

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO
UTILIZANDO HIPOCLORITO DE SODIO Y
CLORURO FÉRRICO EN EL AGUA
DEL RÍO SAMA, 2014**

Tesis

presentada por:

Bach. NANCY FLORES COTRADO

Para optar el título profesional de

INGENIERO QUÍMICO

Tacna-Perú

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

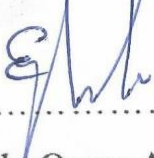
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química
**EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO
UTILIZANDO HIPOCLORITO DE SODIO Y
CLORURO FÉRRICO EN EL AGUA
DEL RÍO SAMA, 2014**

Tesis sustentado por Bach. Nancy Flores Cotrado, el día 17 de enero del 2017, estando integrado el jurado por:

Presidente : 
Msc. Manuel de Jesús Sanchez Rosales

Secretario : 
Ing. Luis Fernando Cáceres Yañez

Vocal : 
Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

Asesor : 
Msc. Zoila Luz Mendoza Rodas

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres Gerardo y Emerenciana.

A mis hermanos Ronal, Emma y Sadham.

A mis amigas y amigos.

A mis compañeras y compañeros.

AGRADECIMIENTOS

Al ver fructificados los esfuerzos realizados durante la etapa universitaria, por los conocimientos recibidos y la orientación a seguir una disciplina. Mi agradecimiento a la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la UNJBG, por los conocimientos que allí me impartieron, permitiendo adquirir conocimientos que fueron nuevos para mí y que formaron una visión de servicio a la sociedad.

Especialmente, mi agradecimiento y gratitud a mi familia y amigos por su invaluable apoyo para la elaboración de este proyecto, por sus valiosos consejos, por su amistad brindada. Finalmente, mi gratitud a la Oficina General de Investigación de la UNJBG, por su decidido apoyo y contribución mediante la financiación de proyectos de investigación con recursos de canon minero.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
CONTENIDO.....	v
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1.1. Antecedentes del problema.....	3
1.1.2. Problemática de la investigación.....	5
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	8
1.4. OBJETIVOS.....	9
1.4.1. Objetivo general.....	9
1.4.2. Objetivos específicos.....	9
1.5. HIPÓTESIS.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	10
2.2. BASES TEÓRICAS.....	12

2.2.1. Área de estudio	12
2.2.2. Parámetros de la calidad de agua del río Sama	16
2.2.3. El arsénico en el agua superficial.....	18
2.2.4. Ingesta de arsénico por el ser humano	22
2.2.5. Normativas y estándares	22
2.2.6. Tecnologías de tratamiento.....	22
2.2.7. Proceso de coagulación y floculación	25
2.2.8. Carga eléctrica y doble capa	25
2.2.9. Factores de estabilidad e inestabilidad	26
2.2.10. Adsorción y neutralización de cargas.....	29
2.2.11. Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado	29
2.2.12. Cloruro férrico	30
2.2.13. Dosificación	32
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	33
3.2. MUESTRA DE ESTUDIO	34
3.2.1. Identificación de variables	34
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	35
3.3.1. Diseño experimental y procesamiento de datos	36

3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	38
3.4.1.	Equipos	38
3.4.2.	Materiales	38
3.4.3.	Reactivos	39
3.4.4.	Técnicas y métodos de recolección de datos	39
3.5.	PROCEDIMIENTOS Y ANÁLISIS DE DATOS	40
3.5.1.	Etapas de la investigación	40
3.5.2.	Caracterización de las aguas crudas del río Sama	43
3.5.3.	Análisis fisicoquímico del agua del río Sama	44
3.5.4.	Resultados de las pruebas de remoción	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		51
4.1.	RESULTADOS	51
4.1.1.	Resultados de la matriz de diseño compuesto central	51
4.1.2.	Resultados de la matriz de diseño compuesto central para la respuesta de hierro total y el pH	52
4.1.3.	Análisis estadístico de los datos experimentales del modelo empírico que se ajuste	54
4.1.4.	Determinación de las condiciones de operación para maximizar la eficiencia en la remoción de arsénico	62

4.2. DISCUSIÓN.....	63
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Parámetros de la calidad de agua del río Sama	17
Tabla 2: Operacionalización de variables	35
Tabla 3: Niveles de los factores para remover el arsénico	36
Tabla 4: Matriz del diseño experimental compuesto central	37
Tabla 5: Análisis en situ de la muestra del agua del río Sama	44
Tabla 6: Análisis de la muestra del agua del río Sama	44
Tabla 7: Análisis de remoción de arsénico y hierro residual frente al	46
Cloruro férrico	
Tabla 8: Análisis de remoción de arsénico y hierro residual frente al	49
Hipoclorito de sodio	
Tabla 9: Resultados de la variable de respuesta del arsénico total	51
Tabla 10: Resultados de la variable de respuesta del hierro residual	52
Tabla 11: Análisis de varianza para la remoción del arsénico utilizando un	55
modelo cuadrático	
Tabla 12: Coeficiente de regresión de la remoción de arsénico para el modelo	60
cuadrático	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa del arsénico en los distritos de Tacna	7
Figura 2: Mapa de cuenca de Sama	15
Figura 3: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de $\text{AsO}_2\text{-H}_2\text{O}$	19
Figura 4: Especies de arsénico trivalente en función del pH	21
Figura 5: Especie de arsénico pentavalente en función del pH	21
Figura 6: Doble capa de una partícula coloidal	25
Figura 7: Proceso de coagulación	27
Figura 8: Fuerzas de atracción y repulsión	28
Figura 9: Prueba experimental aplicando Cloruro férrico	42
Figura 10: Remoción de arsénico total al añadir Cloruro férrico.	47
Figura 11: Variación del ph al añadir Cloruro férrico al agua superficial	48
Figura 12: El pH al aumentar la dosis de Hipoclorito de sodio	50
Figura 13: Diagrama de pareto de la remoción de arsénico	56
Figura 14: Gráfica de efectos principales para la remoción de arsénico	57
Figura 15: Gráfica de la interacción para la remoción de arsénico	59
Figura 16: Diagrama de la superficie de respuesta de la remoción de arsénico....	61

Figura 17: Diagrama de la superficie de respuesta de la remoción de arsénico..... 61

vista frontal

Figura 18: Contorno de la superficie de respuesta estimada de la remoción de 62

arsénico

ANEXOS

Anexo 1: Reglamento de la calidad del agua para consumo humano DS N° 031-2010- SA límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica	73
Anexo 2: Reglamento de la calidad del agua para consumo humano DS N° 031-2010-SA. límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos	74
Anexo 3: Resultados de los análisis en el río Sama, realizado por la Autoridad Nacional del Agua	75
Anexo 4: Nombres y posiciones de los puntos geográficos de los puntos de muestro en las cuencas de Sama y Locumba	76
Anexo 5: Parámetros fisicoquímicos y elementales de cada uno de los puntos de muestreo	77
Anexo 6: Aplicación de Cloruro férrico en una planta de agua potable	78
Anexo 7: Aplicación del proceso de coagulación	79
Anexo 8: Sedimentación de los coágulos	80
Anexo 9: Determinación del arsénico total utilizando el test de arsénico	81
Anexo 10: Medida del arsénico en el test de arsénico	82

Anexo 11: Procedimiento para el análisis de arsénico.....	83
Anexo 12: Procedimiento para el análisis de hierro	85

RESUMEN

El río Sama, está ubicado en la región de Tacna, sus aguas son utilizadas por los pobladores de Sama Inclan para consumo humano, agricultura y ganadería. Según el reporte de monitoreo, realizado por la Autoridad Nacional del Agua, del 24 al 29 de noviembre del 2014, se ha determinado que el nivel de contaminación por arsénico de las aguas superficiales que consumen los pobladores del distrito de Sama Inclan de la región Tacna-Perú, es mayor a 0,44 mg/L.

En el presente trabajo se evaluó la remoción de arsénico, en las mismas muestras de las aguas del río en mención, caracterizadas en la primera etapa del trabajo, mediante el método de coagulación con hipoclorito de sodio y cloruro férrico, considerando diferentes rangos de dosis de ambos reactivos, además de controlar otras variables tales como tiempos de sedimentación, agitación y floculación en el equipo de prueba de jarras.

Finalmente, se determinó experimentalmente que la mayor remoción de arsénico total de 98,06 % y hierro residual de 0,143 ppm, se obtuvo con una dosis de 0,075 ppm de hipoclorito de sodio; 87,04 ppm de cloruro férrico y 45 min de tiempo de sedimentación.

Palabras clave: Evaluación, remoción, arsénico, hipoclorito de sodio, cloruro férrico, agua de río.

ABSTRACT

The Sama River is located in the Tacna region, its waters are used by the people of Sama Inclan for human consumption, agriculture and livestock. According to the monitoring report carried out by the National Water Authority from November 24 to 29, 2014, it has been determined that the level of arsenic contamination of surface waters consumed by residents of the Sama Inclan district of the Tacna region Peru, is greater than 0,44 mg/L.

In this project an evaluation of the arsenic removal in the same samples of the mentioned river waters, characterized in the first stage of the work, was made by means of the coagulation method with sodium hypochlorite and ferric chloride considering different dose ranges of both reagents, in addition to controlling other variables such as settling, agitation and flocculation times in jug test equipment.

Finally, it was determined experimentally that the highest total arsenic removal of 98,06 % and 0,143 ppm residual iron was obtained with a dose of 0,075 ppm sodium hypochlorite; 87,04 ppm of ferric chloride and 45 min of settling time.

Keywords: Evaluation, removal, arsenic, sodium hypochlorite, ferric chloride, river water.

INTRODUCCIÓN

El agua contaminada con arsénico es un problema de salud pública y se presenta a nivel mundial, debido a la toxicidad de este elemento. La ingesta, por un tiempo prolongado, ocasiona consecuencias severas para el ser humano, una de ellas es la enfermedad crónica conocida como hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), que culmina en lesiones de la piel y cáncer (Litter y Jiménez, 2004).

Por ello, es importante reducir la concentración de arsénico en el agua. La contaminación del agua, es uno de los problemas que enfrentan diferentes zonas del Perú, ya que este problema puede darse de forma natural y por la intervención del ser humano, siendo el resultado un problema para el uso eficiente del recurso hídrico tanto en el abastecimiento en calidad y cantidad.

El presente trabajo de investigación, consiste en evaluar la remoción del arsénico presente en el agua del río Sama, basándose en la oxidación de As^{+3} a As^{+5} con hipoclorito de sodio y la desestabilización química de las partículas coloidales, que se producen al neutralizar las fuerzas que lo mantienen separados, por medio de la adición de cloruro férrico, las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren

formando coágulos de mayor carga que sedimentaran en la superficie, siendo importante a tomar en cuenta el tiempo de sedimentación de los coágulos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

Se han realizado distintos estudios en Latinoamérica, en países como México, Argentina, Chile y Perú donde el problema del arsénico, es un problema de salud pública; estos trabajos tienen la finalidad de proponer, tecnologías aplicables que puedan minimizar el problema (Castro de Esparza, 2006).

Los procesos y tecnologías conocidos para la remoción de arsénico del agua, son variados y comprenden desde tratamientos en plantas potabilizadoras convencionales y métodos domiciliarios, hasta tecnologías in situ. Los procesos que se conocen en la actualidad son: oxidación, precipitación, coagulación y ablandamiento con cal, ósmosis inversa, microfiltración, nanofiltración, adsorción, tratamientos biológicos de fitorremediación, electrodiálisis y electrocinética, entre otros (Litter, Morgada y Bundschuh, 2010).

Continuamente se proponen nuevos métodos o mejoras, cada proceso presenta ventajas, desventajas y limitaciones, según las condiciones locales, lo que no asegura un resultado técnico, económico y ambiental adecuado en todos los casos.

Por ello, resultan de particular interés las técnicas de remoción que utilizan mecanismos basados en los principios de coagulación-floculación (Romero, 1999).

Los procesos de coagulación-floculación, son metodologías propias y habituales en plantas potabilizadoras, principalmente para remoción de materia suspendida y clarificación del agua. En una primera etapa, los compuestos químicos en solución, se adsorben a la superficie de partículas sólidas en suspensión y posteriormente, en la coagulación, estos coloides se agrupan formando flóculos de mayor tamaño, los cuales son removidos mediante precipitación o filtración. La precipitación, consiste, básicamente, en la adición de productos químicos al agua. El mezclado, la formación de una matriz sólida a través de la coprecipitación o una combinación de estos procesos, en la separación de la matriz sólida del agua (Romero, 1999).

El tratamiento de precipitación-coprecipitación, incluye la adición de oxidantes químicos, ajustes de pH y coagulantes o precipitantes químicos. Entre los factores de importancia para la remoción con este método, se han identificado el tipo y la dosis del coagulante, tiempo de mezcla, estado de oxidación y concentración de arsénico inicial, temperatura, presencia de otros solutos inorgánicos y el pH. Existen numerosos parámetros que influyen en las fuerzas químicas y físicas que posibilitan que estos fenómenos ocurran; en ellas los aspectos de mayor relevancia, son las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales presentes en el agua, la temperatura, el pH y la dosis del coagulante (Romero, 1999).

1.1.2. Problemática de la investigación

En países de América Latina como Argentina, Chile, México, El Salvador, Nicaragua, Perú y Bolivia, por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles altos de arsénico. La ruta de exposición de las personas al arsénico son la ingesta de agua (Castro de Esparza, 2006).

La situación más grave se da en zonas rurales con insuficiente acceso al suministro de agua potable, donde las condiciones de vida, prestaciones de salud y prevención de enfermedades, son muy inferiores en comparación con las urbanas. Allí, sin recursos económicos ni apoyo tecnológico, los pobladores utilizan agua de ríos, vertientes, pozos y estanques con un elevado grado de contaminación. El arsénico es altamente tóxico y responsable de hidroarsenicismo crónico regional endémico, que culmina en lesiones de la piel y cáncer (Litter y Jimenez, 2004).

En poblaciones rurales de nuestro país, existen zonas que cuentan con recursos hídricos, cuyas características geológicas contienen distintos metales disueltos en el agua, principalmente el arsénico, que supera la concentración permisible, y que pone en riesgo la salud de la población, debido a las carencias de los servicios básicos de agua potable, por los altos costos de operación y mantenimiento de las tecnologías existentes para la remoción de arsénico, y se ven en la necesidad de utilizar aguas naturales con alto contenido de arsénico (Castro de Esparza, 2006).

El agua constituye uno de los problemas fundamentales a resolver para el departamento de Tacna. La zona sur del Perú es caracterizada por una actividad volcánica importante, propia del círculo de fuego del pacífico. Además, esta zona es la cabecera del desierto de Atacama, lo cual la caracteriza como una zona de estrés hídrico (Franco y Rodríguez, 2002).

Según la evaluación de la Dirección General de Salud Ambiental, respecto de la calidad del agua que se consume en Tacna, la población rural está expuesta al consumo de agua con alto contenido de arsénico (DIRESA, 2015).

Los recursos hídricos en los puntos principales de aprovechamiento de la cuenca del río Sama, presenta valores por encima de los límites máximos permisibles, lo que limita su uso en la actividad agropecuaria y restringe su aprovechamiento para uso poblacional sin previo tratamiento (ANA, 2013).

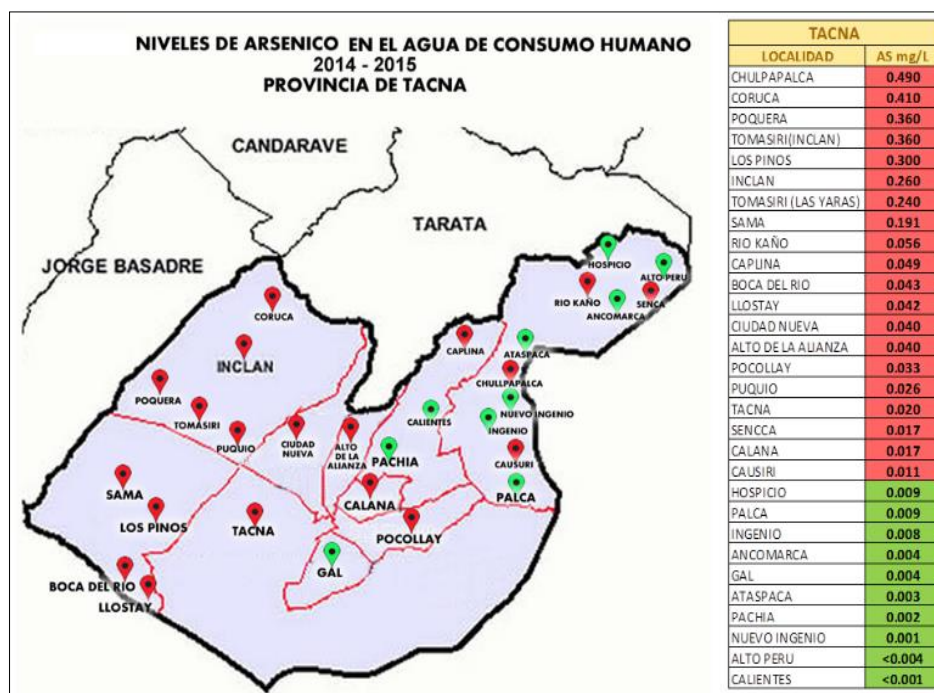


Figura 1. Mapa del arsénico en los distritos de Tacna.

Fuente: DIRESA, 2015.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El río Sama se encuentra ubicado en el departamento de Tacna, ocupando parte de la localidad de Sama Inclán (Coruca). Sus aguas son usadas para uso doméstico, agricultura y ganadería. La Dirección Regional de Salud Tacna y el Instituto Nacional de Salud realizaron un estudio de niveles de arsénico al que están expuestos los pobladores de Inclán, encontrándose que el 85 % de la población de Inclán estaba expuesto a la presencia de este metal pesado, que contiene 0,41 mg/L de arsénico. Existen diversos métodos de remoción de arsénico, con la finalidad de dotar de agua tratada para el consumo humano se plantea.

¿Se puede remover el arsénico en el agua del río Sama utilizando hipoclorito de sodio y cloruro férrico?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Frente al problema del alto contenido de arsénico en el agua del río Sama (ANA, 2013), que sobrepasa el límite máximo permisible establecido de 0,01 mg/L, según la normas nacionales (Anexo 1); surge la necesidad de tratar el agua para garantizar su disponibilidad. Una dosificación inadecuada puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua.

Por lo tanto se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de la coagulación y que dificulta una óptima remoción de arsénico. El presente trabajo de investigación, consiste en evaluar la remoción de arsénico determinando las dosis adecuadas de hipoclorito de sodio, cloruro férrico y tiempo de sedimentación.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Remover el arsénico del agua del río Sama, utilizando hipoclorito de sodio y cloruro férrico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el rendimiento de la remoción del arsénico, utilizando hipoclorito de sodio (mg/L), cloruro férrico (mg/L) y tiempo de sedimentación adecuado.
- Determinar las variables operacionales adecuadas del proceso de remoción del arsénico: cloruro férrico (mg/L), hipoclorito de sodio (mg/L) y tiempo de sedimentación (ts).

1.5. HIPÓTESIS

Empleando hipoclorito de sodio y cloruro férrico se reducirá la concentración de arsénico del agua del río Sama.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

En la Universidad Nacional de Córdoba, se realizaron ensayos de laboratorio con base en procesos de coagulación-floculación, con el objetivo de evaluar la eficiencia en la eliminación del arsénico en el agua para consumo humano. Se evaluó, para identificar los principales factores que controlan la remoción de arsénico en agua. En los ensayos realizados, se varió la dosis de los coagulantes desde 5 a 500 mg/L, la de partículas sólidas desde 0 a 6000 mg/L y la concentración inicial de arsénico desde 0,5 a 5 mg/L (Carro y Franco, 2014).

Con estas variables, se realizaron combinaciones en más de 100 experimentos. Se obtuvieron porcentajes de remediación de arsénico que variaron desde 0 hasta 95 %. Los resultados obtenidos, permitieron lograr remociones del 95 % al incorporar cloruro férrico y del 80 % con sulfato de aluminio en soluciones con arsenato. Para las dosis de cloruro férrico mayores a 50 mg/L, la eficiencia de la remediación disminuyó considerablemente, en relación con los resultados obtenidos con sulfato de aluminio, para todos los tipos y concentraciones de sólidos. Las mayores remociones, se lograron a pH entre 3 y 5, en soluciones oxidadas. A partir de los resultados obtenidos y su análisis, mediante regresiones

lineales múltiples con valores de $R^2 > 0,90$, se pudo determinar que los parámetros que controlan la remoción son: la dosis de floculante, el pH del líquido y la concentración de sólidos en suspensión. La mineralogía de los sólidos y el tipo de floculante, tendrían un efecto menos significativo en la remoción mediante coagulación-floculación. Los resultados obtenidos son relevantes para la remoción de arsénico en plantas potabilizadoras de agua, como también en la implementación de métodos caseros de remoción (Carro y Franco, 2014).

Los resultados obtenidos por Carro et al. (2014), permitieron lograr remociones del 95 % al incorporar cloruro férrico y del 80 % con sulfato de aluminio en soluciones con arsenato. En México, en el municipio de Zimapán, específicamente en el pozo el Muhi, se encontró que la concentración de arsénico era mayor al límite máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud que es de 0,010 mg/L, por lo que el agua no era apta para consumo humano (Maldonado, 2012).

Se realizaron estudios para determinar la eficiencia de remoción de arsénico, encontrando la dependencia en buena medida de la dosis del coagulante, empleándose cloruro férrico y de la dosis de cloro utilizado para oxidar el arsénico presente de As^{+3} a As^{+5} , siendo el proceso de coagulación-floculación, la etapa fundamental del tratamiento. Se removió el arsénico en concentraciones mayores a 98,8 % prácticamente sin modificarse el pH del agua; la concentración de arsénico

inicial era de 1,3 mg/L y la concentración al final del tratamiento era de alrededor de 0,0156 mg/L (Maldonado, 2012).

Los procesos de coagulación, reaccionan formando hidróxidos metálicos insolubles que se asocian con los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Las especies iónicas, son removidas del agua por reacción con un ión de carga opuesta y con los flóculos de hidróxidos metálicos, a través de la adsorción, que se dice a la asociación del contaminante con la superficie del precipitado y/o oclusión, refiriéndose a la adsorción del contaminante en el interior de los flóculos en crecimiento formando precipitados que sedimentaran (Hering et al., 2000).

Los factores que influyen en el desempeño de la coagulación, son el pH de la solución, el tipo y la dosis de coagulante, la fuerza iónica del agua y el estado de oxidación de las especies de arsénico, además de los parámetros operacionales, como son: los tiempos de retención y los gradientes de velocidad en el mezclado (Hering et al., 2000).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Área de estudio

El área de estudio es en la cuenca del río Sama, que pertenece al sistema hidrográfico del Pacífico y tiene sus orígenes en las Lagunas Calere (Río Cano, 4 600 m.s.n.m.), Cotanvilque (Río Jaruma Chico, 4 680 m.s.n.m.), Laycacochoa (Río Jaruma, 4 700 m.s.n.m.) y Caparaja (4 900 m.s.n.m.) (ANA, 2010).

El río Sama se encuentra entre las coordenadas geográficas 17°12' y 18°10' de Latitud Sur y 69°50' y 70°51' de Longitud Oeste. Políticamente, está ubicada en el departamento de Tacna, ocupando parte de las provincias de Tacna y Tarata (ANA, 2013).

Los límites de la cuenca Sama son: por el norte la cuenca del río Maure, por el sur el Océano Pacífico, por el este las cuencas de los ríos Kallapuma, Uchusuma y Caplina; y por el oeste la cuenca del río Locumba. Este río nace en las alturas de la laguna Cotanvilque con el nombre de río Jaruma Grande; posteriormente, se conoce con los nombres de río Jaruma, Huallatire, Ticalaco, Pistala y Tala hasta la confluencia con el río Salado, donde forma el río Sama, el cual desemboca en el Océano Pacífico (ANA, 2013).

Sus afluentes principales son: por la margen derecha, los ríos Ticaco (40 km²), Salado (425 km²) y la quebrada Honda (705 km²) por la margen izquierda, los ríos Tarata y Aruma (ANA, 2013).

El régimen del río es torrencioso y es el más irregular de la zona sur por su gran variabilidad y marcada diferencia entre sus descargas extremas. La cuenca es alimentada en el verano austral por precipitaciones pluviales; en este período se concentra el 75 % de las descargas, y el resto del año es alimentado por deshielos de glaciales y/o la descarga de los acuíferos de agua subterránea. La máxima descarga registrada fue de 115,4 m³/s y la descarga mínima fue de 0,01 m³/s.

La media anual fue 2,27 m³/s, que equivale a un volumen medio anual de 71,89 Hm³. Entre los meses de enero a marzo, se concentran mayores descargas, que disminuyen a partir de setiembre a diciembre (ANA, 2013).

El agua que discurre dentro del cauce del río Sama es controlada en la estación de aforos La Tranca. En dicha estación, se aforan las descargas de la cuenca colectora, cuya área total aproximada es 1 875 km² (ANA, 2013).

El punto del monitoreo de agua superficial es RSama3 ubicada en el río Sama, a la altura del puente Coruca; en coordenadas de campo de 345675 E y 8049782 N a 841 m.s.n.m.

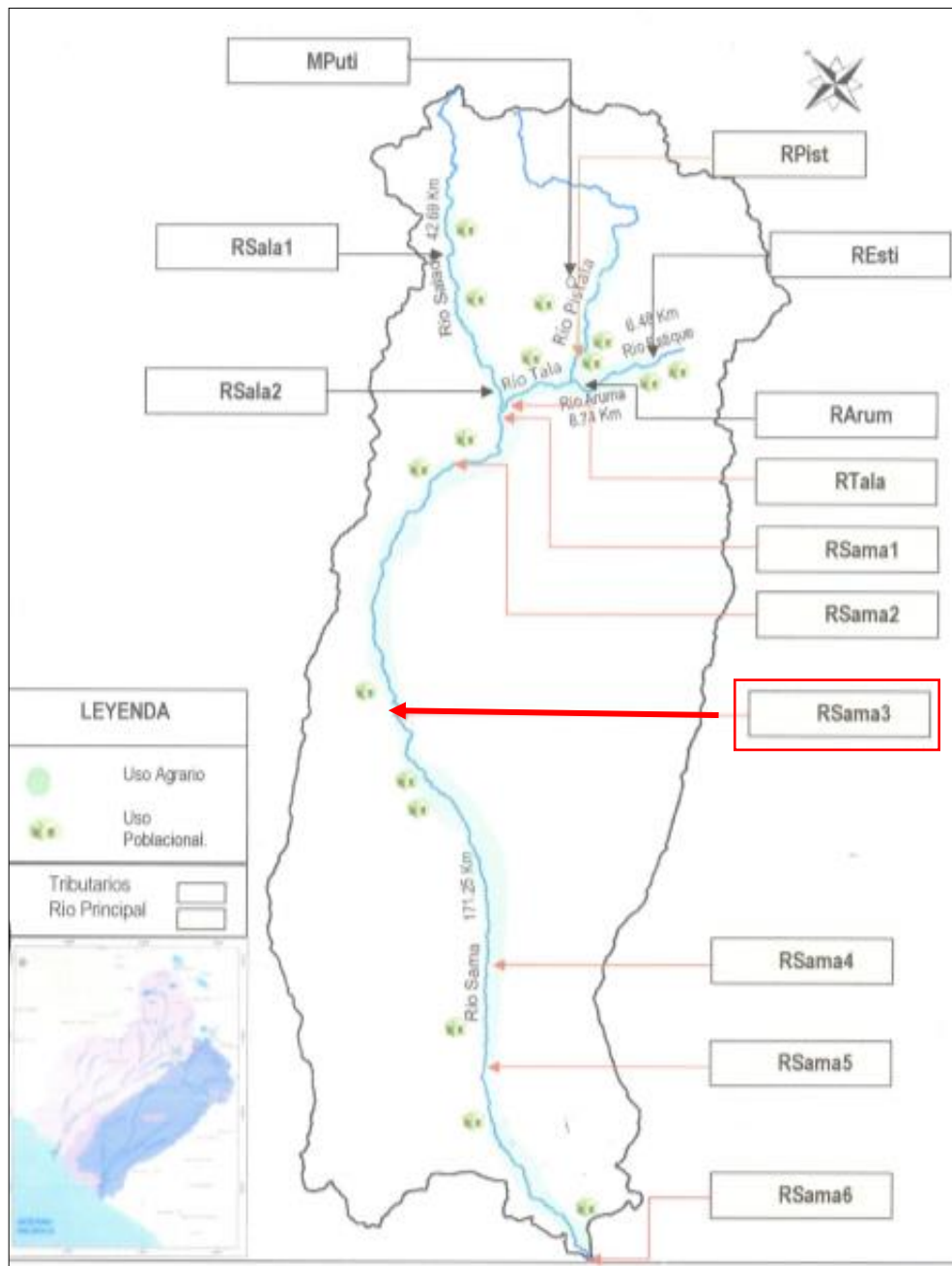


Figura 2. Mapa de cuenca de Sama.

Fuente: ANA, 2013.

2.2.2. Parámetros de la calidad de agua del río Sama

El curso del río Sama comprende desde su nacimiento en la unión del río Salado con Tala, hasta el sector de Boca del río (aguas de afloramiento). En el río Sama se ha encontrado parámetros de acuerdo al siguiente detalle: La calidad de las aguas en el río Sama se ve afectada en este punto de monitoreo por el valor de arsénico que excede 6,16 veces, el hierro (Fe) que excede 0,88 veces y el manganeso (Mn) que excede 0,88 veces a los valores establecidos en el Estándar de Calidad Ambiental para agua. El origen del arsénico es natural y va asociado al componente presente en la geología regional, como son las agrupaciones mineralógicas metálicas sulfuradas, como el caso de la arsenopirita (FeAsS), presente en las formaciones ígneas del batolito costero peruano (ANA, 2013).

Se ha encontrado que los niveles de pH oscilan, entre 4,22 unidades de pH y el valor más alto 8,84 unidades de pH. Se ha encontrado que los niveles de arsénico oscilan, entre 0,005 mg/L y el valor más alto 1,167 mg/L. (ANA, 2013).

En la cuenca alta del río Sama, en el río Pistala y río Tala, existen restricciones para el riego de vegetales y bebida de animales, por los niveles de conductividad y arsénico en RPist y la presencia de hierro y manganeso en RTala, debido a la naturaleza geológica de los suelos por donde discurren las aguas superficiales. En la cuenca media y baja en el río Sama, existen restricciones para el riego de vegetales y bebida de animales por los niveles de conductividad en RSama5, la

presencia de arsénico, boro, hierro y manganeso, calcio (RSama3 y RSama5), y sodio (RSama5). Debido a la naturaleza geológica de los suelos (ANA, 2013).

Se ha recopilado el historial de datos de los parámetros fisicoquímicos, entre los años 2011 - 2014 (Anexo 3), mediante informes reportados por la Autoridad Nacional del Agua, cuyo punto de monitoreo de agua superficial es RSama3 ubicada en el río Sama, altura del puente Coruca; en coordenadas de campo de 345675 E y 8049782 N a 841 m.s.n.m. (ANA, 2013).

Tabla 1

Parámetros de la calidad del río Sama

Parámetro	Punto de muestreo RSAMA3			
	Octubre 2011	Diciembre 2012	Marzo 2013	Marzo 2014
Temperatura (°C)	23,60	23,60	21,00	21,00
pH	8,30	8,40	9,60	9,60
Conductividad	2560	2470	792	792
Magnesio total (mg/L)	47,35	40,77	28,92	28,92
Sodio total (mg/L)	255,35	263,94	53,52	53,52
Arsénico total (mg/L)	0,36	0,36	0,19	0,19
Boro total (mg/L)	9,39	7,58	1,81	1,81
Hierro total (mg/L)	0,62	0,51	3,35	3,35

Fuente: Monitoreos realizados por la Autoridad Nacional del Agua, 2014.

2.2.3. El arsénico en el agua superficial

El arsénico, número atómico 33 y peso atómico 74,922 una , puede estar presente en distintos estados de oxidación (-3, 0, 3, 5) y en formas inorgánicas y orgánicas, en amplio rango de concentraciones (Litter, Sancha y Ingallinella, 2010).

En el agua, este metaloide se encuentra en dos estados de oxidación +3 y +5. La forma trivalente (As^{+3}), se hidroliza como ácido arsenioso (H_3AsO_3) y está presente como ácido libre o como una de las especies resultantes de su disociación. La forma pentavalente (As^{+5}) se hidroliza como ácido arsénico (H_3AsO_4) (Bundschuh et al., 2009).

Los estados de oxidación que predominan son As^{+3} y As^{+5} , con menos frecuencia, As^0 y As^{-3} . El arseniato, la especie arsenical más difundida en el medio ambiente, es la mayoritaria en agua y suelos, el arsenito es la forma inorgánica reducida y está presente en forma minoritaria en aguas, suelos y seres vivos. El estado de oxidación del arsénico, está controlado fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH, siendo un elemento singular, entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxianiones, por su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6,5-8,5) (Litter, Armienta y Farías, 2009).

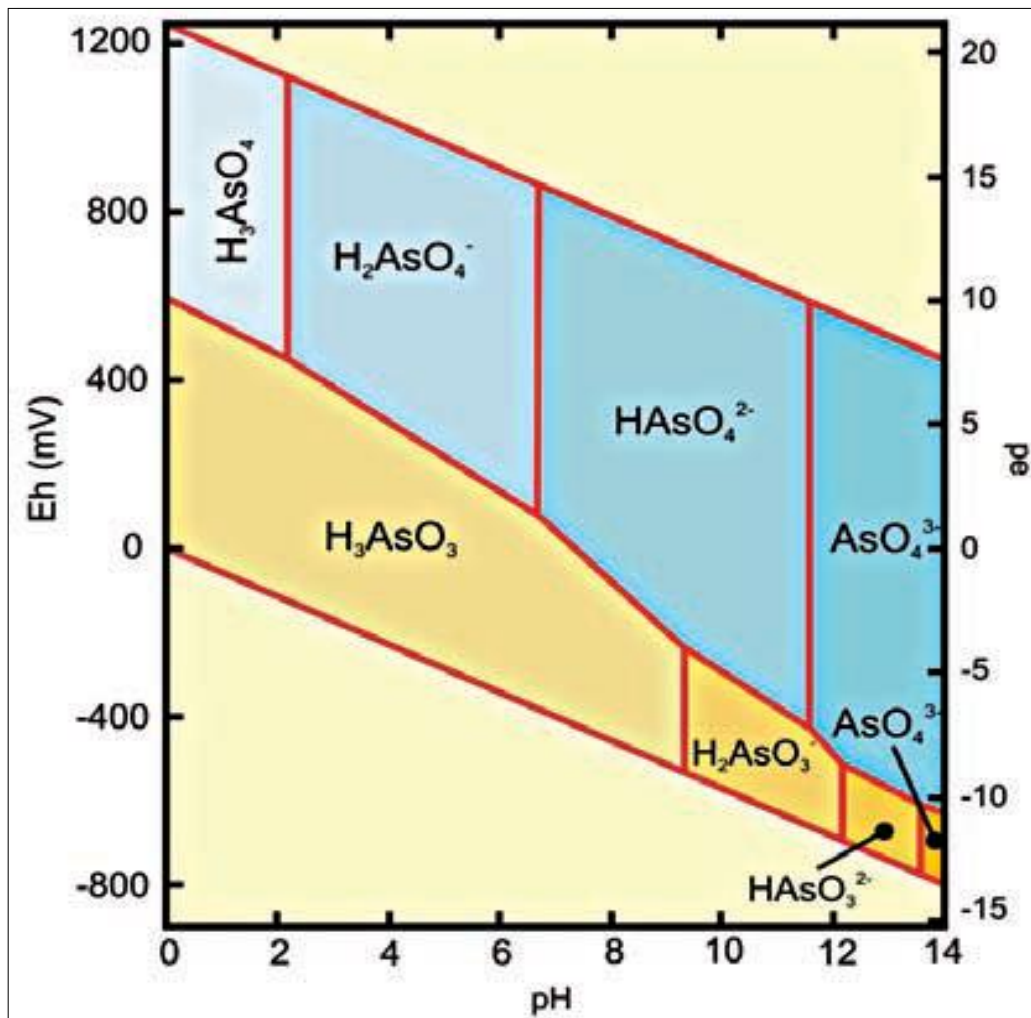


Figura 3. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema $\text{AsO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

Fuente: Litter, Armienta y Farias, 2009.

En condiciones oxidantes, el As^{+5} predomina sobre el As^{+3} , encontrándose fundamentalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH bajos (inferiores a 6,9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} (en condiciones de extrema

acidez, la especie dominante será H_3AsO_4^0 , mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} . En condiciones reductoras a pH inferior a 9,2, predominará la especie neutra (Litter et al., 2009).

Se encuentra fundamentalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH menores que 6,9. Mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} , en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-} . El ácido arsenioso aparece a bajo pH y condiciones reducidas suaves, pero se transforma en H_2AsO_3 a medida que aumenta el pH. En condiciones reductoras, a pH inferior a 9,2 predominará la especie neutra. Cuando el pH excede 12 puede estar presente la especie HAsO_3^{2-} , por lo cual no se encontrará esta especie en aguas naturales. Dado que forma aniones en solución pero es un metaloide, el arsénico no forma generalmente complejos con aniones simples como Cl^- y SO_4^{2-} como sí lo hacen los metales catiónicos. El arsénico forma uniones con azufre, nitrógeno y carbono orgánico.

A bajo pH, en presencia de sulfuro, se puede formar HAsS_2 ; a bajos valores de pH, en aguas con concentraciones de azufre grandes o moderadas, son estables los sulfuros As_2S_3 y AsS (Litter et al., 2009).

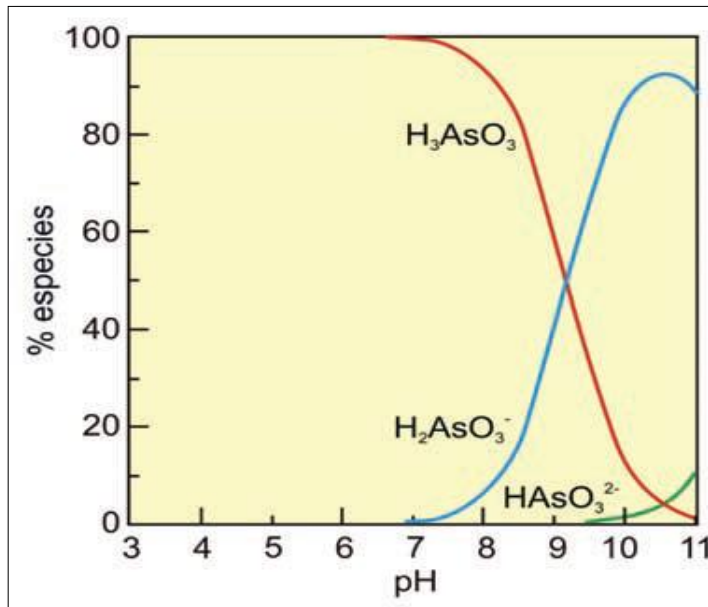


Figura 4. Especies de arsénico trivalente en función de pH.
Fuente: Litter, Armienta y Farías, 2009.

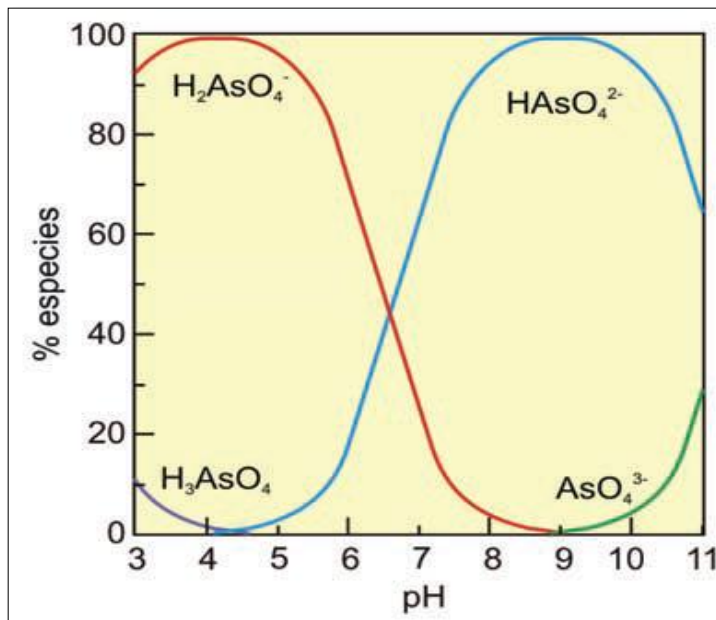


Figura 5. Especies de arsénico pentavalente en función de pH.
Fuente: Litter, Armienta y Farias, 2009.

2.2.4. Ingesta de arsénico por el ser humano

El arsénico se absorbe por todas las vías con la eficacia suficiente para producir toxicidad, aunque la preferente es la vía digestiva, con una eficacia superior al 90 %. En la sangre, se encuentra en el interior de los hematíes y unido a las proteínas plasmáticas. Tras una dosis aguda de arsénico, se produce una distribución a todos los órganos con una mayor concentración en el hígado y el riñón (Ferrer, 2003).

2.2.5. Normativas y estándares

En la última edición de las Guías para la calidad del agua potable de la OMS (2008) ISBN 92-4-154696-4 y según la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, 2011, establecen una concentración de arsénico no mayor a 0,01 mg/L.

2.2.6. Tecnologías de tratamiento

Varias son las tecnologías desarrolladas para el abatimiento de arsénico en agua. Las más empleadas son la de coagulación-floculación y la de ósmosis inversa. Otras tecnologías utilizadas, con menor frecuencia, son la de adsorción y la de intercambio iónico mediante el uso de resinas (INTI, 2009).

2.2.7. Proceso de coagulación y floculación

La coagulación es la desestabilización del coloide mediante la formación de coágulos, originados por la adición al agua de un producto capaz de neutralizar la carga eléctrica de las partículas coloidales, generalmente electronegativas. El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos, en general. Tales impurezas coloidales, presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad (Salazar, 2012).

Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos: El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla (Salazar, 2012).

El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo, hasta cerca de 100 segundos, de

acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida. La remoción de las partículas coloidales, está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración (Salazar, 2012).

Las partículas coloidales, se caracterizan por ser hidrofílicas (tienen afinidad por el agua) e hidrófobas (es decir que rechazan al agua), los primeros se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontáneo, por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos. Las partículas hidrófobas son, en general, partículas de materias inorgánicas mientras que las hidrofílicas son materias orgánicas; en realidad son las partículas que son exclusivamente hidrofílicas o hidrofóbicas; se obtienen más bien partículas hidratadas a los diferentes grados. La carga eléctrica y la capa de agua que rodean las partículas hidrófilas, tienden a desplazar las partículas unas de otras y, en consecuencia, los estabiliza dentro de la solución (Cárdenas, 2000).

2.2.8. Carga eléctrica y doble capa

Dentro del agua superficial, las partículas coloidales, son las causantes de la turbiedad y del color por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos. Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta (Cárdenas, 2000).

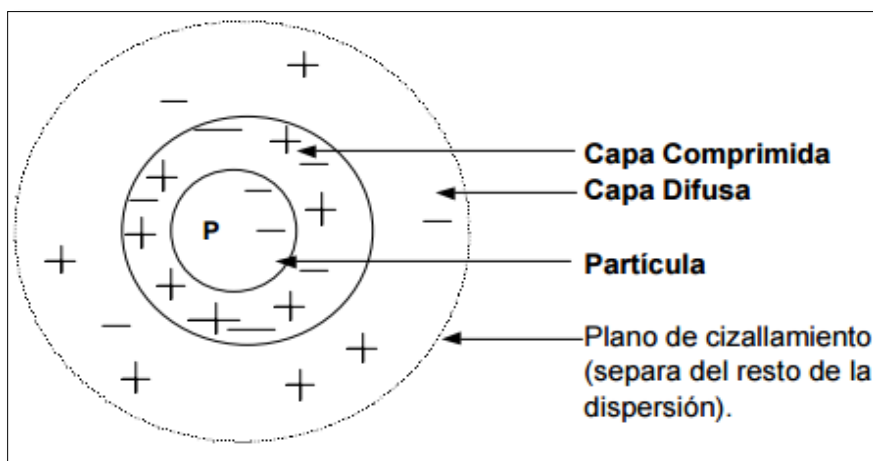


Figura 6. Doble capa de una partícula coloidal.

Fuente: Cárdenas, 2000.

2.2.9. Factores de estabilidad e inestabilidad.

Las partículas coloidales están sometidas a dos grandes fuerzas:

Fuerzas de atracción de Van der Waals: E_a (factores de Inestabilidad); son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.

Fuerzas de repulsión electrostáticas: E_b (colúmbicas – factor de estabilidad); son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras; por ejemplo 2 partículas de igual signo no se pueden aproximar, estas se rechazan.

En la Figura 7, se muestra cómo las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos, la adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la nube de iones que rodean los coloides de modo que pueden aglomerarse (Cárdenas, 2000).

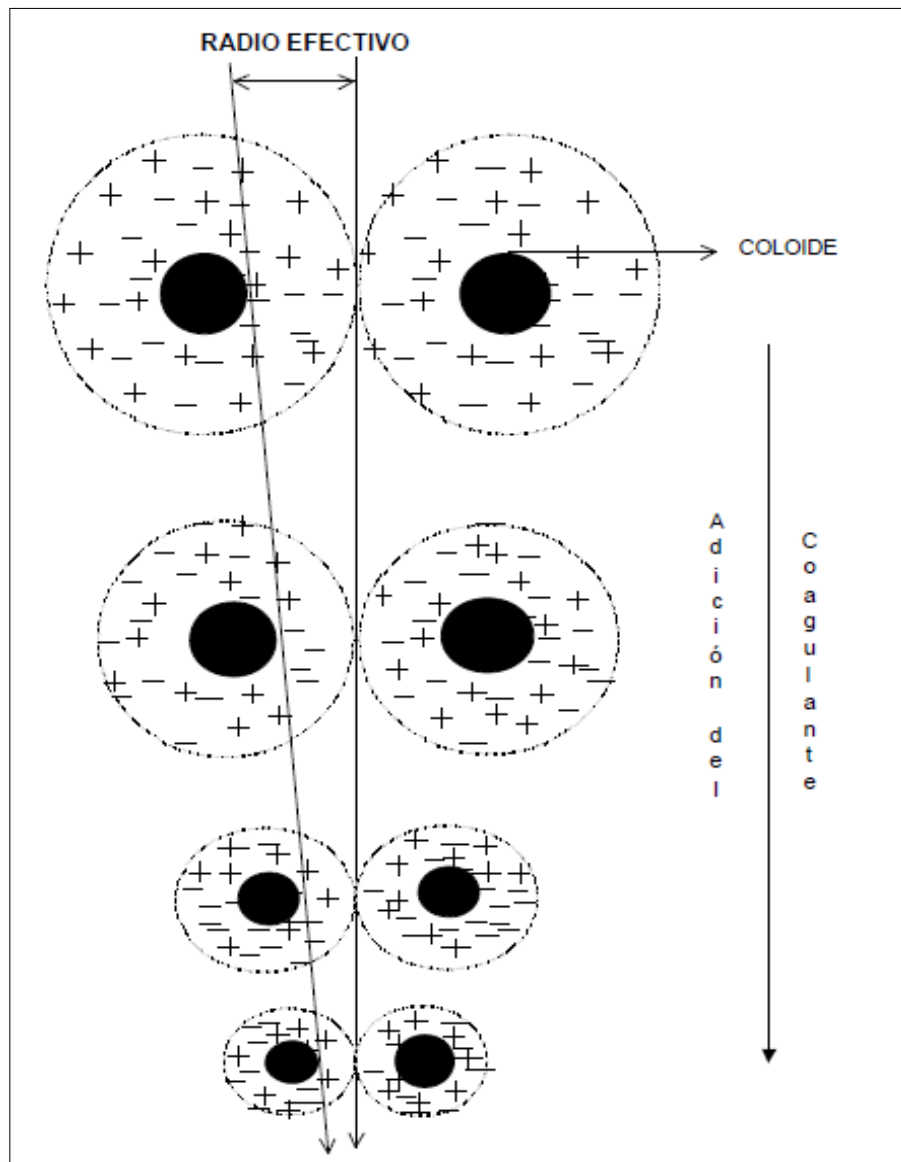


Figura 7. Proceso de coagulación.

Fuente: Cárdenas, 2000.

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

Compresión de la Doble Capa: Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. Existe, por otro lado, un potencial de atracción o fuerzas de atracción E_a , entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Walls, fuerzas de estabilización molecular, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos (Cárdenas, 2000).

En la Figura 8, si la distancia que separa a las partículas es superior a “L”, entonces las partículas, no se atraen. E, es la energía que los mantiene separados. Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Walls no son afectados por las características de la solución.

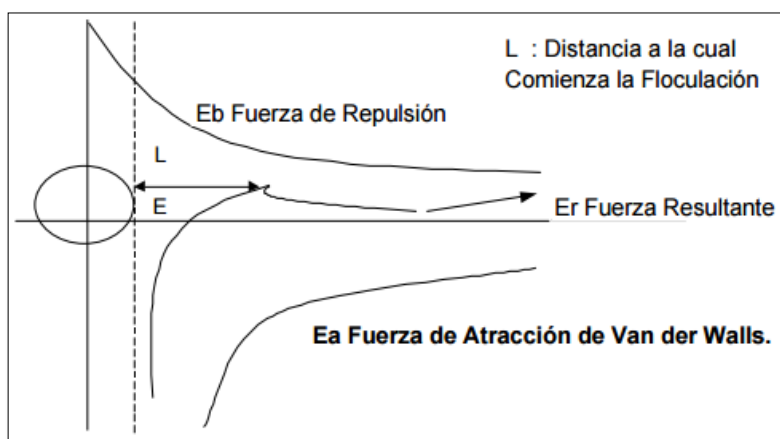


Figura 8. Fuerzas de atracción y repulsión.

Fuente: Cárdenas, 2000.

2.2.10. Adsorción y neutralización de cargas

Las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide. El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua. Después de la teoría de la doble capa, la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que, la fuerza natural de mezcla, debido al movimiento browniano no es suficiente, requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo, realizar la agitación mecánica o hidráulica. Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se reestabiliza la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que, el exceso de coagulante es adsorbido en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original (Cárdenas, 2000).

2.2.11. Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de cloruro férrico FeCl_3 , el floc está formado de moléculas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales, acelera la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una

relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante (Cárdenas, 2000).

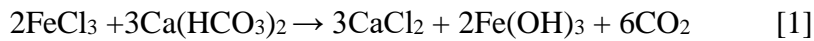
2.2.12. Cloruro férrico

El cloruro férrico se presenta en forma sólida o líquida. La forma sólida es cristalina, de color pardo, deliquescente, de fórmula teórica $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Se funde fácilmente en su agua de cristalización a $34\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que es necesario protegerla del calor. La forma líquida comercial, tiene un promedio de 40 % de FeCl_3 . Para evitar toda confusión entre los contenidos de producto puro o de producto comercial, es recomendable expresar la dosis de coagulantes en Fe equivalente; es decir 20,5 % para la fórmula sólida y 14 % aproximadamente, para la solución acuosa comercial (Occidental Chemical, 2008).

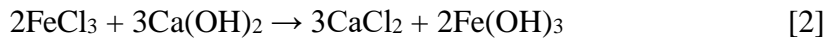
En presencia de hierro, las soluciones acuosas de cloruro férrico, se reducen rápidamente a cloruro ferroso FeCl_2 . Esta reacción explica su gran poder corrosivo frente al acero, y la necesidad de seleccionar adecuadamente el material de los recipientes de almacenamiento, de preparación y de distribución (Occidental Chemical, 2008).

Reacciones del cloruro férrico en el agua:

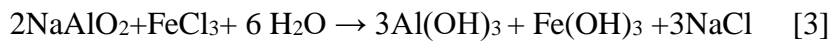
Con la alcalinidad



Con la cal



Con el aluminato sódico



Es un proceso por el cual, las cargas eléctricas de las sustancias coloidales disueltas o suspendidas, son neutralizadas por el agente floculante, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración (Occidental Chemical, 2008).

La coagulación es parte de un proceso físico-químico de tratamiento de aguas que tiene por objeto, retirar el material coloidal del agua. La actividad del coagulante FeCl_3 no se debe a la acción directa de Fe^{+3} sobre la carga de los coloides. En la hidrólisis de las sales el catión señalado, no se forma libre sino que se combina con moléculas de agua y grupos OH^- y H^+ , constituyendo formas complejas, las cuales llegan incluso a polimerizarse. Estas formas tienen fórmula variable según el pH del agua (Occidental Chemical, 2008).

Es importante tener presente que, en la banda de pH alcalino, se constituyen formas complejas cargadas negativamente. Las formas expuestas son solubles.

Éstas rodean y son adsorbidas por la superficie del coloide, siendo las que neutralizan la carga electrostática del mismo, anulando las fuerzas repulsivas que existen, haciendo al coloide inestable (Occidental Chemical, 2008).

2.2.13. Dosificación

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. Este método permite realizar ajustes de las distintas variables, con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento (Occidental Chemical, 2008).

Una Prueba de Jarras simula los procesos de coagulación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica. Un envase actúa como un control, mientras que las condiciones de funcionamiento puede variar entre los restantes cinco envases. Un medidor de RPM, en la parte superior del dispositivo, permite el control uniforme de la velocidad de mezclado en todos los envases. Las pruebas que se utilizan para este fin, se conocen como “Pruebas de Jarras” y sobre todo tienen por objeto determinar la dosis óptima de coagulante mediante la simulación de tres procesos básicos que se realizan en planta: mezcla rápida, mezcla lenta y decantación (Occidental Chemical, 2008).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología empleada se basó en describir etapas a fin de cumplir con los requisitos involucrados en una investigación de tipo experimental. Para definir dónde se ubica la investigación, la clasificaremos según el tipo de diseño.

- Según el tiempo de ocurrencia es prospectivo.
- Según período y secuencia es transversal.
- Según el análisis y alcance de los resultados es experimental.

La investigación consiste en la manipulación de tres variables experimentales, en condiciones controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular. El diseño experimental empleado permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas.

3.2. MUESTRA DE ESTUDIO

La muestra de agua estudiada fue representativa del río Sama, se utilizó como referencia la guía para la preservación y manejo de muestras, norma técnica peruana ISO 5667-3-2001.

El punto de muestreo para la investigación, fue ubicado en el pueblo de Sama (Estación de monitoreo), este punto de muestreo es utilizado por instituciones como la Autoridad Nacional del Agua, para determinar la calidad fisicoquímica del río Sama. Punto de monitoreo de agua superficial es RSama3 ubicada en el río Sama, a la altura del puente Coruca; en coordenadas de campo de 345675 E y 8049782 N a 841 m.s.n.m. (ANA, 2013).

Se procedió a realizar la caracterización fisicoquímica del agua muestreada, siguiendo las normas técnicas peruanas para cada parámetro analizado y fueron realizadas en el Laboratorio de Procesos Químicos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.

3.2.1. Identificación de variables

VARIABLES INDEPENDIENTES

- Cloruro férrico (ppm)
- Hipoclorito de sodio (ppm)
- Tiempo de sedimentación (ts)

Variables dependientes

- Arsénico total (mg/L)
- Hierro residual (mg/L)

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Definido las variables en función de factores medibles, se realizó una definición conceptual de la variables para romper el concepto difuso que ella engloba y así darle sentido concreto dentro de la investigación; luego, en función de ello se procede a realizar la definición operacional de la misma para identificar los indicadores que permitirán realizar su medición de forma empírica y cuantitativa.

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variables	Factores	Indicador	Unidad	Rango
Independiente	Hipoclorito de sodio	dosis	ppm	0,05 – 0,1
	Tiempo de sedimentación	tiempo	min	30 – 60
Dependiente	Cloruro férrico	dosis	ppm	20 – 70
	Arsénico residual	mg/L	mg/L	< 0,01
Parámetro	Hierro residual	mg/L	mg/L	< 0,3
	pH			
	Turbiedad		NTU	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Diseño experimental y procesamiento de datos

Teniendo en cuenta los rangos de los factores que intervienen en la remoción del arsénico, se elabora la siguiente tabla.

Tabla 3

Niveles de los factores para remover el arsénico

Factores	Nivel Inferior (-)	Nivel 0	Nivel Superior (+)
FeCl ₃ (ppm)	20	45	70
NaClO (ppm)	0,05	0,075	0,1
Tiempo de sedimentación (min)	30	45	60

Fuente: Elaboración propia.

La estrategia ejecutada para realizar las pruebas experimentales de remoción de arsénico total y encontrar las condiciones adecuadas de operación para obtener la mayor remoción, fue plantear un diseño experimental compuesto central con tres factores (8 puntos factoriales + 6 puntos estrella + 4 puntos centrales). Se procedió al arreglo experimental correspondiente, el cual muestra que son necesario 18 pruebas experimentales totales, en diferentes condiciones como se muestra a continuación.

Tabla 4*Matriz del diseño experimental compuesto central*

N°	Variables codificadas			Variables naturales			variable de respuesta	
	X ₁	X ₂	X ₃	FeCl ₃ (ppm)	NaClO (ppm)	Ts (min)	As (mg/L)	Fe (mg/L)
1	-1	-1	-1	20,00	0,050	30,00		
2	1	-1	-1	70,00	0,050	30,00		
3	-1	1	-1	20,00	0,100	30,00		
4	1	1	-1	70,00	0,100	30,00		
5	-1	-1	1	20,00	0,050	60,00		
6	1	-1	1	70,00	0,050	60,00		
7	-1	1	1	20,00	0,100	60,00		
8	1	1	1	70,00	0,100	60,00		
9	-1,68	0	0	2,96	0,075	45,00		
10	1,68	0	0	87,04	0,075	45,00		
11	0	-1,68	0	45,00	0,033	45,00		
12	0	1,68	0	45,00	0,117	45,00		
13	0	0	-1,68	45,00	0,075	19,77		
14	0	0	1,68	45,00	0,075	70,23		
15	0	0	0	45,00	0,075	45,00		
16	0	0	0	45,00	0,075	45,00		
17	0	0	0	45,00	0,075	45,00		
18	0	0	0	45,00	0,075	45,00		

Fuente: Elaboración propia.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Equipos

- 01 pH metro CHECKER HI 98103 POTABLE pH METER
- 01 Multiparametro Thermo Scientific Orion Star A329 Portable PH/ISE/Conductivity/RDO/ DO Meter
- 01 Turbidímetro Hach 2100Q Portable, rango 0-1000 NTU
- 01 Balanza Analítica CEE, Serie ABS-ABJ
- 01 Leaching Test Jar test (Velp Scientifica)

3.4.2. Materiales

- 06 Vasos precipitados 500ml
- 02 Fiolas de 50 ml
- 01 Fiola de 1000 ml
- 01 Pipeta graduada de 20 ml
- 01 Pipeta graduada de 10 ml
- 01 Pipeta graduada de 0,1 ml
- 02 Bombilla de succión
- 01 Vagueta

3.4.3. Reactivos

- Cloruro férrico hexahidratado
- Hipoclorito de sodio 5 % (marca comercial lejía Clorox).
- Reactivos para determinar el arsénico (Test arsénico método: Colorímetro con tiras de ensayo MQuant™, semicuantitativamente por comparación visual mediante varilla analítica en intervalo de medida de 0,005 - 0,5 mg/L As).
- Reactivos para determinar el hierro (Test Hierro método: Colorimétrico con tarjeta colorimétrica MQuant™, en intervalo de medida de 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1,0 mg/L Fe).

3.4.4. Técnicas y métodos de recolección de datos

Se utilizaron los procedimientos de las respectivas normas técnicas peruanas (NTP) para realizar los análisis de las muestras.

- Calidad de Agua. Muestreo: Guía para la Preservación y Manejo de Muestras Norma Técnica Peruana ISO 5667-3-2001.
- NTP 214.025:1990 Agua potable. Determinación del pH. Método Potenciométrico.

- Test arsénico método: colorímetro con tiras de ensayo MQuant™, semicuantitativamente por comparación visual mediante varilla analítica en intervalo de medida de 0,005 - 0,5 mg/L As. (Anexo 11).
- Test de hierro método: colorimétrico con tarjeta colorimétrica MQuant™, en intervalo de medida de 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1,0 mg/L Fe. (Anexo 12).
- EPA 200.7 Revisión 4.4 (1994) (Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma de Inducción Acoplada). Determinación de metales totales x ICP ÓPTICO. Laboratorio acreditado ALS-CORPLAB.

3.5. PROCEDIMIENTOS Y ANÁLISIS DE DATOS

El presente trabajo se define como un estudio experimental por la manipulación de variables, ejecutándose en el Laboratorio de Procesos Químicos de la E.P. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, la investigación se llevó a cabo en las siguientes etapas.

3.5.1. Etapas de la investigación

Primera Etapa

La toma de muestra se realizó según la norma para muestreo, en el centro de la corriente del río Sama, a una mediana profundidad, evitando la presencia de espuma

superficial, en dirección opuesta al flujo del recurso hídrico. Se realizó análisis in situ y se envió un frasco del agua superficial para el análisis a la Corporación de Laboratorios Ambientales de Latinoamérica ALS-CORPLAB.

Segunda Etapa

Se diluyó el cloruro férrico hexahidratado para la aplicación en el tratamiento de agua basándose, en los procesos de potabilización. Preparando una solución de cloruro férrico al 40 % (Occidental Chemical, 2008).

Tercera Etapa

Se realizó estudios preliminares, en el Equipo de Prueba de Jarras por 1 minuto a 80 RPM, continuamente seguido por 40 RPM por un lapso de 15 minutos. Con un volumen de muestra de agua natural de río Sama de 1 litro y un tiempo de sedimentación de los coágulos de 45 minutos, estos parámetros fueron tomados según referencia de estudios ya realizados (Gil, 2010).

Variándose las dosis de Cloruro férrico aplicando 10 ppm, 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm y 100 ppm de cloruro férrico.

Variando las dosis de Hipoclorito de sodio aplicando 0,01 ppm, 0,05 ppm, 0,1 ppm, 0,2 ppm, 0,05 ppm y 1 ppm de hipoclorito de sodio.

También se realizó estudios preliminares con cloruro férrico y el tiempo de sedimentación.

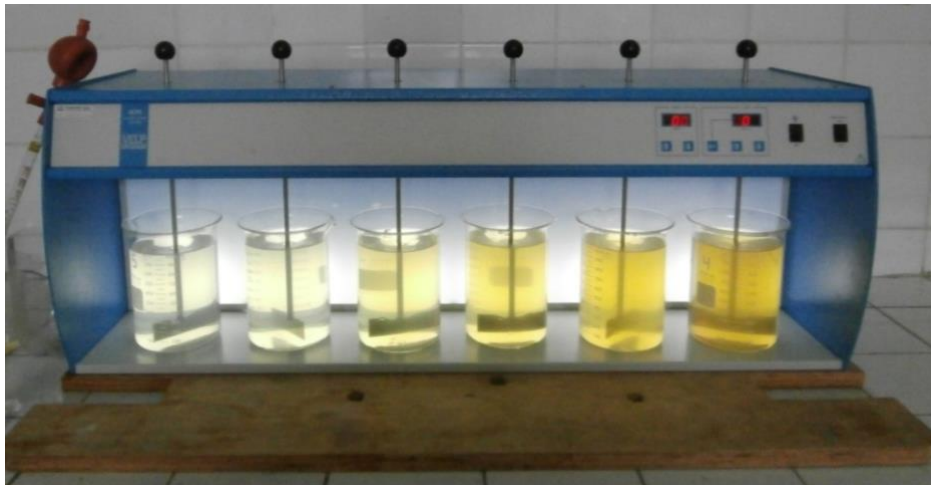


Figura 9. Prueba experimental aplicando 10 ppm, 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm y 100 ppm de cloruro férrico.

Fuente: Elaboración propia.

Cuarta Etapa

Las pruebas preliminares permitieron analizar las respuestas y escoger los rangos de estudio para las variables a controlar y diseñar el diseño experimental compuesto central que permitió analizar este diseño experimental.

Para la estimación del modelo y para el ajuste, se utilizó el software Statgraphics centurión XVI (versión demo), para construcción de las gráficas de superficie. Se ejecutó las 18 pruebas experimentales, según el arreglo del diseño compuesto central de una forma aleatoria, variando para esto los factores: dosis de

hipoclorito de sodio y cloruro férrico, como también el tiempo de sedimentación; determinando el valor o concentración de las variables respuesta arsénico total.

Quinta Etapa

Se realizó la construcción del modelo. Conociendo los valores correspondiente a los factores (variables independientes) y los de la respuesta (variable dependiente), se procedió a efectuar el modelo de análisis de superficie respuesta, consistente en la obtención de ecuaciones matemáticas empíricas que relacionan las respuestas con los factores.

3.5.2. Caracterización de las aguas crudas del río Sama

Coordenadas donde se tomó la muestra de agua del río Sama, punto de monitoreo referencial establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2010).

El punto del monitoreo de agua superficial es RSama3 ubicada en el río Sama, a la altura del puente Coruca; en coordenadas de campo de 345675 E y 8049782 N a 841 m.s.n.m.

Tabla 5*Análisis in situ de la muestra del agua del río Sama*

Parámetros	Valor	Unidades
pH	8,50	pH
Temperatura	20,00	°C
Conductividad	2213	mS/cm
As	0,314	mg/L
Fe	0,166	mg/L
Turbiedad	7	UNT

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestra el resultado de los análisis in situ practicados a la muestra de agua tomada en el río Sama, para realizar las corridas.

3.5.3. Análisis fisicoquímico de la muestra de agua del río Sama antes de someterse a experimentación.

Tabla 6*Análisis de la muestra del agua del río Sama en el laboratorio*

Parámetros	Valor	Unidades
pH	8,17	pH
Temperatura	25,5	°C
Conductividad	2285	mS/cm
Arsénico Total	0,314	mg/L
Hierro total	0,156	mg/L
Turbiedad	7	UNT

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se muestra el resultado de los análisis fisicoquímicos practicados a la muestra de agua tomada en el río Sama, para realizar las corridas experimentales, encontrándose una concentración de arsénico total en el agua de 0,314 mg/L.

Se realizó los análisis fisicoquímicos a la muestra del agua del río Sama, para hacer la comparación con los resultados del Informe técnico del monitoreo de aguas superficiales de la cuenca de Sama realizados por la Autoridad Nacional del Agua (Anexo 3). Se puede comparar la variación de las características fisicoquímicas del agua de dicha zona.

3.5.4. Resultados de las pruebas de remoción

Para elegir los rangos, menor y mayor del diseño experimental, se obtuvo resultados que permitieron evaluar la concentración del arsénico ajustando las variables de hipoclorito de sodio, cloruro férrico y el tiempo de sedimentación donde se logró comprender el comportamiento del agua frente a las variables de cloruro férrico e hipoclorito de sodio (Maldonado, 2012).

Como parámetro, el pH del agua es esencial para determinar en qué especie se encuentra el arsénico, en As^{+3} o As^{+5} y además es un parámetro importante a tener en cuenta en la calidad de agua, tanto para consumo humano, uso doméstico o riego (Gil, 2010).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 7

Análisis de remoción de arsénico total y hierro residual frente al cloruro férrico

FeCl ₃ (ppm)	Turbiedad (NTU)	pH	Fe (mg/L)	As (mg/L)	Turbiedad 60 min (NTU)
10	9,85	8,09	0,05	0,200	3,80
20	5,79	7,72	0,10	0,090	2,36
40	3,83	7,14	0,20	0,030	1,75
60	3,75	7,03	0,40	0,020	1,86
80	4,97	6,63	0,80	0,010	2,36
100	5,10	6,52	1.00	0,005	2,10

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 7, la concentración de arsénico total se reduce a medida que aumenta la dosis de cloruro férrico en la solución.

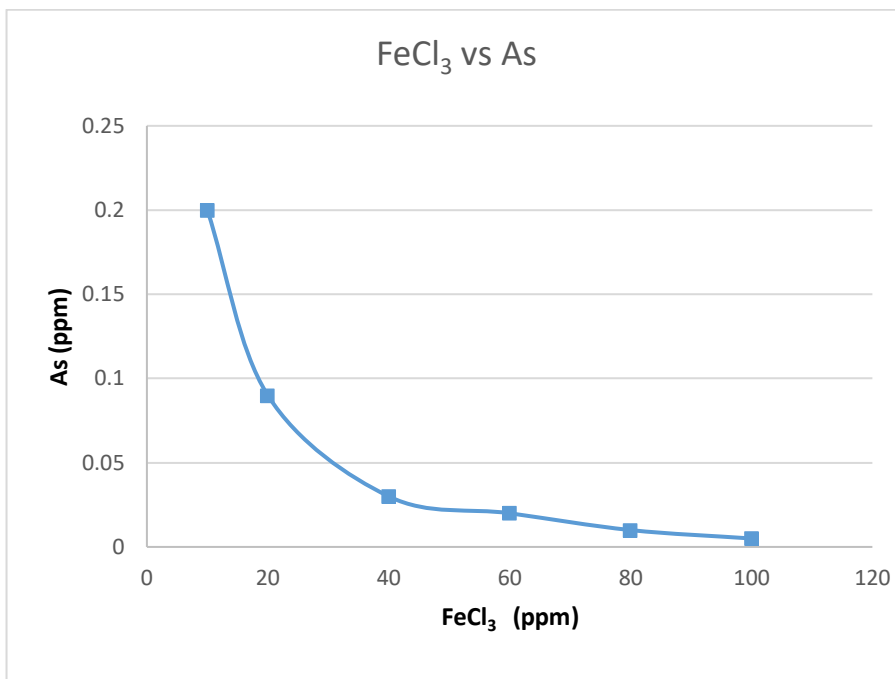


Figura 10. Remoción de arsénico total al añadir cloruro férrico.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se observa la variación de la remoción de arsénico respecto al aumento de la dosis de cloruro férrico, a mayor dosis de cloruro férrico, la remoción de arsénico es mayor.

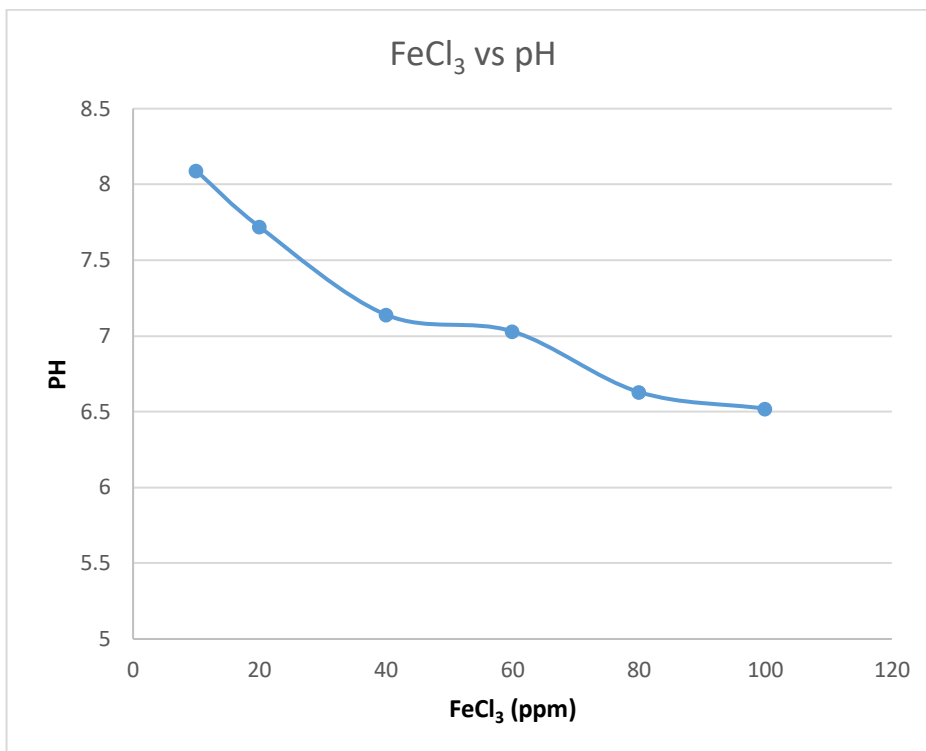


Figura 11. Variación del pH al añadir cloruro férrico al agua superficial.

Fuente: Elaboración: propia.

En la Figura 11 se observa la variación del pH, al aumentar la dosis de cloruro férrico, el pH de la solución se hace más ácido (Occidental Chemical, 2008) .

Tabla 8

Análisis de remoción de arsénico total y hierro residual frente al hipoclorito de sodio

NaClO (ppm)	Turbiedad (NTU)	pH	Fe (mg/L)	As (mg/L)
0,02	2,05	8,05	0,030	0,314
0,05	1,79	7,85	0,029	0,250
0,10	1,89	7,53	0,026	0,250
0,20	1,75	7,23	0,030	0,300
0,50	1,97	4,68	0,030	0,250
1,00	2,10	2,52	0,025	0,250

Fuente: Elaboración: propia.

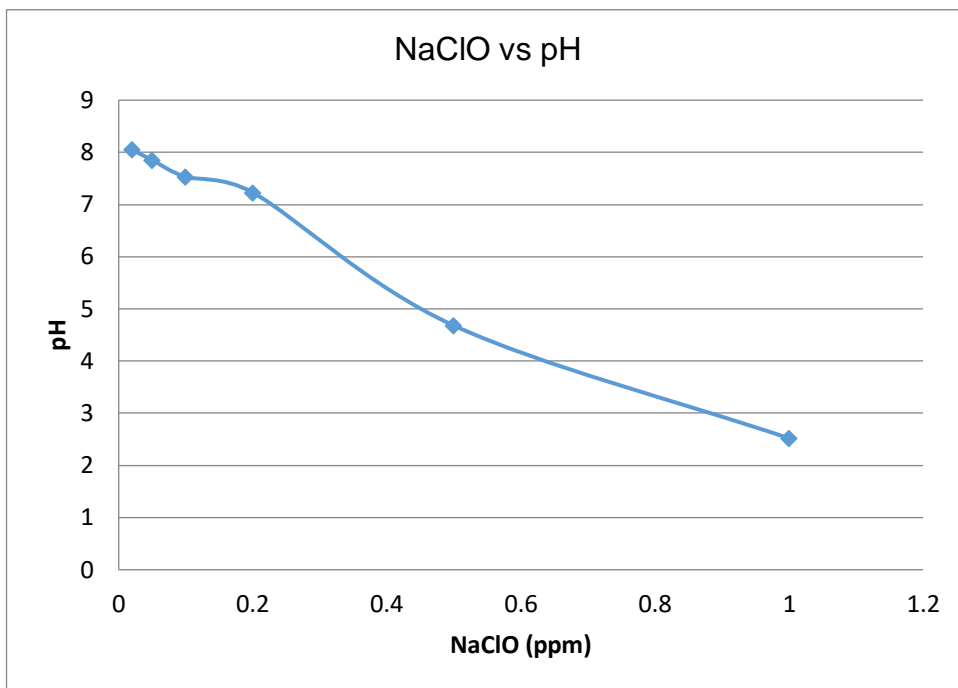


Figura 12. pH al aumentar la dosis de hipoclorito de sodio.

Fuente: Elaboración propia.

El hipoclorito de sodio es un compuesto de pH ácido, por ello es necesario hacer un previo análisis de la dosificación, con una dosis mayor a 0,2 ppm de hipoclorito de sodio, se obtiene una solución muy ácida.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Resultados de la matriz de diseño compuesto central.

Tabla 9

Resultados de la variable de respuesta del arsénico total

N°	Variables naturales			Variable de respuesta	
	FeCl ₃ (ppm)	NaClO (ppm)	ts (min)	As (mg/L)	As (%)
1	20	0,050	30	0,145	60,8
2	70	0,050	30	0,030	91,9
3	20	0,100	30	0,100	73,0
4	70	0,100	30	0,050	86,5
5	20	0,050	60	0,150	59,5
6	70	0,050	60	0,040	89,2
7	20	0,100	60	0,125	66,2
8	70	0,100	60	0,030	91,9
9	2,96	0,075	45	0,250	32,4
10	87,04	0,075	45	0,005	98,6
11	45	0,033	45	0,030	91,9
12	45	0,117	45	0,015	95,9
13	45	0,075	19,77	0,025	93,2
14	45	0,075	70,23	0,020	94,6
15	45	0,075	45	0,015	95,9
16	45	0,075	45	0,015	95,9
17	45	0,075	45	0,020	94,6
18	45	0,075	45	0,020	94,6

Fuente: Elaboración propia.

(ts) indica el tiempo de sedimentación de los coágulos.

4.1.2. Resultados de la matriz de diseño compuesto central para la respuesta de hierro total y el pH.

Tabla 10

Resultados de la variable de respuesta hierro residual

N°	Variables naturales			Variable de respuesta	
	FeCl ₃ (ppm)	NaClO (ppm)	ts (min)	Fe (mg/L)	pH
1	20	0,05	30	0,10	7,6
2	70	0,05	30	0,15	6,9
3	20	0,1	30	0,07	7,58
4	70	0,1	30	0,15	6,68
5	20	0,05	60	0,07	7,5
6	70	0,05	60	0,10	6,74
7	20	0,1	60	0,05	7,54
8	70	0,1	60	0,10	6,69
9	2,955	0,075	45	0,05	8,3
10	87,04	0,075	45	0,25	6,41
11	45	0,033	45	0,20	7,01
12	45	0,117	45	0,15	6,52
13	45	0,075	19,77	0,15	6,98
14	45	0,075	70,23	0,15	6,86
15	45	0,075	45	0,20	7,05
16	45	0,075	45	0,15	7,15
17	45	0,075	45	0,20	7,15
18	45	0,075	45	0,15	7,15

Fuente: Elaboración propia.

(ts) indica el tiempo de sedimentación de los coágulos.

La Tabla 10, muestra los resultados de hierro residual menores a los establecidos por los estándares nacionales máximos permisibles (Anexo 1), estos resultados se deben a que en el proceso de coagulación, las partículas coloidales formadas por el hidróxido de hierro, poseen normalmente una carga eléctrica negativa, situado sobre su superficie. Estas cargas, llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos, acompañados de una débil cantidad de iones positivos. Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa; por lo tanto, hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución. (Cárdenas, 2000).

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro del floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de cloruro férrico, el floc está formado de moléculas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales, acelera la formación del precipitado que reduce la cantidad de hierro en el agua, lográndose una fácil separación. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. Estos resultados obtenidos no será necesario ser evaluados.

Influencia del pH en la solución, es un factor determinante en el proceso de interacción fluido partícula. La química de la coagulación y floculación del cloruro férrico, está basada en las cargas eléctricas de las partículas, es por ello que el pH y la dosis del coagulante, influirán en este proceso (Maldonado, 2012). A mayores dosis de cloruro férrico el pH disminuirá.

4.1.3. Análisis estadístico de los datos experimentales del modelo empírico que se ajuste a los datos experimentales.

Es fundamental que el modelo elegido, se ajuste a la realidad con la mayor precisión posible. El modelo lineal tiene un R-cuadrado ajustado de 51,4 % que indica que el modelo, así ajustado, explica 60 % de la variabilidad en arsénico. Ajustando a un modelo cuadrático. El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 94 % de la variabilidad en concentración de arsénico [As]. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 87,14 %. A medida que su valor es mayor, el ajuste de la recta a los datos es mejor, puesto que la variación explicada es mayor; así, el desajuste provocado por la sustitución de los valores observados por los predichos, es menor. El error estándar del estimado, muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,024, siendo esta la medida de dispersión que nos indica cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en la distribución de datos. El error medio absoluto (MAE) de 0,0124, es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los

residuos para determinar si halla alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Puesto que el valor-P es mayor que 5 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5 %.

Tabla 11

Análisis de varianza para la remoción del arsénico utilizando un modelo cuadrático

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: FeCl ₃	0,0447823	1	0,0447823	78,32	0,0000
B: NaClO	0,000531872	1	0,000531872	0,93	0,3631
C: Ts	0,0000098377	1	0,0000098377	0,02	0,8989
AA	0,0245435	1	0,0245435	42,92	0,0002
AB	0,0008	1	0,0008	1,40	0,2708
AC	0,0002	1	0,0002	0,35	0,5706
BB	0,000606781	1	0,000606781	1,06	0,3331
BC	0,0000125	1	0,0000125	0,02	0,8861
CC	0,000606781	1	0,000606781	1,06	0,3331
Error total	0,00457436	8	0,000571795		
Total (corr.)	0,0755736	17			

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

R-cuadrada = 93,9471 %

R-cuadrada (ajustada por G.L.) = 87,1377 %

Error estándar del est. = 0,0239122

Error absoluto medio = 0,0123999

Estadístico Durbin-Watson = 1,80598 (P=0,2429)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,0934864

En la Tabla 11, se observa la variabilidad de la concentración de arsénico [As] en partes separadas, para cada uno de los efectos. Esto prueba la significancia estadística de cada efecto, comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, dos efectos tienen un valor-P menor que 0,05; indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95 %, dando como factores importantes en orden de significancia a la dosis de cloruro férrico, factor cuadrático de la dosis de cloruro férrico, tal como también lo muestra el diagrama de Pareto en la Figura 13.

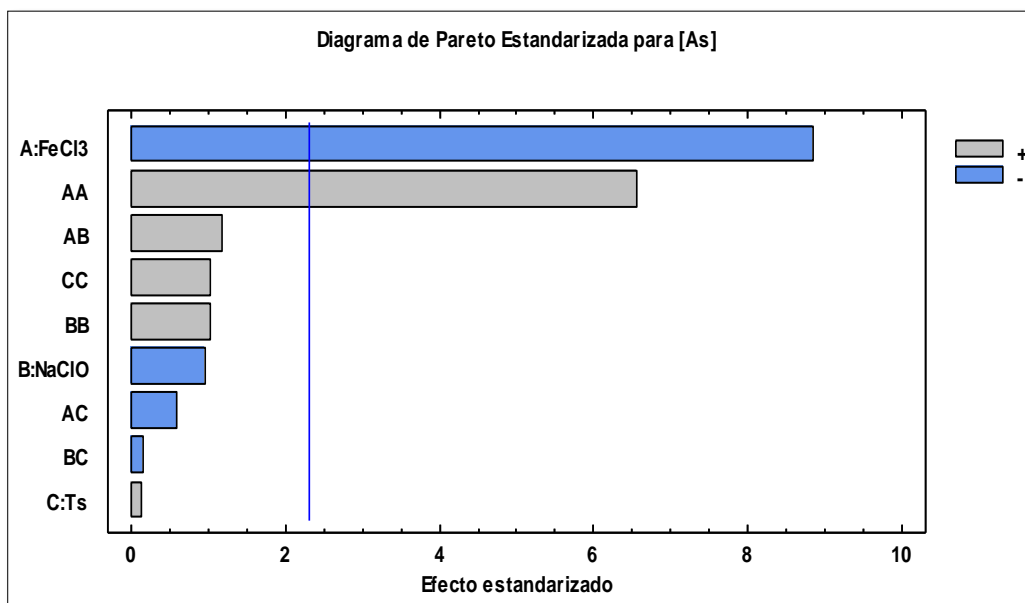


Figura 13. Diagrama de Pareto de la remoción de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

La influencia en la respuesta del sistema, ante cambios en las variables, pueden ser observadas de manera estandarizada en el diagrama de Pareto, en la Figura 13,

esto muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente de magnitud, la longitud de cada barra, es proporcional al efecto estandarizado, el cual es el efecto estimado dividido entre su error estándar. La línea vertical es utilizada para juzgar cuáles efectos son estadísticamente significativos. Cualquier barra que se extienda más allá de la línea, corresponde a efectos que son estadísticamente significativos con un 95 % de nivel de confianza. En este caso, la Figura 13 muestra los factores importantes que son en orden de significancia: la dosis de cloruro férrico, el factor cuadrático de la dosis de cloruro férrico.

La barra azul (-) indica que si el factor o interacción aumenta, contribuirá a la remoción del arsénico total y la barra gris (+) muestra que si este factor o interacción aumenta, la concentración de arsénico total también aumentará.

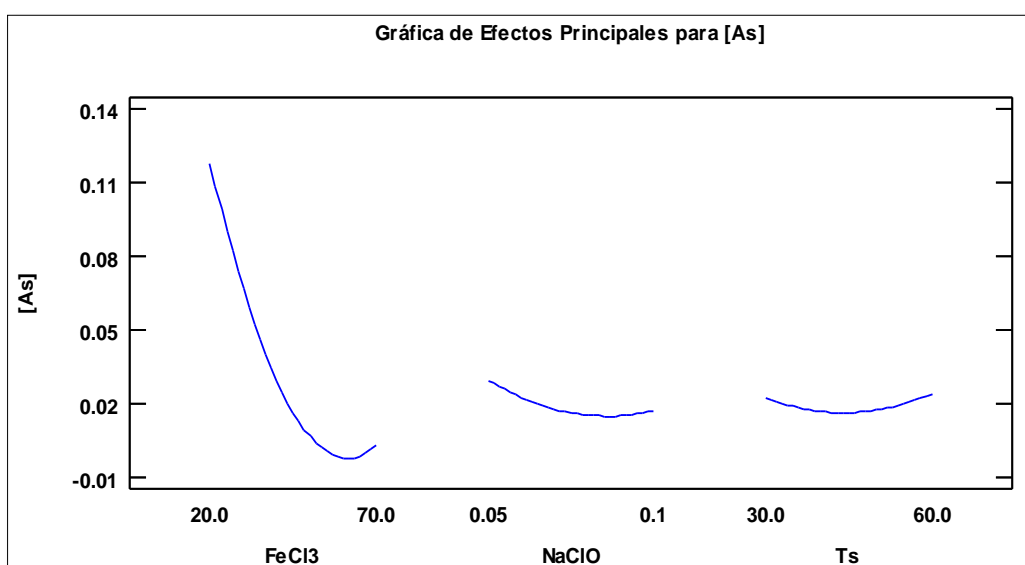


Figura 14. Gráfica de efectos principales para la remoción de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

Para verificar el efecto de cada factor individualmente, tendremos que observar la Figura 14. En esta figura se puede apreciar que las variaciones de las concentraciones de cloruro férrico, causan una variación significativa en la remoción de arsénico. La remoción máxima de arsénico, se alcanza a concentraciones cercanas a 60 ppm de cloruro férrico, la máxima remoción del arsénico se da en 0,75 ppm de hipoclorito de sodio, y un tiempo de sedimentación de 45 minutos.

En estudios realizados en la localidad de Zimapán, de acuerdo a los reportes de calidad del agua en el lugar, el arsénico se encuentra presente principalmente en la forma As^{+5} , así el cloro que se utilizará será para oxidar la escasa presencia de As^{+3} a As^{+5} . En la literatura se reportan dosis de 50 mg/L de $FeCl_3$ y 20 mg /L de cloro para obtener 98 % de eficiencia de remoción de arsénico, (Riancho, 1998) y 80 mg/L de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ para remover 98,8 % (Morales, 1995).

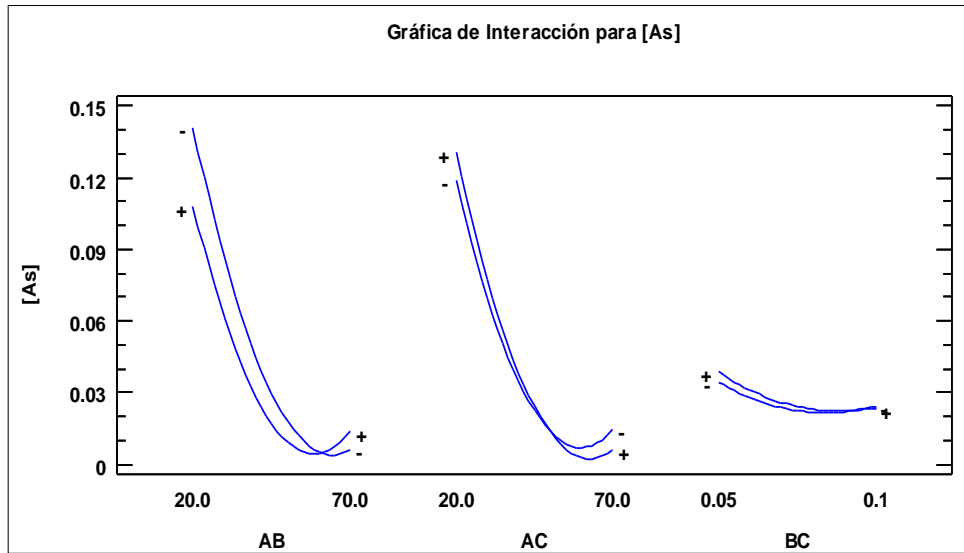


Figura 15. Gráfica de la interacción para la remoción de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

Analizando la Figura 15, se afirma que la interacción no es significativa en el área de exploración. Esto explica, de manera lógica, el comportamiento del cloruro férrico, cómo actúa de manera rápida, la interacción del hierro con el arsénico, y cómo el arsénico actúa de distintas maneras en sus especies arsenicales dependiendo del pH, que el hipoclorito de sodio, le da a la solución las condiciones adecuadas para la oxidación de As^{+3} a As^{+5} son insignificantes. Según Maldonado, 2012; el proceso de coagulación y floculación utilizando $FeCl_3$ como coagulante y Cl_2 para oxidar As^{+3} a As^{+5} remueve el arsénico en concentraciones mayores a 98,8 % prácticamente sin modificarse pH del agua; de una concentración de arsénico de 1,3 mg/L entonces la concentración al final del tratamiento fue de

alrededor de 0,016 mg/L, cercano al límite permisible establecido en la OMS que es de 0,01 mg/L.

El tiempo de sedimentación interactúa de manera favorable a la sedimentación de los coágulos en los que se ha atrapado las especies arsenicales.

Tabla 12

Coefficiente de regresión de la remoción de arsénico para el modelo cuadrático

Coeficiente	Estimado
constante	0,418735
A:[FeCl ₃]	-0,00923362
B:[NaClO]	-2,48187
C:Ts	-0,00186383
AA	0.0000704787
AB	0,016
AC	-0,0000133333
BB	11,0816
BC	-0,00333333
CC	0.0000307824

Fuente: Elaboracion: propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned}
 [As] = & 0,418735 - 0,00923362 \times FeCl_3 - 2,48187 \times NaClO - 0,00186383 \times Ts \\
 & + 0,0000704787 \times FeCl_3^2 + 0,016 \times FeCl_3 \times NaClO \\
 & - 0,0000133333 \times FeCl_3 \times Ts + 11,0816 \times NaClO^2 \\
 & - 0,00333333 \times NaClO \times Ts + 0,0000307824 \times Ts^2
 \end{aligned}$$

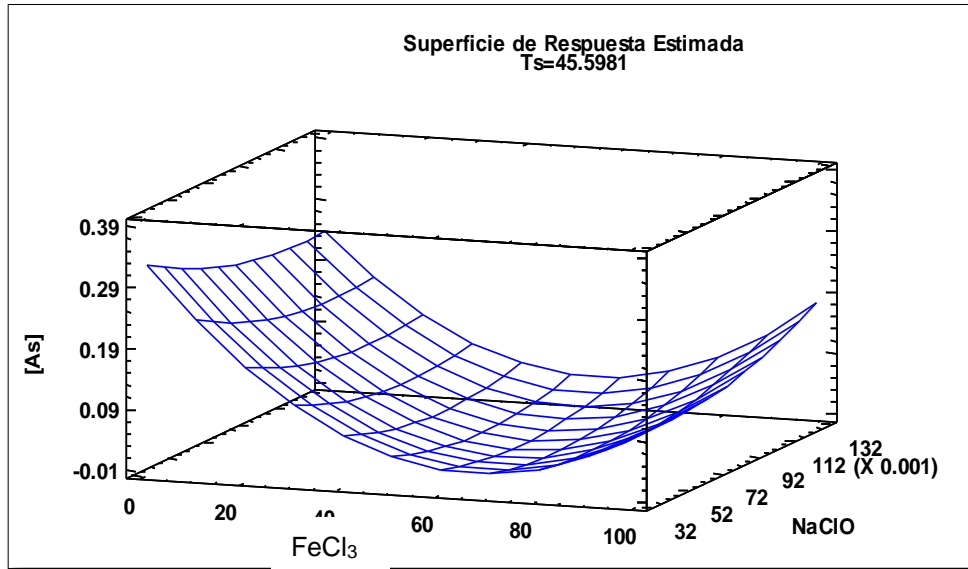


Figura 16. Diagrama de la superficie de respuesta de la remoción de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

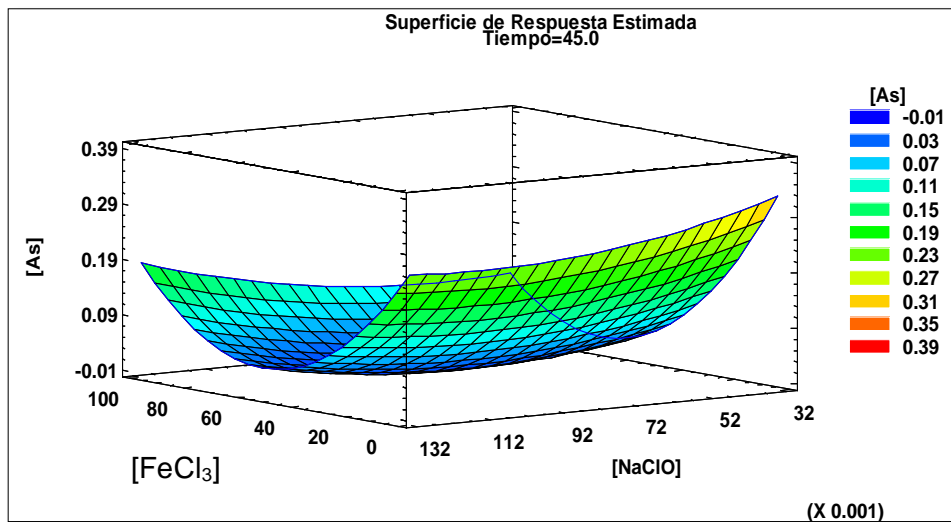


Figura 17. Diagrama de la superficie de respuesta de la remoción de arsénico vista frontal.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

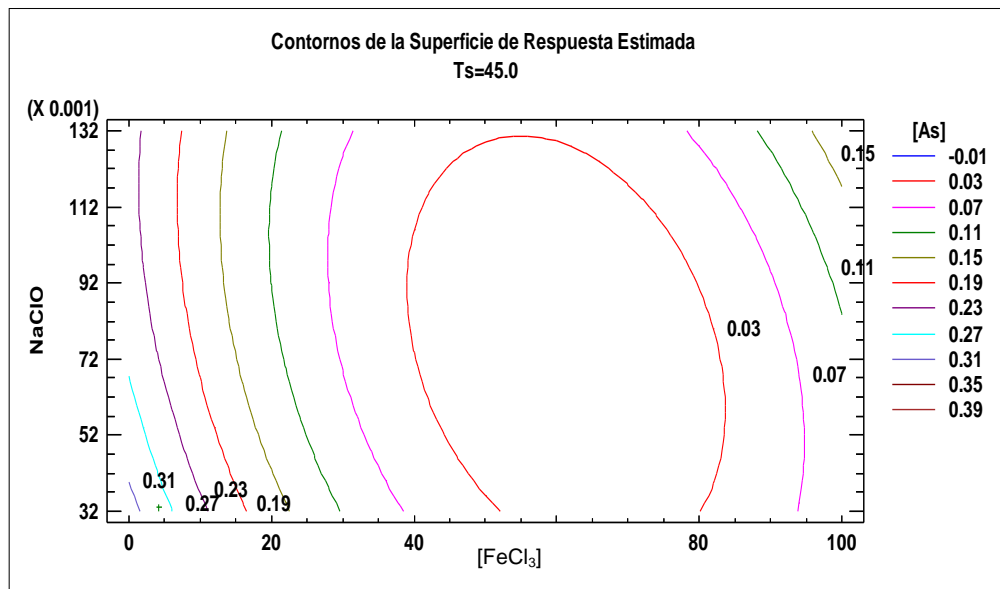


Figura 18. Contorno de la superficie de respuesta estimada de la remoción de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando software Statgraphics Centurion XVI versión demo.

4.1.4. Determinación de las condiciones de operación para maximizar la eficiencia en la remoción de arsénico.

Al utilizar el diseño compuesto central, permitió validar un modelo matemático cuadrático; al cual los datos experimentales muestran un porcentaje de ajuste aceptable de un R cuadrado de 87,14 %. El análisis de varianza (ANOVA), ha determinado que la prueba de falta de ajuste para el modelo no es significativa, lo cual significa que el modelo cuadrático propuesto puede ser utilizado para interpolar dentro de la región de exploración experimental. Se logró remover el

arsénico del agua utilizando cloruro férrico e hipoclorito de sodio, pero ello siempre dependerá de las concentraciones a emplear de cloruro férrico e hipoclorito de sodio; la variable más importante, en este proceso de remoción, es el cloruro férrico ya que si se minimiza la concentración de cloruro férrico de 20 mg/L aplicada en el proceso la remoción será mínima, más si la concentración aplicada es mayor a 70 mg/L de cloruro férrico la remoción será máxima pero se alterará la calidad del agua, reduciendo el pH a valores bajos, no haciendo posible su uso.

4.2. DISCUSIÓN

En los ensayos realizados se obtuvieron porcentajes de remoción de arsénico que variaron desde 32,4 % hasta 98,6 %. En la Tabla 9 se presentan los resultados de los diferentes ensayos realizados para los cuales se muestra la remoción obtenida (%) en función de las variables independientes. En la Tabla 10, se presentan los resultados obtenidos respecto al hierro residual y el pH.

Se puede observar que la remoción depende, en gran manera, de la dosis aplicada de cloruro férrico. A mayor dosis de cloruro férrico la remoción de arsénico es 98,6 %; sin embargo, esto tiene un efecto negativo en el pH, el pH del agua baja a 6,41 y según los límites máximos permisibles establecidos (DESA, 2012) (Anexo 1). El pH es de 6,5 a 8,5.

Para contrastar los resultados obtenidos, comparamos con los estudios realizados por Maldonado (2012); que removió el arsénico en concentraciones mayores a 98,8 % prácticamente sin modificarse el pH del agua; la concentración de arsénico inicial era de 1,3 mg/L y la concentración al final del tratamiento era de alrededor de 0,0156 mg/L aplicando una dosis de cloruro férrico hexahidratado de 80 mg/L y 1 mg/L de cloro. Este procedimiento permitió establecer los principios de los ensayos realizados, si bien es cierto la concentración inicial del arsénico total en el río Sama es de 0,314 mg/L se llevó a una reducción de 0,005 mg/L, una remoción equivalente a 98,6 %.

La aplicación del cloro permite una previa oxidación. Esto se debe a que las constantes de disociación del As^{+5} son menores que las del As^{+3} y por lo tanto, su disociación es mayor. Esto es consecuencia de la mayor eficiencia de remoción del arsenato frente a la del arsenito, lo que a su vez, justifica la oxidación del agua. Estudios previos realizados en la zona de experimentación del río Sama, indican que la concentración de As^{+3} es mínima en comparación de la concentración existente de As^{+5} (Franco et al., 2002). Lo que justifica que la intervención de la variable de hipoclorito de sodio es poco significativa.

Los procesos de coagulación reaccionan formando hidróxidos metálicos insolubles, que se asocian con los contaminantes presentes en el agua. Las especies iónicas son removidas del agua por reacción con un ión de carga opuesta y con los flóculos de hidróxidos metálicos, la asociación del contaminante con la superficie

del precipitado y/o oclusión, forma la adsorción, el contaminante en el interior de los flóculos en crecimiento, forma los precipitados que sedimentarán (Hering et al. 2000), para ello se vio conveniente un tiempo de sedimentación de 30 minutos como mínimo y máximo de 60 minutos, la significancia del tiempo de sedimentación, no fue importante dado que el proceso de sedimentación se dio rápidamente.

Se removió el arsénico del agua utilizando cloruro férrico e hipoclorito de sodio, pero ello siempre dependerá de las concentraciones a emplear de cloruro férrico e hipoclorito de sodio. La variable más importante en este proceso de remoción, es el cloruro férrico, ya que si se minimiza la concentración de cloruro férrico de 20 mg/L aplicada en el proceso la remoción será mínima, más si la concentración aplicada es mayor a 70 mg/L de cloruro férrico, la remoción será máxima pero se alterará la calidad del agua, reduciendo el pH a valores bajos.

Hering et al. (2000) indican que los factores que influyen en el desempeño de la coagulación, son el pH de la solución, el tipo y la dosis de coagulante, la fuerza iónica del agua y el estado de oxidación de las especies de arsénico, además de los parámetros operacionales. Lo cual afirmamos con los resultados de la investigación.

CONCLUSIONES

El mayor rendimiento de la remoción de arsénico fue de 98,6 %, empleándose 87,04 mg/L de cloruro férrico y 0,075 mg/L de hipoclorito de sodio y un tiempo de sedimentación de 45 minutos, el menor rendimiento de la remoción de arsénico fue de 32,4 % empleándose 2,955 mg/L de cloruro férrico y 0,075 mg/L de hipoclorito de sodio y un tiempo de sedimentación de 45 minutos. Esto también nos lleva a la conclusión que el cloruro férrico es la variable más importante y que la concentración en que se aplica es básico en el proceso de remoción del arsénico.

El proceso de remoción de arsénico utilizando FeCl_3 e hipoclorito de sodio para oxidar As^{+3} a As^{+5} , remueve el arsénico en concentraciones mayores a 90 % modificando el pH del agua; si la concentración de arsénico es de 0,37 mg/L entonces la concentración esperada, al final del tratamiento, será de alrededor de 0,005 mg/L de arsénico, valor inferior al límite permisible establecido en las normas nacionales que es de 0,01 mg/L.

RECOMENDACIONES

Es importante hacer las pruebas previas para conocer el comportamiento del agua del río Sama, frente a las variables con que se trabajará, teniendo en cuenta firmemente las respuestas de hierro residual después del tratamiento, ya que si este es mayor a 0,03 mg/L establecidos en los estándares de calidad de agua, se estaría contaminado.

Es recomendable realizar 3 veces el análisis de las muestras, ya que el proceso de análisis es bien sensible.

Manejar adecuadamente los residuos peligrosos de arsénico y de hierro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. (2010). *Evaluación de recursos hídricos cuencas de los ríos Locumba y Sama*. Lima: Dirección de conservación y planeamiento de recursos hídricos. Área de aguas superficiales. Perú.
- ANA. (2013). *Informe de la calidad del agua en los ríos de la región Tacna*. Autoridad Nacional del Agua. Perú.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw Hill Interamericana, S.A.
- Bundschuh, J. Armienta, M., Bhattacharya, P., & Matschul, A. (2009). *Natural arsenic in groundwaters of Latin America*. Lise: Balkema Publisher. Reino Unido.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., & Litter, M. (2008). *Distribución del arsénico en las Regiones Ibérica e Iberoamericana*. Buenos Aires: CYTED. Argentina.
- Camacho, B., Curcio, H., Duhalde, D., & Otros. (2008). *Reducción de arsénico en el agua. Uso de un método doméstico*. Seminario de agua (págs. 10-13). Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Cárdenas, Y. A. (2000). *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico*. Informe: Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima. Perú
- Carro Pérez, M. E., & Franco M., F. (2014). *Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación*. Revista internacional de contaminación ambiental. México.

- Castro de Esparza, M. (2006). *Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública*. Natural arsenic in groundwaters of Latin America. Lima. Perú.
- Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano*. Lima. Perú.
- DIRESA. (2015). *Resultados de calidad de agua para consumo humano del sistema de agua de la ciudad de Tacna*. Perú.
- Ferrer, A. (2003). *Intoxicación por metales*. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, vol.26, suppl.1, págs.141-153. ISSN 1137- 6627. Unidad de Toxicología Clínica, Hospital Clínico Universitario San Juan Bosco. España.
- Franco Vildoso, A. E., Ponce, S., & Rodríguez, J. (2002). *Actividad hidrogeológica del sur del Perú, una evaluación situacional de las cuencas de Sama y Locumba*. TECNIA UNI, págs. 44-54. Perú.
- Gil Recalde, M. (2010). *Determinación de los parámetros de influencia en el proceso del agua de la Quebrada El Guamal para su potencial uso industrial por la empresa Americana de Curtidos LTDA Y CÍA C.S.A.* Pereira. Colombia.
- Hering, J., Chen, P., Wilkie, J., Elimelech, M., & Liang, S. (2000). *Arsenic Removal by Ferric Chloride*. JAWWA, Vol. 88, N°. 4, págs. 155-167. California.
- INTI. (2009). *Modelo de intervención para el abatimiento de arsénico en aguas de consumo*. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Química.
- Litter, M. I. & Jiménez G. A. (2004). *Avances en tecnologías económicas solares para desinfección, descontaminación y remoción de arsénico en aguas de*

comunidades rurales de América Latina (Método FH y RAOS) - Proyecto OEA AE-141. Argentina.

Litter, M. (2010). *La problemática del arsénico en la Argentina: el HACRE.* Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional San Martín. Argentina.

Litter, M. I., Sancha, A. M., & Ingallinella, A. M. (2010). *IBEROARSEN Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas.* Argentina: CYTED.

Litter, M., Armienta, M., & Farías, S. (2009). *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en agua y suelos.* Argentina: CYTED.

Litter, M., Morgada, M., & Bundschuh, J. (2010). *Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption.* Argentina.

Maldonado Arellano, A. (2012). *Proceso de tratamiento utilizado para eliminar arsénico en un pozo de agua ubicado en Zimapán, Hidalgo.* México: Instituto Politécnico Nacional.

Manahan, S.E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental.* México: Reberté S.A.

MINAM. (2008). *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua,* Ministerio del Ambiente. Perú.

Morales, F., (1995). *Coagulación con sales de hierro y su eficiencia en la remoción de arsénico del agua subterránea destinada al consumo humano en Zimapán. México.* Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.

- Occidental Chemical. (2008). *Manual cloruro férrico*. Santiago, Chile: Occidental Chemical Chile Limitada.
- OMS. (2008). *Arsenic in drinking-water*. Guías de la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua potable. Ginebra.
- Pérez Castrejón , S., Rivera Hue, M., Martín Domínguez , A., Gelover, S., Piña Soberanis , M., Gómez Rojas , A., y otros. (2012). *Comparación técnico-económica entre coagulación química y electrocoagulación para remover arsénico del agua*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. III, número especial TyCA-RETAC, págs. 5-21.
- Quispe Cohaila, A., Malpartida Arrieta, V., & Franco, J. (2005). *Evaluación preliminar de la calidad del agua para consumo humano de la población del distrito de Sama y alternativa de tratamiento*. Ciencia y Desarrollo, 91-94, UNJBG. Tacna. Perú.
- Riancho, F. J. (1998). *Evaluación de procesos para la eliminación de arsénico en el agua de Abastecimiento*. México: UNAM.
- Romero Rojas, J. (1999). *Potabilización del agua*. México. Alfaomega S.A.
- Salazar, L. (2012). *Diseño de plantas potabilizadoras*. Bogota, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Sharmin, N. (2001). *Arsenic removal processes on trial in Bangladesh*. En F. Ahmed, A. Ali, & Z. Adeel, Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water. Tokio: Bangladesh University of Engineering and Technology. Japón.

SUNASS. (2001). *Reglamento general de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento*. Perú.

ANEXOS

Anexo 1

Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N°031-2010-SA.
Límites Máximos permisibles de parámetros de Calidad Organoléptica.

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7. Sólidos totales disueltos	mgL ⁻¹	1 000
8. Cloruros	mg Cl ⁻ L ⁻¹	250
9. Sulfatos	mg SO ₄ ⁼ L ⁻¹	250
10. Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	500
11. Amoníaco	mg N L ⁻¹	1,5
12. Hierro	mg Fe L ⁻¹	0,3
13. Manganeso	mg Mn L ⁻¹	0,4
14. Aluminio	mg Al L ⁻¹	0,2
15. Cobre	mg Cu L ⁻¹	2,0
16. Zinc	mg Zn L ⁻¹	3,0
17. Sodio	mg Na L ⁻¹	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental, 2011.

Anexo 2

Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N°031-2010 SA.
Límites Máximos Permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos.

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L ⁻¹	0,020
2. Arsénico (nota 1)	mg As L ⁻¹	0,010
3. Bario	mg Ba L ⁻¹	0,700
4. Boro	mg B L ⁻¹	1,500
5. Cadmio	mg Cd L ⁻¹	0,003
6. Cianuro	mg CN ⁻ L ⁻¹	0,070
7. Cloro (nota 2)	mg L ⁻¹	5
8. Clorito	mg L ⁻¹	0,7
9. Clorato	mg L ⁻¹	0,7
10. Cromo total	mg Cr L ⁻¹	0,050
11. Flúor	mg F L ⁻¹	1,000
12. Mercurio	mg Hg L ⁻¹	0,001
13. Níquel	mg Ni L ⁻¹	0,020
14. Nitratos	mg NO ₃ L ⁻¹	50,00
15. Nitritos	mg NO ₂ L ⁻¹	3,00 Exposición corta 0,20 Exposición larga
16. Plomo	mg Pb L ⁻¹	0,010
17. Selenio	mg Se L ⁻¹	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L ⁻¹	0,07
19. Uranio	mg U L ⁻¹	0,015
Parámetros Orgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Trihalometanos totales (nota 3)		1,00
2. Hidrocarburo disuelto o emulsionado; aceite mineral	mgL ⁻¹	0,01
3. Aceites y grasas	mgL ⁻¹	0,5
4. Alacloro	mgL ⁻¹	0,020
5. Aldicarb	mgL ⁻¹	0,010
6. Aldrín y dieldrín	mgL ⁻¹	0,00003
7. Benceno	mgL ⁻¹	0,010
8. Clordano (total de isómeros)	mgL ⁻¹	0,0002
9. DDT (total de isómeros)	mgL ⁻¹	0,001
10. Endrín	mgL ⁻¹	0,0006
11. Gamma HCH (lindano)	mgL ⁻¹	0,002
12. Hexaclorobenceno	mgL ⁻¹	0,001
13. Heptacloro y heptacloroepóxido	mgL ⁻¹	0,00003
14. Metoxicloro	mgL ⁻¹	0,020
15. Pentaclorofenol	mgL ⁻¹	0,009
16. 2,4-D	mgL ⁻¹	0,030
17. Acrilamida	mgL ⁻¹	0,0005
18. Epiclorhidrina	mgL ⁻¹	0,0004
19. Cloruro de vinilo	mgL ⁻¹	0,0003
20. Benzopireno	mgL ⁻¹	0,0007
21. 1,2-dicloroetano	mgL ⁻¹	0,03
22. Tetracloroetano	mgL ⁻¹	0,04

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental, 2011.

Anexo 3

Resultados de los análisis en el río Sama, realizado por la Autoridad Nacional del Agua.

PUNTOS DE MONITOREO					
PARÁMETROS	Código de cuenca: 13158	2011	2012	2013	2014
		Rsama3	Rsama3	Rsama3	Rsama3
pH	Unidad de pH	8,39	9,50	8,39	8,39
Temperatura	° Celsius	17,5	21	17,5	17,5
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	8,16	7,54	8,16	8,16
Conductividad	µs/cm	2122	792	2122	2122
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	330	<1,8	330	330
Coliformes Totales	NMP/100mL	13000	NA	13000	13000
Nitratos	mg N/L	<0,06	1,33	<0,06	0,58
Sulfuros	mg/L	<0,002	<0,06	<0,002	<0,002
Fosfatos	mg P/L	0,602	0,602	0,602	0,200
Fósforo total	mg P/L	0,0781	0,0781	0,0781	0,0484
Cianuro WAD	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Aluminio total	mg/L	0,2303	0,2303	0,2303	0,2303
Arsénico total	mg/L	0,3853	0,1866	0,3853	0,3853
Boro total	mg/L	90,343	90,343	90,343	90,343
Cobalto total	mg/L	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011
Cobre total	mg/L	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
Cromo total	mg/L	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Hierro total	mg/L	0,8802	43,3474	0,8802	0,8802
Litio	mg/L	13,871	13,871	13,871	13,871
Manganeso total	mg/L	0,1347	0,1347	0,1347	0,1347
Níquel total	mg/L	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
Sodio	mg/L	257,49	257,49	257,49	257,49
Zinc total	mg/L	0,0454	0,0454	0,0454	0,0454

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2014.

Anexo 4

Nombres y posiciones de los puntos geográficos, de los puntos de muestreo en las cuencas de Sama y Locumba.

CUENCA DE SAMA

Nombre	Nombre del Río	Posición geográfica
A	Estique	17°31'42.00"S 70°1'54.00"W
B	Tarucachi	17°31'18.12"S 70°2'1.26"W
C	Pistala	17°29'46.80"S 70°5'43.02"W
D	Aruma	17°29'57.00"S 70°5'39.00"W
E	Tala	17°28'15.00"S 70°9'30.00"W
F	Salado	17°28'13.02"S 70°10'10.98"W
G	Sama	17°28'35.40"S 70°10'18.18"W
H	Sama	17°50'31.02"S 70°31'12.00"W
I	Sama	18°9'33.00"S 70°40'10.98"W

CUENCA DE LOCUMBA

J	Salado	17°19'53.58"S 70°13'27.00"W
K	Callazas	17°19'45.00"S 70°14'7.98"W
M	Curibaya	17°26'17.04"S 70°25'47.58"W
N	Ilabaya	17°28'9.00"S 70°32'31.80"W
O	Locumba	17°28'34.62"S 70°32'33.12"W
P	Locumba	17°41'6.72"S 70°50'33.90"W
Q	Locumba	17°54'25.68"S 70°57'28.98"W

Fuente: Ponce y Rodríguez, 2002.

Anexo 5

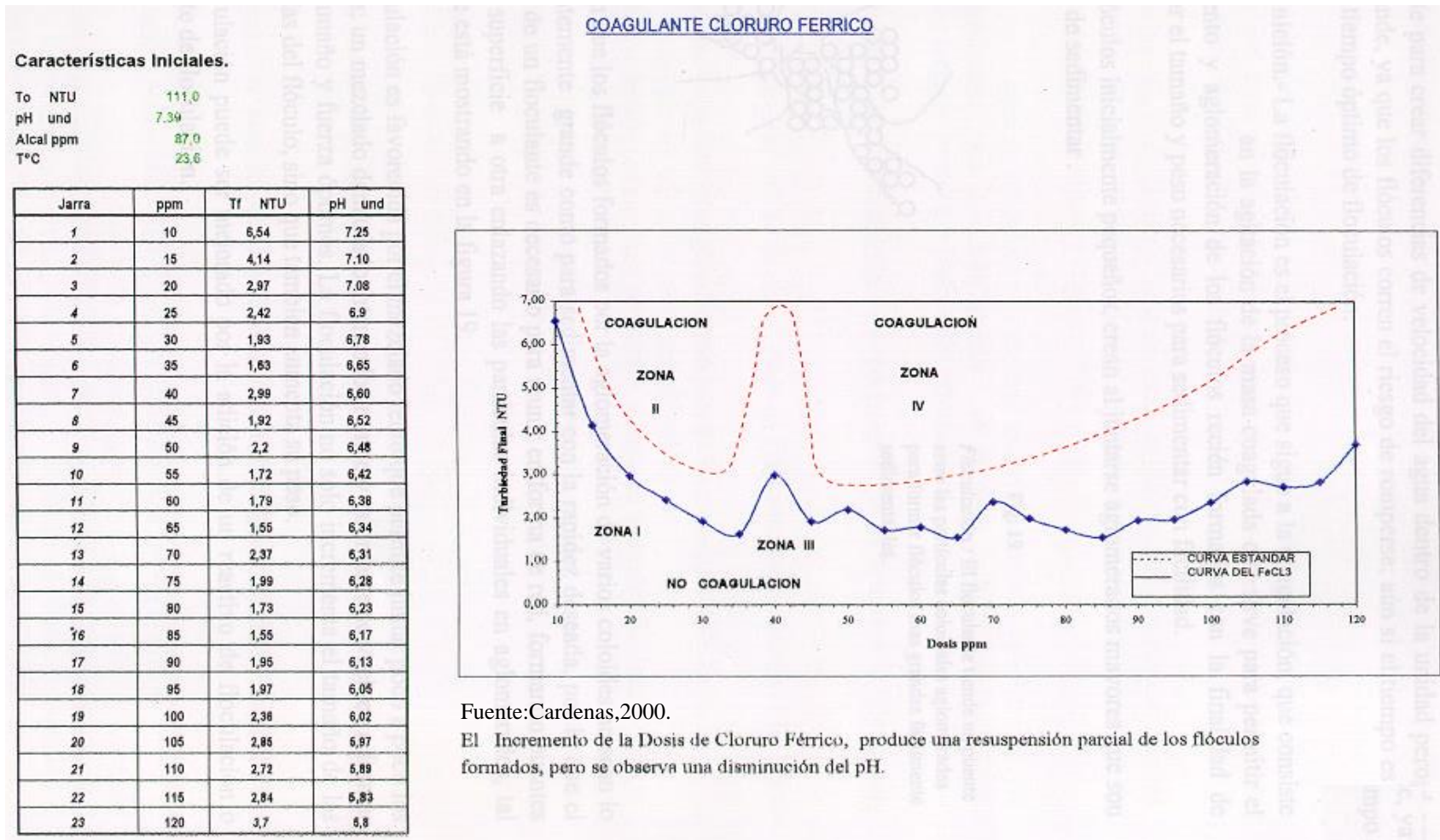
Parámetros fisicoquímicos y elementales de cada uno de los puntos de muestreo.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	M	N	O	P	Q
pH	Unidad	6	2.5	8.2	3.05	6.37	8.37	7.98	7.46		8.55	9.48	8.32	8.15	8.16	8.03	
Conduc	□ Scni i	138	116	769	155	109	256	163	263	258	120	198	203	162	2580		
Solid. Tot.	mgL ⁻¹	940	845	520	105	738	193	110	175	172	803	133	135	108	1731		
Bicarbo nato	mgL ⁻¹	16.1	0.00	64.6	0.00	40.4	86.9	34.0	99.0	52.5	22.0	85.0	94.9		119.		
carbonat o	HCO ₃ ⁻ mgL ⁻¹ CO ₃ ⁻	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18		
Na	mgL ⁻¹	31.1	17.4	43.7	42	50.3	375	137	254	363	154	240	255	158	306		
Fe, AA	mgL ⁻¹	0.92	0	0.24	4.01	2.53	0.25	1.86	1.78	0.61	0.21	0.17	0.22	0.16	0.21		
Fe, Color	mgL ⁻¹	1.18	9.33	0.51	4.63	3.16	0.49	2.78	3.26	0.92	0.11	0.12	0.66	0	0.25		
Boron	mgL ⁻¹																
As, Color	mgL ⁻¹	0.01	0.01	0.08	0.00	0.03	1.28	0.40	0.17	1.42	0.69	0.85	0.82	0.08	0.73		
As, Elect.	mgL ⁻¹	1	2	6	9	7	3	0	5	5	0	0	6	0	7		
As, Elect.	mgL ⁻¹	0.01	0.01	0.12	0.01	0.07	1.55	0.51	0.20	1.18	0.54	0.64	0.63	0.06	0.59		
As, Elect.	mgL ⁻¹	0	8	9	0	5	5	0	6	2	3	2	5	7	4		
As, Elect.	mgL ⁻¹	0.01	0.01	0.08	0.00	0.04	1.04	0.37	0.18	1.22	0.81	0.82	0.85	0.08	0.67		
AsIII, Elect.	mgL ⁻¹	2	3	7	8	2	3	5	0	6	3	2	7	2	3		
AsIII, Elect.	mgL ⁻¹	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11	0.02	0.04	0.14	0.16	0.16	0.04	0.05	0.04		
AsV, Elect.	mgL ⁻¹	3	3	7	6	7	8	9	1	9	1	8	1	2	2		
AsV, Elect.	mgL ⁻¹	0.00	0.01	0.07	0.00	0.03	0.92	0.34	0.13	1.07	0.65	0.65	0.81	0.03	0.63		
08/03/2 008	Fecha	9	0	0	2	5	5	6	9	7	2	4	6	0	1		

Fuente: Ponce, & Rodríguez, 2002.

Anexo 6

Aplicación de cloruro férrico en una planta de agua potable.



Anexo 7

Aplicación del proceso de coagulación.

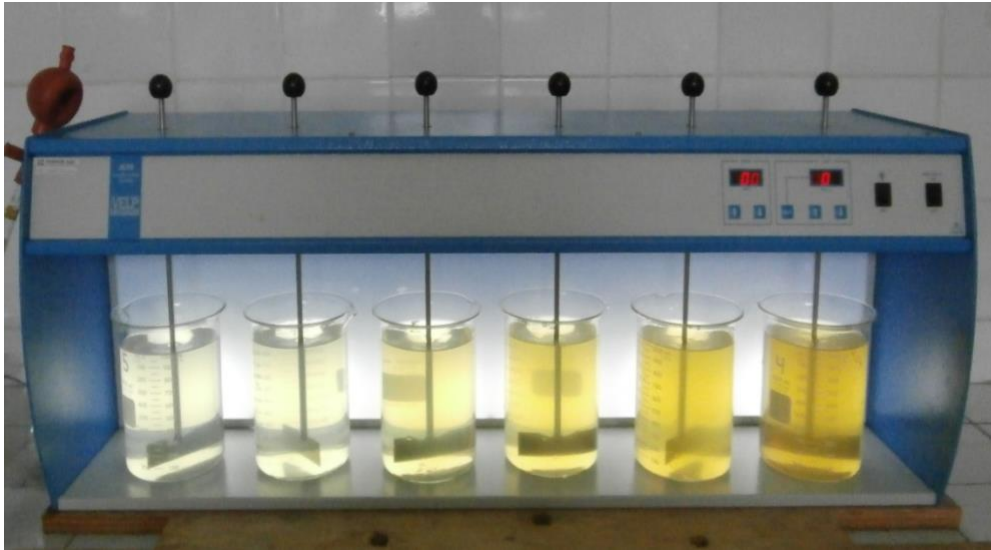


Figura 1. Muestra las corridas de agua con hipoclorito de sodio y cloruro férrico.

Fuente: Elaboración propia.

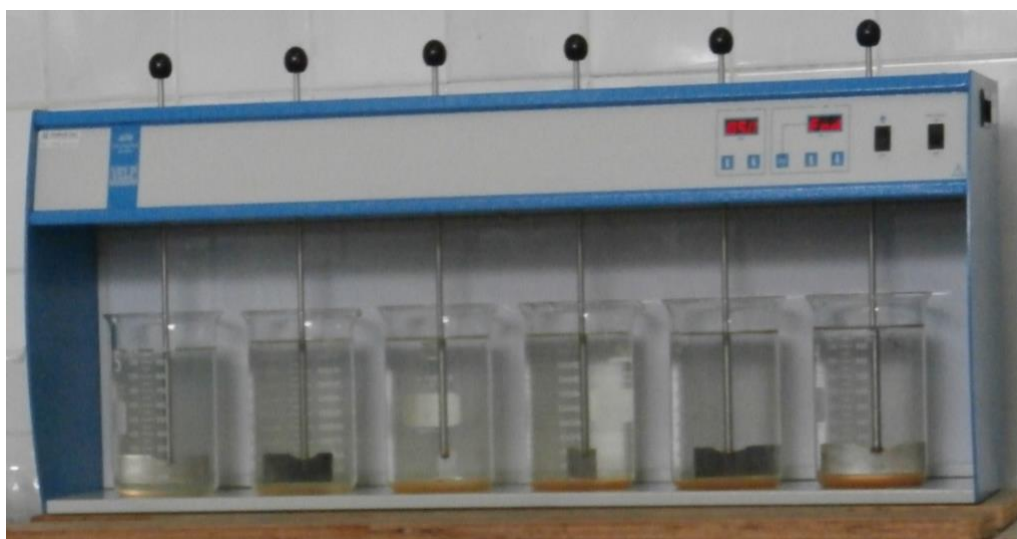


Figura 2. Muestra la sedimentación de los coágulos de cloruro férrico.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8

Sedimentación de los coágulos.



Figura 3. Muestras sedimentadas luego del proceso de coagulación.

Fuente: Elaboración propia.

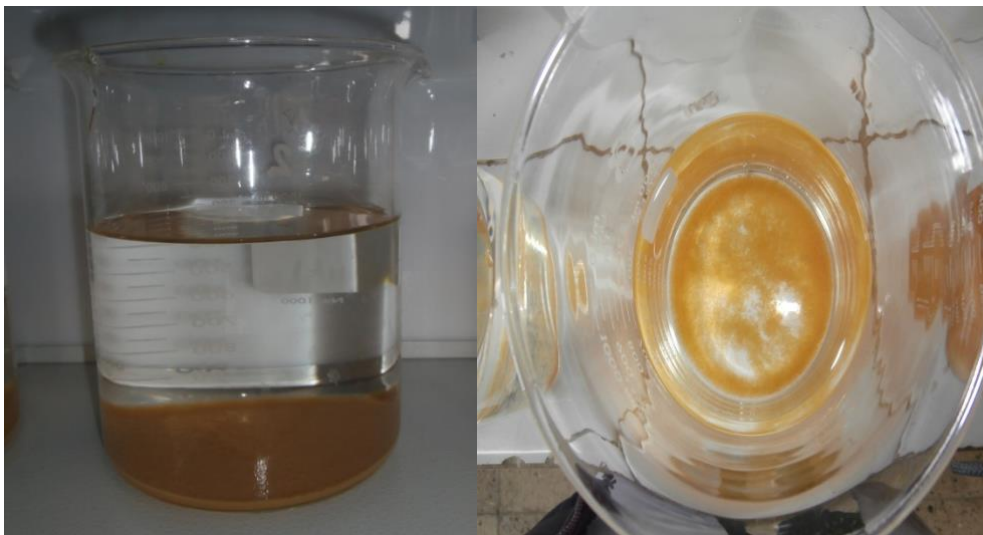


Figura 4. Muestras sedimentadas luego del proceso de coagulación.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9

Determinación del arsénico total utilizando el test de arsénico.



Figura 5. Test para la determinación del arsénico.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Proceso de reacción para la determinación de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10

Medida del arsénico en el test de arsénico.

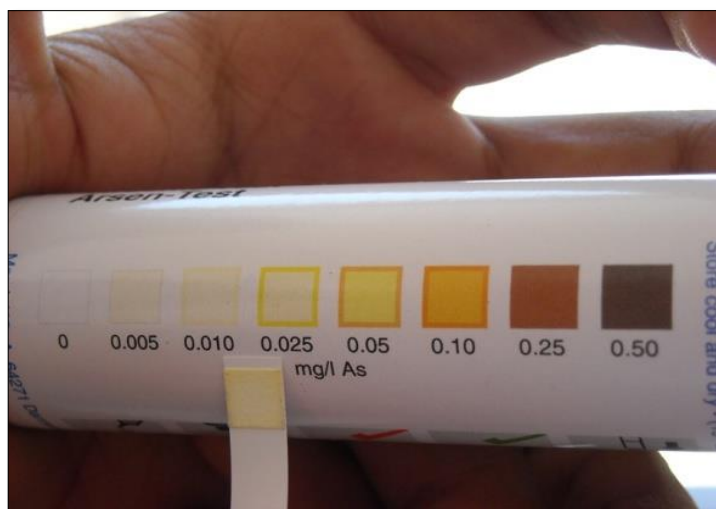


Figura 7. Comparación colorimétrica para determinar la concentración de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

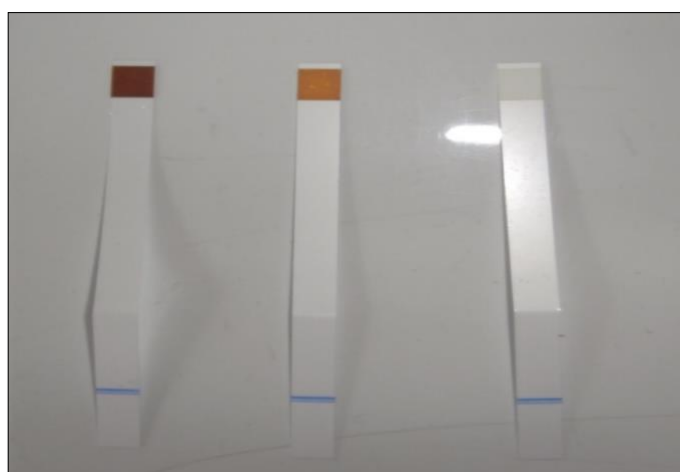


Figura 8. Determinación de la concentración de arsénico en cada prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11

Procedimiento para el análisis de arsénico.

1.17927.0001

MQuant™ Test Arsénico

As

1. Método

Por adición de cinc en polvo, de un ácido sólido y - para **eliminación de iones sulfuro interferentes** - de un oxidante a los compuestos de arsénico(III) y arsénico(V) se libera hidruro de arsénico, que con bromuro de mercurio(II) contenido en la zona de reacción de la tira de ensayo forma halogenuros pardos amarillos mixtos de arsénico y mercurio. La concentración de arsénico(III) y arsénico(V) se determina **semicuantitativamente** por comparación visual de la zona de reacción de la tira de ensayo con las zonas de una escala colorimétrica.

2. Intervalo de medida y número de determinaciones

Intervalo de medida / graduación de la escala colorimétrica	Número de determinaciones
0,005 - 0,010 - 0,025 - 0,05 - 0,10 - 0,25 - 0,50 mg/l de As	100

3. Campo de aplicaciones

El test determina arsénico trivalente y pentavalente.

Material de las muestras:

Aguas potables y minerales
Aguas de manantial y de pozo
Aguas subterráneas y superficiales

4. Influencia de sustancias extrañas

Ésta se comprobó en soluciones con 0,1 y con 0 mg/l de As. Hasta las concentraciones de sustancias extrañas indicadas en la tabla la determinación todavía no es interferida.

Concentración de sustancias extrañas en mg/l o en %			
Ag ⁺	0,5	Mg ²⁺	1000
Al ³⁺	100	MnO ₄ ⁻	500
Ca ²⁺	1000	Na ⁺	1000
Cl ⁻	1000	Ni ²⁺	1
CN ⁻	500	NO ₂ ⁻	100
CO ₃ ²⁻	100	NO ₃ ⁻	100
CrO ₄ ²⁻	250	PO ₄ ³⁻	100
Cu ²⁺	0,5	S ²⁻	2
F ⁻	100	Sb ³⁺	1
Fe ²⁺	500	SeO ₃ ²⁻	1
Fe ³⁺	500	SO ₃ ²⁻	2
K ⁺	1000	SO ₄ ²⁻	1000
		EDTA	1000
		Cloro libre	250
		(hipoclorito)	10 ¹⁾
		Poli(etil)englicol	1
		Tensioactivos	1
		aniónicos ²⁾	0,1
		Tensioactivos	0,1
		catiónicos ³⁾	0,05
		Tensioactivos	20 %
		no iónicos ⁴⁾	
		NaCl	

¹⁾ En caso de concentraciones más elevadas eliminar el poli(etil)englicol según la aplicación (ver sitio web).

²⁾ ensayado con Marlon® A 375

³⁾ ensayado con bromuro de N-cetil-N,N-trimetilamonio

⁴⁾ ensayado con Triton® X-100

5. Reactivos y auxiliares

¡Tener en cuenta las advertencias de peligro que se encuentran en los diferentes componentes del envase!

Las tiras de ensayo y los reactivos del test son utilizables hasta la fecha indicada en el envase si se conservan cerrados entre +15 y +25 °C.

Contenido del envase:

Caja con 100 tiras de ensayo
1 frasco de reactivo As-1
1 frasco de reactivo As-2
1 frasco de reactivo As-3
1 cuchara dosificadora roja
1 cuchara dosificadora verde
2 frascos de reacción con tapa roscada

Otros reactivos:

Arsénico - patrón Titrisol® para 1000 mg/l de As, art. 109939

6. Preparación

Las muestras con más de 0,50 mg/l de As deben diluirse con agua destilada. En su lugar se puede usar también el test Arsénico (tiras de ensayo visual) art. 117917 (intervalo de medida 0,02 - 3,0 mg/l de As).

7. Técnica

Muestra preparada	60 ml	Llenar el frasco de reacción hasta la señal de enrase.
Reactivo As-1	2 gotas ¹⁾	Añadir y agitar ligeramente.
Reactivo As-2	1 cuchara dosificadora roja rasa	Añadir y agitar ligeramente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.
Reactivo As-3	1 cuchara dosificadora verde rasa	Añadir y cerrar inmediatamente el frasco de reacción con la tapa roscada.

Desplegar hacia arriba el fijador de tiras negro integrado en la tapa roscada de manera que el punto blanco señale hacia el usuario. Introducir **inmediatamente** en la abertura la tira de ensayo con la zona de reacción delante hasta la raya de marcado y plegar de nuevo el fijador de tiras totalmente hacia abajo.

Dejar en reposo 20 minutos, agitando ligeramente dos o tres veces en forma circular. **¡Evitar el contacto entre la tira de ensayo y la solución!**

Sacar la tira, sumergirla brevemente en agua destilada, sacudirla para eliminar el exceso de líquido, y clasificar el color de la zona de reacción de la mejor manera posible de acuerdo con una zona de color de la etiqueta.

Leer el correspondiente valor de medición en mg/l de As.

¹⁾ ¡Mantener el frasco verticalmente durante la adición del reactivo!

Notas sobre la medición:

- Después de transcurrido el tiempo de reacción indicado, la zona de reacción puede continuar cambiando de color. Esto no debe ser tenido en cuenta en la medición.
 - Si el color de la zona de reacción corresponde a la tonalidad más oscura de la escala colorimétrica o es más intenso, debe repetirse la medición con **nuevas** muestras diluidas, hasta que se obtenga un valor inferior a 0,50 mg/l de As.
- En el resultado del análisis debe considerarse correspondientemente la dilución (ver también apartado 6):

Resultado del análisis = valor de medición x factor de dilución

8. Control del procedimiento

Comprobación de las tiras de ensayo, de los reactivos del test y de la manipulación:

Diluir el patrón de arsénico con agua destilada a 0,10 mg/l de As y analizar como se describe en el apartado 7.

Notas adicionales, ver bajo www.qa-test-kits.com.

9. Notas

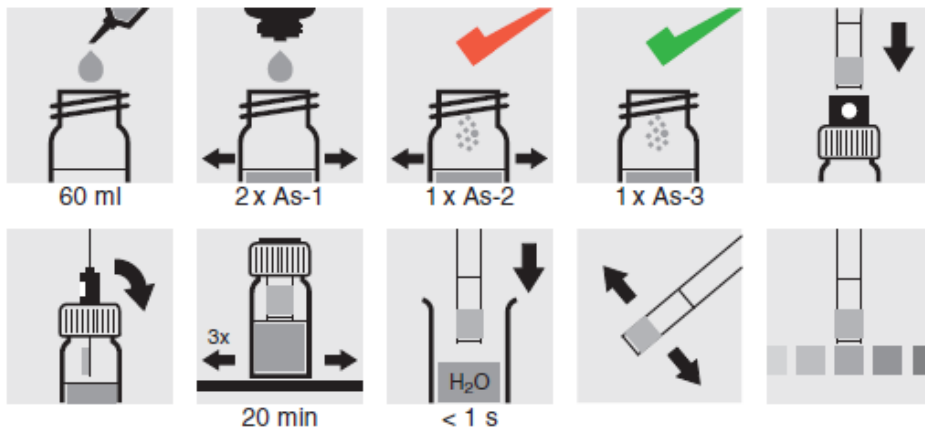
- **Cerrar de nuevo inmediatamente** los frascos tras la toma de los reactivos y la caja tras la toma de la tira de ensayo.
- Enjuagar los frascos de reacción **solamente con agua destilada.**

MQuant™ Arsenic Test Arsen-Test

Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany
EMD Millipore Corporation, Billerica, MA 01821, USA



Store cool and dry • (15 - 25 °C) • Kühl und trocken lagern





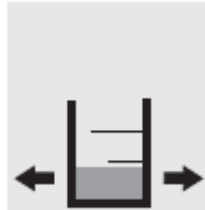

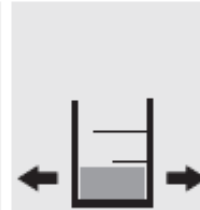
Lot/Charge



Exp./Verw. bis

Anexo 12

Procedimiento para el análisis de hierro.

0.05 – 1.0 mg/l (de) Fe
 (0.05 – 0.1 – 0.3 – 0.4 – 0.6– 0.8 – 1.0 mg/l (de) Fe)

				
5 ml of sample	Add 1 level microspoon of reagent Fe-1.	Dissolve the solid substance.	Add 4 drops of reagent Fe-2.	Mix.
5 ml Probe	1 gestrichenen Mikrolöffel Reagenz Fe-1 zugeben.	Feststoff lösen.	4 Tropfen Reagenz Fe-2 zugeben.	Mischen.
5 ml d'échantillon	Ajouter 1 microcuiller arasée de réactif Fe-1.	Dissoudre la substance solide.	Ajouter 4 gouttes de réactif Fe-2.	Mélanger.
5 ml de muestra	Añadir 1 microcuchara rasa de reactivo Fe-1.	Dissolver la sustancia sólida.	Añadir 4 gotas de reactivo Fe-2.	Mezclar.

	
Reaction time: 3 minutes	Compare the color with the color scale, read off the result.
Reaktionszeit: 3 Minuten	Farbe der Farbskala zuordnen, Messwert ablesen.
Temps de réaction: 3 minutes	Comparer la couleur avec l'échelle colorimétrique, lire le résultat.
Tiempo de reacción: 3 minutos	Comparar el color con la escala colorimétrica, leer el valor de medición.