

REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA DEL RÍO LOCUMBA (DISTRITO DE ITE, REGIÓN DE TACNA-PERÚ), UTILIZANDO CLORURO FÉRRICO

Angélica Machaca Rodríguez ^a, Jean Carlos Pizarro Rabanal^a, Lorena Cornejo Ponce^b,
Dante Morales Cabrera^c, Edgardo Avendaño Cáceres^{*}

RESUMEN

El *objetivo* de la presente investigación fue proponer una alternativa de solución al problema de falta de horas de abastecimiento de agua subterránea para consumo humano del distrito de Ite, realizando el tratamiento con cloruro férrico para la remoción de arsénico ($0,4930 \pm 0,0642$ mgL⁻¹) de origen natural del río Locumba; que será utilizado como fuente adicional de agua. *Metodología:* se utilizó un equipo probador de jarras para el estudio de las condiciones de operación. Se aplicó un análisis factorial fraccionado y luego un análisis de superficie respuesta para estudiar en las variables de operación: su influencia, linealidad y las condiciones adecuadas de operación. Adicionalmente se realizó la especiación y el análisis del arsénico (As⁺³) utilizando la extracción por fase sólida (EFS) y voltamperometría. *Resultados:* Se logró reducir el número de variables de operación de cinco a tres variables (dosis de FeCl₃, velocidad de floculación, tiempo de sedimentación); a estas últimas se les aplicó el diseño de superficie respuesta determinando que las muestras que fueron filtradas luego del proceso de tratamiento; en todas las condiciones de operación mostraron concentración de arsénico menores a 0,01 mgL⁻¹. En las muestras no filtradas se logró concentraciones por debajo de 0,01 mgL⁻¹ en dos condiciones de operación. Los resultados de las muestras de arsénico sin filtrar se ajustaron a un modelo cuadrático, obteniendo un valor de r²-ajustado de 94%. El modelo cuadrático encontrado mostró ser punto silla. Las mejores condiciones de operación para la mayor remoción de arsénico (0,00924 mgL⁻¹) en las muestras sin filtrar fueron: 40 mgL⁻¹ de dosis de FeCl₃, 60 rpm como velocidad de floculación, 80 minutos de tiempo de sedimentación, pH=7 y un tiempo de floculación de 25 minutos. Conclusiones: Es posible remover el arsénico del agua del río Locumba a niveles aptos para el consumo humano utilizando como coagulante el cloruro férrico en las condiciones de operación encontradas en el presente estudio. Debe tenerse presente que el pH es una de las variables más importantes en este tipo de procesos de tratamiento y el uso de ácido sulfúrico para regularlo una de las mejores alternativas por el costo y la cercanía de Ite a la compañía minera Southern Copper Corporation quien produce este insumo químico.

Palabras clave: Arsénico, cloruro férrico, coagulación, floculación.

^a Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores S/N, Tacna 23001, Perú.

*eavendanoc@unjbg.edu.pe

^b Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Tarapacá, Arica, Chile.

^c Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores S/N, Tacna, Perú.

ARSENIC REMOVAL FROM THE WATER OF THE LOCUMBA RIVER (ITE DISTRICT, TACNA REGION-PERU), USING FERRIC CHLORIDE

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to propose an alternative solution to the problem of lack of hours of underground water supply for human consumption in the district of Ite, carrying out the treatment with ferric chloride for the removal of arsenic ($0,4930 \pm 0,0642 \text{ mgL}^{-1}$) of natural origin from the Locumba river; which will be used as an additional source of water. **Methodology:** a jug testing equipment was used to study the operating conditions. A fractional factorial analysis was applied and then a response surface analysis to study the operating variables: their influence, linearity and the appropriate operating conditions. Additionally, speciation and analysis of arsenic (As^{+3}) were performed using solid phase extraction (SFS) and voltammetry. **Results:** It was possible to reduce the number of operation variables from five to three variables (FeCl_3 dose, flocculation speed, sedimentation time); The response surface design was applied to the latter, determining that the samples that were filtered after the treatment process; in all operating conditions they showed arsenic concentrations lower than $0,01 \text{ mgL}^{-1}$. In the unfiltered samples, concentrations below $0,01 \text{ mgL}^{-1}$ were achieved in two operating conditions. The results of the unfiltered arsenic samples were fitted to a quadratic model, obtaining an r^2 -adjusted value of 94%. The found quadratic model was shown to be a saddle point. The best operating conditions for the greatest removal of arsenic ($0,00924 \text{ mgL}^{-1}$) in the unfiltered samples were: 40 mgL^{-1} of FeCl_3 dose, 60 rpm as flocculation speed, 80 minutes of sedimentation time, $\text{pH} = 7$ and a flocculation time of 25 minutes. **Conclusions:** It is possible to remove arsenic from Locumba river water to levels suitable for human consumption using ferric chloride as coagulant under the operating conditions found in this study. It should be kept in mind that pH is one of the most important variables in this type of treatment process and the use of sulfuric acid to regulate it is one of the best alternatives due to the cost and proximity of Ite to the Southern Copper Corporation mining company, which produces this chemical input.

Key words: Arsenic, ferric chloride, coagulation, flocculation.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial diversas investigaciones¹ reportan que el contenido de arsénico en las diferentes fuentes de agua de los continentes del mundo, son un peligro para la salud pública, debido a los daños a la salud que se pueden generar por un consumo continuo y de largo tiempo; como son afecciones cardiovasculares, la hiperqueratosis, cáncer de piel y pulmón entre otros.

El arsénico se presenta en distintas formas inorgánicas y orgánicas y en diferentes estados de oxidación ($-3, 0, +3$ y $+5$)²; en particular, algunas formas, trivalente (As^{+3}) y pentavalente

(As⁺⁵) son peligrosas para la salud humana. Las formas más comunes en que se encuentra el arsénico en aguas naturales es en su forma inorgánica (As⁺³ y As⁺⁵)³. Las especies disueltas de arsénico dependen del pH y potencial de óxido-reducción (Eh)^{4,5}. En las aguas subterráneas anóxicas y aguas en condiciones reductoras, el As(III) comúnmente se hidrata existiendo principalmente como la especie H₃AsO₃ en un pH < 9,2 y bajo condiciones más alcalinas existirán sus aniones disociados (H₂AsO₃⁻, HAsO₃²⁻ y AsO₃³⁻). La especie H₂AsO₃ del As⁺³ sería la forma dominante que se encontraría presente en un agua natural a un pH ente 0 - 9,2. La forma dominante del arsénico en las aguas naturales superficiales suele ser el As⁺⁵ disuelto que incluye al H₃AsO₄ en condiciones muy ácidas (pH < 2) y sus aniones asociados (H₂AsO₄⁻, HAsO₄²⁻ y/o AsO₄³⁻) en aguas menos ácidas, neutras y alcalinas⁶. Los valores de Eh para un agua en condiciones moderadamente oxidativa se encuentra en rangos de +141 < Eh < +202 y valores de pH entre 7,4 - 8,3 las especies se presentarían como HAsO₄²⁻¹.

Se han estudiado y propuesto una diversidad de tecnologías convencionales y no convencionales para la remoción de arsénico^{2,7,8,9}; en los últimos años investigaciones⁹ categorizan en 04 grupos los procesos de remoción de arsénico: intercambio iónico, separación por membranas, procesos de precipitación y procesos de adsorción, los cuales generalmente incluyen la pre-oxidación para hacer posible la remoción del As⁺³. La investigación⁷ menciona que una combinación de los procesos de coagulación y filtración son los más económicos y efectivos. Adicionalmente indica que los mecanismos durante el proceso de coagulación para la remoción del arsénico son: (i) Adsorción que implica la formación de complejos superficiales entre el arsénico soluble y los sitios activos en los precipitados de hidróxido metálico, (ii) Coprecipitación con incorporación de las especies de arsénico soluble en una fase creciente de hidróxido por inclusión, oclusión o adsorción. Otros estudios¹⁰ mencionan que los tratamientos de coprecipitación y adsorción con sales de Fe⁺³ hidróxidos de hierro (Fe(OH)₃), son los mayormente utilizados debido a sus bajos costos y alta eficiencia en la remoción del arsénico. También se menciona que la precipitación de arsénico es posible a través de la coagulación química con sales de Fe⁺³, como son las de cloruro férrico (FeCl₃) y sulfato férrico (Fe₂(SO₄)₃)⁵. En los procesos de coagulación y floculación para una máxima eficiencia de eliminación de As, el coagulante se mezcla homogéneamente en todo el medio acuoso. El coagulante metálico como por ejemplo el FeCl₃ se hidroliza en agua y forma el Fe(OH)₃ con carga positiva. El As⁺³ se trata previamente con algún oxidante para convertirlo en As⁺⁵, es un paso necesario en la eliminación del As del agua contaminada. As⁺⁵ es un anión y es atraído por los flóculos de Fe(OH)₃ cargados positivamente. En todo el proceso de coagulación y floculación, el pH, la especiación, la dosis de coagulante y la velocidad de agitación son los principales parámetros¹¹.

Autores¹² muestran en sus investigaciones que la presencia de los iones fosfato, silicato y bicarbonato reducen la eficiencia de remoción del As(III) y la presencia de bicarbonato y silicato magnifica el efecto del fosfato sobre la absorción del As(V).

La región de Tacna ubicada en la zona extremo sur del Perú, frontera con Chile, es una de las regiones de Latinoamérica con la problemática de concentraciones de arsénico de origen natural que sobrepasan los valores máximos recomendados por la OMS (0,01 mgL⁻¹) en varias de sus fuentes de agua. Entre las fuentes de agua antes mencionadas tenemos las del Valle de

Locumba donde se reportan concentraciones entre 0,2-0,4 mgL⁻¹ de arsénico¹³ (zona rural de la Región de Tacna-Perú) que se encuentra ubicado en la parte media de la cuenca hidrográfica Locumba, que abarca los ríos Curibaya, Ilabaya y Cinto¹⁴. La unión de estos tres ríos antes mencionados forma el río Locumba. La Administración Local del Agua Caplina Locumba (ALA-Caplina Locumba) que pertenece a la Autoridad Nacional del Agua (ANA-Perú); en el historial de resultados de monitores participativos de la calidad del agua superficial en la cuenca Locumba, durante las épocas de estiaje (setiembre-2015, octubre-2016, octubre-2017, noviembre-2019, octubre-2020 y mayo-2021), la estación de monitoreo 1316RLocu5 se ubicada en el río Locumba (coordenadas UTM Zona 19, 300082 Este y 8036874 Norte), muestra valores promedio de: arsénico 0,4930±0,0642 mgL⁻¹, sulfatos 437,48±45,77 mgL⁻¹, silicato 47,97±3,24 mgL⁻¹, cloruros 397,20±52,65 mgL⁻¹, hierro 0,3454±0,2317 mgL⁻¹, pH 8,45±0,3547 y conductividad 2271,57±281,40 μScm⁻¹. Metros más abajo de esta estación de muestreo se encuentra la bocatoma del canal de Ite, que lleva agua del río Locumba hasta el centro poblado de Ite (Provincia de Jorge Basadre, región de Tacna). El centro poblado de Ite tiene una población de 772¹⁵ habitantes, cuenta con una planta antigua de tratamiento de agua que se utiliza cloruro férrico (FeCl₃) para la remoción de arsénico; la concepción de diseño de la planta no es la adecuada para alcanzar concentraciones ≤ 0,01 mgL⁻¹ de arsénico. La planta trata una parte del agua derivada del río Locumba que llega al centro poblado de Ite; pero este tratamiento no es suficiente para hacerla apta para el consumo humano. El agua para consumo humano que utilizan los pobladores proviene de un pozo de agua subterránea, teniendo el inconveniente de un número reducido de horas de abastecimiento durante el día.

La presente investigación propone utilizar un método convencional de tratamiento (coagulación-floculación optimizado) para el agua proveniente del río Locumba, utilizando como coagulante metálico el FeCl₃. Se determinaron las variables que afectan al proceso de remoción de arsénico y los valores que permitan alcanzar la remoción de arsénico a niveles menores o iguales a los límites máximos permisibles que exige la norma nacional peruana y lo recomendado por la OMS (0,01 mgL⁻¹). Esta propuesta busca ser una alternativa de solución al problema de horas limitadas de abastecimiento de agua apta para consumo humano que tienen los pobladores del distrito de Ite.

II PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizado en el distrito de Ite. El distrito de Ite pertenece a la Provincia Jorge Basadre, que está ubicado al norte de la región de Tacna Perú (ver Figura 1). Limita por este con el distrito de Locumba, por el Oeste con el Océano Pacífico, por sur con el distrito de Sama las Yaras y por el norte con la provincia de Ilo (región de Moquegua). Se ubica a una altitud media de 174 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.).

2.2 Punto de toma de muestras de agua

El punto de toma de muestra de agua fue en el río Locumba que pasa por la localidad de Ite. Sus coordenadas de ubicación (Zona 19 Este 291898,3 Norte 8024172,4) a la entrada de la planta de tratamiento de agua de Ite.

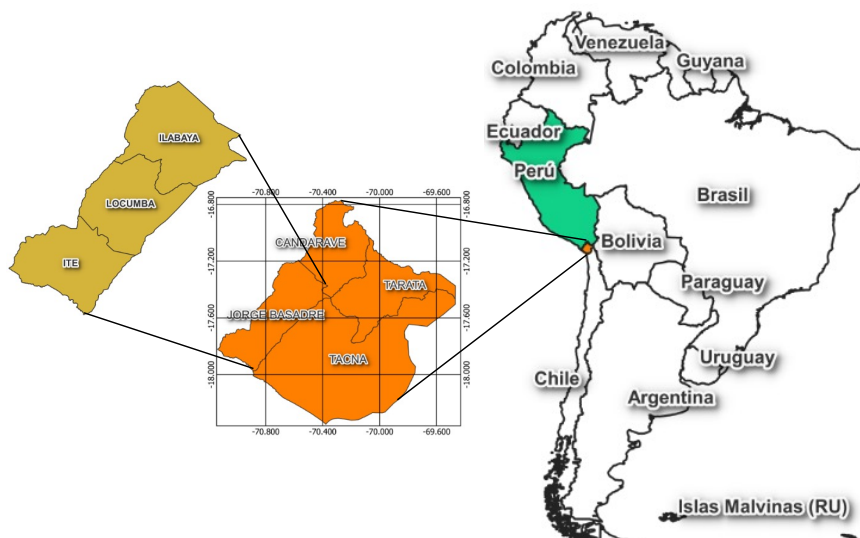


Figura 1. Mapa de localización del Perú, la región de Tacna, las cuatro provincias de la región de Tacna y los distritos de la provincia Jorge Basadre.

2.3 Muestreo y análisis de laboratorio:

Para el muestreo en el río Locumba se utilizó el protocolo Nacional de Monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales de la ANA¹⁶. Se analizaron como parámetros de campo las coordenadas de ubicación (GPS marca Garmin Montana 680), temperatura, pH, conductividad (multiparámetro marca HANNA HI98129) y potencial de oxidación reducción (HANNA HI98120). Estas muestras fueron preservadas con HNO_3 (1:1), mantenidas a una temperatura de 4 °C y enviadas para su análisis mediante ICP-MS a un laboratorio externo acreditado S.G.S. del Perú S.A.C., el límite de detección (LD) y límite de cuantificación (LC) para el arsénico fue de 0,00003 mgL^{-1} y 0,00010 mgL^{-1} respectivamente, el hierro tuvo un LD=0,0004 mgL^{-1} y LC=0,0013 mgL^{-1} .

Para la recolección de muestra de agua para las pruebas de remoción de arsénico se utilizó dos envases de polietileno de 20 litros de capacidad. Las fechas de muestreo para las pruebas de remoción de arsénico fueron realizados en el año 2019 entre los meses de agosto a octubre; realizándose varios muestreos, pero solo seleccionando los datos de dos muestreos realizados en diferentes fechas, uno para el diseño factorial fraccionado y el otro para el diseño experimental de Box-Behnken. El análisis de especiación de arsénico se realizó solo una vez en el mes de abril del año 2022.

2.4 Análisis de especiación de arsénico (As^{+3})

Para el análisis de especiación de As^{+3} se utilizó dos metodologías de análisis para la misma muestra de agua del río Locumba.

La primera metodología fue utilizando la extracción por fase sólida (EFS) a través de cartuchos descartables de especiación de arsénico¹⁷, estos cartuchos son usados para separar las especies de arsenito (As^{+3}) del arseniato (As^{+5}) en muestras de agua. Cada cartucho contiene 2,5 g de adsorbente selectivo. Para la preparación de la muestra se pasa de 30 a 50 mL de la muestra de agua previamente filtrada utilizando un filtro de jeringa de 0,45 μm , a través de un cartucho de especiación desechable (para muestras de agua con concentraciones mayores a 0,5 mgL^{-1} se debe utilizar dos cartuchos conectados en serie). El cartucho retiene al arseniato de la muestra, mientras que la especie arsenito permanece en el agua filtrada. El rango de pH recomendable para la separación de la especie arsenito es entre 4 a 9.

El procedimiento seguido en esta investigación fue tomar una muestra de agua del río Locumba e inmediatamente en el lugar de muestreo utilizando una jeringa de 50 mL conectada a un filtro de jeringa de 0,45 μm se procedió a filtrar y hacer pasar 30 ml de la muestra filtrada a través de dos cartuchos de especiación de arsénico conectados en serie (recomendado cuando la muestra contiene más de 0,5 mgL^{-1} de arsénico); esta muestra fue preservada con HNO_3 (1:1) a 4°C y enviada para su análisis mediante ICP-MS a un laboratorio externo acreditado SGS del Perú S.A.C. para el análisis de arsénico (para nuestro caso será la concentración de arsenito en la muestra de agua).

La segunda metodología para la cuantificación de As^{+3} fue utilizando una metodología sensible y selectiva por voltamperometría a través de un electrodo de microhilos de oro, esto se realizó mediante el analizador portátil de AV 946 (marca Metrohm) este equipo muestra límites de detección de 0,9 μgL^{-1} y 0,3 μgL^{-1} para arsénico total ($As^{+3} + As^{+5}$) y As^{+3} respectivamente. La preparación de la muestra fue tomando 15 mL de muestra filtrada a través de filtro de membrana de 0,45 μm y utilizando 3 mL de electrolito compuesto por ácido sulfámico (1 mol L^{-1}), ácido cítrico (0,5 mol L^{-1}) y cloruro de potasio (0,45 mol L^{-1}), se utilizó la metodología de adición estándar utilizando una solución patrón de As^{+3} ($c(NaAsO_2) = 0,05$ mol/L, Titripur®). La muestra utilizada en este análisis fue filtrada en el punto de muestreo y transportada al laboratorio a 4°C antes de las 24 h para su análisis. Estos análisis fueron realizados en el laboratorio de nanotecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Adicionalmente se tomaron dos muestras de agua del río Locumba las cuales se preservaron con HNO_3 (1:1) a 4°C; una de ellas sin filtrar y la otra filtrada utilizando filtro de jeringa de 0,45 μm . Estas dos muestras fueron enviadas para su análisis de arsénico total y arsénico soluble a un laboratorio externo acreditado S.G.S. del Perú S.A.C.. Los parámetros registrados en campo fueron la conductividad, temperatura, pH (equipo multiparámetro marca HANNA HI98129), potencial de oxidación reducción ORP (HANNA HI98120) y las coordenadas de ubicación GPS (Garmin Montana 680).

2.5 Diseño experimental aplicado para el análisis de datos

Se aplicó ensayos preliminares para determinar las variables (factores) más influyentes en la eficiencia de remoción de arsénico total para la calidad de agua del río Locumba. Para esto se aplicó un diseño experimental factorial fraccionado 2^{5-1} , considerando como factores la dosis de cloruro férrico (X_1), pH (X_2), velocidad de floculación (X_3), tiempo de floculación (X_4) y tiempo de sedimentación (X_5). Como variables respuesta (independientes) se tuvo la concentración de arsénico total residual (Y_1), pH final (Y_2) y la concentración de hierro total residual (Y_3). Una vez identificadas las variables más significativas se procedió con la aplicación del diseño factorial de superficie respuesta de Box-Behnken; este tipo de arreglo factorial permitió determinar: las condiciones de operación para obtener la mejor eficiencia de remoción, el cálculo más eficiente de los coeficientes de primer, segundo orden del modelo matemático y reducir el número de pruebas experimentales¹⁸. Siguiendo el arreglo de Box-Behnken para tres factores significativos determinados previamente: dosis de $FeCl_3$ (X_1), velocidad de floculación (X_2) y el tiempo de sedimentación (X_3), se utilizó 12 combinaciones de las pruebas complementado con 04 puntos centrales para la evaluación del error. Los factores, rangos de operación y variables respuesta se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Variables y niveles de operación para el diseño experimental de Box-Behnken.

	Variables	Niveles		
		-1	0	+1
Variables independientes (factores)	X_1 : dosis de $FeCl_3$ ($mg\ L^{-1}$)	30	40	50
	X_2 : velocidad de floculación (rpm)	20	40	60
	X_3 : tiempo de sedimentación (minutos)	40	60	80
Variables dependientes (respuesta)	Y_1 (SF): arsénico total residual ($mg\ L^{-1}$) sin filtración.			
	Y_2 (SF): hierro total residual ($mg\ L^{-1}$) sin filtración.			
	Y_3 : pH			
Parámetros que se mantuvieron constantes				
Tiempo de coagulación(min)= 1 minuto				
Velocidad de coagulación (rpm) = 200 rpm				
pH=7,0				
Tiempo de floculación (min)= 25				

2.6 Tratamiento de las pruebas de remoción de arsénico

Las pruebas de remoción de arsénico fueron efectuadas utilizando un equipo probador de jarras (marca VELP SCIENTIFICA JLT 6), con 06 jarras cilíndricas de 1 Litro sin baffles. Se utilizó FeCl_3 vendido por QUIMPAC (40% p/p, densidad: 1,40 – 1,44 g/ml) como único coagulante metálico (esta presentación del coagulante es la normalmente utilizada en las plantas de tratamiento de agua). El acondicionamiento de la muestra (agua del río Locumba), los procesos de coagulación, floculación y sedimentación se realizaron con el siguiente procedimiento: El acondicionamiento del pH de la muestra de acuerdo al pH requerido por la matriz del diseño experimental (ver tabla 4) se realizó agregando un 1 Litro de muestra de agua a cada jarra, luego utilizando un agitador magnético (marca MS-H280-Pro Lb Pro) para lograr una mezcla uniforme, se procedió a agregar H_2SO_4 (0,1 M), hasta alcanzar el pH requerido por la prueba. El proceso de coagulación se realizó manteniendo una velocidad de 200 rpm durante 1 minuto¹⁹ (es en este punto donde se aplica las diferentes dosis de coagulante). La condición del proceso de floculación (velocidad y tiempo) y el tiempo de sedimentación fueron establecidas de acuerdo a la matriz del diseño experimental (ver tabla N°1 y tabla N°4). Una vez finalizado el proceso de sedimentación se extrajo 300 mL de cada muestra, de las cuales a 100 mL fueron filtrados a través de papel filtro (Whatman N°40)¹⁹ y otros 100 mL sin filtrar se les agregó HNO_3 (1:1) como preservante y fueron enviados refrigerados a 4°C para el análisis de arsénico y hierro (total y filtrado). Los 100 mL finales se utilizaron para la determinación de pH.

2.7 Análisis estadístico de los datos

Para el análisis estadístico de datos se utilizó el software Statgraphics v19 (versión de prueba), con el cual se aplicó el diseño experimental factorial fraccionado 2⁵⁻¹ y el diseño de superficie respuesta de Box-Behnken para diferentes condiciones de operación, obteniendo los análisis de varianza, la representación de Pareto, las gráficas de comportamiento de los factores principales y la ecuación cuadrática empírica que mejor se ajustó a los datos experimentales para las concentraciones de arsénico y hierro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Especiación de arsénico (As^{+3})

Los resultados encontrados se muestran en la tabla 2, junto a los resultados de Arsénico total (As-T), Arsénico Soluble (As-S) y los parámetros de campo registrados. El análisis de especiación se realizó mediante dos metodologías: la primera utilizando la extracción por fase sólida (EFS) a través cartuchos descartables de especiación (CDE); los autores de esta metodología⁽¹⁷⁾ determinaron una recuperación promedio del 98% de As^{+3} en el filtrado para concentraciones de arsénico total por debajo de 0,5 mgL^{-1} , esto fue corroborado también en investigaciones recientes²⁰. La segunda forma de especiación fue utilizando el método de voltamperometría con uso de electrodo de oro (VEO). Las concentraciones bajas As^{+3} muestran claramente de forma puntual, que la concentración de esta especie en el punto de muestreo es despreciable y el arsénico predominante es la forma As^{+5} . Considerando el segundo método (VEO) como método más sensible para la determinación de la especie As^{+3} , se tiene que el método primer método de especiación (CDE) utilizado, tiene una lectura cinco

veces mayor a este nivel de concentración de As^{+3} ; siendo posible afirmar que su límite de cuantificación es superior a $0,005 \text{ mgL}^{-1}$.

Tabla 2. Resultados de la especiación de As^{+3}

T°C	pH	ORP (mV)	C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	As-T (mgL^{-1})	As-S (mgL^{-1})	As^{+3} (CDE) (mgL^{-1})	As^{+3} (VEO) (mgL^{-1})
18,6	8,06	+178	2428	0,487	0,480	0,005	0,001

ORP: Potencial de oxidación reducción, **C.E.:** Conductividad eléctrica, **As-T:** Arsénico total, **As-S:** Arsénico Soluble, **As^{+3} (CDE):** Concentración de As^{+3} utilizando cartuchos descartables de especiación, **As^{+3} (VEO):** Concentración As^{+3} utilizando voltamperometría con uso de electrodo de oro.

Una manera cualitativa para determinar el predominio de las especies inorgánicas de arsénico (As^{+3} y As^{+5}); que es tomada en consideración por otros autores^{1,21}; es determinando el potencial de oxidación reducción ORP (mV) y el pH de la muestra de agua; y luego ubicar estos datos en un diagrama para especies acuosas de arsénico como la mostrada en la figura 2. Este tipo de registro de datos en la presente investigación se realizó una vez cada año durante tres años, estos datos y otros parámetros registrados en campo se muestran en la Tabla 3 y se grafican en la figura 2. La ubicación de los tres puntos encerrados dentro del círculo rojo señalado en la figura 2, muestra que la forma predominante del arsénico según las características de ORP y pH del agua en el punto de muestreo se encuentra en la forma de $HAso_4^{2-}$ (As^{+5}). Estos resultados concuerdan con el análisis cuantitativo realizado utilizando las dos metodologías antes señaladas; el arsénico predominante se encuentra en la forma más oxidada (As^{+5}).

Tabla 3. Registro de parámetros evaluados en campo

Fecha	T°C	pH	ORP (mV)	C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
10/2020	18,7	8,30	180,5	2400
10/2021	17,7	8,34	147,0	2308
04/2022	18,6	8,06	178,0	2428

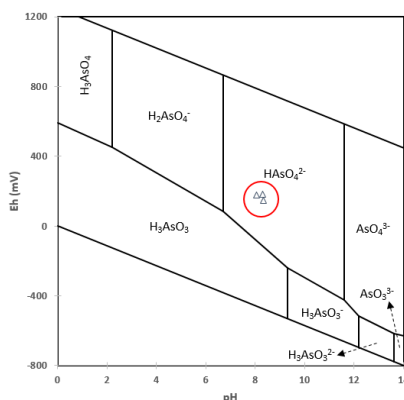


Figura 2. Diagrama Eh-pH para especies acuosas de Arsénico en un sistema $As-O_2-H_2O$ a 25°C y 1 bar total de presión²²

3.2 Pruebas experimentales de remoción de arsénico

Los análisis de las muestras de agua utilizadas para las pruebas experimentales dieron como resultado concentraciones promedio de: arsénico total (As-T) = $0,5097 \pm 0,014 \text{ mgL}^{-1}$, hierro (Fe) = $0,1575 \pm 0,1410 \text{ mgL}^{-1}$, pH = $8,38 \pm 0,10$, temperatura = $17,5 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ y una turbiedad = $14,5 \pm 2,1$ unidades nefelométrías de turbiedad (NTU). Estos resultados se encuentran en el rango del promedio registrado en los últimos años por ALA-Caplina Locumba durante los monitoreos participativos de calidad de agua en época seca (estiaje) en la estación "1316RLocu5" y también con los datos registrados en el punto N° 9 en una publicación previa registrada por el equipo de investigación²³ en la cuenca Locumba. En cuanto a la turbiedad; no se tiene registro de este parámetro en los datos de la ALA-Caplina Locumba para ser comparados.

Las variables de operación significativas seleccionadas como resultado de la aplicación de un diseño experimental factorial fraccionado 2^{5-1} fueron: la dosis de cloruro férrico (FeCl_3), pH, velocidad de floculación (v_f), y el tiempo de sedimentación (t_s). Habiéndose observado que las mayores eficiencias de remoción de arsénico se lograron a valores de pH en el rango menor de operación (pH=7), resultados que coinciden con otros autores^{24,3}. Se consideró mantener un valor constante de pH=7 para todas las pruebas en el arreglo experimental de superficie respuesta de Box-Behnken, quedándose solamente con: la dosis de FeCl_3 , velocidad de floculación y tiempo de sedimentación como variables de operación. El arreglo de superficie respuesta de Box-Behnken y los resultados para cada una de las 16 condiciones de operación se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de operación y valores finales de arsénico, hierro y pH, para 16 pruebas experimentales.

N°	Factores			Variables Respuesta		
	d_ FeCl_3 X_1	v_f \bar{X}_2	t_s \bar{X}_3	As(SF) $Y_{1(\text{SF})}$	Fe(SF) $Y_{2(\text{SF})}$	pH Y_3
1	30	20	60	0,03671	1,1162	6,88
2	50	20	60	0,01739	0,9037	6,78
3	30	60	60	0,01601	0,4828	6,89
4	50	60	60	0,01056	0,5795	6,63
5	30	40	40	0,02018	0,6612	6,84
6	50	40	40	0,01061	0,5920	6,78
7	30	40	80	0,01695	0,4487	6,82
8	50	40	80	0,00830	0,4099	6,77
9	40	20	40	0,02304	0,9020	6,84
10	40	60	40	0,01547	0,6412	6,78
11	40	20	80	0,02161	0,8755	6,76
12	40	60	80	0,00924	0,3961	6,72
13	40	40	60	0,01228	0,5618	6,78
14	40	40	60	0,01338	0,5605	6,76
15	40	40	60	0,01238	0,4847	6,84
16	40	40	60	0,01484	0,5532	6,86

Dónde: d_ FeCl_3 (dosis de FeCl_3 , mgL^{-1}), v_f (velocidad de filtración, rpm), t_s (tiempo de sedimentación, minutos). As(SF) y Fe(SF) son las concentraciones (mgL^{-1}) de arsénico y hierro en muestras que no fueron filtradas al final de cada prueba experimental (SF).

En la tabla 4 podemos observar que el resultado de las concentraciones de arsénico en 14 de un total 16 muestras que fueron analizadas al final de cada prueba sin pasar por filtración (SF), superaron el valor de $0,01 \text{ mgL}^{-1}$, adicionalmente se registró que las concentraciones de hierro superaron el valor de $0,3 \text{ mgL}^{-1}$ en las 16 muestras sin filtrar (SF). La normativa peruana²⁵ establece como límite máximo permisible para el arsénico es de $0,01 \text{ mgL}^{-1}$ y $0,3 \text{ mgL}^{-1}$ para el hierro. La Organización Mundial de la Salud (OMS)²⁶ establece un valor de referencia provisional de $0,01 \text{ mgL}^{-1}$ para arsénico y no fija valor de referencia para el hierro. Las concentraciones determinadas de arsénico y hierro de las muestras filtradas (CF) para las 16 condiciones de operación mostradas en la tabla 4 son menores a los límites máximos permisibles que exige la normativa del Perú y del valor que establece como referencia la OMS, registrándose concentraciones de arsénico en el rango de $0,0035$ a $0,0099 \text{ mgL}^{-1}$ y para el hierro de $0,0163$ a $0,1208 \text{ mgL}^{-1}$. La investigación³ alcanzo remociones del 94% al 98% para concentraciones de As^{+5} de $0,5$ y $1,0 \text{ mgL}^{-1}$, $\text{pH}=6,5$, dosis de FeCl_3 de 30 y 60 mgL^{-1} . Encontrándose estas eficiencias de remoción cercanas a las logradas en la presente investigación para las muestras filtradas (0,99% a 0,98%, pH igual a 7 y dosis de FeCl_3 entre 30 a 50 mgL^{-1} para una concentración inicial de arsénico de $0,5 \text{ mgL}^{-1}$).

3.3 Pruebas estadísticas:

Como se observa en la Tabla 4, la concentración de $\text{As}(\text{SF})$ en 14 muestras y de $\text{Fe}(\text{SF})$ en las 16 muestras se encuentran sobre el límite máximo permitido por la legislación peruana para el arsénico y hierro. Considerando lo antes mencionado y con el fin de determinar las condiciones de operación que minimicen las concentraciones finales de $\text{As}(\text{SF})$ y $\text{Fe}(\text{SF})$ y de esta manera potencialmente asegurar concentraciones aún menores después de un proceso de filtrado final; se aplicó el diseño de superficie respuesta de Box-Behnken, generándose la tabla de análisis de varianza, diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales, los modelos matemáticos empíricos que mejor se ajuste a los datos experimentales para $\text{As}(\text{SF})$ y $\text{Fe}(\text{SF})$ que a continuación se detallan y analizan.

Tabla 5. Análisis de Varianza para las muestras de $\text{As}(\text{SF})$.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:d_ FeCl_3	0,000231018	1	0,000231018	163,49	0,0010
B:v_ F	0,000281675	1	0,000281675	199,34	0,0008
C:t_ S	0,00002178	1	0,00002178	15,41	0,0294
AA	0,0000130863	1	0,0000130863	9,26	0,0557
AB	0,0000480942	1	0,0000480942	34,04	0,0100
AC	2,116E-7	1	2,116E-7	0,15	0,7246
BB	0,000105627	1	0,000105627	74,75	0,0033
BC	0,00000576	1	0,00000576	4,08	0,1368
CC	0,00000415141	1	0,00000415141	2,94	0,1850
Falta de ajuste	0,0000131256	3	0,00000437521	3,10	0,1891
Error puro	0,0000042392	3	0,00000141307		
Total (corr.)	0,000728768	15			

R-cuadrada = 97,6172 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,0431 por ciento

a) Para la concentración de las muestras de As(SF)

La tabla 5, muestra que los tres factores principales son significativos en el rango de exploración seleccionado, siendo el orden de significancia de mayor a menor: velocidad de floculación (v_F), dosis de FeCl_3 (d_{FeCl_3}) y el tiempo de sedimentación (t_S). También son significativos el factor cuadrático v_F y la interacción de los factores d_{FeCl_3} y v_F . Un importante resultado que valida el modelo cuadrático utilizado es la prueba de falta de ajuste que para este análisis no es significativo demostrando que el modelo cuadrático utilizado es adecuado; esto es también validado por el valor del R^2 -ajustado=94%. Los investigadores^{3,27} al trabajar con FeCl_3 para la remoción de arsénico utilizando el modelo de Box-Behnken hallaron valores de R^2 -ajustado de 0,92% y 0,78% respectivamente, significando que sus datos experimentales se ajustaron en menor grado al modelo cuadrático propuesto.

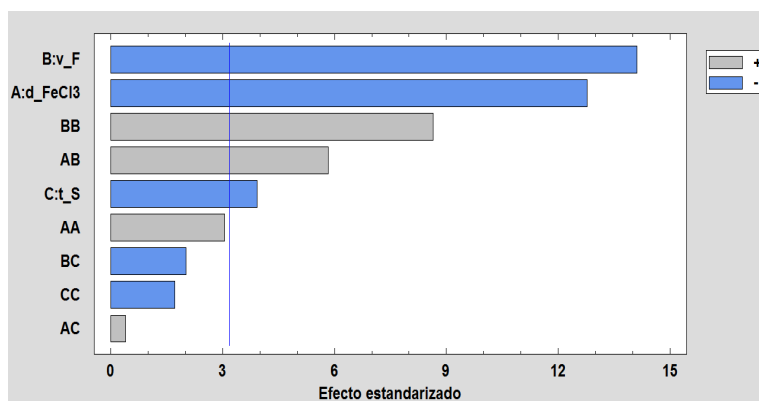


Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizada para las muestras de As(SF)

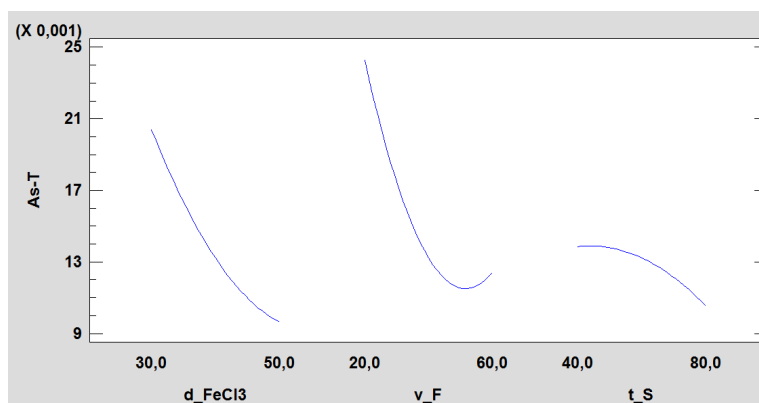


Figura 4. Gráfica de efectos principales para las muestras de As(SF)

La ecuación empírica con sus respectivos coeficientes de regresión para el comportamiento de la concentración del arsénico As(SF) es:

$$\begin{aligned} \text{As(SF)} = & 1,15 \times 10^{-1} - 2,75 \times 10^{-3} (d_{\text{FeCl}_3}) - 1,84 \times 10^{-3} (v_{\text{F}}) + 2,97 \times 10^{-4} (t_{\text{S}}) \\ & + 1,81 \times 10^{-5} (d_{\text{FeCl}_3})^2 + 1,73 \times 10^{-5} (d_{\text{FeCl}_3})(v_{\text{F}}) \\ & + 1,15 \times 10^{-6} (d_{\text{FeCl}_3})(t_{\text{S}}) + 1,28 \times 10^{-5} (v_{\text{F}})^2 - 3 \times 10^{-6} (v_{\text{F}})(t_{\text{S}}) \\ & - 2,55 \times 10^{-6} (t_{\text{S}})^2 \end{aligned}$$

El diagrama de Pareto (figura 3) muestra que los 03 factores principales (v_{F} , d_{FeCl_3} y t_{S}), el factor cuadrático v_{F} (BB) y la interacción de factores $d_{\text{FeCl}_3} * v_{\text{F}}$ (AB) representados por barras horizontales que superan la línea horizontal de color azul; son los factores significativos. El color azul de las barras significa que a mayor valor del factor la concentración final del arsénico será menor, y el color plomo de la barra indica que a mayor valor del factor la concentración final del arsénico será mayor. El comportamiento de los efectos principales mostrados en la figura 4 complementa lo antes mencionado, claramente el aumento de la velocidad floculación (v_{F}) reduce la concentración de arsénico fomentando el crecimiento y aumentando la densidad del floc formado, teniendo como consecuencia la precipitación del mismo y por co-precipitación la remoción del arsénico. Pero esto tiene una velocidad límite donde una mayor velocidad provoca la rotura del floc formado aumentando nuevamente la concentración de arsénico (efecto cuadrático de la variable v_{F}). Para el caso de la velocidad de sedimentación (t_{S}) se muestra que a mayor tiempo de sedimentación favorece la reducir la concentración final de arsénico.

b) Para la concentración de las muestras de Fe(SF)

En la tabla 6 donde se muestra el análisis de varianza para el Fe(SF), se observa que los factores principales significativos son la velocidad de floculación (v_{F}) y el tiempo de sedimentación (t_{S}). Así mismo son significativos la interacción de factores de la dosis de FeCl_3 (d_{FeCl_3}) y velocidad de floculación (v_{F}) representados por AB, como también es significativo el factor cuadrático de la velocidad de floculación (v_{F}) representado por BB. La falta de ajuste no es significativa indicando que el modelo cuadrático utilizado se ajusta a los datos experimentales, esto es reafirmado por el valor de un R^2 -ajustado de 95%.

Tabla 5. Análisis de Varianza para las muestras de As(SF).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:d _{FeCl3}	0,00626081	1	0,00626081	4,55	0,1226
B:v _F	0,360316	1	0,360316	261,87	0,0005
C:t _S	0,0554778	1	0,0554778	40,32	0,0079
AA	0,00299756	1	0,00299756	2,18	0,2364
AB	0,0239012	1	0,0239012	17,37	0,0251
AC	0,00023104	1	0,00023104	0,17	0,7095
BB	0,165039	1	0,165039	119,95	0,0016
BC	0,0119465	1	0,0119465	8,68	0,0602
CC	0,0062331	1	0,0062331	4,53	0,1232
Falta de ajuste	0,00780658	3	0,00260219	1,89	0,3069
Error puro	0,00412781	3	0,00137594		
Total (corr.)	0,644337	15			

R-cuadrada = 98,1478 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95,3695 por ciento

Con la finalidad de analizar el efecto de los factores, se utilizó el diagrama de Pareto que se muestra en la figura 5, donde se observa un comportamiento similar al visto en la remoción de arsénico con respecto al factor $v_F(B)$ y su efecto cuadrático BB , indicando que el aumento en la velocidad de floculación favorece a la formación del floc de hidróxido de hierro (tamaño y densidad), fomentando su rápida sedimentación y reduciendo la concentración de hierro particulado; pero velocidades altas romperán el floc de hidróxido de hierro formado, provocando mayores concentraciones de hierro particulado (efecto cuadrático BB). Con respecto al efecto del aumento en el valor del factor tiempo de sedimentación (t_S), este contribuye a reducir la concentración de hierro. El comportamiento de los factores principales mostrados en la figura 6 complementa lo antes mencionado.

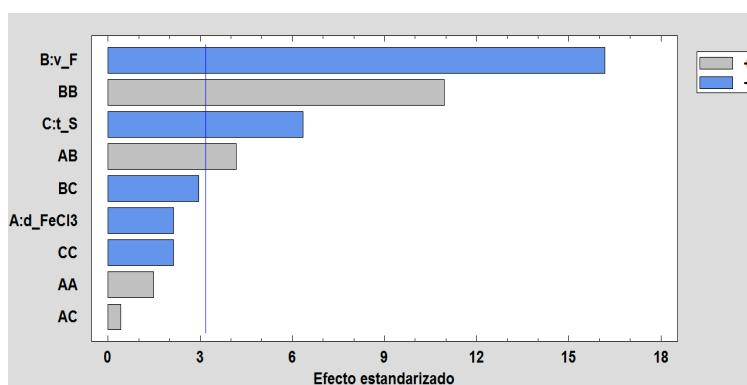


Figura 5. Diagrama de Pareto estandarizado para las muestras de Fe(SF)

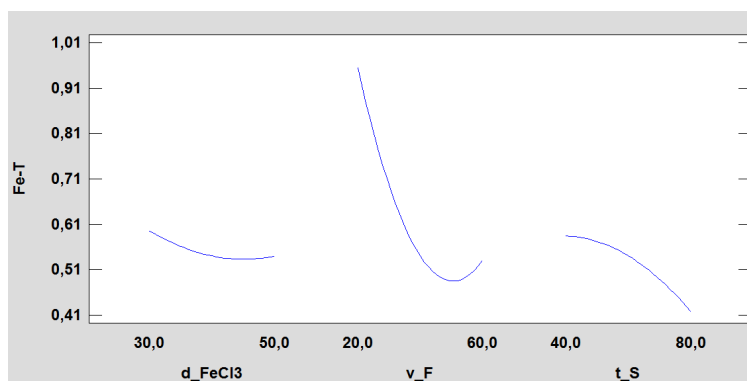


Figura 6. Gráfica de efectos principales para las muestras de Fe(SF)

La ecuación empírica con sus respectivos coeficientes de regresión para el comportamiento de la concentración de hierro Fe(SF) es:

$$\begin{aligned} Fe(SF) = & 2,06 - 4,24 \times 10^{-2}(d_{FeCl_3}) - 5,85 \times 10^{-2}(v_F) + 1,16 \times 10^{-2}(t_S) \\ & + 2,74 \times 10^{-4}(d_{FeCl_3})^2 + 3,87 \times 10^{-4}(d_{FeCl_3})(v_F) \\ & + 3,80 \times 10^{-5}(d_{FeCl_3})(t_S) + 5,08 \times 10^{-4}(v_F)^2 \\ & - 1,37 \times 10^{-4}(v_F)(t_S) - 9,87 \times 10^{-5}(t_S)^2 \end{aligned}$$

3.3 Condiciones de operación para la mayor remoción de las concentraciones de As(SF) y Fe(SF).

Para determinar las condiciones de operación se utilizó las ecuaciones de los modelos empíricos de regresión para el As(SF) y Fe(SF) e independientemente a cada uno se les aplicó el criterio Hessiano²⁸ o de la segunda derivada; con el fin de determinar la existencia de un mínimo local, máximo local o punto silla. Determinándose que los dos modelos empíricos encontrados muestran puntos silla, no pudiéndose determinar un único valor que pueda minimizar las concentraciones de As(SF) y Fe(SF); este comportamiento también se muestra en una investigación²⁷ donde se utiliza también FeCl₃ para la remoción de arsénico, teniendo como una variante el efecto del ácido húmico, concluyendo que no existe un único valor óptimo para las condiciones de operación que lleve a la mayor remoción de arsénico, determinando rangos de para las condiciones de operación. Los integrantes del grupo investigación tomaron como criterio seleccionar las condiciones de operación de la prueba N°12 de la tabla 4; que muestra concentraciones finales de As(SF) y Fe(SF) de 0,00924 mgL⁻¹ y 0,3961 mgL⁻¹ respectivamente que fueron alcanzadas con las condiciones de operación: 40 mgL⁻¹ de dosis de FeCl₃, 60 rpm como velocidad de floculación, 80 minutos de tiempo de sedimentación, pH=7 y un tiempo de floculación de 25 minutos. Esta selección fue basada en las dos únicas pruebas de As(SF) que registraron concentraciones por debajo de 0,01 mgL⁻¹ (pruebas N°8 y N°12 de la tabla 4), considerando la prueba donde se tendría menor gasto de FeCl₃.

CONCLUSIONES

En base a los resultados encontrados aplicando un método de tratamiento convencional para remoción de arsénico, utilizando como coagulante metálico FeCl₃ se logró remover el As(CF) en todas las muestras filtradas al final de cada tratamiento, lográndose concentraciones menores e iguales al límite máximo permisible exigido por la normativa peruana (0,01 mgL⁻¹) y recomendada por OMS. Adicionalmente también se logró concentraciones de hierro por debajo del límite máximo permisible exigido por la normatividad peruana (0,3 mgL⁻¹) en las muestras de Fe(CF) filtradas al final del tratamiento para todas las condiciones de operación estudiadas. Esto refuerza los resultados encontrados sobre una despreciable concentración de As⁺³(0,001 mgL⁻¹) y la predominancia de la especie As⁺⁵; que es la especie donde mejores resultados de remoción se tiene utilizando FeCl₃ según las diversas fuentes bibliográficas consultadas.

Para el caso de las muestras que al final de cada prueba no fueron filtradas, solamente se logró remover el As(SF) por debajo del límite máximo en dos muestras (N°8 y N°12 de la tabla 4), la concentración de Fe(SF) en las 16 muestras mantuvo concentraciones por encima del valor máximo permisible exigido por la normatividad peruana. El análisis de superficie respuesta aplicado al As(SF) y Fe(SF) permitió determinar que los modelos cuadráticos empíricos propuestos se ajustan a los datos experimentales para el As(SF) y Fe(SF) obteniendo valores de R²-ajustado de 94% y 95% respectivamente, como también permitió reducir el número de pruebas experimentales reduciendo los costos de la investigación. No fue posible determinar una sola condición de operación que minimice las concentraciones de As(SF) y Fe(SF); debido a que los dos modelos empíricos encontrados muestran puntos silla, optando por seleccionar como las mejores condiciones de operación para la mayor remoción de As(SF) y Fe(SF): 40 mgL⁻¹ de dosis de FeCl₃, 60 rpm como velocidad de floculación, 80 minutos de tiempo de sedimentación, pH=7 y un tiempo de floculación de 25 minutos; que corresponde a la prueba N°12 de la tabla 4.

De acuerdo a los resultados encontrados en este estudio, se propone como alternativa de solución al problema de horas de abastecimiento de agua del distrito de Ite la tecnología estudiada en la presente investigación, pero es aún necesario hacer un análisis de costos por el uso adicional de ácido sulfúrico que se necesitaría para regular el pH del agua antes de la aplicación del FeCl₃. Siendo potencialmente preferible el uso del ácido antes mencionado debido a los pocos kilómetros de distancia entre el distrito de Ite y la compañía minera Southern Copper Corporation quien produce este insumo químico.

AGRADECIMIENTOS

A.S.M.R. agradece el financiamiento de publicación a la obtención del Premio Nacional Cultura del Agua 2021-H₂O Investigaciones mediante un convenio de cooperación entre la Autoridad Nacional del Agua, Perú y Forest Trends Association en representación del Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica. Los contenidos son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, ni del Gobierno de los Estados Unidos de América, ni del Gobierno de Canadá.

A.S.M.R. agradece a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por financiar la tesis para optar el título de ingeniero químico a través de fondos concursables provenientes de Canon, sobrecanon y regalías mineras.

Al laboratorio de Nanotecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por permitir realizar parte de los análisis de especiación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Escalera Vásquez R, Ormachea Muñoz M. Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de procesos de remoción. *Inv y Des.* 2017;17(1):27–41.
2. Algieri C, Pugliese V, Coppola G, Curcio S, Calabro V, Chakraborty S. Arsenic removal from groundwater by membrane technology: Advantages, disadvantages, and effect on human health. *Groundw Sustain Dev.* 2022;19(July):100815. doi: 10.1016/j.gsd.2022.100815
3. Baskan MB, Pala A. Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology. *J Hazard Mater.* 2009;166(2–3):796–801.
4. Phearom S, Shahid MK, Choi Y. Nature of surface interactions among Fe₃O₄ particles and arsenic species during static and continuous adsorption processes. *Groundw Sustain Dev* 2022;18(May):100789. doi: 10.1016/j.gsd.2022.100789
5. Raju NJ. Arsenic in the geo-environment: A review of sources, geochemical processes, toxicity and removal technologies. *Environ Res.* 2022;203:111782. doi: 10.1016/j.envres.2021.111782
6. Henke KR. *Arsenic: Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd; 2009. 1–569 p.
7. Wang Y, Duan J, Liu S, Li W, Van Leeuwen J, Mulcahy D. Removal of As(III) and As(V) by ferric salts coagulation - Implications of particle size and zeta potential of precipitates. *Sep Purif Technol.* 2014;135:64–71.
8. Rathi BS, Kumar PS. A review on sources, identification and treatment strategies for the removal of toxic Arsenic from water system. *J Hazard Mater.* 2021;418(May):126299. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126299.
9. Weerasundara L, Ok YS, Bundschuh J. Selective removal of arsenic in water: A critical review. *Environ Pollut.* 2021;268:115668. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115668
10. Shi Q, Jing C, Meng X. Competing Interactions of As Adsorption and Fe(III) Polymerization during Ferric Coprecipitation Treatment. *Environ Sci Technol.* 2018;52(13):7343–50.
11. Yadav AK, Yadav HK, Naz A, Koul M, Chowdhury A, Shekhar S. Arsenic removal technologies for middle- and low-income countries to achieve the SDG-3 and SDG-6 targets: A review. *Environ Adv.* 2022;9(June):100262. doi:10.1016/j.envadv.2022.100262
12. Meng X, Korfiatis GP, Bang S, Bang KW. Combined effects of anions on arsenic removal by iron hydroxides. *Toxicol Lett.* 2002;133(1):103–11.
13. Bundschuh J, Litter MI, Parvez F, Román-Ross G, Nicolli HB, Jean JS, et al. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Sci Total Environ.* 2012;429:2–35.
14. ANA (Autoridad Nacional del Agua Perú). Plan de gestión de los recursos hídricos de la cuenca Caplina - Locumba [Internet]. 2015. 262 p. [Citado 03 nov 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/88>
15. INEI. Directorio Nacional de Centros Poblados, Censos Nacionales 2017, Departamento de Tacna, Tomo 4 [Internet]. Lima; 2018. [Citado 12 set 2022]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm

16. ANA. Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales [Internet]. Autoridad Nacional del Agua. 2016. p. 85. [Citado 20 oct 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209>
17. Meng X, Wang W. Speciation of arsenic by disposable cartridges. Third Int Conf Arsen Expo Helath Eff. 1998;43(V):1–5.
18. Bezerra MA, Santelli RE, Oliveira EP, Villar LS, Escaleira LA. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*. 2008;76(5):965–77.
19. IWA. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment [Internet]. The International Water Association (IWA). 2022. [Citado 15 nov 2022]. Disponible en: <https://www.iwapublishing.com/news/coagulation-and-flocculation-water-and-wastewater-treatment>.
20. Katsoyiannis IA, Tzollas NM, Tolkou AK, Mitrakas M, Ernst M, Zouboulis AI. Use of novel composite coagulants for arsenic removal from waters-experimental insight for the application of polyferric sulfate (PFS). *Sustain*. 2017;9(4): 590. doi: 10.3390/su9040590.
21. Quino I, Ramos OE, Ormachea M, Chambi MI, Quintanilla J, Ahmad A, et al. Geochemical mechanisms of natural arsenic mobility in the hydrogeologic system of lower Katari Basin, Bolivian Altiplano. *J Hydrol*. 2021;594: 125778. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125778
22. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl Geochemistry*. 2002;17(5):517–68.
23. Avendaño Cáceres E, Briceño Toledo M, Cornejo Ponce L, Morales Cabrera D, Ward NI. Metales De Valor Añadido En Los Ríos Salado Ubicados En Las Cuencas Sama Y Locumba (Región De Tacna - Perú) Y Su Correlación Con Arsénico Y Boro. *Rev Soc Quím Perú*. 2021;87(3):278–97.
24. Inam MA, Khan R, Lee KH, Wie YM. Removal of arsenic oxyanions from water by ferric chloride—optimization of process conditions and implications for improving coagulation performance. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(18): 9812. doi: 10.3390/ijerph18189812.
25. Dirección General de Salud. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Dir Gen Salud Ambient del Minist Salud [Internet]. 2009;46 p. [Citado 23 nov 2022]. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/reglamento_calidad_agua.pdf
26. Gorchev HG, Ozolins G. WHO guidelines for drinking- water quality. *WHO Chron*. 1984;38(3):104–8.
27. Watson MA, Tubić A, Agbaba J, Nikić J, Maletić S, Molnar Jazić J, et al. Response surface methodology investigation into the interactions between arsenic and humic acid in water during the coagulation process. *J Hazard Mater*. 2016;312:150–8.
28. Malakhaltsev M, Arteaga R. Cálculo vectorial. Bogotá: Universidad de los Andes; 2013. 370 p.