro flóculos.

La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos. (Sanchez, 2015)

2.2.17 Influencia de la Turbiedad

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Entre más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez.

La turbiedad del agua superficial es en gran parte debido a partículas de diámetros que varían entre 0.2 y 5 μm . La coagulación de estas partículas es muy fácil de realizar cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permite hacer las siguientes predicciones: (Andía, De Vargas y Barrenechea; 2000)

- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad aumenta conviene realizar un pretratamiento basado en una sedimentación natural o forzada.

En este caso, para una sedimentación forzada, es recomendable el empleo de un polímero aniónico para elevar la probabilidad de colisión entre las partículas por lo que la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario, cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.

2.2.18 Análisis de la Turbidez

Este método tiene como principio general determinar la cantidad de sustancias en líquido a través de un análisis óptico por medio de la detección de las partículas con una fuente de haz lumínico y un detector de luz fijado a 90 grados del haz original. La fuente luminosa de infrarrojo permite medir de 0,01 hasta 1100 TE/F = NTU = FNU con un límite de comprobación de 0,01, haciendo posible su medición para agua potable hasta

aguas residuales. (Asociación española de normalización y certificación, 2001)

2.2.19 Tipos de coagulación

Se presentan dos tipos básicos de coagulación: por adsorción y por barrido.

- **Coagulación por Adsorción**

(Andía, 2000) Afirma que se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flóculos en forma casi instantánea. Ver en anexo, la figura 2.2 Explicación gráfica de la formación de flóculos por adsorción.

- **Coagulación por Barrido**

Según Andía et al. (2000), este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico. Ver en anexo, la figura 2.3 Explicación gráfica coagulación por barrido.

2.2.20 Coagulantes Utilizados

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso,

muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son:

- a) Sulfato de Aluminio.
- b) Aluminato de Sodio.
- c) Cloruro de Aluminio.
- d) Cloruro Férrico.
- e) Sulfato Férrico.
- f) Sulfato Ferroso.
- g) Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación).

Siendo los más utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

2.2.21 Coagulante Cloruro Férrico

(Quispe Coica, 2016) Trabajó en los procesos de coagulación con cloruro férrico a escala de laboratorio con aguas naturales y artificiales contaminadas con As (III) y As (V). El agua usada en dicha investigación provenía del drenaje de mina cuyo contenido de arsénico era alto, se empleó un proceso de coagulación mejorado con iones férricos y calcita gruesa, logrando una eliminación de As de más del 99 % por medio de la coagulación mejorada seguida de filtración convencional con papel de filtro. Por otro lado se estudiaron la estequiometría, cinética, y oxidación del arsenito con Fe (VI) y realizaron

ensayos de eliminación de arsénico utilizando Fe (VI) como oxidante y coagulante. (Franco & Carro, 2014)

2.2.22 Floculación

“La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.” (Gómez Puente, 2005)

“Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. En esta etapa corresponde una mezcla lenta, que debe realizarse a la velocidad adecuada para crear diferencias de velocidad del agua suficientes para generar contacto entre los flóculos, sin que se rompan.” (Andía, 2000).

La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso. La floculación puede ser mejorada por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación. (Aguilar, 2002)

2.2.23 Tipos de floculación

Hay 2 tipos de floculación: (Andía, 2000)

- **Floculación Pericinética**

Está producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano. (Mancipe, Ordoñez, & Alejandro, 2016)

• **Floculación Ortocinética**

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los micros flóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinetica luego se produce la floculación ortocinética. (Mancipe, Ordoñez, & Alejandro, 2016)

2.2.24 Floculantes más usados

Estos floculantes pueden ser de naturaleza: mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis (Devesa Rey, Rodríguez Rodríguez, & Urréjola, 2017)

Floculantes Minerales. Se encuentra la sílice activada, que es el primer floculante empleado, que debe ser preparado antes de emplear, su preparación es tan delicada y presenta el riesgo de la gelatinización; produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución. (Caso Atarjea en los años 70 – 80, se utilizó en el tratamiento de agua).

Floculantes Orgánicos Naturales. Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales. Los alginatos, cuya estructura polimérica son: Los ácidos manuránicos y los ácidos glucónico.

Floculantes Orgánicos de Síntesis. Son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 a 107 gr. /mol, estos se clasifican de acuerdo con la ionicidad de los polímeros:

- ✓ Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico).
- ✓ Neutros o no iónicos (poliacrilamidas).
- ✓ Catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico).

2.2.25 Mecanismo de Coagulante

La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz de:

- Neutralizar la carga de los coloides, generalmente electronegativos, presentes en el agua.
- Formar un precipitado.

La sedimentación de los coloides requiere un determinado tamaño de partícula, que se consigue mediante el proceso de coagulación. Incluso partículas mayores, que no son realmente coloidales y que sedimentarían si se les diera un tiempo suficiente, requieren de la coagulación para asentarse con mayor rapidez.

Para este caso, la capacidad del FeCl_3 como coagulante para

desestabilizar una suspensión coloidal es función de su carga. Así, los electrolitos capaces de aportar cationes trivalentes, que neutralizan las cargas negativas del coloide, presentan una mayor capacidad coagulante (teoría de Schulze-Hardy). (Montoya Arias & Silencio Acuña, 2017)

2.2.26 Mecanismo de Floculante

Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y transformando así, partículas individuales en aglomerados. Esta aglomeración de coloides puede que no sea lo bastante grande como para asentarse con la rapidez deseada. (Gómez Puente, 2005)

La floculación es estimulada por un mezclado lento con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula de flóculo; una agitación demasiado intensa puede romperlos y raramente vuelven a adquirir el tamaño óptimo. Como consecuencia de la floculación no sólo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también afecta a su naturaleza física. (Andía, 2000)

2.2.27 Sedimentación

Se define como el mecanismo mediante el cual las partículas suspendidas se separan por fuerzas de gravedad. La coagulación y floculación implica la adición de compuestos que inducen la rápida agregación y sedimentación de las partículas suspendidas (Wang et al., 2005).

Se entiende por sedimentación a la remoción, por efecto gravitacional de las partículas en suspensión en un fluido y que tengan peso específico mayor que el fluido. En un determinado

intervalo de tiempo no todas las partículas en suspensión sedimentan. Justamente las que sedimentan en un intervalo de tiempo elegido son llamadas sólidos sedimentables.

“La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada” (Pérez y CEPIS, 1977).

2.2.28 Tipos de Sedimentación

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración, así: (La Corte, 2006, p. 27)

- **Sedimentación de partículas discretas**

Se refiere a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

- **Sedimentación de partículas floculentas**

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a

consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) si cambian durante la caída. Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

- **Sedimentación por caída libre e interferida**

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

2.2.29 Prueba de Jarras

Las pruebas más representativas para determinar el comportamiento de los coagulantes y floculantes a escala pequeña es el Ensayo de “Prueba de Jarra”.

Es un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, promoviendo la remoción de coloides suspendidos y materia orgánica. Este procedimiento permite determinar las condiciones de operación óptimas para el tratamiento de aguas, ya que permite hacer ajustes en el pH, variar dosis de coagulantes y floculantes y alternar velocidades

de agitación. (Cayotopa y Rodríguez, 2011).

La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento para el agua o el tratamiento de aguas residuales. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado, o la prueba de coagulante o diferentes tipos de polímeros, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor.

La técnica está conformada por 3 etapas de tratamientos: La mezcla inicial (también llamado rápido o mezcla flash), floculación y clarificación, así como la traducción en un protocolo de pruebas de la muestra. Los parámetros clave incluyen: (American Water Works Association, 2011)

- Gradiente de velocidad / intensidad de mezclado en la mezcla rápida y cuencas de floculación.
- Tiempos de retención eficaces en la mezcla rápida y cuencas de floculación.
- Tasa de carga superficial de la cuenca de sedimentación.
- Tiempo de retención real en las cuencas si la prueba de jarras se está haciendo para evaluar tiempo-reacciones dependientes para que a gran escala de tiempo de reacción influye en los resultados

2.2.30 Gradiente de Velocidad

Es la variable más importante que tiene la prueba de jarras y está expresada como la intensidad de agitación en el agua, para ello se utiliza paletas o rotores accionados en forma mecánica o magnética.

2.2.31 Polímeros naturales

Los denominados biocoagulantes o coagulantes naturales son ciertamente seguros, amigables con el medio ambiente y libres de toxicidad (bajo condiciones adecuadas de uso). Sus compuestos bioactivos son proteínas, polisacáridos, mucílagos, taninos y alcaloides

2.2.32 Tara (*Caesalpinia spinosa*)

La Tara es un carbohidrato polimerizado con alto peso molecular.

Químicamente es un galactomanano formado por monómeros de manosa y galactosa en una relación 3:1 (De La Cruz, 2004) Sus principales aplicaciones son como aditivos químicos, modificadores de propiedades tales como hidratación, viscosidad y estabilidad.

2.2.33 Análisis por espectrometría de masas de plasma (ICP-MS)

Es una técnica que permite determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt).

Consiste en el acoplamiento de un método para generar iones

(plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas).

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interface de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa.

Cada una de las masas sintonizadas llega al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra.

2.3. Bases Legales

2.3.1 Estándares de Calidad Ambiental del Agua

En julio del 2008 se aprobaron los ECA para agua (D.S. N° 002-2008-MINAM), con el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presente en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. Los ECA son

aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural. (MINAM, 2008)

En diciembre del 2015, se hizo una modificación de los parámetros y valores de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua aprobados por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, entrando en vigencia el D.S. N° 015-2015-MINAM.

2.3.2 Límite Máximo Permisible para Efluente Mineros Metalúrgicos (LMP)

Medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el sistema de gestión ambiental, según (MINAM, 2010). Ver en anexo, la tabla N° 2.2 Límite Máximo Permisible para Efluente Mineros Metalúrgicos.

CAPITULO III

VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de la Investigación

- Variable Independiente: X

X1: Concentración de Cloruro Férrico como agente coagulante

Definición Conceptual: Es la cantidad miligramos por litro de solución necesaria del agente coagulante que se usará en el proceso de remoción de arsénico total presente en aguas de mina.

X2: Concentración de Goma de tara como agente floculante

Definición Conceptual: Es la cantidad miligramos por litro de solución necesaria del agente floculante que se usará en el proceso de remoción de arsénico total con FeCl_3 presente en aguas de mina.

- Variable Dependiente: Y

Y: Remoción del arsénico presente en aguas de mina

Definición Conceptual: Porcentaje de remoción de arsénico total en el proceso de floculación, posterior al uso del coagulante FeCl_3 .

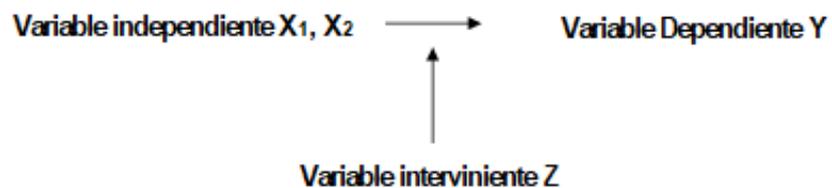
- Variable Interviniente: Z

Z: Potencial de hidrógeno

Definición Conceptual: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno $[H]^+$ presente en determinadas disoluciones.

3.2. Operacionalización de variables

La investigación ha realizar será netamente experimental, en ese sentido existe una relación entre las variables, del tipo:



- Variable Independiente: X

X1: Concentración del Cloruro Férrico como agente coagulante (mg/L)

Definición Operacional: Es la cantidad de miligramos por litro necesaria del cloruro férrico que actuará como agente coagulante en el proceso de remoción de arsénico total.

Indicador: Porcentaje de remoción miligramos de arsénico total por litro de agua de mina.

X2: Concentración de la Goma de Tara como agente floculante (mg/L)

Definición Operacional: Es la cantidad de miligramos por litro necesaria de la Goma de Tara que actuará como agente floculante en el proceso de remoción de arsénico total con FeCl_3 .

Indicador: Porcentaje de remoción miligramos de arsénico total por litro de agua de mina.

- Variable Dependiente: Y

Y: Remoción de arsénico presente en aguas de mina (mg/L)

Definición Operacional: Proceso de variación de la concentración del arsénico total presente en aguas de mina, a fin de obtener resultados por debajo de los Límites Máximos Permisibles para aguas provenientes de actividades minero-metalúrgicas según DS N° 010-2010-MINAM (As total <0,1 mg/L).

Indicador: Variación de la concentración de arsénico total (mg/L)

- Variable Interviniente: Z

Z: Potencial de hidrógeno

Definición Operacional: Concentración de iones de hidrógeno presente en una disolución en el rango de $6 < [\text{pH}] < 9$

Indicador: Cantidad de iones de hidrógeno.

Ver en anexo, la tabla N° 3.1 Descripción de variables con sus

respectivos indicadores.

3.3. Hipótesis

“El uso de la goma de tara como agente floculante optimizará el proceso de remoción de arsénico total con FeCl_3 presente en aguas de mina”

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo de Investigación

Para definir el tipo de investigación se consultó el libro “**Metodología de la investigación científica**” de Dr. Roberto Hernández Sampieri, Dr. Carlos Fernández y Dra. María del Pilar Baptista (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), por lo que se concluye que la investigación es de tipo de **experimental y a escala de laboratorio** donde se verificó la manipulación de las variables “**X₁**= Concentración de Cloruro férrico (mg/L) y “**X₂**= Concentración de Goma de Tara como agente floculante (mg/L) el cual permitió analizar el efecto sobre la variable dependiente “**Y**= Concentración de arsénico residual presente en aguas de mina (mg/L).

4.2 Diseño de la investigación

Como parte del diseño de la investigación se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

4.2.1 Elección del diseño del experimento

La metodología del diseño de experimentación permite describir cualquier fenómeno considerando el efecto de diferentes variables independientes en forma simultánea. Es decir, se diseña una serie de ensayos con los que se estudia

un proceso. Los modelos más usuales son los factoriales, los factoriales fraccionales y el modelo de Box-Wilson. Para los tres, el análisis de los resultados se completa con la obtención de modelos matemáticos (análisis de regresión) y, a partir de ellos, se encuentran las condiciones que maximizan (o minimizan) el valor de una respuesta determinada.

Hay dos tipos principales de diseños de superficie de respuesta, Diseños centrales compuestos y diseños de Box-Behnken. Los diseños centrales compuestos pueden ajustarse a un modelo cuadrático completo. Suelen utilizarse cuando el plan del diseño requiere de un experimento secuencial, porque estos diseños pueden incluir información de un experimento factorial planificada correctamente. (Tomado de la página web de soporte minitab). Para el desarrollo de esta tesis se ha tomado el diseño de tipo centrales compuestos según el anexo, tabla N° 4.1 Diseño compuesto central de Box-Wilson cuando $k=2$

4.2.2 Determinación del punto de monitoreo y toma de muestra del efluente minero sin tratamiento

Para este estudio se ha designado a la bocamina “Balcón” como punto de monitoreo debido a que en el confluyen los drenajes generación en interior mina. Ver en anexo, la figura N° 4.1 Fotografía de la bocamina Balcón (JNG) de Consorcio Minero Horizonte.

4.2.3 Caracterización inicial del efluente generado por la mina de oro ubicada en el departamento de la Libertad.

El agua de mina proveniente de las operaciones subterráneas

de la minera, fueron monitoreadas previamente por la propia empresa generando una data histórica para el parámetro fisicoquímico arsénico total. Ver en anexo, la tabla N°4.2 Resultados Históricos de Arsénico Total en Agua de Mina.

Tanto los datos históricos y el último resultado obtenido del análisis de agua sobre el efluente minero, fueron comparados con los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero-Metalúrgicas según lo establece el DS 010-2010-MINAM, en donde se identificó al parámetro Arsénico total (As-T) sobrepasa el límite establecido.

4.2.4 Selección del tipo de tratamiento a emplear

Del monitoreo preliminar se tomó un muestra y se realizó una prueba de especiación de arsénico. Ver en anexo, la figura N° 4.2 Gráfica con resultados de especiación de Arsénico. Con la finalidad de determinar las predominancias de especies de arsénico, tanto en su forma de arseniato AsO_4^{3-} , o de arsenito AsO_3^{3-} .

Teniendo ya la caracterización física del agua en estudio se procederá en proponer el uso de $FeCl_3$ como coagulante.

Para el caso de la Goma de tara, según el estudio referencial es usado como polímero natural en los procesos de floculación.

Por tal motivo, para la investigación realizada resulta de particular interés las técnicas de remoción que utilizan mecanismos basados en los principios de coagulación-floculación.

4.2.5 Criterio para la selección de valores de concentración de cloruro férrico (FeCl_3) y goma de tara.

(Campo Chapeña & Tobar Olave, 2011) En su estudio “Evaluación de la dosificación de cloruro férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR-CAÑAVERALEJO” menciona experiencias mundiales de proyectos a escala real en donde tuvieron resultados exitosos con dosis entre 14 y 20 mg/L de Fe con 0.5 mg/L de polímero.

En otro estudio realizado, en el tratamiento de agua de mina con cloruro férrico, establecen como concentración de FeCl_3 8.34mg/L y 12.05mg/L como coagulante para remover valores de arsénico total 0.39 mg/L y 0.65 (Quispe Coica, 2016) respectivamente; por estas referencias, se ha seleccionado los siguientes valores (4.3 ppm; 10 ppm; 15 ppm; 20ppm y 25.7ppm) de estudio del FeCl_3 como coagulante.

Para el caso del floculante se los valores de aplicación de polímero oscilan entre 0.1 mg/L a 0.5mg/L esto debido a la gran cantidad de segmentos que poseen las moléculas de polímero. (Campo Chapeña & Tobar Olave, 2011), por tal sentido para este trabajo se ha seleccionado los siguientes valores de goma de tara (430mg/L; 1000mg/L; 1500mg/L; 2000mg/L y 2570mg/L) como polímero natural.

Por último, para establecer la cantidad de pruebas a realizar se hizo uso del “Diseño compuesto central de Box-Wilson”. Ver en anexo, la tabla 4.3 Diseño compuesto central de Box-Wilson. De esa manera se establecen combinaciones de

cloruro férrico y goma de tara con la finalidad de hallar una zona en donde ambas variables interactúan y generen un mejor resultado de remoción.

4.2.6 Prueba preliminares test de jarra entre el coagulante (FeCl₃) y el agua de mina.

Inicialmente se realizaron 5 pruebas al agua de mina dosificando las mismas concentraciones FeCl₃ con la finalidad de ver la respuesta del férrico como coagulante en el agua de mina en estudio.

4.2.7 Descripción de la prueba de jarra

Para el uso del equipo de test de jarra, tanto en las pruebas preliminares como pruebas propias del experimento se definieron parámetros de operatividad del equipo como capacidad de la jarra a utilizar (volumen de muestra), gradiente de velocidad para la mezcla rápida y mezcla lenta, tiempo de mezcla rápida y lenta;

- **Selección de gradiente y tiempo de mezcla**

Para iniciar con la prueba de jarra se estableció para la mezcla rápida un gradiente $264.1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ y tiempo de mezcla de 90 segundos, haciendo uso de las gráficas de gradiente del equipo test de jarras marca “4G Platypus Jar Tester”, se eligió la velocidad de agitación 100rpm para una Temperatura de 24°C del agua de estudio; mientras que para la mezcla lenta se estableció un tiempo de mezcla de 25 min y un gradiente $66.8 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ cuya velocidad de agitación corresponde a 40rpm. Ver en anexo, en la figura N° 4.2 4G Platypus Jar Tester.

En la prueba de jarras se utiliza variaciones en la dosis del

coagulante en cada jarra (generalmente 6 jarras), permitiendo la sedimentación de los sólidos en suspensión.

• **Cálculo de las concentraciones de Fe⁺³ y su reparación**

Para obtener las concentraciones de Fe⁺³ se utilizó el compuesto de FeCl₃6H₂O en forma sólida (polvo), por lo que primero se tuvo que realizar el siguiente cálculo para determinar cuántos gramos del compuesto se debe pesar para obtener

4.3mg Fe⁺³,

10mg Fe⁺³, 15mg Fe⁺³, 20mg Fe⁺³ y 25.7mg Fe⁺³.

$$\frac{4.3mgFe^{+3}}{1mL} \times \frac{1gFe^{+3}}{1000mgFe^{+3}} \times \frac{1molFe^{+3}}{55,85gFe^{+3}} \times \frac{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFe^{+3}} \times \frac{270.3gFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}$$

$$= 0.02081gFeCl_3 \cdot 6H_2O$$

$$\frac{10mgFe^{+3}}{1mL} \times \frac{1gFe^{+3}}{1000mgFe^{+3}} \times \frac{1molFe^{+3}}{55,85gFe^{+3}} \times \frac{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFe^{+3}} \times \frac{270.3gFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}$$

$$= 0.048gFeCl_3 \cdot 6H_2O$$

$$\frac{15mgFe^{+3}}{1mL} \times \frac{1gFe^{+3}}{1000mgFe^{+3}} \times \frac{1molFe^{+3}}{55,85gFe^{+3}} \times \frac{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFe^{+3}} \times \frac{270.3gFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}$$

$$= 0.072gFeCl_3 \cdot 6H_2O$$

$$\frac{20mgFe^{+3}}{1mL} \times \frac{1gFe^{+3}}{1000mgFe^{+3}} \times \frac{1molFe^{+3}}{55,85gFe^{+3}} \times \frac{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFe^{+3}} \times \frac{270.3gFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}$$

$$= 0.096gFeCl_3 \cdot 6H_2O$$

$$\frac{25.7mgFe^{+3}}{1mL} \times \frac{1gFe^{+3}}{1000mgFe^{+3}} \times \frac{1molFe^{+3}}{55,85gFe^{+3}} \times \frac{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFe^{+3}} \times \frac{270.3gFeCl_3 \cdot 6H_2O}{1molFeCl_3 \cdot 6H_2O}$$

$$= 0.124gFeCl_3 \cdot 6H_2O$$

Obtenidos los cálculo teóricos de pesos de FeCl₃6H₂O para las 5 concentraciones de Fe⁺³. Ven en anexo, tabla N° 4.4 Relación de masa volumen de Fe⁺³. Se procede la

preparación de las 5 concentraciones de Fe^{+3} . Ver en anexo, figura N° 4.3 Preparación de las 5 concentraciones de Fe^{+3} .

- **Preparación de la Goma de tara**

De las concentraciones de goma de tara seleccionadas para el estudio, se usó 24 vasos precipitados de capacidad 25mL para la preparación de la Goma de Tara, en donde se vertió los pesos de goma de tara. Ver en anexo, Tabla N° 4.5 Pesos de goma de tara. Se disolvió con 25ml de agua ultra pura haciendo uso de un agitador y pastilla imantada. Ver en anexo, figura N° 4.4 Etapa de agitación con pastilla imantada de cada vaso con 25 ml de solución de goma de tara. Posteriormente se dejó 30 min de maduración de la solución de goma de tara. Ver en anexo, figura N° 4.5 Proceso de maduración de la goma de tara.

- **Control de pH con NaOH**

Para regular el pH después de haber agregado el férrico, se agrega dosis de NaOH a 5 molar, hasta llevar a todas las muestras a un pH de 8.

Culminado el tiempo de mezcla lenta, se dejó por un tiempo de sedimentación de 5 min como máximo.

Extracción de muestras de agua tratada y preparación para su envío.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

Para este estudio se ha definido como población del estudio a

las aguas de mina provenientes de las operaciones de Unidad de Producción Consorcio Minero Horizonte. Ver en anexo, figura N° 4.6 Ubicación de la Unidad Minera Consorcio Minero Horizonte.

4.3.2 Muestra

La muestra de agua que contiene arsénico es tomada al ingreso de las pozas de sedimentación provenientes de las operaciones de Unidad de Producción Consorcio Minero Horizonte, principalmente de la bocamina Balcón, con coordenadas UTM. WGS 84, Zona 19 (Este: 225 956, Norte: 9 115 547). Ver en anexo, la figura N° 4.1 Fotografía de la bocamina Balcón (JNG) de Consorcio Minero Horizonte.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Técnica de recolección de datos

- **Instrumentos de recolección de datos**

La recopilación de datos históricos como parte de la caracterización del agua de mina se extrajo de los informes de monitoreo remitidos por el laboratorio. La técnica usada para esta etapa fue interpretación de resultados ya existentes.

- **Toma de muestra**

Se utilizaron las técnicas de muestreo establecidas en el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales en las Actividades Minero-Metalúrgicas publicado por el Ministerio de Energía y Minas, el año 2011. Ver en anexo, tabla N° 4.6 Requisitos de toma de muestra y

preservación de muestra.

4.4.2 Métodos y equipos de recolección de datos

Los métodos y equipos utilizados para la medición de los parámetros analizados en el agua de mina.

4.5 Procedimiento de recolección de datos

4.5.1 Estudio preliminares

Para determinar los niveles de concentración de arsénico presente en el agua de mina a tratar se tomó una muestra de un litro en recipiente de polietileno, preservado con ácido nítrico (HNO₃) pH<2, conservado a temperatura T=6°, y fue llevado a analizar al laboratorio JRamon del Perú S.A.C.

Los resultados del análisis realizado en esta etapa de estudio preliminar permitieron realizar una caracterización fisicoquímica tanto de parámetros tomados in situ y de metales presentes en el agua de mina.

Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos se usó un equipo portátil de medición de pH y turbiedad en campo. Mientras que para el análisis de metales totales se hizo uso de la metodología establecida por la norma EPA 200.8

4.5.2 Experiencia del Test de Jarra

En esta parte de la experiencia se recolecta datos como el valor de pH con el ph-metro, temperatura y turbiedad con el turbidímetro para cada litro de jarra que iniciarán el

tratamiento de coagulación y floculación.

En el proceso de coagulación, durante la etapa de la mezcla rápida, cuando se agrega a cada jarra la concentración de FeCl_3 , se medirá por segunda vez el pH con la finalidad de controlar y regularlo con NaOH hasta garantizar un valor de $\text{pH}=8$.

Posterior a ello se agrega, en la etapa de mezcla lenta, las dosis de goma de tara; culminado el tiempo de mezcla lenta se procede a tomar tiempo hasta su sedimentación. Por último se procede a tomar los valores de pH, turbiedad y temperatura.

Después de culminar el tiempo de sedimentación las muestras tratadas con coagulante FeCl_3 y goma de tara en cada vaso del test de jarra serán extraídas para su posterior análisis en el laboratorio.

4.5.3 Preparación de muestras y análisis

La conservación y tratamiento de las muestras se realizó según las normas establecidas en el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales en las Actividades Minero-Metalúrgicas publicado por el Ministerio de Energía y Minas, el año 2011. Ver en anexo, tabla N° 4.6 Requisitos de toma de muestra y preservación de muestra. Asimismo se efectuaron las determinaciones de los elementos por espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado.

4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.

Se hizo uso de tablas de Excel para la recolección de datos y fueron procesadas mediante el programa estadístico MiniTab 15, realizando un análisis de superficie de tipo Box – Behnken para determinar el tratamiento más efectivo con respecto a la reducción de arsénico presente en el agua de mina.

El programa Minitab-15 es un sistema para el análisis de datos que permite la interacción de los distintos experimentos, así también la generación de respectivos gráficos y tablas para su discusión final, mediante el uso del programa SPSS, MiniTab y/o Excel en donde se aprovechará el diseño compuesto central de Box-Wilson y hacer uso de la técnica de superficie respuesta para entender mejor y optimizar los resultados.

CAPITULO V

RESULTADOS

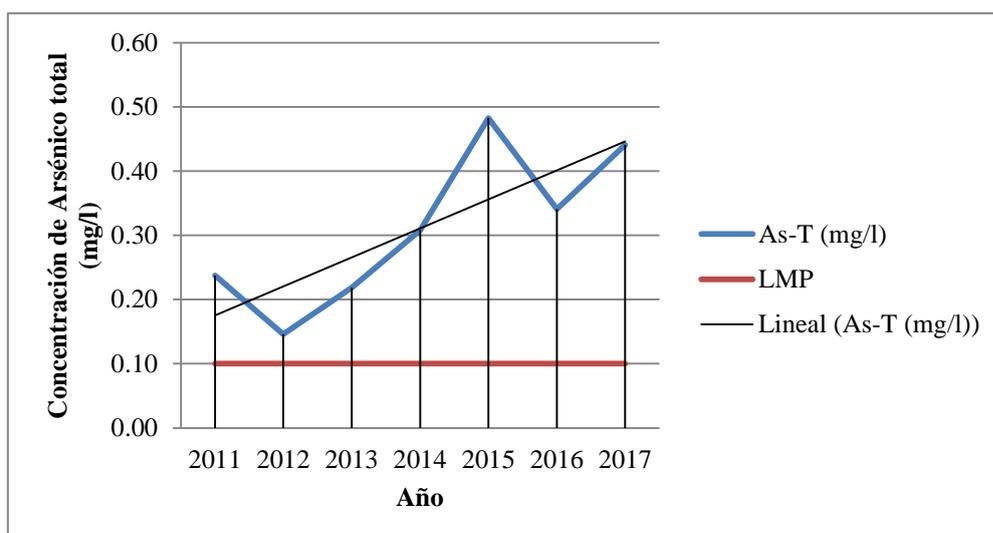
5.1 Objetivo 1: Determinar la concentración de arsénico total presente en el agua de mina en estudio.

TABLA N° 5.1
RESULTADOS HISTORICOS DE ARSENICO TOTAL EN EL
AGUA DE MINA

Punto de Monitoreo	Año	As-T (mg/l)	LMP (mg/l)
Agua de Mina	2011	0.24	0.1
	2012	0.15	0.1
	2013	0.22	0.1
	2014	0.31	0.1
	2015	0.48	0.1
	2016	0.34	0.1
	2017	0.44	0.1
	2018	0.26	0.1

Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.1
CONCENTRACION HISTORICA DEL ARSENICO TOTAL
2011-2017



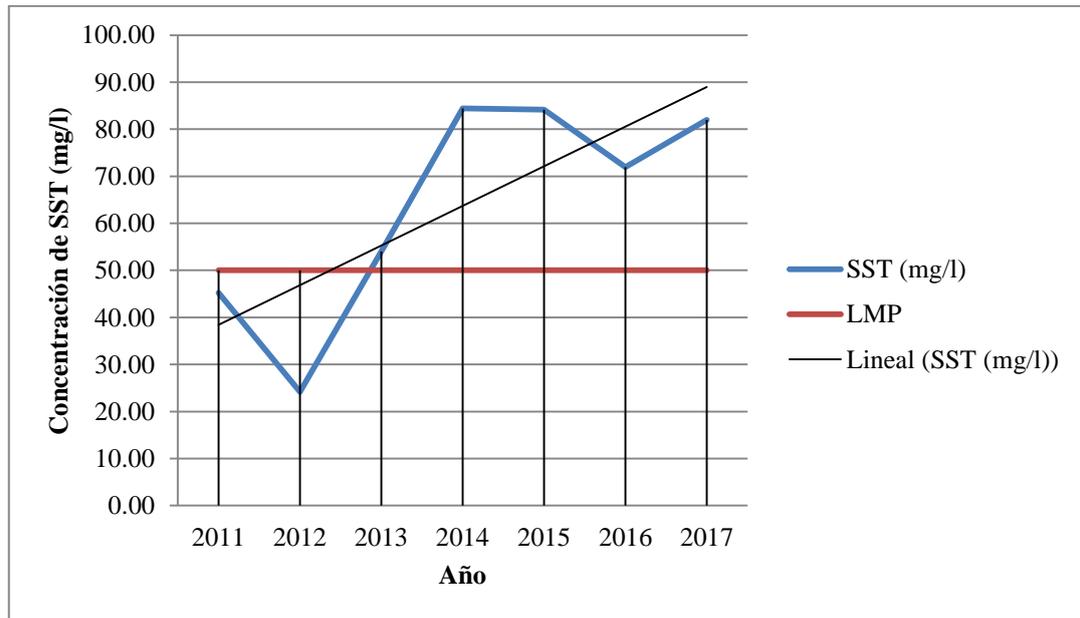
Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 5.2
RESULTADOS HISTORICOS DE SST EN EL AGUA DE MINA

Punto de Monitoreo	Año	SST (mg/l)	LMP (mg/l)
Agua de Mina	2011	45.24	50
	2012	24.16	50
	2013	54.01	50
	2014	84.43	50
	2015	84.15	50
	2016	71.98	50
	2017	81.98	50
	2018	85.50	50

Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.2
CONCENTRACION HISTORICA DE SST 2011-2017



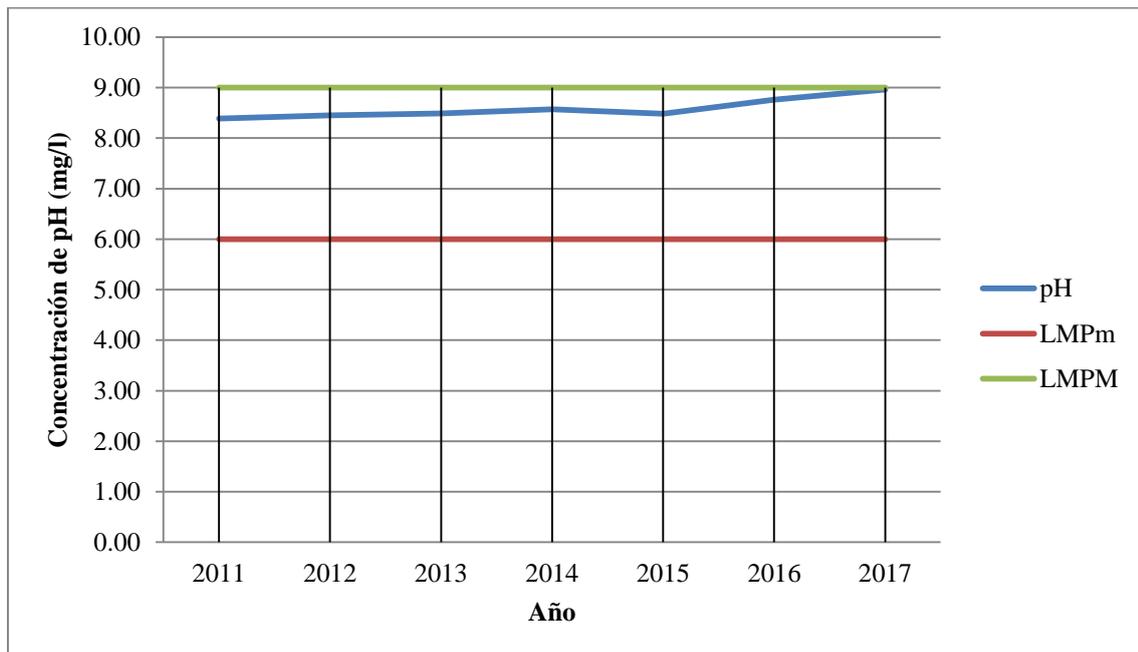
Fuente: Elaboración propia.

**TABLA N° 5.3
RESULTADOS HISTORICOS DE pH EN EL AGUA DE MINA**

Punto de Monitoreo	Año	pH	LMP mínimo	LMP máximo
Agua de Mina	2011	8.39	6	9
	2012	8.45	6	9
	2013	8.49	6	9
	2014	8.57	6	9
	2015	8.48	6	9
	2016	8.76	6	9
	2017	8.96	6	9
	2018	7.97	6	9

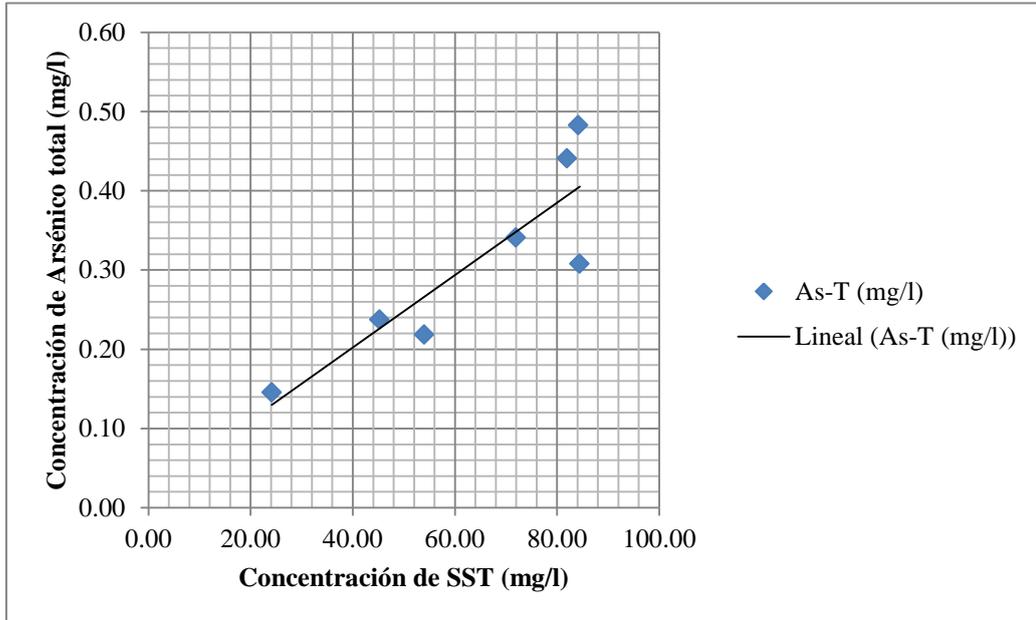
Fuente: Elaboración propia.

**GRAFICO N° 5.3
CONCENTRACION HISTORICA DEL pH 2011-2017**



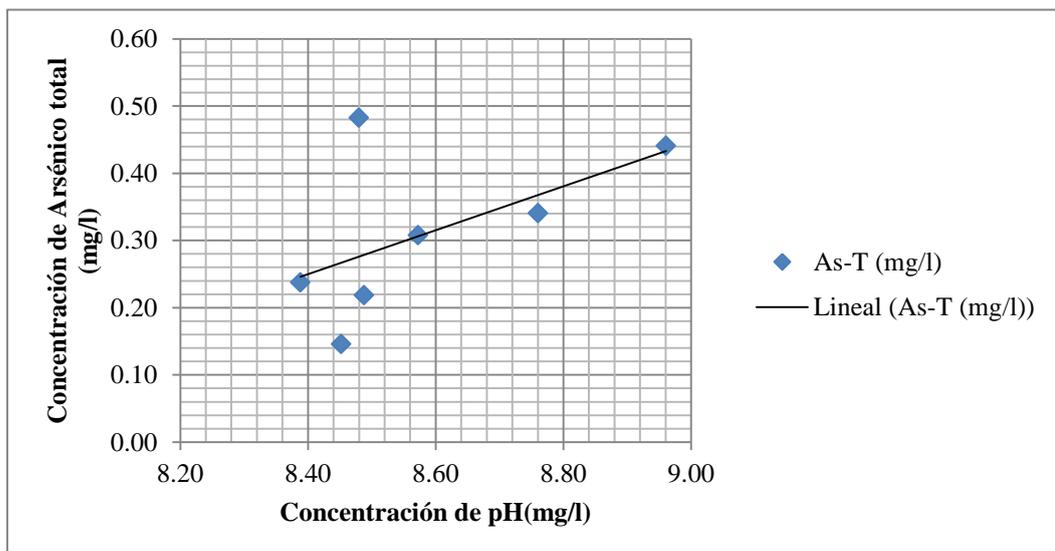
Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.4
RELACION HISTORICA ENTRE EL ARSENICO TOTAL Y LOS
SST 2011-2017



Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.5
RELACION HISTORICA ENTRE EL ARSENICO TOTAL Y pH
2011-2017



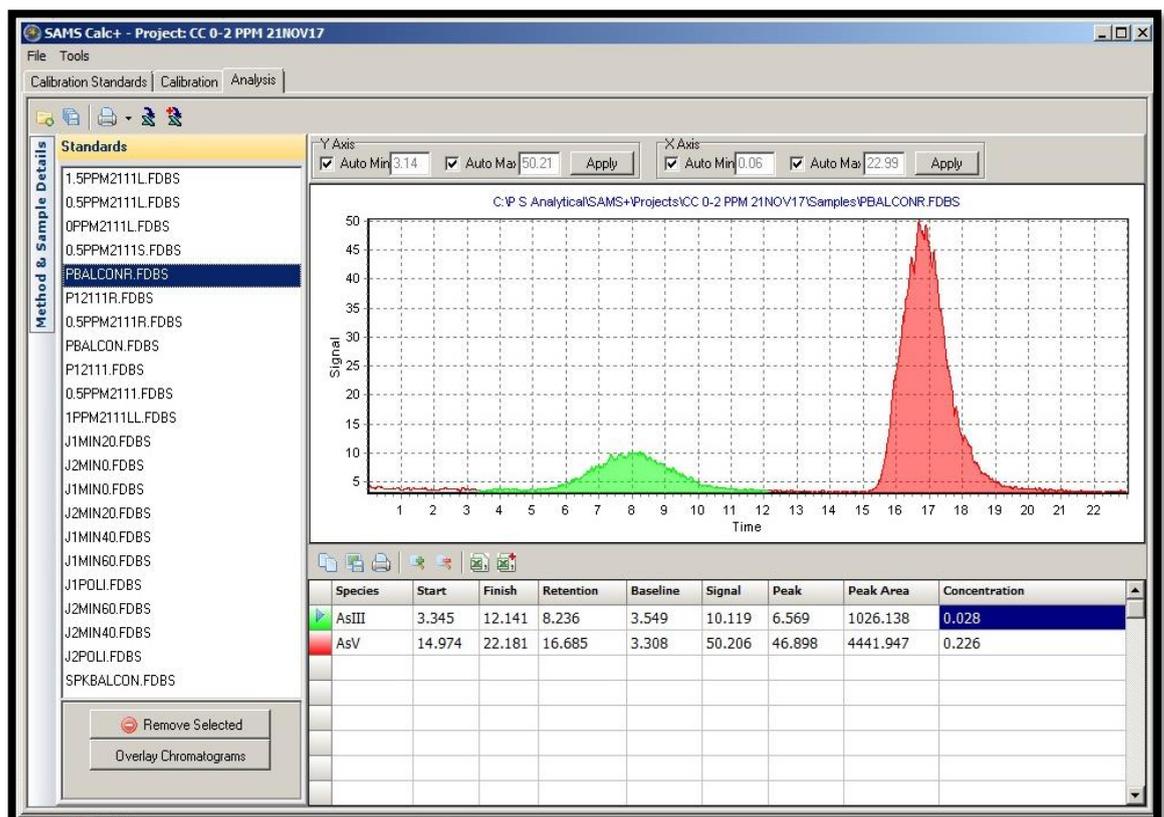
Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 5.4
RESULTADOS PROMEDIOS DE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL
AGUA DE MINA A ESTUDIAR

Parámetro	Resultados
pH	7.2
Turbiedad	84.8 NTU
Arsénico total	0.257 mg/l
Temperatura	24 °C

Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.6
RESULTADOS DE ESPECIACIÓN DE ARSÉNICO



Fuente: Elaboración propia.

5.2 Objetivo 2: Evaluar las variables que intervienen en el proceso de coagulación con FeCl₃ y floculación con Goma de Tara.

**TABLA N° 5.5
RESULTADOS PRUEBAS JARRAS INICIAL
COMPORTAMIENTO DIFERENTES CONCENTRACIONES
DE COAGULANTE FECL₃ CON EL AGUA DE MINA**

Componente	Parámetro	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5
Agua de mina	pH ₀	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	As-T ₀ (mg/l)	0.257	0.257	0.257	0.257	0.257
	Turbiedad ₀ (NTU)	84.8	84.8	84.8	84.8	84.8
	FeCl ₃ (mg/l)	4.3	10	15	20	25.7
Agua de mina con FeCl ₃	pH 1	6.3	5.7	5.3	4.1	3.3
	As-T 1 (mg/l)	0.29	0.16	0.009	0.003	0.001
	Tiempo sedimentación (min)	120	55	47	36	30
	Turbiedad 1(NTU)	19.0	11.4	9.5	7.0	6.6

Fuente: Elaboración propia.

**TABLA N° 5.6
TABULACION DE POSICIONAMIENTO PARA
DETERMINACION DE CONCENTRACION DE CLORURO
FERRICO POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA**

-1.414	-1	0	1	1.414
4.3	10	15	20	25.7

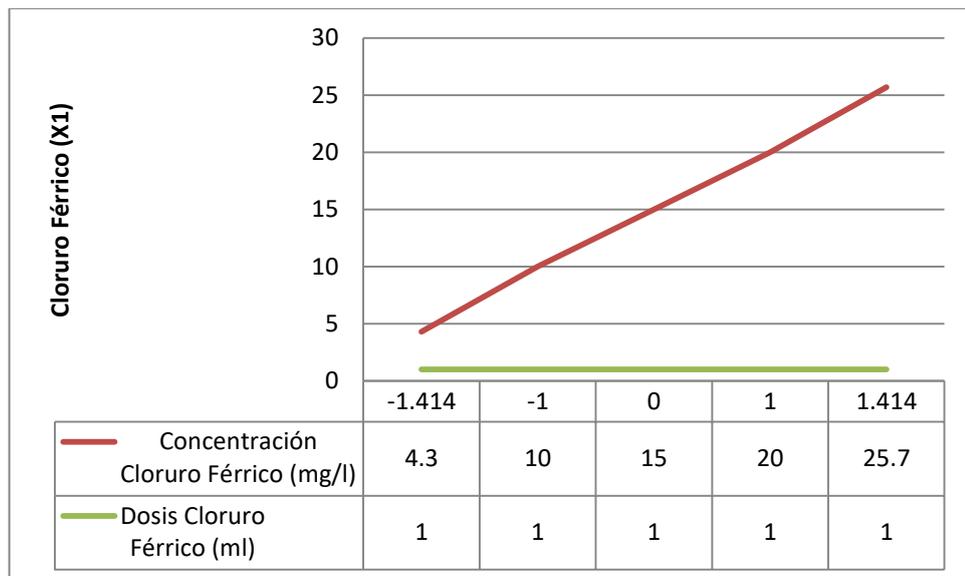
Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 5.7
CONCENTRACION DE CLORURO FERRICO POR METODO
SUPERFICIE DE RESPUESTA

Posición	Concentración Cloruro Férrico (mg/l)	Dosis Cloruro Férrico (ml)
-1.414	4.3	1
-1	10	1
0	15	1
1	20	1
1.414	25.7	1

Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.7
CONCENTRACION Y DOSIS DE CLORURO FERRICO POR
METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA



Fuente: Elaboración propia.

5.3 Objetivo 3: Optimizar el proceso de remoción de arsénico que emplea FeCl₃, mediante la adición de goma de tara

**TABLA N° 5.8
TABULACION DE POSICIONAMIENTO PARA
DETERMINACION DE CONCENTRACION DE GOMA DE
TARA POR METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA**

-1.414	-1	0	1	1.414
430	1000	1500	2000	2570

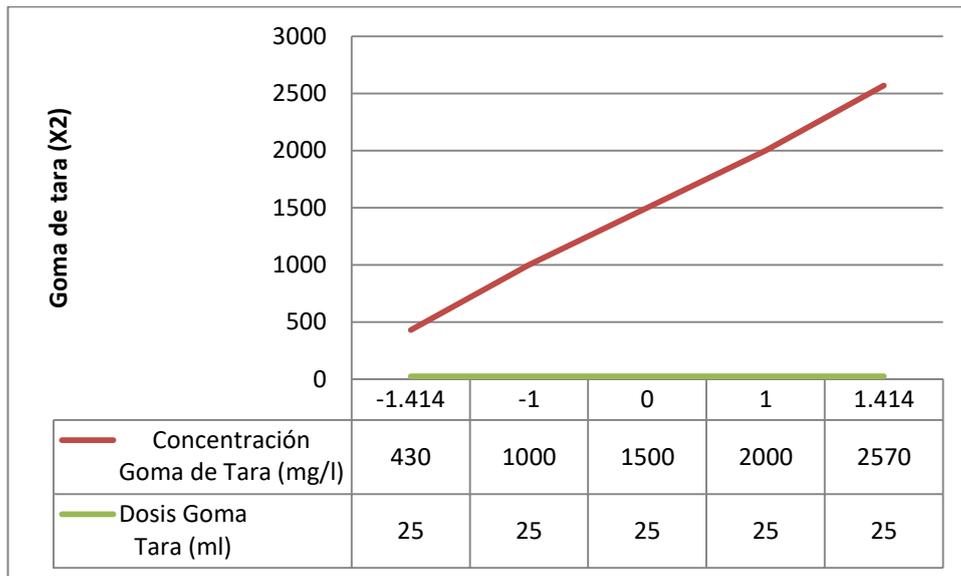
Fuente: Elaboración propia.

**TABLA N° 5.9
CONCENTRACION DE GOMA DE TARA POR METODO
SUPERFICIE DE RESPUESTA**

Posición	Concentración Goma de Tara (mg/l)	Dosis Goma Tara (ml)
-1.414	430	25
-1	1000	25
0	1500	25
1	2000	25
1.414	2570	25

Fuente: Elaboración propia.

**GRAFICO N° 5.8
CONCENTRACION Y DOSIS DE GOMA DE TARA POR
METODO SUPERFICIE DE RESPUESTA**



Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 5.10
DISTRIBUCION FINAL DE LAS CONCENTRACIONES DE
CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA ANTES DE LOS
EXPERIMENTOS

Prueba	Posiciones Método Superficie Respuesta		Concentraciones (mg/l)		Dosis (ml)	
	FeCl3 (X1)	Goma de Tara (X2)	FeCl3 (X1)	Goma de Tara (X2)	FeCl3 (X1)	Goma de Tara (X2)
Jarra 1	-1	-1	10	1000	1	25
Jarra 2	1	-1	20	1000	1	25
Jarra 3	-1	1	10	2000	1	25
Jarra 4	1	1	20	2000	1	25
Jarra 5	0	0	15	1500	1	25
Jarra 6	0	0	15	1500	1	25
Jarra 7	-1.414	0	4.3	1500	1	25
Jarra 8	1.414	0	25.7	1500	1	25
Jarra 9	0	-1.414	15	430	1	25
Jarra 10	0	1.414	15	2570	1	25
Jarra 11	0	0	15	1500	1	25
Jarra 12	0	0	15	1500	1	25

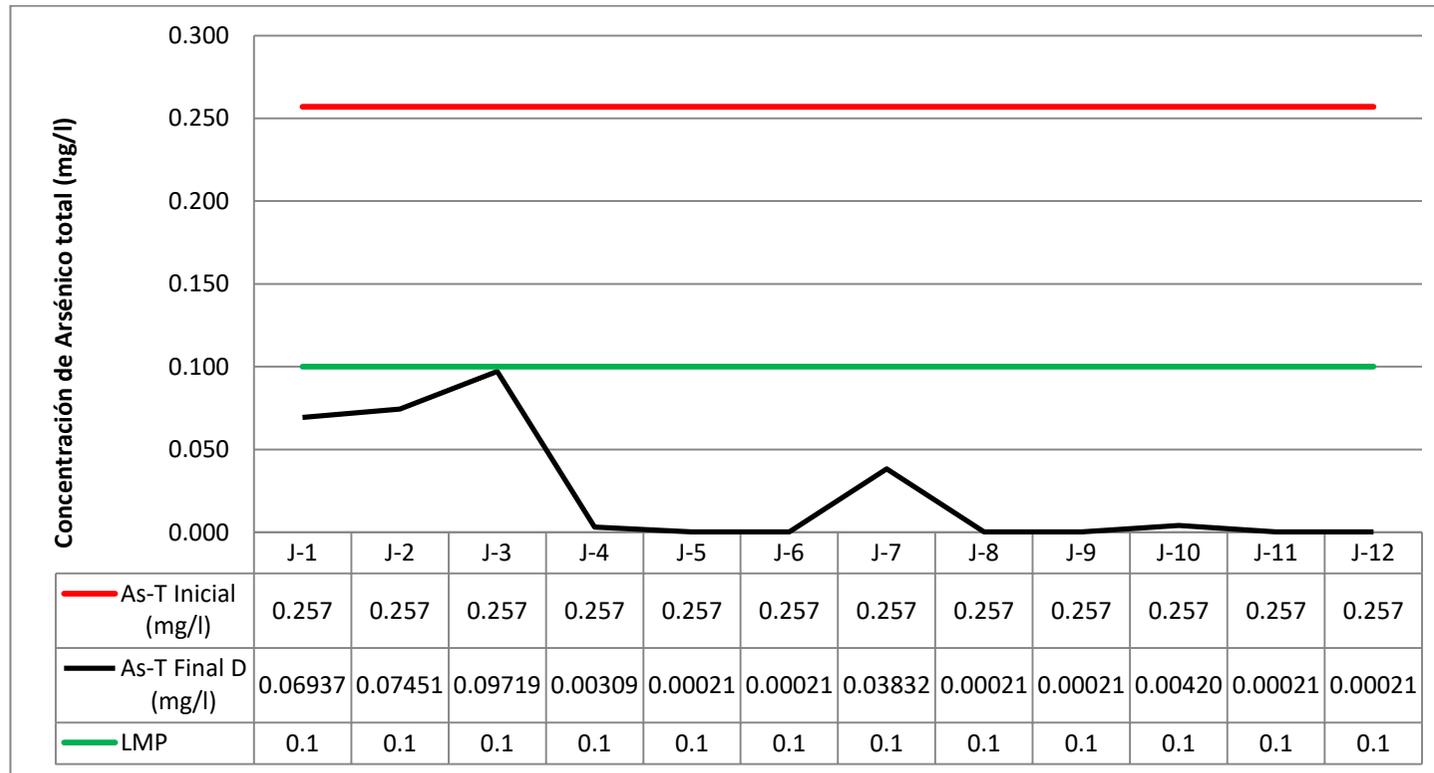
Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 5.11
RESULTADOS FINALES DEL FINAL DE LAS CONCENTRACIONES DE
CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA ANTES DE LOS
EXPERIMENTOS

Prueba	FeCl ₃ (mg/l)	Goma de Tara (mg/l)	As-T Inicial (mg/l)	As-T Final (mg/l)	Tiempo sedimentación (Seg.)	Porcentaje de remoción	LMP (mg/l)
Jarra 1	10	1000	0.257	0.06937	60	73.0%	0.1
Jarra 2	20	1000	0.257	0.07451	62	71.0%	0.1
Jarra 3	10	2000	0.257	0.09719	70	62.2%	0.1
Jarra 4	20	2000	0.257	0.00309	48	98.8%	0.1
Jarra 5	15	1500	0.257	0.00021	50	99.9%	0.1
Jarra 6	15	1500	0.257	0.00021	50	99.9%	0.1
Jarra 7	4.3	1500	0.257	0.03832	61	85.1%	0.1
Jarra 8	25.7	1500	0.257	0.00021	50	99.9%	0.1
Jarra 9	15	430	0.257	0.00021	51	99.9%	0.1
Jarra 10	15	2570	0.257	0.00420	60	98.4%	0.1
Jarra 11	15	1500	0.257	0.00021	50	99.9%	0.1
Jarra 12	15	1500	0.257	0.00021	49	99.9%	0.1

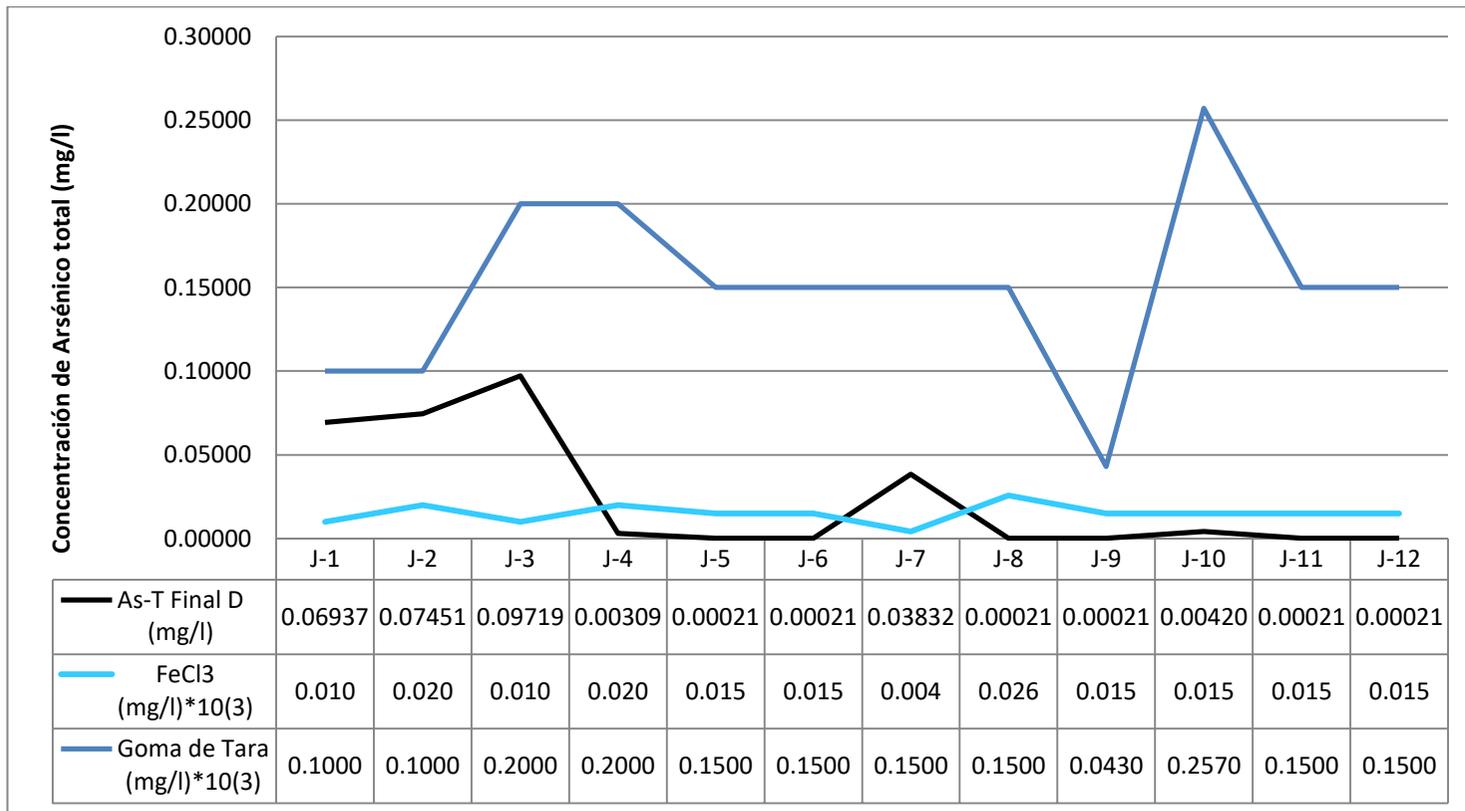
Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.9
RESULTADOS FINALES DEL ARSENICO TOTAL DESPUES DE LOS EXPERIMENTOS



Fuente: Elaboración propia.

GRAFICO N° 5.10
CONCENTRACIONES FINALES DEL CLORURO FERRICO Y GOMA DE TARA VS ARSENICO
TOTAL DESPUES DE LOS EXPERIMENTOS



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados

Para la validación de la hipótesis “El uso de la goma de tara como agente floculante optimizará el proceso de remoción de arsénico con FeCl_3 presente en aguas de mina” se verificaron los resultados obtenidos del análisis del agua de mina previamente tratada con FeCl_3 y goma de tara para la remoción de arsénico total.

Esta capacidad varía de acuerdo al tratamiento que recibió el agua de mina. Y se puede demostrar a través de los siguientes resultados:

Los mejores resultados de remoción de arsénico se obtuvieron con valores 1500 a 2000 mg/L de goma de tara.

La capacidad de FeCl_3 y la goma de tara se ve afectada en un medio ácido.

Se consiguió una reducción de hasta 119 min del tiempo de sedimentación.

6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares

De acuerdo al estudio “Remoción de arsénico (As) de efluentes minero en la unidad de producción de Marañón de Compañía Minera Poderosa, mediante la adición de Cloruro

Férrico” se pudo concluir que se requiere de 8.34mg/L de FeCl₃ para disminuir el arsénico de 0.3434 mg/L a 0.0122 mg/L. Teniendo dicho referente, para el presente estudio se consideró un valor de 4.3 mg/L de FeCl₃ como coagulante y se consideró la adición de 25 ml de Goma de Tara con una concentración de 1500mg/L. La interacción de la dos variables a dichas concentraciones mencionadas dieron como resultado arsénico total final de 0.03832 mg/L con lo cual podemos concluir que la incorporación de la goma de tara como agente floculante favorece al proceso de remoción de arsénico debido a que en nuestro caso se evidenció un mejor porcentaje de remoción de arsénico total de 85.1%.

De la caracterización realizada al agua de mina en estudio se pudo determinar que esta era de carácter neutro, con pH 7.2 y que presentaba bajo contenido de arsénico (0.267 mg/l) pero lo suficiente para superar el Límite Máximo Permitido (LMP 0.1 mg/l), según el referente estudio “Eliminación de arsénico de agua altamente arsénica mediante coagulación mejorada con iones férricos y calcita gruesa” en donde realizan pruebas en agua de drenaje de mina con alto contenido de arsénico con un proceso de coagulación mejorado con iones férricos y calcita gruesa, se puede observar que en intervalos ácidos, se consiguió una eliminación muy alta de arsénico, mientras que en el intervalo alcalino la eliminación de arsénico disminuyó bruscamente con el aumento del pH; sin embargo en el presente estudio, se ha demostrado que para obtener la formación de floc, el proceso de coagulación requería necesariamente una regulación de pH con NaOH hasta condicionar un medio alcalino no mayor a pH 9, posterior a la adición de FeCl₃ ya que este, reducía el pH y condicionaba un

ambiente ácido en el que no permitía la formación de los floc.

Por otro lado, en el mismo referente bibliográfico, indica que mediante un proceso de coagulación mejorado con iones férricos y calcita gruesa (38-74 mm). Los resultados experimentales han demostrado que los floc a base de arsénico producido por coagulación con iones férricos solos eran muy finos, por lo que se necesitaba microfiltración (membrana como medio filtrante) para eliminar los coagulados del agua. Mientras que para el presente estudio la adición de goma de tara permite la formación de floc de mayor tamaño, esto debido principalmente por ser compuestos conformadas por largas cadenas y su alto peso molecular.

La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.

De acuerdo a las consideraciones generales de esta investigación "Nueva tecnología para la eliminación de arsénico de los efluentes mineros" Asociación Brasileña de Metalurgia, Materiales y Minería, donde las aguas residuales resultantes presentan concentraciones de arsénico entre 300 mg/L y 1600mg/L indica que el proceso de tratamiento de co-precipitación férrica, técnica que actualmente sigue siendo usada, produce grandes cantidades de residuos secundarios con baja estabilidad, y para ello propone como tecnología la incorporación de floculante anicónico en la agitación lenta

posterior a ello se dejó durante un período de dos horas para la precipitación. Frente a este caso, la goma de tara estaría cumpliendo el papel de floculante en el presente experimento, teniendo más un comportamiento neutro durante la adición en el proceso, al margen de ello, se puede comparar los tiempos de sedimentación registrados, todos los experimentos en donde intervienen tanto FeCl_3 como coagulante y goma de tara como floculante los tiempos de sedimentación son a lo mucho de 45 a 60 segundos.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas en este trabajo se realizaron escala de laboratorio. La tecnología propuesta para eliminar arsénico contenido en las aguas provenientes de la operación minera, se basa en la co-precipitación mediante el uso de coagulantes (cloruro férrico) y floculante natural (goma de tara) y un arsénico agente. Resultó ser eficaz y factible técnicamente.
- Según las pruebas experimentales del presente estudio se evidencia que a una dosis de FeCl_3 (430 mg/L) y sin regular el pH hasta llevarlo a un medio básico, no permite la correcta formación de flocs, presentando partículas suspendidas, conllevando a encontrar arsénico en el medio acuoso.
- Se concluye también que el ph 8.5 es el valor que permite formar buenos floc, condicionando a tener tiempos menores de 60 segundos para sedimentar totalmente.
- El floculante natural goma de tara optimiza el proceso de remoción de arsénico total con el coagulante cloruro férrico en las aguas de mina.
- La dosis óptima del floculante goma de tara según la metodología de Superficie de Respuesta está en el rango de 1500 a 2000 mg/L.

- La dosis óptima coagulante cloruro férrico según la metodología de Superficie de Respuesta está en el rango de 15 a 25.7 mg/L.
- La eficiencia de remoción del arsénico total mediante el tratamiento coagulación – floculación es en promedio del 90.7% en las 12 pruebas realizadas; teniendo valores mínimos de hasta 0.00021 mg/l y máximo de 0.09719 mg/l, en ambos casos se cumple con los Límites Máximos Permisibles según DS 010-2010-MINAM.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación financiera costo - beneficio para la implementación del floculante natural goma de tara a nivel macro en los sistemas de tratamiento de aguas residual con contenido de metales totales como el arsénico total.
- Evaluar la eco - toxicidad de los lodos sedimentados en el proceso de tratamiento coagulación – floculación del sistema de tratamiento a escala de laboratorio, a fin de prevenir posibles impactos potenciales al medio ambiental durante su manejo y disposición final.
- Evaluar la eficiencia del floculante goma de tara y compararlas con coagulantes sintéticos en la remoción de arsénico total.
- Realizar una valoración económica detallada para la implementación del tratamiento con Goma de Tara a gran escala incluyendo gastos operativos: equipos, materiales y mano de obra.
- Implementar un sistema de tratamiento de aguas de mina incluyendo a la goma de tara a fin de generar lodos menos tóxicos.

CAPÍTULO IX

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. Murcia: Universidad de Murcia-Servicio de publicaciones.
2. Aguilar Ascon, E. A. (2010). *Utilización de las semillas de Tara (Caesalpinia Spinosa) como ayudante de coagulación en el tratamiento de aguas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
3. American Public Health Association. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19 th.
4. American Water Works Association. (2011). *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes*. 3 th.
5. Andía, Y. C. (2000). *Tratamiento de agua coagulación floculación*. Lima.
6. Apaza Asqui, D. W. (2015). *Remoción de metales plomo (Pb) y Zinc (Zn) de las aguas del Rio T´oro Q´ocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca*. Puno.
7. Asociación española de normalización y certificación. (2001). ISO 7027:1999 Determinación de la turbiedad. *Normativa española* (pág. 8). Madrid: AENOR.
8. Bravo Guerrero, M. M., & Gutierrez López, J. L. (2016). *Remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas del Rio Pollo en Otuzco empleando semillas de Caesalpinia spinos (Tara)*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
9. Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., Garcia, J., & Fuentes, L. (2007). *Eficiencia de las semillas de moringa oleífera como*

- coagulante alternativo en la potabilización del agua. *BOLETÍN DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS*, 245.
10. Campo Chapeña, M., & Tobar Olave, C. J. (2011). *Evaluación de la Dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluyente a la PTAR CAÑAVERALEJO*. Santiago de Cali: Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.
 11. Devesa Rey, R., Rodríguez Rodríguez, F., & Urréjola, S. (2017). *Diseño de un experimento de optimización del Proceso de Coagulación-Floculación*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
 12. Deza, J., & Muñoz, S. (2010). *Metodología de la investigación científica*. Lima.
 13. Díaz Claros. (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y de reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas*.
 14. Franco, F., & Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *SciELO*.
 15. Galindo. (2005). Arsénico en aguas: Origen, movilidad y Tratamiento. *II SEMINARIO HISPANO-LATINOAMERICANO SOBRE TEMAS ACTUALES DE HIDROLOGÍA SUBTERRANEA* (pág. 5). Río Cuarto: ISBN .
 16. Gómez Puente, N. A. (2005). *Remoción de materia orgánica por Coagulación - Floculación*. Manizales: Universidad de Colombia.
 17. Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la investigación científica*. Mexico: Mc Graw Hill.
 18. INGEMMET. (2007). *Compendio de Yacimientos Minerales del Perú*. Lima: INGEMMET.
 19. Juberzay, C. (2011). *Procesos de tratamientos de aguas coagulación y floculación*. Santa Ana de Coro: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.

20. Langsch, J. (2012). New Technology for Arsenic Removal from Mining Effluents. *Elsevier*, 2.
21. Mancipe, A., Ordoñez, L., & Alejandro, B. (2016). *Implementación de Oxidantes (Mlox, NaClO, H2O2) para el Mejoramiento de los Procesos de Coagulación y Floculación de Aguas Residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) el Salitre*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
22. MINAM. (30 de Julio de 2008). Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. *El Peruano*.
23. MINAM. (2010). *límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas*. Lima: El Peruano.
24. Mohan, D., & Pittman, C. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using. *Elsevier*, 3-4.
25. Montoya Arias, C. E., & Silencio Acuña, K. A. (2017). *Evaluación de pH, concentración de FeSO4 y FeCl3 en remoción de sólidos suspendidos y sulfuros en efluentes de pelambre en curtiembre*. Trujillo.
26. Quispe Coica, F. A. (2016). *Remoción de arsénico (as) de efluente minero en la unidad de producción de Marañón de compañía minera Poderosa, mediante la adición de cloruro férrico*. Lima: Universidad Nacional del Callao.
27. Revelo, A., Proaño, D., & Banchón, C. (2015). *“Biocoagulación de Aguas Residuales de Industria Textilera Mediante Extractos de Caesalpinia Spinosa”*. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.
28. Roberts, L., Hug, S., Ruettimnn, T., Billah, M., Wahab Khan, A., & Tariqur Rahman, M. (2004). *Arsenic Removal with Iron(II) and Iron(III) in Waters with High Silicate and Phosphate Concentrations*.
29. Sanchez, E. (2015). Coagulantes, floculantes y agentes deshidratantes de lodos. <http://tratamientodelodos.blogspot.pe/>.
30. Smedley P.L., K. D. (2002). *A review of the source, behaviour and*

distribution of arsenic in natural waters. España: Applied Geochemistry.

31. Song, S., Lopez Valdivieso, A., Hernandez Campos, D., Monroy Fernandez, M., & Razo Soto, I. (2006). *Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric ions and coarse calcite.* México: Elsevier.
32. Universidad de Ginebra. (2006). The Huachón gold prospect, Eastern Andean Cordillera of Peru: the southern extension of a 400 km long Carboniferous orogenic gold province? *Section des Sciences de la Terre*, 2.

APENDICE

- **Matriz de Consistencia**

TITULO DE LA TESIS: LA GOMA DE TARA COMO AGENTE FLOCULANTE EN LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON FeCl₃ PRESENTE EN AGUA DE MINA						
Problema General	Objetivos	Hipótesis de Investigación	Operacionalización de las variables			Metodología
			Variable	Indicador	Unidad	
¿En qué medida el uso de la goma de tara como agente floculante optimizará el proceso de remoción de arsénico con FeCl₃ presente en aguas de mina?	General:	“El uso de la goma de tara como agente floculante optimizará el proceso de remoción de arsénico con FeCl₃ presente en aguas de mina”	Independiente X			Tipo de investigación. Experimental. <u>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.</u> Técnica de recopilación de Datos Documental y experimental haciendo uso del diseño de Compuestos Centrales (CCD) Técnica de análisis estadístico Superficie de respuesta Equipo Laboratorio. Prueba de jarras (determinación dosis óptima de los floculantes). Analizador de arsénico. Potenciómetro. Metodología
	Determinar la capacidad de la goma de tara como agente floculante en la optimización del proceso de remoción de arsénico con FeCl ₃ , presente en aguas de mina.		Concentración de goma de tara como agente floculante	Porcentaje de remoción de As en (mg/L)	% Remoción de As	
	Específicos:		Dependiente Y			
	Determinar la concentración arsénico total presente en el agua de mina en estudio. Evaluar las variables que intervienen en el proceso de coagulación con FeCl ₃ y floculación con Goma de Tara. Optimizar el proceso de remoción de arsénico que emplea FeCl ₃ , mediante la adición de goma de tara.		Remoción de arsénico presente en aguas de mina (mg/L)	Variación de la concentración de As en (mg/L) presente en agua de mina.	mg/L As	
			Interviniente Z			

			Potencial de hidrógeno	Concentración de iones de hidrógeno presente en agua de mina.	Valores de pH	Análisis de medición de As. Determinación factores concentración FeCl ₃ goma de tara, pH. Evaluación de la capacidad de goma de tara.
--	--	--	------------------------	---	---------------	--

Fuente: Propia

ANEXOS

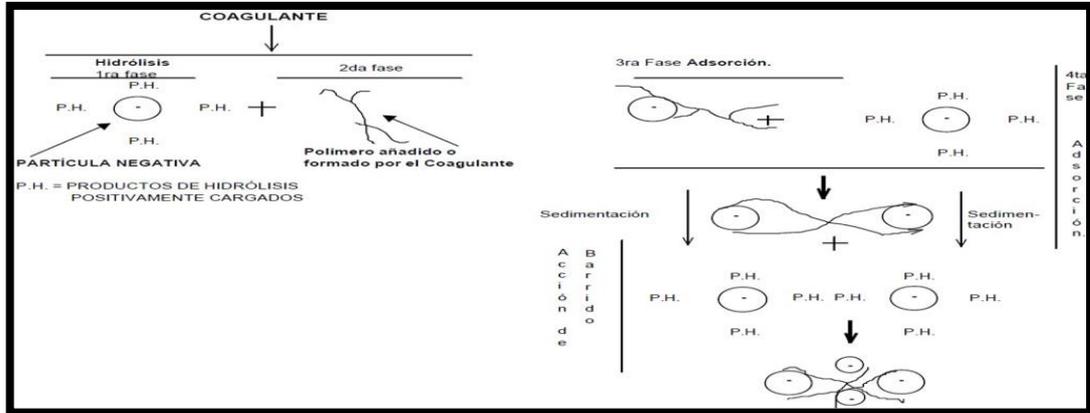
**TABLA N° 2.1
TECNOLOGÍAS PARA LA ELIMINACIÓN DEL ARSÉNICO, VENTAJAS
Y DESVENTAJAS**

Tecnologías	Ventajas	Desventajas
Oxidación y reducción	Simple. Bajos costos de instalación. Fácilmente aplicada a grandes volúmenes de agua. As(III) puede ser oxidado directamente por un número de reactivos químicos, luz UV o solar o métodos electrocatalíticos.	Algunos oxidantes producen productos tóxicos y carcinogénicos. Necesita tratamiento de remoción posterior.
Coagulación/filtración	Operación simple. Bajos costos de capital y operativos. Aplicable a escala grande, mediana y pequeña. Efectivo cuando As(V) es el único contaminante. Si se agrega cloro, simultánea desinfección, oxidación de As(III) y remoción de la turbidez. Las sales de Al permiten la remoción de F ⁻ .	Se necesita personal capacitado. Deben emplearse reactivos químicos. Necesita ajuste de pH. Necesita disposición de barros contaminados con As. Necesita filtración. Susceptible a la química del agua. As(III) debe ser previamente oxidado.
Adsorción (alúmina activada, óxidos e hidróxidos de hierro, TiO ₂ , óxido de cerio, metales)	Simple. No se necesitan agregar otros reactivos químicos. Altamente selectivo hacia el As(V). Útil para tratamiento a baja escala: pequeñas comunidades y hogares individuales.	Eficiencia moderada. Se necesita regeneración y reemplazo. Interferencias: Se, F ⁻ , Cl ⁻ y SO ₄ ²⁻ . Tratamientos de punto de uso necesitan regeneración y reemplazo.

Nanofiltración y Ósmosis inversa	<p>Altamente efectivo para As. Útil a nivel de gran escala, pequeñas comunidades y hogares. Mínima operación. Se necesita mantenimiento de membranas. Efectivo para aguas con alto contenido de sólidos totales disueltos (STD).</p>	<p>Altos volúmenes requieren unidades de membrana múltiples. Alto consumo eléctrico. Altos costos de capital y operación. Alto rechazo de agua. Ensuciamiento de membranas. Rechazo de 50%. Pueden ser removidos otros iones necesarios en el agua de bebida.</p>
Intercambio iónico	<p>Remoción efectiva. No depende del pH y la concentración del influente.</p>	<p>No remueve As(III). Interfieren sulfatos, STD, Se, F⁻ y NO₃⁻. Sólidos en suspensión y precipitados de hierro causan atascamientos. Puede requerir pretratamiento.</p>
Hierro cerivalente y combinación con luz solar	<p>Para hogares individuales o comunidades pequeñas. Materiales locales disponibles localmente a bajo costo. Operación simple. Tecnología económica y amigable. Los materiales nanoparticulados aumentan significativamente la capacidad de carga y reactividad, usando muy poca cantidad de material. Exitosamente probada en áreas remotas de América Latina. Con luz solar: oxidación de As(III) y desinfección simultánea.</p>	<p>Muy sensible a las propiedades fisicoquímicas del agua. Puede requerir precauciones especiales para asegurar la remoción de material coloidal de tamaño nanométrico.</p>
Fotocatálisis heterogénea oxidativa o reductiva con TiO ₂	<p>La fotocatalisis oxidativa puede usar luz solar o lámparas UV de bajo costo. TiO₂ es material de bajo costo. Simultánea oxidación de As(III), remoción de contaminantes orgánicos, metales tóxicos y desinfección. La fotocatalisis reductiva permite la inmovilización de As(0) sobre TiO₂.</p>	<p>Se necesita adición simultánea o posterior de hierro. Se necesita bastante investigación adicional. Se requiere la adición de donores orgánicos.</p>

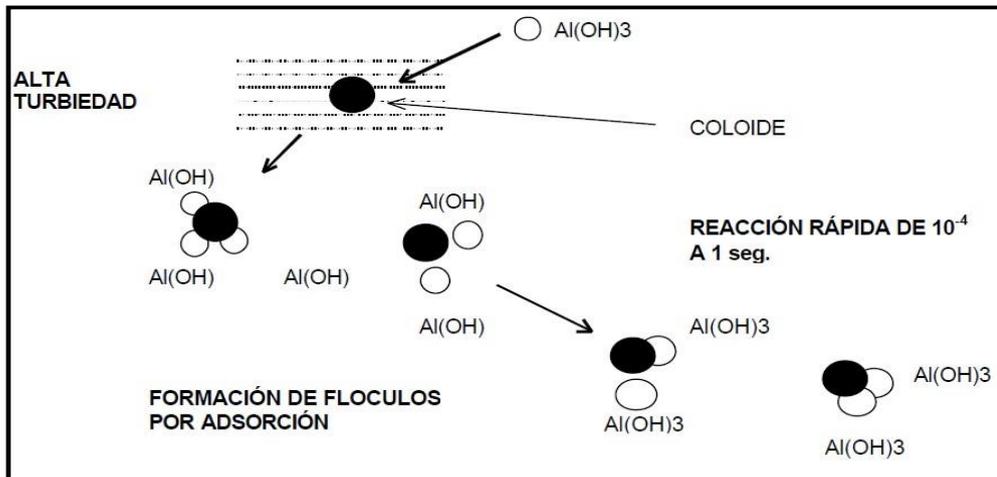
Fuente: (Mohan & Pittman, 2007)

FIGURA N° 2.2
FASES DE LA COAGULACIÓN



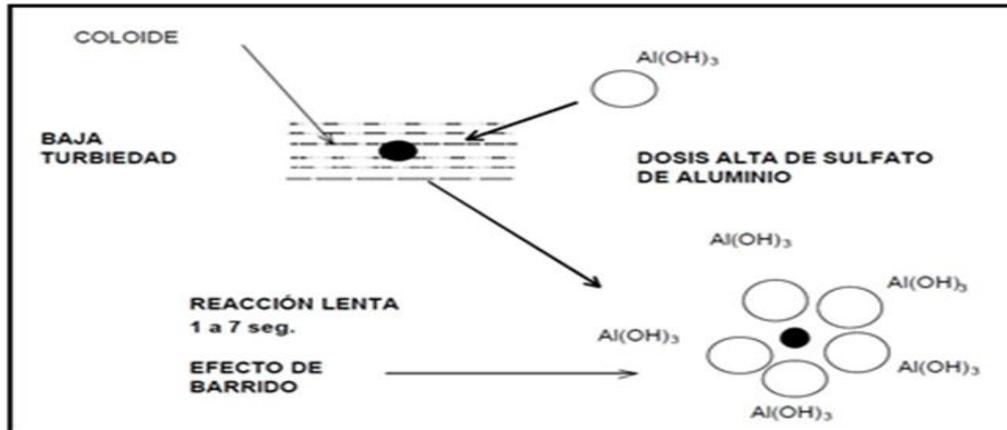
Fuente: BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

FIGURA N° 3.2
EXPLICACIÓN GRÁFICA DE LA FORMACIÓN DE FLÓCULOS POR ADSORCIÓN



Fuente: <http://tratamientodelodos.blogspot.pe>

FIGURA N° 2.3
EXPLICACIÓN GRÁFICA COAGULACIÓN POR BARRIDO



Fuente: <http://tratamientodelodos.blogspot.pe>

TABLA 2.2
LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE PARA EFLUENTE MINEROS METALÚRGICOS

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS			
Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

Fuente: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_010-2010-minam.pdf.

TABLA N° 3.1
DESCRIPCIÓN DE VARIABLES CON SUS RESPECTIVOS
INDICADORES

Variable	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Independiente	Concentración del Cloruro Férrico: Es la cantidad de gramos por litro de solución necesaria de FeCl ₃ que actuará como agente coagulante en el proceso de remoción de arsénico total.	X1: mg/L de FeCl ₃ X2: mg/L de FeCl ₃ X3: mg/L de FeCl ₃ 4.3(mg/L)<X1<25.7 (mg/L)	Porcentaje de remoción de As-T en (mg/L) en agua de mina.
	Concentración de goma de tara: Es la cantidad de gramos por litro de solución necesaria de la Goma de Tara que actuará como agente floculante en el proceso de remoción de arsénico total con FeCl ₃	X1: mg/L de goma de Tara X2: mg/L de goma de Tara X3: mg/L de goma de Tara 430 (mg/L)<X2<2,570 (mg/L)	Porcentaje de remoción de As-T en (mg/L) en agua de mina.
Dependiente Remoción del arsénico presente en aguas de mina	Proceso de variación de la concentración del arsénico total presente en aguas de mina, a fin de obtener resultados por debajo de los Límites Máximos Permisibles para aguas provenientes de actividades minero-metalúrgicas según DS N° 010-2010-MINAM (As <0,1 mg/L)	Y: Arsénico total presente en aguas residual 0.05 (mg/L)<Y<1 (mg/L)	Variación de Concentración de As-T en (mg/L)
Interviniente Potencial de hidrógeno	Concentración de iones de hidrógeno presente en una disolución en el rango de 6 – 9	6 < [pH] < 9	Valores de pH dentro del rango.

Fuente: Propia

TABLA N° 4.1
DISEÑO COMPUESTO CENTRAL DE BOX-WILSON CUANDO K=2

Bloquear	X1	X2
1	-1	-1
1	1	-1
1	-1	1
1	1	1
1	0	0
1	0	0
2	-1.414	0
2	1.414	0
2	0	-1.414
2	0	1.414
2	0	0
2	0	0

Fuente: Propia

FIGURA N° 4.1
FOTOGRAFÍA DE LA BOCAMINA BALCÓN (JNG) DE
CONSORCIO MINERO HORIZONTE



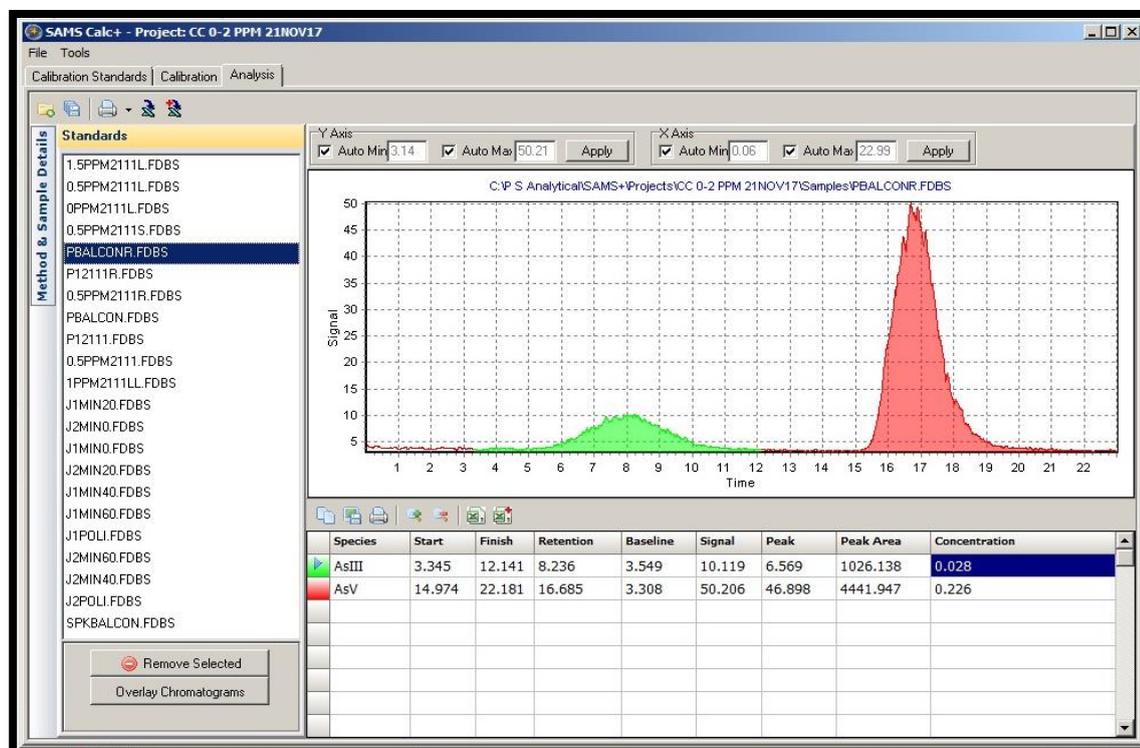
Fuente: Propia

TABLA N° 4.2
RESULTADOS HISTORICOS DE ARSENICO TOTAL EN EL
AGUA DE MINA

Punto de Monitoreo	Año	As-T (mg/l)	LMP
Agua de Mina	2011	0.24	0.1
	2012	0.15	0.1
	2013	0.22	0.1
	2014	0.31	0.1
	2015	0.48	0.1
	2016	0.34	0.1
	2017	0.44	0.1
	2018	0.26	0.1

Fuente: Propia.

FIGURA N° 4.2
GRÁFICA CON RESULTADOS DE ESPECIACIÓN DE
ARSÉNICO



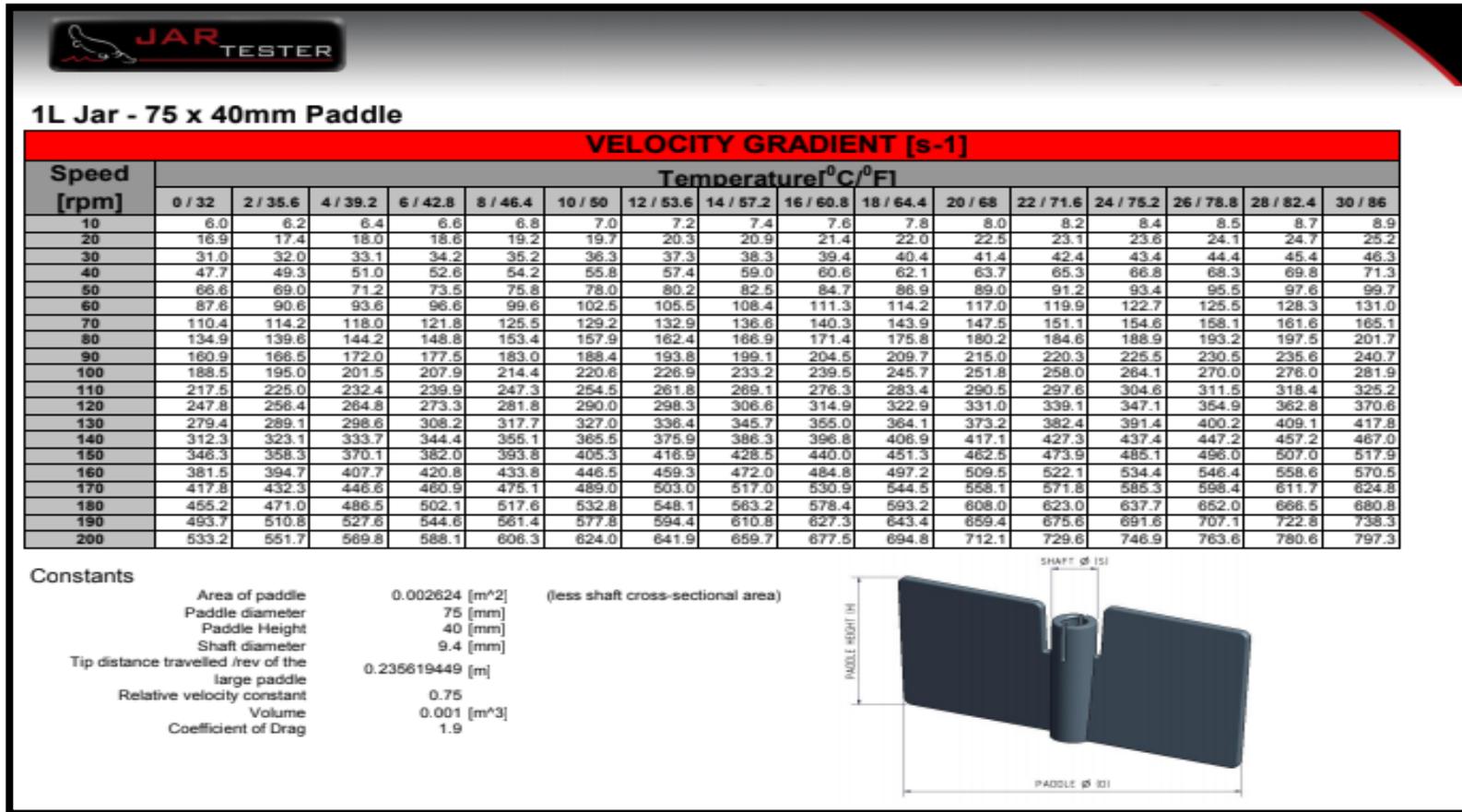
Fuente: Propia

TABLA N° 4.3
DISEÑO COMPUESTO CENTRAL DE BOX-WILSON

FeCl₃ (ppm)				
4.3	10	15	20	25.7
Goma de tara (mg/L)				
430	1000	1500	2000	2570

Fuente: Propia

FIGURA N° 4.2
4G PLATYPUS JAR TESTER



Fuente: sales@austscientific.com.au - www.austscientific.com.au

TABLA N° 4.4
RELACIÓN DE MASA VOLUMEN DE Fe⁺³

[Fe⁺³] (mg/L)	Peso FeCl₃6H₂O (g)	Volumen (mL)
4.3	0.020	1
10	0.048	1
15	0.072	1
20	0.096	1
25.7	0.124	1

Fuente: Propia

FIGURA N° 4.3
PREPARACIÓN DE LAS 5 CONCENTRACIONES DE Fe⁺³



Fuente: Propia

TABLA N° 4.5
PESOS DE GOMA DE TARA

Goma de tara (GT)	Peso (mg)
GT 1	0.010
GT 2	0.025
GT 3	0.037
GT 4	0.05
GT 5	0.064

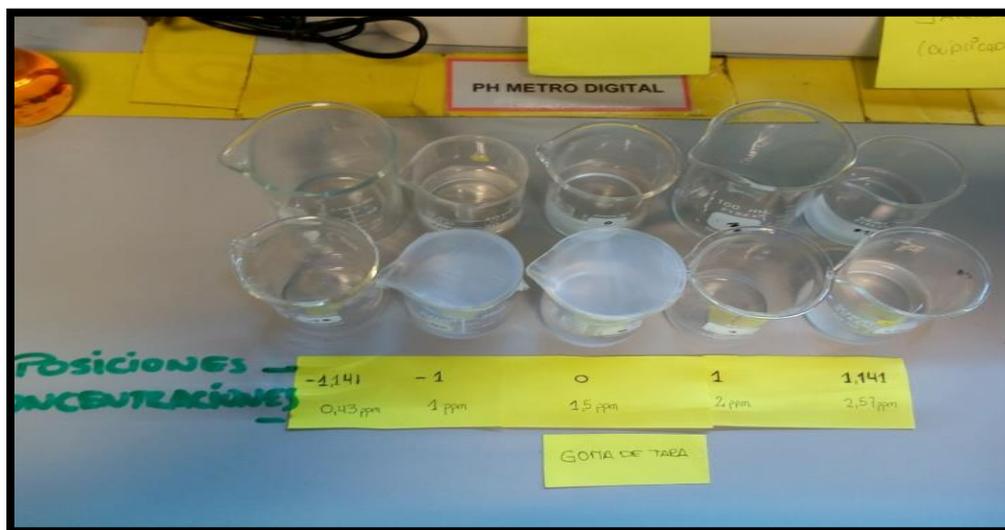
Fuente: Propia

FIGURA N° 4.4
ETAPA DE AGITACIÓN CON PASTILLA IMANTADA DE CADA
VASO CON 25 ML DE SOLUCIÓN DE GOMA DE TARA



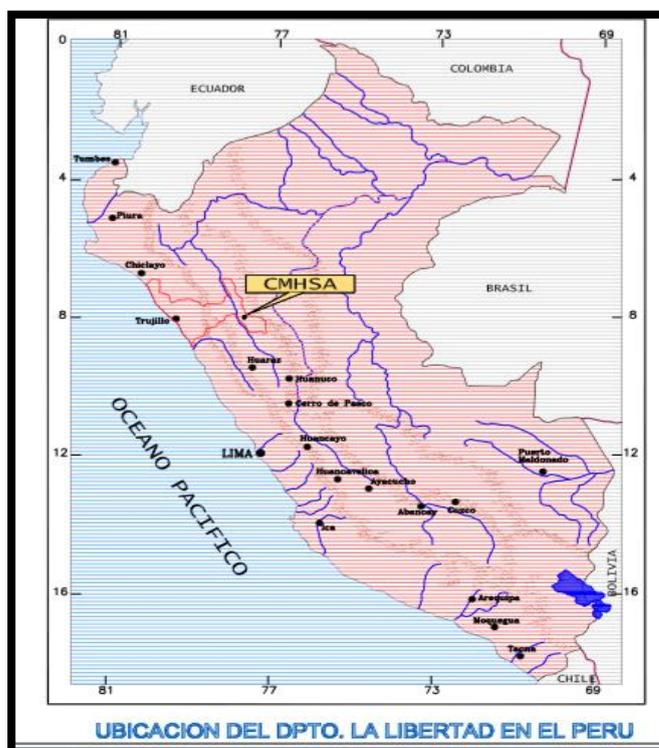
Fuente: Propia

FIGURA N° 4.5
PROCESO DE MADURACIÓN DE LA GOMA DE TARA



Fuente: Propia

FIGURA N° 4.6
UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA CONSORCIO MINERO HORIZONTE



Fuente: EIA Consorcio Minero Horizonte

TABLA N° 4.7
MÉTODOS Y EQUIPOS

Parámetro	Unidades	Equipo	Método
pH		Potenciómetro de membrana	4500-H+ B
Metales pesados	mg/l	Espectrómetro	EPA 200.8
Turbidez	UNT	Turbidímetro de membrana	2130 B
Arsénico		ICP-MS	

Fuente: (*) (American public Health Association, 1999)

TABLA N° 4.6
REQUISITOS DE TOMA DE MUESTRA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA

"REQUISITOS PARA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA Y PRESERVACIÓN"¹					
Determinación/parámetro	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra	Tipo de muestra ³	Preservación y conservación	Tiempo máximo de duración recomendado ⁵
Físico-químico:					
Oxígeno disuelto				Análisis inmediato en campo	
pH				Análisis inmediato en campo	
Conductividad	P, V	500	AS, AR	Refrigerar	28 días
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	P, V	250	AS, AR	Refrigerar	48 horas
Fenoles	P, V	500 mL	AS, AR	Refrigerar, agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	40 días después de extraer
DBO	P, V	1000 mL	As	Refrigerar	48 horas
DQO	P, V	100 mL	AS, AR	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	28 días
Fosfato	V(A)	100 mL	As	Para fosfato disuelto filtrar inmediatamente, refrigerar	48 horas
Cianuro WAD/cianuro Libre/cianuro total	P, V	500 mL	AS, AR	Agregar NaOH hasta pH>12, refrigerar en la oscuridad	14 días
Aceites y Grasas	V, amber boca ancha calibrado	1000 mL	AS, AR	Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar	28 días
Hidrocarburos	V Amber boca ancha	1 000 mL	As	Agregar HCl hasta pH < 2 refrigerar 4°C	28 días
Metales, totales	P	100 mL	As	Agregar HNO ₃ hasta pH < 2	6 meses
Cromo VI	P (A) o V(A)	300 mL	As	Refrigerar	24 horas
Arsénico	P (A) o V(A)	500 mL	As	Agregar HNO ₃ hasta pH<2, 4° C, refrigerar	2 meses
Mercurio	P (A), V(A)	500 mL	AS, AR	Agregar HNO ₃ hasta pH<2, 4° C, refrigerar	28 días
N-Amoniaco	P, V	500 mL	AS, AR	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	28 días
Nitrato	P, V	100 mL	AS, AR	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h (28 días para muestras cloradas)
Nitrito	P, V	100 mL	AS, AR	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 horas
Orgánico, Kjeldahl (N-Orgánico)	P, V	500 mL	AS, AR	Refrigerar, agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	28 días
Sólidos totales suspendidos	P,V	500 mL	AS	Refrigerar	2 a 7 días
Sólidos totales disueltos (STD)	P,V	500 mL	AS	Refrigerar	3 a 7 días
Sulfato	P, V	100 mL	AS, AR	Refrigerar	28 días
Sulfuro	P, V	100 mL	AS, AR	Refrigerar; agregar 4 gotas de acetato de zinc 2N/100 mL; agregar NaOH hasta pH>9	7 días
Plaguicidas	VD) tapón de TFE	1000 mL	AS, AR	Refrigerar, agregar 1000 mg ácido ascórbico/L, si hay cloro residual	7 días

Fuente: Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales en las Actividades Minero-Metalúrgicas publicado por el Ministerio de Energía y Minas, el año 2011.