

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UN  
REACTOR BATCH Y PROPUESTA DE DIMENSIONAMIENTO  
PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA DEL RÍO  
LOCUMBA - ITE, REGIÓN TACNA,  
UTILIZANDO CLORURO  
FÉRRICO**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Angélica Sofía Machaca Rodríguez

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO QUÍMICO**

TACNA – PERÚ

2021

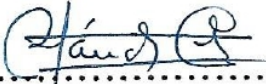
**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**


**Facultad de Ingeniería**

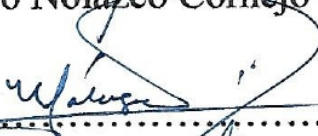
Escuela Profesional de Ingeniería Química

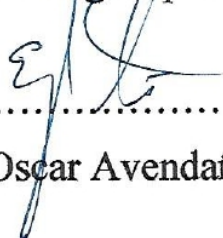
**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UN  
REACTOR BATCH Y PROPUESTA DE DIMENSIONAMIENTO  
PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA DEL  
RÍO LOCUMBA - ITE, REGIÓN TACNA,  
UTILIZANDO CLORURO  
FÉRRICO**

Tesis sustentada por Bach. Angélica Sofía Machaca Rodríguez el día 04 de diciembre del 2020, estando integrado el jurado por:

Presidente: .....   
Mgr. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

Secretario: .....   
Mgr. Pedro Nolazco Cornejo del Carpio

Vocal: .....   
Mgr. Vicente Málaga Apaza

Asesor: .....   
Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su paciencia, su comprensión y su apoyo infinito a lo largo de mi formación profesional y en mí día a día.

A mi hermano, por creer en mí y ayudarme siempre sin esperar nada a cambio.

A mi abuelito, por sus consejos y por inspirarme a conseguir nuevos logros, sin importar la edad.

"Depende de cada uno de nosotros demostrar que este es un mundo que vale la pena salvar... que nuestras vidas, son vidas que vale la pena vivir" – Rhonin

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por la oportunidad. A todas las oportunidades que me condujeron a lograr una de mis metas.

A mis padres.

A mi asesor Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres por su exigencia y su apoyo exhaustivo e incondicional en la presente tesis.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Química, por la formación profesional brindada a mi persona y por el apoyo a través de la infraestructura del Laboratorio de Procesos Químicos, así como al Vicerrectorado de Investigación – Oficina de Investigación – por el financiamiento de la presente tesis gracias a fondos de canon, sobrecanon y regalías mineras en su modalidad de financiamiento de tesis de pregrado mediante concurso.

Y un agradecimiento especial al personal de la División de Saneamiento y Protección Ambiental de la Municipalidad Distrital de Ite, la que está a cargo de la Planta de Tratamiento de agua de Ite, los que nos facilitaron la información y el apoyo en la toma de muestras desde el punto de captación.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.1.1.    Antecedentes del problema.....	6
1.1.2.    Problemática de la investigación .....	10
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	12
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	12
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	16
1.5. OBJETIVOS .....	17
1.5.1. Objetivo general .....	17
1.5.2. Objetivos específicos.....	17
1.6. HIPÓTESIS .....	18

1.6.1.	Hipótesis general .....	18
1.6.2.	Hipótesis específica .....	18
CAPÍTULO II .....		20
MARCO TEÓRICO .....		20
2.1.	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO .....	20
2.2.	BASES TEÓRICAS .....	37
2.2.1.	Área de estudio .....	37
2.2.2.	El Arsénico .....	42
2.2.2.1.	Fuentes de arsénico en la biósfera .....	42
2.2.2.2.	El arsénico en el agua natural .....	44
2.2.2.3.	Química del arsénico .....	45
2.2.2.4.	Efectos del arsénico en el hombre .....	52
2.2.2.5.	Toxicidad del Arsénico .....	53
2.2.2.6.	Envenenamiento agudo .....	54
2.2.2.7.	Envenenamiento crónico .....	56
2.2.3.	Tratamiento del agua .....	56
2.2.4.	Proceso de coagulación – floculación .....	57
2.2.5.	Proceso de coagulación –filtración para la remoción de arsénico .....	59
2.2.6.	Potencialidad del proceso de coagulación .....	62
2.2.7.	Proceso de floculación .....	65
2.2.7.1.	El Floculador .....	68

2.2.7.2.	Tipos de flocladores .....	68
2.2.7.2.1.	Flocladores hidráulicos.....	68
2.2.7.2.2.	Flocladores mecánicos .....	70
2.2.7.3.	Consideraciones de diseño .....	71
2.2.7.4.	Ecuaciones para diseño.....	76
2.2.7.5.	Criterios para el diseño de flocladores hidráulicos.....	79
2.2.7.6.	Consideraciones de diseño según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento .....	84
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	88
	CAPÍTULO III.....	94
	MARCO METODOLÓGICO.....	94
3.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	94
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	94
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	95
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS .	96
3.4.1	Instrumentos, equipos, materiales y reactivos.....	96
3.4.2	Técnicas de recolección de datos .....	99
3.5	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	100
	CAPÍTULO IV.....	107
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	107

4.1. RESULTADOS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA CRUDA Y TRATAMIENTO UTILIZANDO CLORURO FÉRRICO .....	107
4.1.1. Acondicionamiento de agua cruda .....	107
4.1.2. Aplicación del cloruro férrico en el test de jarras.....	110
4.2. RESULTADOS DE LA MATRIZ DE DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO $2^{5-1}$ EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y HIERRO TOTAL .....	112
4.2.1.Resultado del diseño factorial fraccionado $2^{5-1}$ para el agua tratada con filtración.....	112
4.2.2.Resultado del diseño factorial fraccionado $2^{5-1}$ para el agua tratada sin filtración.....	116
4.3. RESULTADOS DE LA MATRIZ DE SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL DISEÑO DE BOX-BEHKEN PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y HIERRO TOTAL .....	119
4.3.1. Agua tratada con filtración .....	119
4.3.2. Agua tratada sin filtración .....	121
4.3.2.1. Análisis estadístico para la remoción de arsénico sin filtración..	123
4.3.2.2. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el arsénico sin filtración.....	129
4.3.2.3. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico. ....	129



4.3.2.4.	Determinación de las mejores condiciones de operación de dosis, velocidad de floculación y tiempo de sedimentación en la remoción de arsénico .....	132
4.3.2.5.	Análisis estadístico para el hierro total sin filtración .....	135
4.3.2.6.	Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el hierro total o residual .....	139
4.3.2.7.	Efecto combinado de las condiciones de operación sobre el hierro total o residual .....	140
4.3.2.8.	Determinación de las mejores condiciones de operación de dosis, velocidad de floculación y tiempo de sedimentación en el hierro total o residual .....	143
4.3.2.9.	Optimización de las condiciones de operación para el arsénico total y el hierro total.....	146
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	147
4.5.	PROPUESTA DE DIMENSIONAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HORIZONTAL .....	150
4.5.1.	Para el dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal de 1 sola cámara: .....	151
4.5.2.	Para el dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras: .....	158
	CONCLUSIONES .....	160

RECOMENDACIONES .....	162
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
ANEXOS .....	171

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resultados de analíticos de los niveles de arsénico realizado en diferentes puntos de monitoreo en la Cuenca Locumba.....	8
<b>Tabla 2:</b> Resultados de parámetros de calidad del agua de la planta de tratamiento de agua de Ite.....	10
<b>Tabla 3:</b> Resumen de las características de las tecnologías de tratamiento de agua.....	15
<b>Tabla 4:</b> Eficiencia de remoción según estado de oxidación del arsénico	28
<b>Tabla 5:</b> Remoción de arsénico por coagulación.....	30
<b>Tabla 6:</b> Comparación entre procesos convencionales de remoción de arsénico.....	32
<b>Tabla 7:</b> Valores de Eh-pH para especiación de arsénico en soluciones acuosas en sistemas As-O <sub>2</sub> -Agua a 25°C y una presión total de 1 bar.....	49
<b>Tabla 8:</b> Ventajas y desventajas del uso de procesos de coagulación en la remoción de arsénico.....	63
<b>Tabla 9:</b> Factores que influyen en la eficiencia de remoción de arsénico por procesos de coagulación.....	64
<b>Tabla 10:</b> Operacionalización de variables para el screening.....	96
<b>Tabla 11:</b> Arreglo experimental factorial fraccionado 2 <sup>5-1</sup> .....	101

<b>Tabla 12:</b> Delineamiento estadístico del diseño factorial fraccionado $2^{5-1}$	102
<b>Tabla 13:</b> Arreglo experimental de Box –Behken	103
<b>Tabla 14:</b> Delineamiento estadístico del diseño de superficie de respuesta de Box – Behken	104
<b>Tabla 15:</b> Análisis de varianza	105
<b>Tabla 16:</b> Características fisicoquímicas del agua cruda	107
<b>Tabla 17:</b> Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total y pH final en muestras filtradas	113
<b>Tabla 18:</b> Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total y pH final en muestras sin filtrar	117
<b>Tabla 19:</b> Matriz del diseño experimental de Box – Behken, respuesta de arsénico, hierro total y pH final – Agua filtrada	120
<b>Tabla 20:</b> Matriz del diseño experimental de Box – Behken, respuesta de arsénico, hierro total y pH final – Agua sin filtración	122
<b>Tabla 21:</b> Análisis de varianza para el arsénico total	123
<b>Tabla 22:</b> Análisis de la regresión múltiple para la remoción de arsénico	124
<b>Tabla 23:</b> Resumen de ajuste estadístico para la variable arsénico total	125
<b>Tabla 24:</b> Predicción de respuesta múltiple para la variable arsénico total	134
<b>Tabla 25:</b> Análisis de varianza para el hierro total	136
<b>Tabla 26:</b> Análisis de la regresión múltiple para el hierro total o hierro residual	136

<b>Tabla 27:</b> Predicción de respuesta múltiple para el Hierro total.....	145
<b>Tabla 28:</b> Predicción de respuesta múltiple para el arsénico total y hierro total .....	146
<b>Tabla 29:</b> Parámetros de operación para un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras.....	158
<b>Tabla 30:</b> Parámetros de dimensionamiento para un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras.....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa de ubicación de las unidades hidrográficas de la cuenca Locumba. .....	37
<b>Figura 2:</b> Localidad de Ite.....	38
<b>Figura 3:</b> Principales fuentes naturales y antropogénicas que permiten el ingreso de arsénico al medio ambiente.....	43
<b>Figura 4:</b> Estructuras de diferentes especies de arsénico encontradas en el agua.	46
<b>Figura 5:</b> Diagrama de Eh-pH para arsénico a 25 °C y 1 bar de presión total, con arsénico total $10^{-5}$ mol/l; los símbolos para especies sólidas están encerrados entre paréntesis en el área sombreada, lo que indica una solubilidad menor de $10^{-5}$ mol/l.....	50
<b>Figura 6:</b> Disociación de arsenito [As (III)].....	51
<b>Figura 7:</b> Disociación de arseniato [As (V)].....	51
<b>Figura 8:</b> Toxicidad causada por envenenamiento agudo y crónico por arsénico	55
<b>Figura 9:</b> Esquema de un floculador hidráulico de flujo horizontal.....	69
<b>Figura 10:</b> Floculador hidráulico de flujo vertical.....	70
<b>Figura 11:</b> Esquemas de floculadores.....	75
<b>Figura 12:</b> Elementos de fluido sometido a mezcla lenta.....	76
<b>Figura 13:</b> Ubicación del punto de muestreo.....	95
<b>Figura 14:</b> Concentración de arsénico en el Río Locumba en los últimos 4 años .....	108

<b>Figura 15:</b> Concentración de hierro en el Río Locumba en los últimos 4 años	109
<b>Figura 16:</b> Diagrama de efectos principales para el arsénico total con filtro	115
<b>Figura 17:</b> Gráfica de probabilidad normal para arsénico total	125
<b>Figura 18:</b> Diagrama de Pareto estandarizada para el arsénico total	126
<b>Figura 19:</b> Gráfica de efectos principales para el arsénico	128
<b>Figura 20:</b> Gráfica de interacciones para el arsénico total	128
<b>Figura 21:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. Las variables independientes dosis (ppm) y velocidad de floculación (rpm), manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min	130
<b>Figura 22:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. Las variables independientes dosis (ppm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la velocidad de floculación a 40 rpm	131
<b>Figura 23:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. La velocidad de floculación (rpm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la dosis a 50 ppm.	132
<b>Figura 24:</b> Curvas de predicción para la optimización de la respuesta arsénico total (mg/l)	135
<b>Figura 25:</b> Diagrama de Pareto estandarizada para el hierro total	137
<b>Figura 26:</b> Gráfica de efectos principales para el hierro total	138

<b>Figura 27:</b> Gráfica de interacciones para el hierro total.....	139
<b>Figura 28:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente de hierro total (mg/l) vs. Las variables independientes dosis (ppm) y velocidad de floculación (rpm), manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min.....	141
<b>Figura 29:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente hierro total (mg/l) vs. Las variables independientes dosis (ppm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la velocidad de floculación a 40 rpm.....	141
<b>Figura 30:</b> Superficie de respuesta para la variable dependiente hierro total (mg/l) vs. La velocidad de floculación (rpm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la dosis a 50 ppm.....	142
<b>Figura 31:</b> Curvas de predicción para la optimización de la respuesta hierro total (mg/l).....	145
<b>Figura 32:</b> Curvas de predicción para la optimización de la respuesta hierro total (mg/l).....	147



## RESUMEN

En la presente tesis se determinaron las mejores condiciones de operación en un reactor batch para la remoción del arsénico en el agua del Río Locumba – Ite cumpliendo con los estándares de calidad referentes a las concentraciones de arsénico y hierro establecidos por la norma (DS N° 031-2010-SA) utilizando cloruro férrico al 40 % como coagulante. Esto se logró utilizando un diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$  y posteriormente, se realizó su optimización mediante un diseño de superficie de respuesta de Box- Behnken. Las variables evaluadas en el screening fueron dosis de cloruro férrico (x1), pH inicial (x2), velocidad de floculación (x3), tiempo de floculación (x4) y tiempo de sedimentación (x5) que luego del análisis se consideró mantener el pH constante a 7 y el tiempo de floculación a 25 rpm, mientras que las variables: Dosis de cloruro férrico (x1), velocidad de floculación (x2) y tiempo de sedimentación (x3) que mostraron mayor variación se utilizaron para realizar el diseño de superficie de respuesta de Box- Behnken. Las concentraciones de arsénico total y hierro total se cuantificaron por análisis con kits de determinación por comparación de color y por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Se realizaron análisis con y sin filtración (se utilizó el filtro Whatmann N° 40) del agua tratada, utilizando los resultados sin filtración para el análisis estadístico. Experimentalmente se logró alcanzar un mínimo en las concentraciones de arsénico y hierro total con una dosis de cloruro férrico de 50 ppm, velocidad de floculación 40 rpm y tiempo de

sedimentación de 80 min. Los resultados obtenidos mostraron remociones de arsénico desde 0,01186 hasta 0,0538 mg/L As, en los resultados sin filtración, siendo la concentración del agua cruda de 0,437 mg/l As. El modelo estadístico para el arsénico total presentó un adecuado coeficiente de determinación  $R^2 = 94,34 \%$  permitiendo alcanzar una remoción de As promedio del 94,65 %, mientras que el  $R^2$  ajustado fue 85,842 %; para el hierro total, el coeficiente de determinación  $R^2$  fue 93,94 % y el  $R^2$  ajustado 84,85 %, siendo el factor más significativo para ambos la velocidad de floculación. Para la propuesta de dimensionamiento se utilizó el valor de la velocidad de floculación de la optimización de ambas variables dependientes, que fue de 47 rpm, un tiempo de floculación de 25 min y un caudal de 8 l/s, que es el caudal con el que actualmente trabaja el floculador de la planta de tratamiento de agua de la localidad de Ite.

**Palabras clave:** Arsénico, cloruro férrico, coagulación, floculación, floculador, remoción.

## ABSTRACT

In this thesis, the best operating conditions were determined in a batch reactor for the removal of arsenic in the water of the Locumba River - Ite, complying with the quality standards regarding the concentrations of arsenic and iron established by the standard (DS No. 031-2010-SA) using 40% ferric chloride as a coagulant. This was achieved using a  $2^{5-1}$  fractional factorial design and subsequently, its optimization was performed using a Box-Behnken response surface design. The variables evaluated in the screening were ferric chloride dose (x1), initial pH (x2), flocculation rate (x3), flocculation time (x4) and sedimentation time (x5), which after the analysis it was considered to maintain the pH constant at 7 and flocculation time at 25 rpm, while the variables: ferric chloride dose (x1), flocculation speed (x2) and sedimentation time (x3) that showed greater variation were used to perform the Box-Behnken surface design response. Total arsenic and total iron concentrations were quantified by analysis with color comparison determination kits and by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Analyzes were performed with and without filtration (Whatmann No. 40 filter was used) of the treated water, using the results without filtration for statistical analysis. Experimentally it was possible to reach a minimum in the concentrations of arsenic and total iron with a dose of ferric chloride of 50 ppm, flocculation speed 40 rpm and sedimentation time of 80 min. The results obtained showed removals of arsenic from 0,01186 to 0,0538 mg/l As, in the results without filtration, the concentration

of raw water being 0,437 mg/l As. The statistical model for total arsenic presented an adequate coefficient of determination  $R^2 = 94,34\%$  allowing to reach an average arsenic removal of 94,65%, while the adjusted  $R^2$  was 85,842%; for total iron, the coefficient of determination  $R^2$  was 93,94% and the adjusted  $R^2$  was 84,85%, the most significant factor for both being the flocculation rate. For the sizing proposal, the value of the flocculation speed of the optimization of both dependent variables was used, which was 47 rpm, a flocculation time of 25 min and a flow rate of 8 l/s, which is the flow rate it's currently working with on the flocculator of the water treatment plant in the town of Ite.

**Keywords:** Arsenic, coagulation ferric, chloride, flocculation, flocculator, removal.

## INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta, el volumen total que ocupa el agua es el 75 % de la Tierra, de este total, el 97 % aproximadamente, es agua salina, por lo tanto, del agua total del planeta solo el 3 % agua dulce (agua apta para consumo humano); además, dos tercios de esta agua aproximadamente se encuentra en los glaciares, casquetes polares y altas montañas en forma de agua congelada. (USGS, 2019).

El agua potable y los suelos contaminados son las dos fuentes principales por las cuales el arsénico ingresa a la cadena alimentaria. La mayoría de los compuestos de arsénico son fácilmente solubles en agua y pueden entrar fácilmente en cuerpos de agua como ríos, lagos y estanques por la escorrentía superficial. Las principales vías de exposición al arsénico humano son: ingestión de agua potable, consumo de alimentos e inhalación de aire. Entre todas las fuentes, se ha informado que el agua potable es la ruta principal de exposición al arsénico en todo el mundo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado que el límite máximo permisible (LPM) para el arsénico en el agua potable sea de 10 µg/L. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos o United States Environmental Protection Agency, (US EPA) también redujo su MPL de 50 a 10 µg/L en 2002 debido a un aumento alarmante de los efectos tóxicos en humanos. (Flora, 2018)

La presencia de arsénico en las diferentes cuencas de la provincia de Tacna, conllevan a que constantemente se esté buscando alternativas de solución para mitigar los efectos nocivos de este metal en los pobladores. En la localidad de Ite,

ubicado al final de la cuenca del Río Locumba, se cuenta con concentraciones de arsénico por encima de los 0,01 mg/L, y además un deficiente sistema de tratamiento que solo abastece de agua para actividades de limpieza y recreación, pero no para el consumo humano debido a su mala calidad. Ello indica la importancia de desarrollar y mejorar técnicas de bajos costos que resulten prácticas y económicamente factibles de ser aplicados en la zona expuesta a los daños que trae consigo una fuente de agua contaminada.

La separación fisicoquímica a través de la coagulación química y la precipitación se ha demostrado como uno de los métodos más efectivos de separación de arsénico. Se ha encontrado que varias combinaciones de coagulantes y oxidantes son efectivas bajo condiciones óptimas de pH. Se ha descubierto que, en condiciones óptimas de coagulación (por cloruro férrico o alumbre), oxidación, sedimentación y filtración, es posible la eliminación del 95-98 % de arsénico. Se ha establecido que el arsénico soluble se puede eliminar efectivamente del agua potable mediante coagulación con cloruro férrico. La sedimentación seguida de la filtración de arena puede producir los resultados en un tiempo razonable y a un costo razonable. Y en este tratamiento, el pH debe ajustarse y mantenerse adecuadamente para llevar el agua de alimentación al punto de máxima insolubilidad del arsénico. (Pal, 2016)

Es por ello que el presente trabajo de investigación consiste en la búsqueda de los parámetros de operación óptimos a escala de laboratorio (test de jarras) del

proceso de coagulación – floculación utilizando cloruro férrico en el agua cruda de la localidad de Ite para obtener la menor concentración de arsénico y hierro total finalizado el tratamiento (por debajo de los límites máximos permisibles establecido), permitiendo realizar la propuesta de dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal considerando el caudal de tratamiento y el volumen ocupado por el floculador actual que posee de la planta de tratamiento de agua de Ite.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Los recursos hídricos destinados para satisfacer las demandas del consumo humano, son cada vez más escasos, cuantitativamente y cualitativamente. Este problema constituye un desafío global para el siglo XXI en la gestión de los recursos hídricos disponibles y en la provisión de instalaciones de agua potable y saneamiento para la población mundial.

En el Perú, varias regiones de la zona sur, no cuentan con un adecuado abastecimiento de agua potable y los que se usan contienen niveles elevados de Arsénico, los que son provocados por contaminación natural. Es por ello que las diferentes instituciones de saneamiento en cada región se ven con la necesidad de emplear diversos tipos de tratamiento con el fin de reducir los niveles de contaminación provocados presentes hasta los niveles recomendados por la normativa de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual establece una concentración de 0,01 mg/L de arsénico, y que está en vigencia en las normativas nacionales de agua.

En las zonas rurales, en las que la mayoría de la población no goza de recursos económicos, obras de saneamiento ni apoyo tecnológico del Estado,



es que recurren a ríos, vertientes, pozos, estanques y otras fuentes, para abastecerse del recurso hídrico, sin embargo, estas fuentes naturales se caracterizan por poseer niveles de contaminación elevados.

En numerosos países de Latinoamérica como Chile, México, El Salvador o Argentina; se estima que aproximadamente más de tres millones y medio de personas ponen en riesgo su salud al beber agua con niveles de arsénico, en forma permanente. En especial, en el agua subterránea, en varios las concentraciones de arsénico en el agua presentan niveles que alcanzan hasta 1 mg/L. En muchos otros países del mundo como Taiwán, India y China el problema este problema es más grave aún. Es así que, en Latinoamérica, las fuentes de arsénico son naturales como en Argentina, por otro lado, en México provienen de la actividad minera, con excepción en las zonas centro y noreste, en las que también son de origen natural. (Castro de Esparza, 1999)

Del mismo modo, en el sur del Perú (Tacna) se encuentra niveles de arsénico por encima de la norma en fuentes naturales de agua, entre estas tenemos al río Locumba, Sama y Uchusuma, entre otras, que principalmente son utilizadas como fuente de abastecimiento de agua de la población, agudizándose la problemática por la escasez de agua.

El arsénico (As) tiende a acumularse en el cuerpo humano, por lo que la exposición crónica de este elemento a determinadas concentraciones, puede repercutir en efectos no cancerígenos como son las lesiones de la piel

(hiperqueratosis e hiperpigmentación de las palmas de las manos y de los pies), irritación de órganos respiratorios y tracto gastrointestinal, enfermedades vasculares, anemia, afección al sistema nervioso, desórdenes en el hígado, diabetes mellitus e incluso cáncer de piel, pulmón y vejiga, pero además también tener efectos carcinogénicos. Inclusive, ha habido reportes de que la exposición crónica al arsénico afecta el desarrollo intelectual de niños y adolescentes. Por el momento no existe un tratamiento contra esta enfermedad, ya que los síntomas aparecen luego de un tiempo prolongado de haber consumido agua con este metal. Debido al poder neurotóxico y carcinógeno de este elemento, la contaminación por arsénico del agua se ha convertido un problema severo de salud pública de importancia a mundial. (Bundschuh & Litter, 2010)

### **1.1.1. Antecedentes del problema**

La contaminación de agua debido a los microorganismos patogénicos, químicos (los pesticidas, compuestos de los farmacéuticos), los metales pesados e iones la hacen insegura para beber. La presencia de estos contaminantes causa los varios efectos de salud. Por ejemplo, agua con la concentración alta de arsénico causa la hiperqueratosis de las manos, la enfermedad de los pies negros y cánceres de la piel, pulmones, vejiga y riñón. (Kausley, y otros, 2018)

En el departamento de Tacna, dos de las cuatro provincias que la conforman: Jorge Basadre y Candarave presentan elevados niveles de arsénico en sus fuentes naturales de agua, y cuentan con agua potable de manera parcial, debido a que en algunos lugares se cuenta con sistemas de tratamiento de agua pero que no funcionan adecuadamente. Estas provincias tienen como principal fuente de abastecimiento las aguas de la cuenca Locumba, en la cual en un 90 % de los puntos de monitoreo establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) – Administración local de agua Locumba/Sama (ALA-Locumba/Sama), para el monitoreo de la calidad de agua superficial 2016 en la Cuenca Locumba y Cuenca Sama (INFORME TÉCNICO N°057-2016-ANA-AAA.CO-ALA.CL-AT/CAJA); presentan niveles de arsénico superiores el límite máximo permisible de arsénico de 0,01 ppm según el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA (ver anexo 1), llegando hasta concentraciones mayores a 0,9 mg/l. En la Tabla 1 se observa los valores obtenidos en el monitoreo previamente mencionado.

**Tabla 1**

*Resultados de analíticos de los niveles de arsénico realizado en diferentes puntos de monitoreo en la Cuenca Locumba*

Cuenca Locumba			Parámetro Químico		
Zona	Río	Clasificación	ECA (mg/l)	Arsénico (mg/l)	Excede
Alta	Callazas	Categoría 3	0,1	0,9854	9,85 veces
	Callazas	Categoría 3	0,1	0,694	6,94 veces
	Salado (Jarumas)	Categoría 3	0,1	0,997	9,97 veces
Media Alta	Curibaya	Categoría 3	0,1	0,6042	6,04 veces
	Salado (Locumba)	Categoría 1 A-2	0,01	0,4836	48,36 veces
Media Baja	Locumba	Categoría 1 A-2	0,01	0,4698	46,98 veces
	Locumba	Categoría 1 A-2	0,01	0,51	51 veces
Baja	Locumba	Categoría 1 A-2	0,01	0,2838	28,38 veces

**Fuente:** Elaboración propia, basado en el INFORME TÉCNICO N°057-2016-ANA- AAA.CO-ALA.CL-AT/CAJA. Categoría 3: "Bebida de animales y riego de vegetales", Categoría 1 A-2: "Poblacional y Recreacional – Aguas que puedan ser potabilizadas con tratamiento convencional".

Estos resultados son coherentes con los hallados por el PMGRH-ANA durante las campañas de muestreo llevadas a cabo entre el 2014-2016. Los informes técnicos realizados por la autoridad administrativa local del agua (ALA) en la que se señala reiteradamente que “la presencia de arsénico y otros metales disueltos tiene su origen en la meteorización de la geología regional (origen litogénico)”. La ALA Caplina – Locumba señala además que “esta es

una característica permanente de este cuerpo de agua, originado por la meteorización de rocas ígneas adyacentes.” (Consortio Locumba, 2017)

Además, según los datos recolectados de los ensayos de laboratorio realizados por la Dirección Regional de Salud – Tacna (DIRESA) de los monitoreos de calidad de agua realizados a la planta de tratamiento de agua de Ite, durante los últimos cuatro años, se tiene registro de los elevados niveles de arsénico en el agua natural de ingreso a la planta y que luego del tratamiento en la planta dichas concentraciones de arsénico se encuentran aún por encima de los 0,45 mg/L mostrando una evidente deficiencia del sistema de tratamiento para la remoción de arsénico (ver anexo 2). Cabe resaltar, que el agua tratada proveniente de esta planta de tratamiento no es consumida por los pobladores de Ite, solo es utilizada para limpieza y otras actividades; al no ser potable, la Municipalidad Distrital de Ite abastece a sus pobladores con agua subterránea previa cloración para el consumo humano (con niveles de arsénico por debajo de 0,01 mg/l As), siguiendo un horario establecido. Por lo que es prescindible entonces, que esta planta realice un mejor tratamiento del agua alcanzando los límites máximos permisibles y con un abastecimiento mínimo de 12 horas diarias.

En la Tabla 2 se observa los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua en la planta de tratamiento de agua de Ite.

**Tabla 2**

*Resultados de parámetros de calidad del agua en la planta de tratamiento de agua de Ite*

Descripción	Concentración de Arsénico (mg/l)			
	2016	2017	2018	2019
<b>Agua natural / ingreso a la planta de tratamiento de agua (PTA) de Ite</b>	<b>0,4943</b>	<b>0,53</b>	<b>0,57</b>	<b>0,77</b>
<b>Agua tratada / Salida de filtros de la planta de tratamiento de agua (PTA) de Ite</b>	-	0,53	0,57	0,78
<b>Agua tratada / Reservorio de agua tratada R1</b>	0,2314	0,52	0,59	0,43
<b>Agua tratada / Reservorio de distribución de agua tratada R2</b>	-	-	0,56	0,53
<b>Caño de vivienda inicial</b>	<b>0,2429</b>	<b>0,51</b>	<b>0,56</b>	<b>0,45</b>
<b>Caño de vivienda final</b>	-	<b>0,51</b>	<b>0,57</b>	<b>0,5</b>

**Fuente:** Elaboración propia, basado en los informes de ensayo de laboratorio del año 2017 al 2019 elaborados por la DIRESA – Tacna.

### **1.1.2. Problemática de la investigación**

En la provincia Jorge Basadre, específicamente en el distrito de Ite, su fuente de agua muestra una concentración promedio de 0,4527 ppm de arsénico (según reporte de resultados fisicoquímicos de monitoreos participativos de calidad de agua superficial 2014-2017, ANA-ALA Locumba – Sama). Este distrito cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable, una actualmente operativa que no fue diseñada para la remoción de arsénico y, una segunda construida pero cuya obra aún no ha sido entregada (no está en operación), por lo que el abastecimiento de agua potable a la población de este distrito se da en

diferentes horarios, alternando las calidades de agua tanto para el consumo humano como para la limpieza y regadío.

La presencia de arsénico en la porción del río Locumba que pasa por el poblado de Ite, es producto de muchos factores debido a que se encuentran en la parte final de la cuenca, como es la contaminación natural debido a factores geotermales como la presencia de afloramientos geotermales en la cabecera de la cuenca y, antropogénicos (aguas residuales municipales y domésticas) en la porción media y baja de la cuenca. La cuenca del río Locumba presenta elevada actividad geotermal, prueba de ello es la presencia de volcanes activos en zonas como Tutupaca y Yucamane, además de observarse una intensa actividad hidrotermal visible en la parte alta de la cuenca, con la presencia de aguas termales entre 30 y 90 grados, fumarolas y géiseres. (INGEMMET, 2009)

Frente a esta problemática, se hace necesario comenzar a brindar soluciones factibles y viables aplicables en esta población, por lo que es fundamental la puesta a punto de la tecnología de remoción de arsénico con la que se cuenta, para que sea lo suficientemente eficiente y se cumpla con los límites recomendados por las normas nacionales. Esta es la principal motivación para proponer el presente trabajo de investigación teniendo como objetivo la determinación de los parámetros de operación en un reactor batch y propuesta de dimensionamiento para la remoción de arsénico utilizando cloruro

férrico, los datos obtenidos contribuirán a establecer las condiciones en las que deben operar las plantas para lograr las mayores remociones de arsénico, así como los parámetros de dimensionamiento del equipo necesario para aplicar esta tecnología.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Dadas las condiciones y la coyuntura ambiental presente en nuestra región, y viendo la imperiosa necesidad de dar solución a este problema; es que se plantea el siguiente problema:

**¿Se podrá determinar los parámetros de operación en un reactor batch utilizando cloruro férrico que permitan la remoción de arsénico del río Locumba, Ite, para lograr el dimensionamiento de un floculador?**

## **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

En Ite, la población no cuenta con un suministro continuo de agua para el consumo humano, la producción de agua de la planta de tratamiento no alcanza los límites máximos permisibles, y el agua subterránea no es suficiente (en cuanto a caudal de abastecimiento), por lo que es necesario dar una alternativa de solución factible y de bajo costo a esta problemática real.

Además, debido a la alta toxicidad del arsénico, la ingesta de agua contaminada con arsénico es un problema de salud pública que enfrenta el mundo en la actualidad. La exposición crónica (a largo plazo) causada por beber esta agua puede producir un daño cutáneo único, como



hiperpigmentación, hiperqueratosis pápula e hiperqueratosis palmoplantar. Además, se ha observado que los cambios caracterizados por la pérdida gradual de la circulación y la cianosis en las extremidades pueden conducir a un tipo muy especial de gangrena llamada gangrena de Raynaud (también conocida como melanopatía), que puede llevar a la amputación. También hay bibliografía referida a diversas dolencias como problemas cardiovasculares, conjuntivitis e irritación cutánea y respiratoria. (Enriqueta et al. 2000)

Uno de los problemas más graves presente en el Perú, es el menoscabo de la calidad del agua natural, esto conlleva un obstáculo en su uso efectivo afectando la calidad y cantidad de su suministro. El más afectado es el poblador rural que no puede acceder a agua potable, tanto para su consumo y usos, debido a que los recursos naturales se encuentran contaminados. Uno de los metales pesados más tóxicos y con efectos acumulativos en el agua es el arsénico, causando graves consecuencias para los humanos. En zonas rurales, el problema de suministro de agua se agrava ya que las fuentes de suministro de son limitadas además de cumplir solamente con el control biológico necesario, no siendo ampliamente exigida e impuesta la normativa.

En general, los tratamientos para potabilizar el agua están orientados a remover turbidez, así como a los microorganismos fecales, lográndose a través de una adecuada combinación de procesos tales como: la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración y finalmente la desinfección. Sin

embargo, para remover algún elemento químico del agua como es el arsénico, las tecnologías empleadas son mucho más complejas, así tenemos: Absorción sobre alúmina activada, electrodiálisis, intercambio iónico y ósmosis inversa; estos tres últimos se caracterizan por utilizar resinas aniónicas o membranas específicas son acceso limitado por su alto costo y escasez en el mercado. Además, el consumo energético, así como de un mantenimiento y operación de plantas por personal calificado repercute en el costo del agua tratada. Por las razones anteriores, los procesos para la remoción de arsénico descritos anteriormente resultan muy costosos.

La USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), publicó un nuevo estándar para el arsénico, el cual estableció un límite máximo contaminante de 0,01 mg/l (10 ppb) y también identificó las mejores tecnologías disponibles (BATs) para lograr el cumplimiento de este nivel (para sistemas pequeños), y son las siguientes: (EPA Ohio, 2010)

- Intercambio iónico (IX)
- Alúmina activada (AA)
- Oxidación/filtración
- Ósmosis inversa (RO)
- Electrodiálisis inversa
- Coagulación mejorada/filtración
- Ablandamiento mejorado con cal

**Tabla 3***Resumen de las características de las tecnologías de tratamiento de agua*

Factores	Procesos de precipitación			
	Ablandamiento mejorado con cal	Mejorado (Convencional) Coagulación, Filtración	Coagulación Asistida por filtración directa	Oxidación Filtración
	LS	CF	CADF	OxFilt
USEPA BAT <sup>B</sup>	Sí	Sí	Sí	Sí
USEPA SSCT <sup>B</sup>	No	No	Sí	Sí
Tamaño del Sistema <sup>B,D</sup>	25 – 10 000	25 – 10 000	500 – 10 000	25 – 10 000
Pre – Oxidación requerida <sup>F</sup>	Sí	Sí	Sí	Sí
Habilidad requerida del operador	Alto	Alto	Alto	Medio
Condiciones óptima de calidad de agua	pH 10,5-11 <sup>I</sup> > 5 mg/l Fe <sup>+3</sup> <sup>I</sup>	pH 5,5-8,5 <sup>P</sup>	pH 5,5-8,5 <sup>P</sup>	pH 5,5-8,5 > 0,3mg/l Fe Fe: As relación >20:1
Residuos generados	Agua de retrolavado, lodos (Alto volumen)	Agua de retrolavado, lodos	Agua de retrolavado, lodos	Agua de retrolavado, lodos
Otras consideraciones	El agua tratada requiere ajuste de pH	Posible pre y post ajuste de pH	Posible pre y post ajuste de pH	Ninguno
Costos	Bajo <sup>Q</sup>	Bajo <sup>Q</sup>	Bajo	Medio

<sup>B</sup> USEPA, 2002<sup>a</sup><sup>D</sup> Económico para los sistemas con el número determinado de personas servidas.<sup>E</sup> Depende del arsénico y las concentraciones férricas.<sup>F</sup> Pre – oxidación solo es requerida para el Arsénico (III)<sup>I</sup> AwwaRF, 2002.<sup>P</sup> Fields, et al., 2002<sup>a</sup><sup>Q</sup> Los costes para LS mejorado y CF mejorado son basados en la modificación de una tecnología del existente. La mayoría de los sistemas pequeños no tendrán esta tecnología en el lugar.

BAT: Mejores tecnologías disponibles que logran con el cumplimiento del nivel de arsénico de 0,01 mg/L.

SSCT: Tecnologías de cumplimiento de sistemas pequeños

Fuente: (EPA Ohio, 2010)

En la Tabla 3 se muestra un resumen de las características de tratamiento de las tecnologías de precipitación publicada por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (USEPA) en el libro “Arsenical treatment technology evaluation handbook for small systems”. Como puede observarse en la Tabla 3, es posible llegar a remociones de arsénico del 95 % utilizando como coagulante el cloruro férrico y ajustando el pH. Así mismo, se puede utilizar la coagulación, pero esta no debe ser convencional, sino mejorada, esto quiere decir optimizada; acondicionando el agua o utilizando, ayudantes de coagulación o floculación. El presente trabajo acondicionará el agua muestra con el fin de tener mejores resultados en la remoción de arsénico. (EPA Ohio, 2010)

#### **1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

##### Alcances

- ✓ El presente trabajo de investigación se realizó a escala de laboratorio utilizando el test de jarras.
- ✓ Se realizaron los análisis básicos y suficientes para poder alcanzar los objetivos, considerando los equipos con los que se cuenta en el laboratorio de Procesos Químicos de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la UNJBG.
- ✓ Se realizaron análisis adicionales de arsénico y hierro total en el Laboratorio de Investigación de la UNJBG

### Limitaciones

- ✓ El estudio se realizó en época de estiaje, con ausencia de lluvias, debido a que las características del Río Locumba son constantes.
- ✓ Los análisis preliminares de arsénico e hierro total residual se realizaron utilizando kits de análisis semicuantitativos con rangos de medición por comparación.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar los parámetros de operación en un reactor batch y realizar la propuesta de dimensionamiento para la remoción de arsénico del agua del río Locumba, Ite, región Tacna, utilizando cloruro férrico.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Acondicionar el agua muestra (agua del Río Locumba no tratada destinada para consumo humano del distrito de Ite).
- Evaluar el efecto del pH, dosis de cloruro férrico y velocidad de agitación en la remoción de arsénico.
- Evaluar la eficiencia de remoción de arsénico total, hierro residual y determinar las condiciones adecuadas de operación.

- Dimensionar el floculador hidráulico de flujo horizontal utilizando el gradiente de floculación con el que se ha logrado la mayor eficiencia de remoción de arsénico total.

## **1.6.HIPÓTESIS**

### **1.6.1.Hipótesis general**

La determinación de los parámetros de operación en un reactor batch utilizando cloruro férrico permitió remover la concentración del arsénico total del río Locumba a los límites máximos permisibles exigidos en la normativa nacional, logrando la propuesta de dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal.

### **1.6.2.Hipótesis específica**

- El acondicionamiento del agua muestra (agua del Río Locumba no tratada destinada para consumo humano del distrito de Ite), y aplicación de diferentes dosis de Cloruro férrico (concentraciones en ppm de  $\text{FeCl}_3$ ), es óptima.
- El pH, dosis de cloruro férrico y tiempo de agitación afectan en la remoción de arsénico y hierro total.
- Las condiciones adecuadas de operación (pH, dosis de cloruro férrico y velocidad de agitación) permitieron obtener una elevada remoción de arsénico y hierro total, siendo estos menores a los límites máximos permisibles.

- El gradiente de velocidad determinado es en el que se presenta una elevada remoción de arsénico utilizando cloruro férrico, permitiendo realizar la propuesta de dimensionamiento del floculador.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

Existen varios autores y organizaciones que han publicado artículos y libros de las tecnologías para la remoción de arsénico identificando al cloruro férrico o sales de hierro como los mejores coagulantes con los que se ha obtenido los mejores resultados entre estos se tienen:

Baskan y Pala (2009) realizaron la remoción de arsénico del agua potable mediante el método de precipitación y coprecipitación utilizando como coagulantes metálicos al cloruro férrico, sulfato ferroso y sulfato férrico. Lograron determinar los efectos de las variables más significativas que fueron la concentración inicial arseniato ( $10 - 1000 \text{ g L}^{-1}$ ), la dosis de coagulante ( $0,5-60 \text{ mg L}^{-1}$ ) y pH (4-9) a través de un diseño experimental. Encontraron un porcentaje alto de correlación con los modelos cuadráticos escogidos, los valores experimentales y los predichos de remoción de arsénico. Los iones de hierro (III) fueron más eficientes y económicos que los iones Hierro (II) debido al uso de menores dosis de coagulante de hierro (III) que las de hierro (II) y condiciones de pH con rangos más amplios de trabajo. Las mayores eficiencias de remoción para bajas concentraciones iniciales de



arseniato se lograron con altas concentraciones de cloruro férrico 40 mg/L y sulfato férrico 50 mg/L, mientras que para dosis iniciales elevadas de arseniato las más altas eficiencias de remoción se lograron con dosis de menores de cloruro férrico 37 mg/L y sulfato férrico 32 mg/L. Este estudio mostró que el diseño de superficie de respuesta y metodología Box-Behnken fue fiable y eficaz en la determinación de las condiciones óptimas para la eliminación de arsénico por coagulación y floculación. (Baskan & Pala, 2009)

Franco M. (2014) realizó numerosos ensayos utilizando como base la coagulación-floculación con el objetivo de determinar qué tan eficiente es este proceso en la eliminación del arsénico en el agua para consumo humano. Para ello, buscó identificar los principales factores que controlan la remoción de este metal en agua para su posterior evaluación. Se realizaron más de cien experimentos aplicando las variaciones de las siguientes variables: Dosis de coagulante desde 5 mg/l hasta 500 mg/l, la concentración inicial de arsénico desde 0,5 hasta 5 mg/l, mientras que la concentración partículas sólidas varió desde 0 hasta 6000 mg/l. Los porcentajes de remoción de arsénico que variaron de 0 hasta 95 %, como fue en caso del cloruro férrico, mientras que del 80 % agregando sulfato de aluminio en soluciones con arseniato. La eficiencia de la remediación disminuyó considerablemente en dosis mayores a 50 mg/l de cloruro férrico en comparación con los resultados obtenidos con

el sulfato de aluminio. En soluciones oxidadas se obtuvieron las mayores remociones de arsénico a un pH entre 3 y 5. (Franco & Carro, 2014)

Se investigó la remoción de As (III) y As (V) por coagulación de sales férricas bajo las influencias de la matriz química, con especial énfasis en el papel del potencial zeta y el tamaño de los precipitados. Los resultados indican que la eficiencia de remoción del arsénico (III) aumenta con el aumento del pH de la solución, pero no se encontró correlación con el potencial zeta de los precipitados. Por el contrario, la mayor remoción del arsénico (V) se produjo en el rango de pH de potenciales zeta positivos y su eficiencia de remoción se redujo significativamente cuando los precipitados se volvieron más negativos a valores altos de pH. La importancia relativa de los dos mecanismos de remoción del proceso de coagulación; co-precipitación y adsorción, se mostró que eran dependientes del pH de la solución. Los tamaños de los precipitados inicialmente formados estuvieron en el intervalo coloidal, los precipitados con los mayores tamaños se lograron en el punto isoeléctrico (IEP). Los tamaños de precipitado influyeron en la concentración de hierro residual a ciertos valores de pH después de la microfiltración y la filtración por arena; sin embargo, mostraron un efecto mucho menor en la eliminación de arsénico. Las concentraciones de electrolito mostraron un efecto notable en el tamaño precipitado, pero sólo un pequeño efecto sobre la eliminación de arsénico. El ácido húmico exhibió una

profunda influencia tanto sobre el potencial zeta, el tamaño de los precipitados y la eliminación de arsénico. (Wang et al. 2014)

Bordoloi, (2013) Realizó un proceso de tratamiento de tres etapas que implicó (i) el acondicionamiento del pH utilizando  $\text{NaHCO}_3$ ; (ii) la oxidación de iones arsenito e iones ferrosos utilizando  $\text{KMnO}_4$  auto-precipitándose con  $\text{MnO}_2$  insoluble bajo condiciones de pH establecidos y (iii) la coagulación utilizando  $\text{FeCl}_3$  para la remoción simultánea de arsénico e hierro del agua. El agua tratada se filtra después de un tiempo de residencia de 1 a 2 h. Se llevaron a cabo experimentos de laboratorio en sistema batch para optimizar las dosis. Un ensayo de campo se llevó a cabo con las condiciones de operación optimizadas en laboratorio a 30 hogares y 5 escuelas de algunas poblaciones altamente afectadas por arsénico en Assam, India. Para concentraciones iniciales de arsénico de 0,1 – 0,5 mg/L y concentraciones iniciales de hierro de 0,3 – 5,0 mg/L; se logró remociones simultaneas de arsénico e hierro a concentraciones alrededor de 5  $\mu\text{g/L}$  y 0,1 mg/L, respectivamente, a condiciones de pH entre 7,0 y 7,5 y tiempos de residencia de 1 h. El proceso también elimina otros elementos pesados, si están presentes, sin dejar ningún residuo tóxico adicional. La pequeña cantidad de lodo sólido que contiene principalmente ferrihidrita con arseniato adsorbida pasó el procedimiento de la prueba de toxicidad característica de lixiviación (TCLP). El costo estimado es de aproximadamente 0,16 USD /  $\text{m}^3$  de agua

purificada. Una alta eficiencia, un muy bajo costo, seguridad, no requerimiento de energía y simplicidad de operación hacen una tecnología potencial de aplicación técnica en las zonas rurales. (Bordoloi et al. 2013)

Coagulación y filtración: Esta es una de la tecnología que comúnmente se utilizan para la remoción de arsénico en el agua. La forma en la que se elimina el arsénico en cuando se encuentra con su valencia cinco de este modo logra ser adsorbido sobre flóculos para después ser eliminados por filtración. Por lo tanto, el arsénico (III) tiene que ser oxidado previamente, generalmente con cloro (Kartinen y Martin, 1995, citado en Litter, Morgada y Bundschuh, 2010). En la actualidad, los coagulantes que tienen mayor aceptación y uso son: Cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ), sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), y sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ), siendo, las sales de hierro excelentes agentes de remoción, como por ejemplo, el cloruro férrico que genera grandes flóculos, mientras que más pequeños se forman con  $\text{FeSO}_4$  (Edwards,1994;.Hering et al,1997; Newcombe y Moller, 2008; Pirnie, 2000; Ravenscroft et al.,2009 citados en Litter, Morgada y Bundschuh, 2010).

En el país vecino del sur, Chile, existen plantas que utilizan la tecnología de coagulación fueron instaladas en los años 70, pasando a formar parte de un la solución de la problemática del arsénico para las pequeñas y medianas ciudades (Sancha y Ruiz, 1984; Sancha, 1999, 2000, 2003, 2006; Sancha y Fuentealba, 2009 citados en Litter, Morgada y Bundschuh,2010).

La primera planta, mediante filtración directa y  $\text{FeCl}_3$  como coagulante se instaló en 1970 en Antofagasta (complejo de El Salar del Carmen). Otras plantas para remoción de arsénico son las de Chuquicamata (Sancha, 2006, citado en Litter et al., 2010) y Taltal (Sancha, 2006; Sancha y Fuentealba, 2009 citados en Litter, Morgada y Bundschuh, 2010).

En Argentina, el Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS) de la Universidad Nacional de Rosario desarrolló el proceso ArCIS-UNR, que utiliza un método de coagulación-adsorción con cloruro de policloruro de aluminio (PAC) o cloruro férrico, seguido de una doble filtración. La tecnología ha demostrado alcanzar el 80-90 % de la remoción de As (Ingallinella et al, 2003; Ingallinella, 2006; Litter et al, 2008). Más tarde, diversas plantas pequeñas y medianas se han implementado con éxito en Argentina con esta metodología. (Litter et al 2010)

En Costa Rica, se desarrolló un estudio que da a conocer dos soluciones para eliminar el arsénico a nivel domiciliario. La primera consistió en remover el arsénico utilizando el sistema de oxidación solar (SORAS) y la otra, utilizando un proceso de coagulación y floculación. Utilizando el sistema SORAS se necesitan entre dos y cuatro horas de exposición en un día soleado o nublado para reducir la concentración de arsénico de 200  $\mu\text{g/L}$  a menos del valor indicado en la norma (10  $\mu\text{g/L}$ ). En el caso del proceso de coagulación-floculación, las condiciones óptimas para obtener resultados conforme a la

norma, fueron las siguientes: con floculante sintético, a un pH de 6, con 1 mg/l de FK-930-S (polímero de cloruro de polidialil-dimetilamonio) y 12 mg/l de cloruro férrico; con floculante natural el pH fue 6 con 250 mg/l de mozote (*Triumfetta semitriloba*), con 14 mg/l de cloruro férrico. El prototipo fabricado constó de un contenedor para la coagulación-floculación y otro contenedor que fue utilizado como filtro de arena logrando tratar 15 litros de agua sintética con 200 µg/l de arsénico y agua natural con 10 y 50 µg/l de arsénico. Sin embargo; se recomienda incluir aspectos como capacitación y aceptación al momento evaluar ambas técnicas en alguna comunidad. (Rojas et al. 2015)

En México, se realizó un estudio de remoción de arsénico en aguas subterráneas de La Comarca Lagunera en Monterrey, en el que se encontró que para remover arsénico se puede utilizar mecanismos de Oxidación/Precipitación/Filtración, usando cloruro férrico principalmente. Este sistema puede ejecutarse en cualquier planta de coagulación y posterior filtración ya existente. Por otro lado, el coagulante cloruro férrico es bastante asequible, de fácil manejo y aplicación. La dosis de cloruro férrico con la que se logró remover arsénico hasta el límite máximo permitido por la Modificación a la NOM 127 Ssa1 que es de 0,025 mg/L de arsénico, fue una dosis de 48 mg/l, siendo no necesario aplicar una dosis mayor como fue la de 60 mg/l con la que se logra una remoción del 100%. Después de la filtración,

se hizo una comparación y se obtuvo que la concentración de arsénico resultante del tratamiento sí presenta una variación significativa ya que el filtrado alcanzó un 99 % de remoción. Finalmente, después de realizado todo el proceso, se obtuvo que la dosis óptima de cloruro férrico es 24 mg/l, siendo esta la cantidad suficiente para alcanzar la concentración de arsénico menor a la señalada por la norma. En cuanto al hierro, los análisis arrojaron que se puede utilizar hasta 30 mg/l de cloruro férrico y se cumplirá con 0,3 mg/l de hierro total que indica la norma como límite máximo de. Se concluye, por lo tanto, que es posible utilizar este tipo de tecnología para remover arsénico del agua de pozo de la Comarca Lagunera con cloruro férrico, ya que es de bajo costo y fácil mantenimiento. el uso de una tecnología de bajo costo. (Aguilar, 2005)

El pH es uno de los factores más importante en la eficiencia del proceso de coagulación para la remoción de arsénico del agua, ya que influye en la determinación de especie de arsénico, así como en el aumento de sitios con carga positiva en las partículas de hidróxidos de hierro (III) y aluminio (III) y además, influye en la solubilidad de estos. A concentraciones normales de agente coagulante, en procesos de tratamiento de aguas, el rango de pH en el cual el hidróxido sólido amorfo es estable es más estrecho para el aluminio que para el hierro (III) y, por lo tanto, el uso de sulfato de aluminio (alumbre)

para remoción de As se restringe a un rango de pH más estrecho que el que corresponde al uso de cloruro férrico. (Litter et al 2010)

Bajo condiciones comparables, varias investigaciones demuestran que, es menos eficiente la remoción de arsénico (III) por coagulación utilizando agentes coagulantes como cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato de aluminio que la remoción de arsénico (V). (Chwirka, J. et al.,2000, Gullledge, J.H. et al. 1973, Sorg, T.J., Logsdon, G.S., 1978 citados en Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010). La siguiente tabla muestra algunos de estos antecedentes.

**Tabla 4**

*Eficiencia de remoción según estado de oxidación del arsénico*

Coagulante	Eficiencia de remoción (%)	
	As (III)	As (V)
Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ )	0 – 20	70 – 80
Cloruro Férrico ( $FeCl_3$ )	40 – 70	80 – 100

**Fuente:** (Litter et al. 2010)

La tecnología de tratamiento de aguas en base a procesos de coagulación, ampliamente utilizada para potabilización de aguas por sus bajos costos de operación y mantenimiento, ha demostrado ser altamente eficiente para remover arsénico, permitiendo alcanzar concentraciones residuales de  $10 \mu g L^{-1}$ . (Litter et al. 2010)

Castro (2004) menciona en lo referente a las tecnologías de coagulación y filtración; que la remoción de arsénico del agua mediante coagulación con



sales de hierro y aluminio, y posterior ablandamiento con hidróxido de sodio dependen el tipo y la dosis del coagulante, la concentración inicial de arsénico y el pH del agua tratada. Así mismo, muestra las eficiencias de remoción del arsénico utilizando diferentes tipos de coagulantes en cual para la presente tesis nos interesa enfocarnos en la remoción con cloruro férrico. (Castro et al. 2004)

Mondal, Majumder, & Mohanty (2006) muestran una tabla de comparación entre los métodos de remoción de arsénico por distintas tecnologías especificando las eficiencias de remoción. En donde puede verse que las tecnologías con precipitación con sales de hierro logran remociones de arsénico total hasta concentraciones menores iguales a 20  $\mu\text{g/L}$  (la norma nacional exige concentraciones menores a 10  $\mu\text{g/L}$ ). La Tabla 5 muestra lo comentado.

**Tabla 5***Remoción de arsénico por coagulación*

<b>Especies Arsenicales</b>	<b>Método de tratamiento</b>	<b>Dosis de coagulante (mg/l)</b>	<b>C. inicial (mg/l)</b>	<b>Remoción (%)</b>	<b>pH</b>
As <sup>+5</sup>	FeCl <sub>3</sub>	5	0,050	100	7,0
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	6	0,005	72	8,0
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	18	0,005	84	8,0
*	Aereación, coagulación con alúmina, sedimentar 6 días y filtración	7	0,8	70	7,4
*	Aereación, coagulación con FeCl <sub>3</sub> , sedimentar 10 días y filtración	18,5	0,69	60	7,4
*	Aereación, coagulación con alúmina, sedimentar 12 días y filtración	21	0,70	46	7,4
*	Cloro (20 mg/l), oxidación, aereación, coagulación con FeCl <sub>3</sub> , sedimentar 20 días y filtración	51	0.83	100	7
*	FeCl <sub>3</sub>	30	1	92	6,8
As <sup>+5</sup>	FeCl <sub>3</sub>	20	0,045	96	7,5
As <sup>+5</sup>	FeCl <sub>3</sub>	40	0,045	95	7,5
As <sup>+5</sup>	FeCl <sub>3</sub>	40	0,043	97	8
As <sup>+5</sup>	Sulfato de aluminio	60	0,043	97	8
As <sup>+5</sup>	Coagulación con sulfato de aluminio	30	<1 – 2	±90	6,4 – 7,5
As <sup>+5</sup>	Coagulación con sulfato férrico	30	< 1 / 2	>90	6,4 – 7,5
As <sup>+3</sup> , As <sup>+5</sup> y arseniato de metano	Cloruro férrico	*	30 – 40	90 – 95	5,5
As <sup>+5</sup>	Alúmina	>5	0,2	97,5	7,0
As <sup>+5</sup>	Sulfato férrico	5	0,2	97,5	7,0
As <sup>+5</sup>	Óxido de manganeso hidratado	20	0,2	76	7,0

(Continúa)

(Continuación de Tabla 5)

Especies Arsenicales	Método de tratamiento	Dosis de coagulante (mg/l)	C. inicial (mg/l)	Remoción (%)	pH
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	200	31	86	10,0
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	500	31	92	10,0
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	1000	31	93	10,0
As <sup>+5</sup>	Adición de hierro electroquímico, oxidación con peróxido de hidrógeno, sedimentación y filtración	*	56	99,8	6,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato férrico	10	0,2	62	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato férrico	10	0,2	75	7,5
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	10	0,2	76	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato cúprico	10	0,2	88	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con cloruro cuproso	10	0,2	85	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con cloruro de zinc	10	0,2	84	7,5
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	300	100	78	8,0
As <sup>+3</sup>	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	625	100	82	8,0
As <sup>+3</sup>	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	300	100	85	8,0
As <sup>+3</sup>	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .18H <sub>2</sub> O	300	100	73	8,0
*	KMnO <sub>4</sub> (13,8 mg/L), oxidación, coagulación con sulfato férrico y filtración	28	0,7	86	7,4

**Fuente:** \*Información o dato no proporcionado por los autores. (Viraraghavan, 1996) (Castro et al 2004)

La USEPA, (2000) muestra una tabla resumen de las características de tratamiento de las tecnologías de precipitación para alcanzar residuales de arsénico de 0,01 mg/L equivalente a 10 µg/L (valor que se exige en la normativa internacional y peruana para agua de consumo humano) (Tabla 6).

**Tabla 6***Comparación entre procesos convencionales de remoción de arsénico*

<b>Procesos</b>	<b>Características principales</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Precipitación con alumbre	pH $\leq$ 6,5; A.O.A.C $\leq$ 20ppb, R.E. = 20 – 90 % OPC = Medio	Proceso bien establecido, conveniente para uso en casa	Uso de productos químicos; generación de lodos contaminantes con arsénico; la dosis de agente oxidante tiene una alta influencia en la eficiencia de remoción.
Precipitación con Hierro	pH = 6 – 8 A.O.A.C $\leq$ 20ppb, R.E. = 60 – 90 % OPC = Medio	Probado y confiable	Uso de productos químicos; generación de lodos contaminantes con arsénico; la dosis de agente oxidante tiene una alta influencia en la eficiencia de remoción.
Electrodialisis	pH = 7 – 9 A.O.A.C $\leq$ 3ppb, R.E. = 95 % OPC = Alto	Calidad de agua pura	Tecnología no muy probada; costosa; necesita agente oxidante
Intercambio Iónico	pH = 7,5 A.O.A.C $\leq$ 2 ppb, R.E. $\geq$ 90% OPC = Alto	Puede producir agua tratada con concentraciones de arsénico menores a 2 ppb	La eficiencia de remoción es afectada por los iones sulfato, nitrato, fluoruros, sólidos disueltos, selenio, etc.
Ablandamiento con Cal	pH $\geq$ 10,5; A.O.A.C $\leq$ 10ppb, R.E. = 80 – 90 % OPC = Alto	Probado y confiable, reduce la corrosión	Los iones sulfatos influyen en la eficiencia de remoción; requiere un tratamiento secundario; se usa productos químicos.

(Continúa)

(Continuación de Tabla 6)

Procesos	Características Principales	Ventajas	Desventajas
Precipitación con Fe/Mn	pH > 7; A.O.A.C ≤ 10 ppb, R.E. = 40 – 90 % OPC = Medio	Probado y confiable	Muy alto y bajo pH reduce la eficiencia de remoción, usa productos químicos; generación de lodos contaminantes con arsénico; la dosis de agente oxidante tiene una alta influencia en la eficiencia de remoción.
Ósmosis inversa	A.O.A.C ≤ 2 ppb, R.E. ≥ 90% OPC = Alto	Agua de alta calidad; amplio rango de tratamiento para sales disueltas.	Instalación y operación de costo elevado; monitoreo frecuente de las membranas, control de pH, temperatura y presión para cumplir con la tolerancia de la membrana.
Adsorción sobre alúmina activada	pH = 5,5 - 6,0; A.O.A.C ≤ 1 ppb, R.E. ≥ 90% OPC = Bajo	Conveniente para uso en casa; reemplazo simple de accesorios requeridos y de bajo costo	Monitoreo cuidadoso; la efectividad está en base al tipo de contaminación, las bacterias pueden desarrollarse sobre la superficie de la alúmina.
Adsorción sobre carbón activado	pH = 2 - 9; A.O.A.C ≤ 7 ppb, R.E. = 30 - 90% OPC = Bajo	Reemplazo simple de accesorios requeridos y de bajo costo	La eficiencia de remoción depende del contenido de ceniza de carbón y la concentración del metal sobre el carbón; tecnología no probada.

**Fuente:** (Mondal et al. 2006)

**A.O.A.C:** Concentración de arsénico en el efluente; **R.E.:** Eficiencia de Remoción **OPC:** Costo de operación.

En la región Tacna, también han sido realizadas investigaciones referentes a la problemática del arsénico por docentes que pertenecen a esta casa superior de estudios Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, entre las que tenemos, “Remoción de arsénico de las aguas de consumo humano del Distrito de Huanuara – Tacna”, a cargo del Dr. Edilberto Mamani López, en el cual se utiliza hierro cero y prueba de jarras, obteniendo un 95% de remoción de arsénico. (Mamani, 2014)

Así también, en “Remoción de Arsénico del Río Sama utilizando la Metodología de hierro cero Valente (Cuenca del Río Sama, Provincia de Tacna)”, en el que la tecnología hierro cero valente, se complementó con citrato y radiación solar. Se utilizó la lana de acero comercial como fuente de hierro, mientras que el citrato fue obtenido de los limones adquiridos en centros de abastos locales, siendo insumos de bajo costo y de fácil acceso, por lo que constituyen una excelente alternativa de solución de bajo costo a nivel domiciliario para el agua del río Sama, para lo cual se propuso un experimento con diseño factorial  $2^2$ , con el objetivo de establecer la influencia de los factores: cantidad de limón (gotas) y hierro (g), manteniendo constante el tiempo de sedimentación y el tiempo de radiación solar. Los resultados que se obtuvieron mostraron que el único factor significativo fue la cantidad de hierro (g). En cuanto al comportamiento del proceso se determinó que fue lineal con un  $R^2 = 75,63 \%$ . De las cinco

diferentes condiciones experimentales, en la que se aplicó una gota de limón y 2 gramos de lana de acero se logró la mayor remoción de arsénico en un 98%. (Avendaño & Mamani, 2013).

Así también, en el “Estudio de la remoción de arsénico del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de acero complementado con aireación y propuesta de diseño de un reactor batch”, el autor combina en el proceso el uso de lana de acero con la aireación para remover arsénico en aguas del río Sama a nivel domiciliario. Los experimentos se realizaron en un reactor batch utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR) con un total de 15 tratamientos. Las variables fueron: pH de 6 a 8,14; masa de hierro de 0,5 a 1,5 g y tiempo de contacto de 50 a 70 min; se mantuvieron constantes el caudal de aireación ( $Q_a$ ) de 1 l/min y volumen ( $V$ ) de agua de 1 litro. En los resultados se observaron remociones con concentraciones de arsénico desde 0,05 a 0,005 mg/l, los que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles según la normativa. En cuanto al análisis de regresión múltiple se obtuvo un r-cuadrado igual a 0,9058 y un r-cuadrado ajustado igual a 0,736, destacando factores como el pH y tiempo de contacto, mientras que fueron significativos también la interacción de pH y tiempo de contacto. Además, se realizó la propuesta diseño del reactor batch para un volumen de 10 litros, una masa aplicada de 15 g de lana de acero,

un pH natural de 8,14 y un tiempo de contacto de 70 min, considerando un caudal de aireación constante de 10 l/min. (Larico, 2019)

Finalmente, en el trabajo “Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución de cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del Río Uchusuma (Provincia de Tacna) y propuesta de diseño de un reactor batch a nivel domiciliario” el objetivo fue calcular el porcentaje de cloruro férrico que debía ser sustituido por almidón de yuca en el proceso. Para ello realizó una metodología de superficie de respuesta (MSR) con el que se determinó la influencia de diversas variables en el proceso de clarificación, las fueron proporción de coagulante (%), velocidad de agitación (rpm), tiempo de sedimentación (min) y tiempo de agitación (min). Para la remoción de arsénico total, las variables significativas fueron la dosis del coagulante (%) y la velocidad de agitación (rpm) obteniéndose una remoción menor a 0,005 mg/l de arsénico total y 0,15 mg/l de hierro total; además se logró reemplazar el cloruro férrico en un 40 % por almidón de yuca. (Gutiérrez, 2019)



## 2.2. BASES TEÓRICAS

### 2.2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende el río Locumba perteneciente a la localidad de Ite, Distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, la cual forma parte de la Cuenca Locumba.

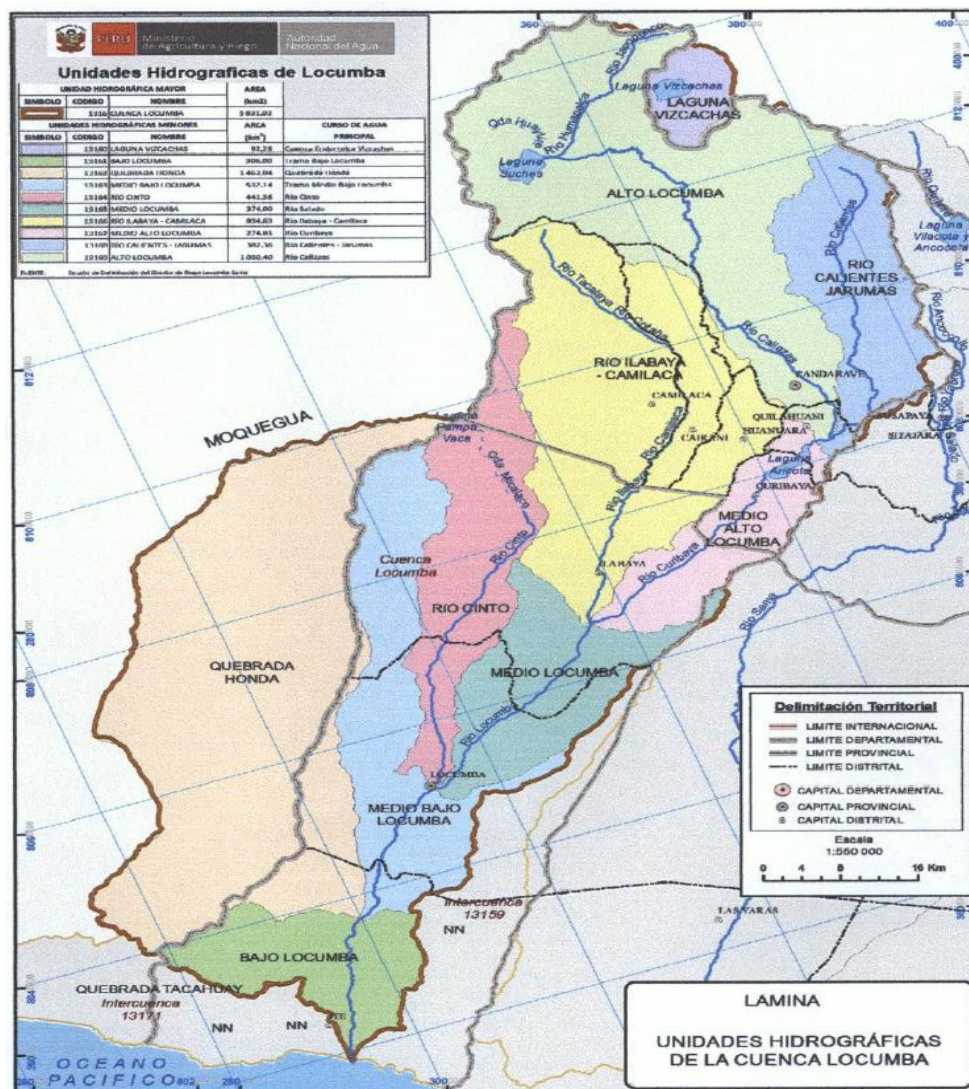


Figura 1: Mapa de ubicación de las unidades hidrográficas de la Cuenca Locumba.

Fuente: (ALA, 2016)



Figura 2: Localidad de Ite  
Fuente: Elaboración Propia, 2019

### **Cuenca Locumba**

Ubicada entre las coordenadas geográficas  $70^{\circ}06''$  y  $71^{\circ}05''$  de Longitud Oeste y  $16^{\circ}47''$  y  $17^{\circ}54''$  de Latitud Sur. La cuenca de Locumba está en los departamentos de Moquegua y Tacna, ocupando parte de las provincias de Candarave, Tacna, Jorge Basadre, Tarata, General Sánchez Cerro y Mariscal Nieto. Los límites de la cuenca son: por el Sur Océano Pacífico, por el Norte la divisoria de los ríos Vizcachas y Chilota, por el Oeste cuenca del río Moquegua y por el Este, cuenca del río Sama. (ALA-Tacna, 2010)

La parte de la cuenca del río Locumba que se encuentra en Tacna, cuenta con un área de 5 742,3 km<sup>2</sup>, sin embargo, solo 505 km<sup>2</sup> corresponden a la cuenca húmeda ubicada por encima de los 3900 m.s.n.m. y que además aporta considerablemente a los recursos superficiales que nacen en la parte alta de la región. Las nacientes del río Locumba corresponden a la vertiente del Pacífico, los que se desplazan principalmente en dirección Noreste-Sureste. (ALA, 2016)

El régimen del río es turbulento, este río es el más irregular de la zona sur ya que presenta una gran variabilidad además de grandes diferencias entre sus descargas, en ocasiones extremas, en el verano es alimentado en el por lluvias, con un 76 % de las descargas, las otras estaciones del año es abastecido por deshielo de glaciales o fuentes de agua subterránea. Esta cuenca cuenta con un embalse natural que regula su caudal que es la laguna Aricota, esta también almacena las aguas de los ríos Callazas y Salado, sus descargas son aprovechadas con fines de uso agrícola y poblacional, y producción de energía eléctrica. (ALA, 2016)

### **Hidrografía**

Los ríos Ilabaya y Curibaya controla la hidrografía de esta cuenca por medio de las estaciones de El Cairo y Ticapampa, respectivamente, en las que se miden las descargas de las cuencas colectoras, las que tienen una extensión aproximada de 955 km<sup>2</sup> en el río Ilabaya y 225 km<sup>2</sup> en el río Curibaya.

La cuenca es bastante alargada con un relieve accidentado, de fondo quebrado, profundo y de pendientes pronunciadas; está limitada por cerros que muestran un descenso rápido y sostenido del nivel las montañas hacia el Océano Pacífico. En la parte superior de la cuenca se encuentran numeroso Lagos y Lagunas de origen pluvial; y como resultado de la brusca disminución de pendiente en su parte inferior, se observa la formación de una llanura pequeña de materiales transportados y depositados por el río.

El escurrimiento superficial se origina por las lluvias a lo largo de las laderas del lado oeste de la Cordillera, el aporte de los deshielos de los nevados y las filtraciones de la Laguna Aricota. Gracias a la información de las lluvias se ha podido establecer que estas se producen principalmente desde enero hasta abril, por lo que el período de estiaje comprende desde junio hasta agosto.

Sus afluentes principales son: por la margen izquierda, el río Curibaya (230 km<sup>2</sup>) y, por la margen derecha, el río Cinto (445 km<sup>2</sup>) y la quebrada Honda (1 580 km<sup>2</sup>). Es importante recalcar que los aportes que originan al río Curibaya provienen de filtraciones de la Laguna Aricota (1 440 km<sup>2</sup>), la que también es alimentada por el río Callazas (1 015 km<sup>2</sup>) y río Salado (375 km<sup>2</sup>); teniendo el río Callazas su nacimiento en la Laguna Suches, que a su vez recibe descargas de los ríos Humapalca y Huaitire, además de los deshielos y las precipitaciones de la zona. (ALA-Tacna, 2010)

Se van a diferenciar claramente tres zonas en La Cuenca Hidrográfica Río Locumba, siendo las siguientes: (ANA, 2013)

- La cuenca Alta, que abarca desde la laguna Suches hasta la laguna Aricota, y abarca los ríos Callazas, río Matazas, Salado y el río Tacalaya.
- La cuenca Media, localizada en el valle de Locumba, y abarca los ríos Curibaya, Ilabaya y el Cinto hasta las inmediaciones del poblado de Camiara.
- La Cuenca Baja, desde el poblado de Ite, hasta la desembocadura en los humedales de la bahía con el mismo nombre.

La cuenca del Locumba cuenta con trasvases desde la parte alta de la cuenca del Maure y del Sama hasta la laguna Aricota a través de dos túneles Kovire e Ichicollo, así también desde esta cuenca alta hacia las minas de Toquepala y Cuajone para la explotación de este recurso de manera subterránea y superficial de las lagunas Suches, Vizcachas y acuíferos asociados y, finalmente en la cuenca baja también existe un trasvase hasta el poblado de Ilo por las cercanías de la captación del canal de Ite.

Los ríos Callazas y Salado en su camino hacia la cuenca media y baja llegan a la laguna Aricota por lo que constituye una barrera natural al libre discurrir de sus aguas. La empresa hidroeléctrica EGESUR utiliza esta fuente para generar electricidad, una vez realizado el proceso el caudal utilizado es retornado 20 km aguas abajo en el cauce del río Curibaya, sin interrumpir el

flujo de esta cuenca. Así también, los aportes de filtraciones naturales de la laguna a este río son bastante significativas. (ANA, 2013)

### **2.2.2. El Arsénico**

El arsénico con el número atómico 33 se localiza en el grupo VA de la tabla periódica, directamente debajo de fósforo. Debido a su similitud físico-químico con el fósforo, el arsénico que es ingerido en el cuerpo humano a menudo rompe el ciclo de ATP y del sistema del metabolismo reemplazando el fósforo. El arsénico es el 20avo elemento más abundante en la corteza de la tierra, 14avo en el agua de mar, y el 12avo elemento más abundante en el cuerpo humano. El arsénico forma compuestos inorgánicos y orgánicos y puede existir en el ambiente en varios estados de oxidación (-3, 0, +3, +5). (Pal, 2016)

#### **2.2.2.1. Fuentes de arsénico en la biósfera**

El arsénico (As) es un no metal presente en la biósfera formando un mínimo porcentaje de la litósfera (0,00005 %), presentándose en dos formas: Orgánica o inorgánica. (Castro de Esparza, 1999). El arsénico es un natural componente de la corteza de Tierra y se encuentra en aproximadamente 320 formas minerales en las rocas. El arsénico puede entrar en los ambientes terrestres y acuáticos vía procesos geológicos naturales y actividades antropogénicas. Las principales fuentes de arsénico natural y antropogénico se describen en la Figura 3. (Flora, 2014)

El arsénico se moviliza en el medio ambiente a través de diversos procesos naturales y una variedad de actividades antropogénicas. Las actividades antropogénicas generalmente incluyen la minería, la combustión de combustibles fósiles, desecantes para cultivos, herbicidas y el uso de pesticidas arsenicales, además del uso de arsénico como agregado para la alimentación del ganado, en particular para las aves de corral. El arsénico puede ingresar al cuerpo humano a través del agua potable, la inhalación y la dieta, pero sobre todo el agua potable probablemente posee la mayor amenaza para la salud humana. El agua potable contiene arsénico en diversas concentraciones dependiendo de la fuente.



Figura 3: Principales fuentes naturales y antropogénicas que permiten el ingreso de arsénico al medio ambiente.  
Fuente: (Flora S. J., 2014)

Por lo tanto, como menciona Castro (1999), el agua es la vía principal de dispersión de arsénico en el ambiente. Aun teniendo en cuenta la sedimentación, la solubilidad de los arsenitos y arseniatos, esta basta para transportar este elemento a cualquier sistema acuático. Las concentraciones de arsénico en aguas naturales son cambiantes y dependes de las formas existentes de arsénico en el sustrato. (Castro, 1999)

#### **2.2.2.2. El arsénico en el agua natural**

La concentración de arsénico en el agua del río depende de la litología del lecho rocoso, la contribución del flujo de base, la recarga de la superficie y los efluentes industriales o de aguas residuales. El aumento de las concentraciones de arsénico se encuentra en áreas donde el agua fluye hacia el agua de la superficie desde las rocas circundantes y aumenta el pH y la alcalinidad del agua resultante. (Flora S. J., 2014)

Debido a la alta tasa de evaporación, la meteorización de las rocas volcánicas y las actividades geotérmicas, también se encuentran altas concentraciones de arsénico en el agua de lago. La estratificación térmica en el agua de lago también afecta la concentración de arsénico y se encuentra que aumenta a profundidades de hasta 10 m debido a la proporción creciente de As (III) a As (V) y al flujo de agua contaminada en la minería. La concentración de As (III) aumenta en verano debido a la disminución de los niveles de oxígeno disuelto y al aumento de la productividad biológica en el



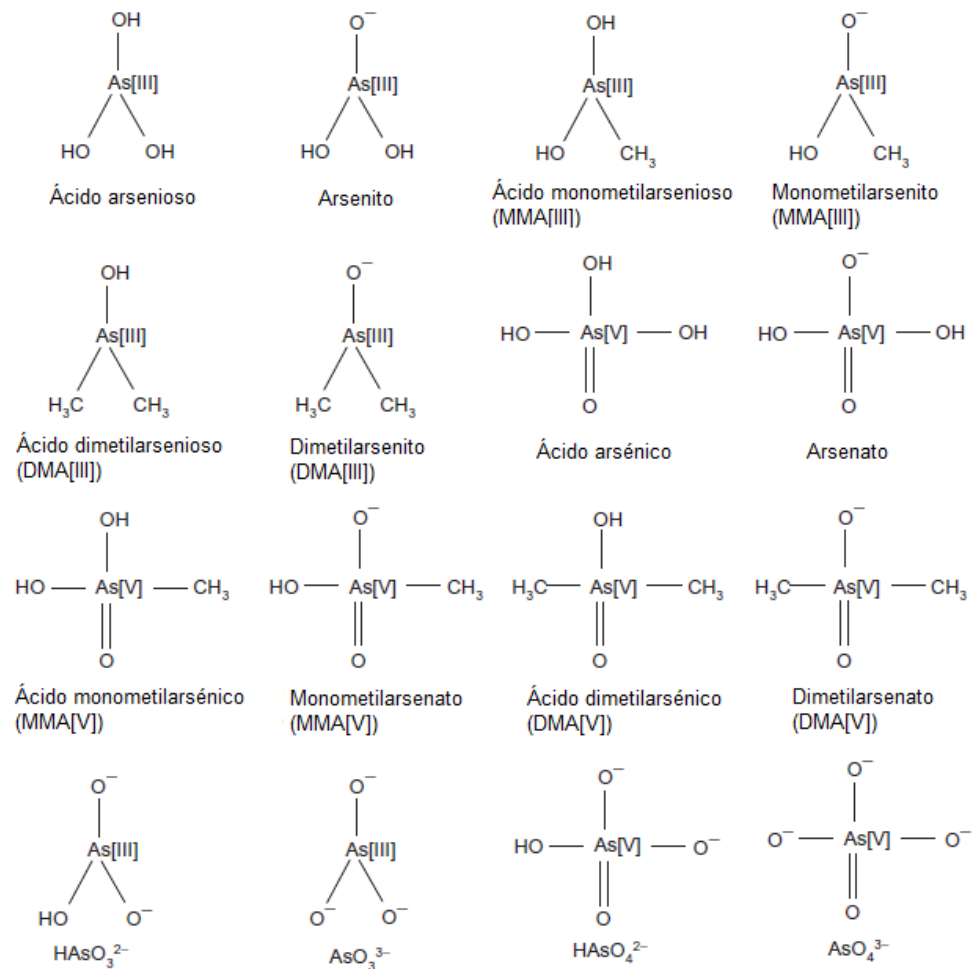
agua del lago más profundo. En aguas lacustres y fluviales, As (V) es generalmente la especie dominante, variando según la variación estacional, las condiciones redox, la temperatura y la actividad biológica. Durante el verano, el As (III) se puede detectar en el agua debido a la reducción biológica del As (V). (Flora S. J., 2014)

### **2.2.2.3. Química del arsénico**

El arsénico forma compuestos inorgánicos y orgánicos y puede ocurrir en el medio ambiente en varios estados de oxidación (-3, 0, +3, +5). En el agua natural, el arsénico se presenta principalmente en formas inorgánicas como oxianiones de arsenito trivalente (+3) o como arseniato pentavalente (+5). (Pal, 2016)

Los compuestos inorgánicos de arsénico incluyen hidruros (por ejemplo, arsina), haluros, óxidos, ácidos y sulfuros. Los ejemplos de compuestos de óxido de arsénico inorgánico incluyen  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{As}_2\text{O}_5$  y sulfuros de arsénico como  $\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{HAsS}_2$  y  $\text{HAsS}_3^{3-}$ . Los dos estados de oxidación predominantes en las aguas subterráneas y superficiales son arseniato (V) y arsenito (III) y son parte de los sistemas de ácido arsénico ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) y ácido ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ), respectivamente. Las especies de arsénico inorgánico que son estables en aguas oxigenadas incluyen ácido arsénico y especies de As (V) como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$ . El ácido arsenioso (As (III)) es también estable como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ , y  $\text{HAsO}_3^{2-}$

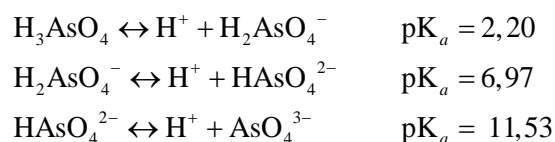
virtud de la reducción ligeramente condiciones acuosas. Estas dos formas de arsénico dependen del potencial de oxidación-reducción y del pH del agua. Las diferentes estructuras de los compuestos de arsénico se presentan en la Figura 4 (Pal, 2016)



**Figura 4:** Estructuras de diferentes especies de arsénico encontradas en el agua.  
Fuente: (Pal, 2016)

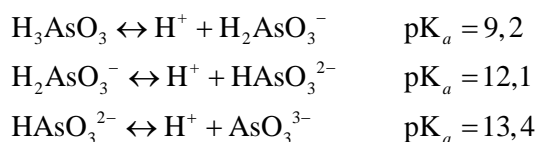
A un pH típico de 5,0 a 8,0 de agua natural, las especies de arseniato pentavalente predominantes son  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y la especie de arsenito trivalente es  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ . La relación de As (V) a As (III) en agua natural es de aproximadamente 4:1. Las condiciones que ayudan la oxidación bioquímica del arsénico van a provocar el cambio a especies con valencia (V) e inversa, así también, aquellas condiciones que ayudan a la reducción modificarán el equilibrio a una especie de valencia (III). Los arseniatos son estables en condiciones aeróbicas u oxidantes, mientras que los compuestos de arsenito son estables en condiciones anaeróbicas o ligeramente reductoras. (Castro de Esparza, 1999)

Los arseniatos tienen mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace en su estructura, por lo que la molécula al disociarse y perder el ion hidrógeno, queda cargado negativamente formando varios aniones. Las reacciones de disociación ácido-base del ácido arsénico se pueden describir como:



En aguas con abundante oxígeno disuelto, el arsénico  $\text{As}^{+5}$  (como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) es bastante estable, coexistiendo con las especies previamente nombradas, en un rango de pH entre 2 hasta 13.

En aguas reductoras, el arsénico se encuentra principalmente en el estado de oxidación trivalente en forma de ácido arsenioso que es característico en aguas subterráneas con pH mayor de 7, como resultado de la disociación de este ácido, es que se ioniza de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



Bajo condiciones anóxicas (en ausencia de oxígeno), con pH mayor que 7, son estables especies dominantes no iónicas de arsénico. Además, tanto los arseniatos y como los arsenitos se disocian en rangos de pH muy diferentes. Así, por ejemplo, en un rango de pH entre 6,5 y 8,5 típico del agua natural, las especies arseniato y arsenitos predominantes son las siguientes:  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ . Tanto la información de la disociación de los iones arsenito y arseniato a diferentes pH, como la información termodinámica del arsénico son muy importantes porque permiten entender su distribución (formas presentes) y su movilidad en el agua subterránea, además de su tratamiento. (Castro de Esparza, 1999)

Las formas orgánicas dominantes que se encuentran en el agua son compuestos de metil y dimetil arsénico, como el ácido monometil arsénico

(MMA (III)), ácido monometil arsénico (MMA (V)), ácido dimetil arsénico (DMA (III)) y ácido dimetil arsénico (DMA (V)). (Pal, 2016)

La especiación de arsénico en solución acuosa está controlada por los dos factores más importantes, el potencial redox (Eh) y el pH. La figura 5 describe las relaciones entre Eh, pH y especies de arsénico acuoso. En condiciones oxidantes,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  domina a un régimen de pH alto, mientras que  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  y  $\text{AsO}_4^{2-}$  predominan en condiciones extremadamente ácidas y alcalinas, respectivamente (Tabla 7). El  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  predomina a pH bajo (<6.9).

**Tabla 7:**

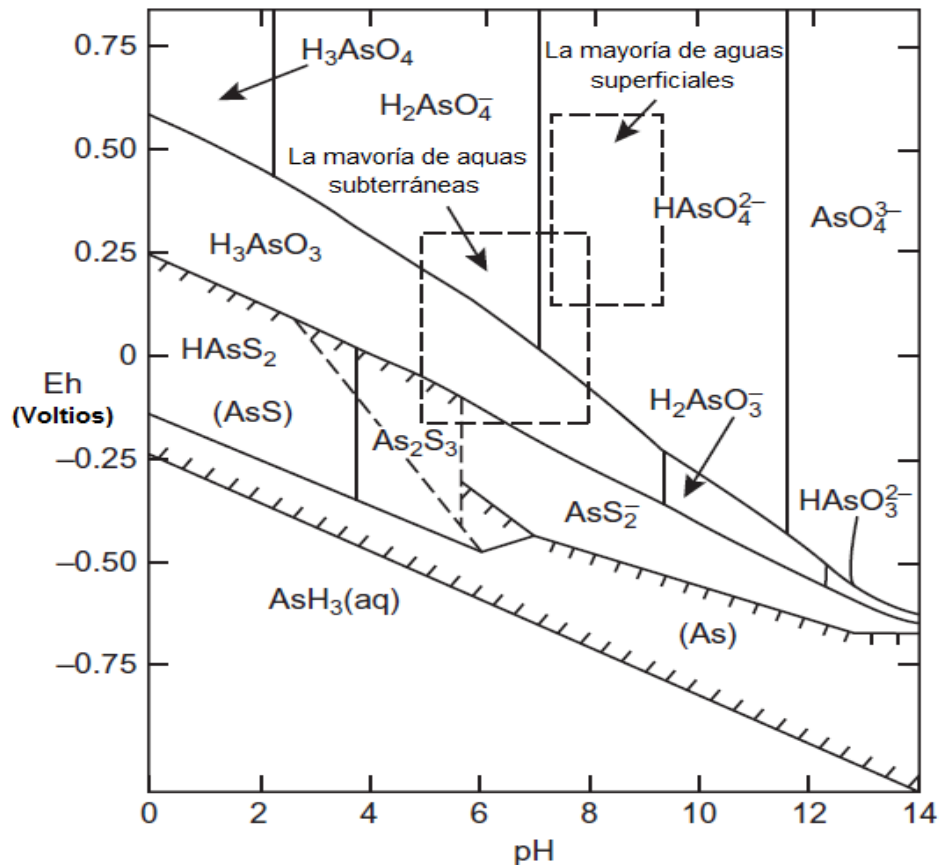
*Valores de Eh-pH para especiación de arsénico en soluciones acuosas en sistemas As-O<sub>2</sub>-Agua a 25°C y una presión total de 1 bar.*

Especie	Eh mV (Aproximado)		Rango de pH (Aproximado)
	Máximo	Mínimo	
$\text{H}_3\text{AsO}_3$	600 a pH = 0	-528	Menos de 9,2
$\text{H}_2\text{AsO}_3^-$	-233	-681	Entre 9,2 y 12,2
$\text{HAsO}_3^{2-}$	-509	-762	Entre 12,2 y 13,5
$\text{AsO}_3^{3-}$	-605	-795 a pH = 14	Por encima de 13,5
$\text{H}_3\text{AsO}_4$	1224 a pH = 0	452	Menos de 2,2
$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$	1105	81	Entre 2,2 y 6,7
$\text{HAsO}_4^{2-}$	843	-424	Entre 6,7 y 11,5
$\text{AsO}_4^{3-}$	576	-629 a pH = 14	Por encima de 11,5

Fuente: (Pal, 2016)

En condiciones reductoras predominará la especie no cargada  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  a un pH inferior a 9,2 (Figura 5). Esto significa que As (III) permanece como una molécula neutra en el agua natural. En general, las especies de arsénico

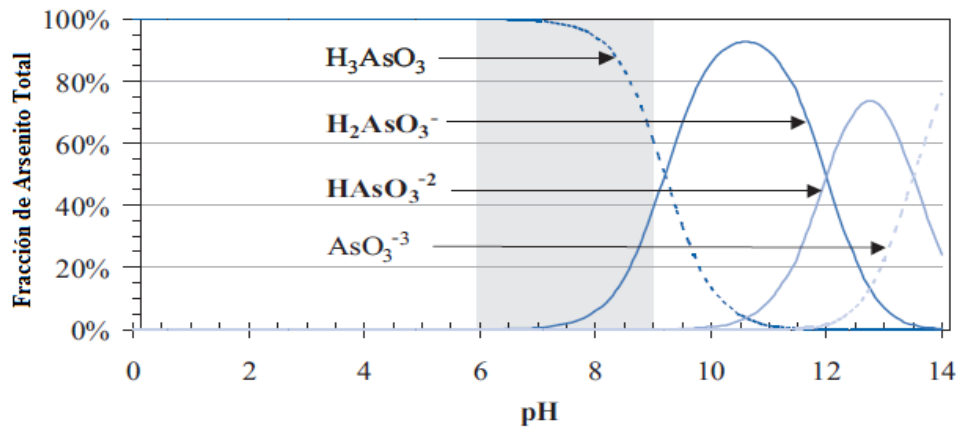
pentavalente son las especies de arsénico dominantes en las aguas superficiales ya que las especies de As(V) son estables en condiciones aeróbicas ricas en oxígeno (valor Eh positivo). Por otro lado, es más probable que ocurra arsénico trivalente en el agua subterránea ya que las especies As (III) son termodinámicamente estables y dominantes en condiciones anaerobias de reducción leve, que son las características de la mayoría de las aguas subterráneas (valor Eh negativo).



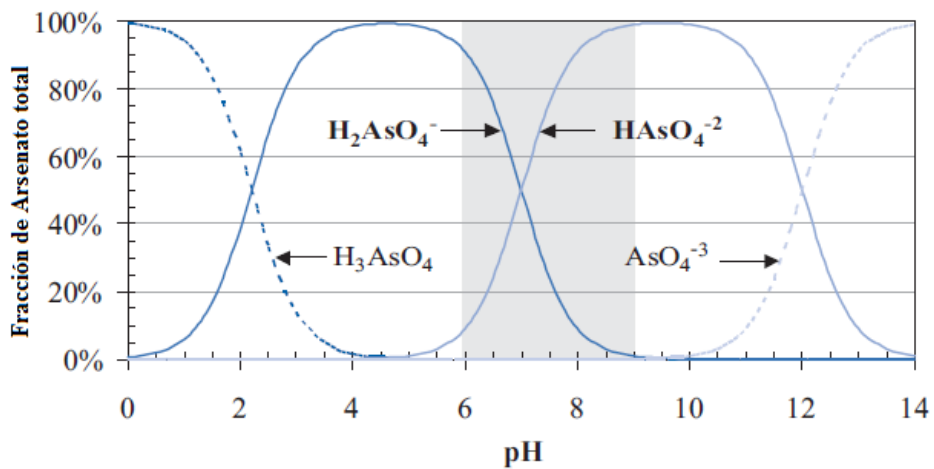
**Figura 5:** Diagrama de Eh-pH para arsénico a 25°C y 1 bar de presión total, con arsénico total  $10^{-5}$  mol/L; los símbolos para especies sólidas están encerrados entre paréntesis en el área sombreada, lo que indica una solubilidad menor de  $10^{-5}$  mol/L.

**Fuente:** (Pal, 2016)

Tanto el arsenito como el arseniato existen en cuatro especies diferentes. La especiación de estas moléculas cambia por disociación y depende del pH. La cinética de disociación para cada uno es casi instantánea. Las dependencias de pH del arsenito y el arseniato se representan en los diagramas de equilibrio termodinámico, en la Figura 6 y la Figura 7, respectivamente. (US EPA, 2005)



**Figura 6:** Disociación de arsenito [As (III)].  
**Fuente:** (US EPA, 2005)



**Figura 7:** Disociación de arseniato [As (V)].  
**Fuente:** (US EPA, 2005)

#### **2.2.2.4. Efectos del arsénico en el hombre**

Como todos sabemos, las principales formas en que las personas están expuestas al arsénico son la ingestión y la inhalación. El arsénico se acumula en el cuerpo a través de una exposición prolongada, por lo que, a una cierta concentración, causa las siguientes afecciones: Cambios en la piel (capilares de la piel y autoexpansión) y daño secundario al sistema nervioso central, inflamación de los órganos del sistema respiratorio, tubo digestivo y órganos hematopoyéticos además de almacenamiento en piel, músculos y huesos, y mínimamente en hígado y riñones. Existe evidencia de que las personas que han consumido arsénico inorgánico a través del agua potable durante mucho tiempo tienen hiperqueratosis palmoplantar, la que se manifiesta principalmente por pigmentación de la piel y callosidades en las palmas y plantas de los pies. En Argentina y México se ha realizado diferentes estudios que han descrito la presencia de arsénico en el agua, así como su grado de contaminación y su incidencia en enfermedades cutáneas. (Castro, 1999)

Los resultados experimentales en animales muestran que el arsénico (III) tienen un mayor grado de toxicidad que el arsénico (V), porque los compuestos pentavalentes ejercen menos efecto sobre la actividad enzimática, pero en el cuerpo pueden reducirse a compuestos trivalentes. El estado de oxidación, estructura química y solubilidad del arsénico determinan la toxicidad en el medio biológico. El nivel de toxicidad de este metal va en



aumento en el siguiente orden: arsénico elemental y compuestos arsenicales  $< \text{As}^{+5}$  orgánico  $< \text{As}^{+5}$  inorgánico  $< \text{As}^{+3}$  orgánico  $< \text{As}^{+3}$  inorgánico  $<$  arsina ( $\text{AsH}_3$ ). La toxicidad del arsénico trivalente es hasta 10 veces mayor comparado con el arsénico pentavalente; siendo la dosis mortal en adultos entre 1 a 4 mg As/kg.

El arsénico está clasificado como elemento cancerígeno del grupo A según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, (USEPA) debido a los evidentes efectos adversos sobre la salud. Por cada 1 000 habitantes expuestos a 0,05 mg/l de arsénico, se han presentado 31,33 casos de cáncer de la piel lo que se consideró bajar el límite máximo permisible de 0,050 mg/l, al de 0,010 mg/l. Dadas las pruebas suficientes de la carcinogenicidad en seres humanos, el Centro Internacional de Investigaciones sobre cáncer lo ha clasificado en el grupo I. El arsénico es eliminado naturalmente por el cuerpo humano aa través de las vías urinarias, heces, sudor y descamación de la piel.(Castro de Esparza, 1999)

#### **2.2.2.5. Toxicidad del Arsénico**

Arsenito inorgánico trivalente ( $\text{As}^{+3}$ )

- El arsénico reacciona con moléculas que contienen grupos -SH como el glutatión (GSH), (ALAD), etc., formando un complejo con tioles e inhibiendo su actividad.

- Los arsenicales trivalentes metilados, como MMAIII, son potentes inhibidores de la GSH reductasa y la tiorredoxina reductasa.
- Al inhibir el lipoato responsable de la formación de intermedios importantes y al bloquear la ruta del ciclo de Krebs, lo que interrumpe la fosforilación oxidativa, el arsenito produce una disminución marcada en los niveles de ATP que causan la muerte celular. (Flora, 2018)

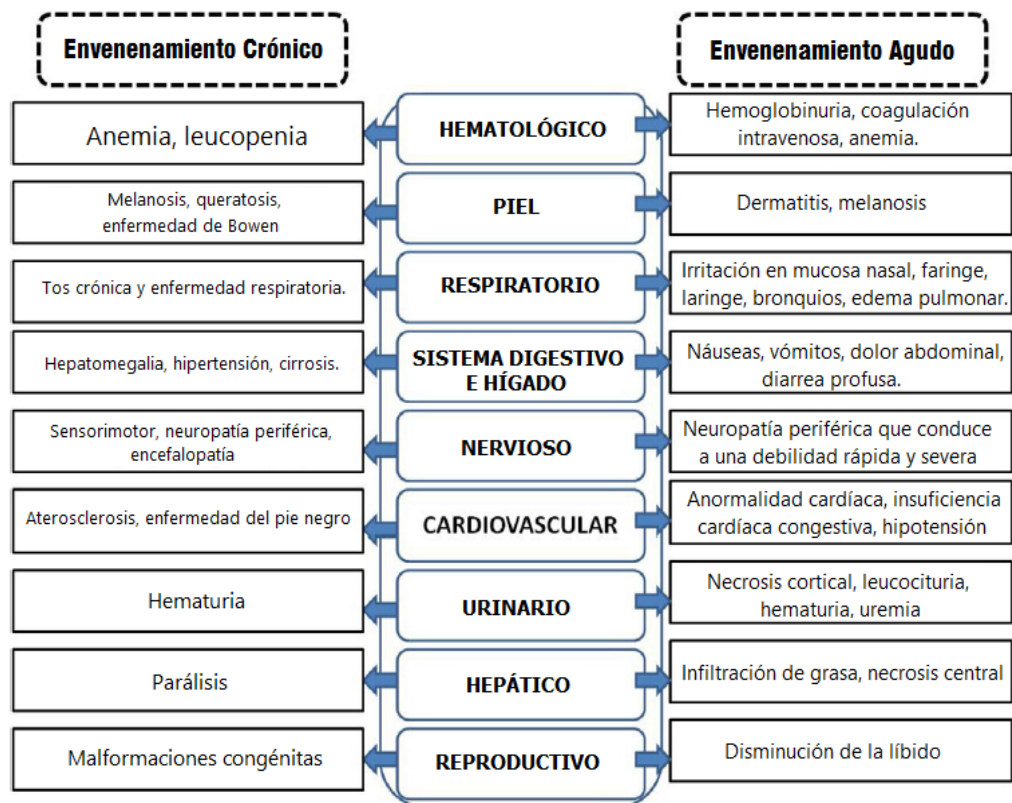
Arseniato inorgánico pentavalente ( $\text{As}^{+5}$ )

- Se someten a reacciones para formar arsenito.
- Fosfato mímico que reemplaza al  $\text{PO}_4^{-3}$  en la bomba de sodio y al sistema de transporte de intercambio aniónico.
- El arsénico inorgánico pentavalente puede formar ésteres con glucosa y gluconato, formando glucosa-6-arseniato y 6-arsenogluconato, lo que inhibe la actividad de la hexocinasa.
- Reemplaza los enlaces de éster de fosfato estables a los enlaces de éster de arseniato por arsenólisis en ATP, lo que provoca un desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y el agotamiento de las reservas de ATP.

#### **2.2.2.6. Envenenamiento agudo**

Los síntomas de toxicidad aguda del arsénico incluyen fiebre, hepatomegalia, cardiopatía, arritmia y, a veces, fallos cardíacos que pueden ser fatales. Las dosis altas de alrededor de 70 a 180 mg de arsénico inorgánico pueden ser letales. También se ha encontrado que el arsénico daña la

membrana mucosa del tracto gastrointestinal. Un trastorno neurológico común que ocurre después de 1 a 2 semanas de grandes dosis de arsénico incluye la pérdida sensorial en el sistema nervioso periférico. También puede agotar los glóbulos rojos que conducen a la anemia, disminuir el número de glóbulos blancos que causan leucopenia, especialmente granulocitopenia, después de una alta dosis de exposición al arsénico. Otros síntomas causados por la exposición aguda alta al arsénico pueden ser vómitos, diarrea, edema pulmonar, tal como se observa en la Figura 8. (Flora, 2018)



**Figura 8:** Toxicidad causada por envenenamiento agudo y crónico por arsénico.  
**Fuente:** (Flora, 2018)

#### **2.2.2.7. Envenenamiento crónico**

La exposición crónica al arsénico induce cambios en el epitelio de la piel, como la hiperpigmentación manchada, mientras que la hipopigmentación puede aparecer por primera vez entre los 6 meses y los 3 años. La ictericia, el dolor abdominal y la hepatomegalia pueden ser el resultado de una lesión hepática que puede conducir a una cirrosis que puede conducir a un carcinoma hepatocelular. La exposición frecuente también puede producir neuropatía periférica y el arsénico inorgánico en el agua potable puede conducir a trastornos cardiovasculares humanos. También se sabe que el arsénico también produce efectos inmunotóxicos (Figura 8). (Flora, 2018)

#### **2.2.3. Tratamiento del agua**

En general, el tratamiento del agua potable tiene como objetivo eliminar el color, la turbidez y los microorganismos de las fuentes fecales. Esta se logra mediante una adecuada combinación de procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Sin embargo; para eliminar elementos químicos como el arsénico del agua, se debe recurrir a otros métodos, como intercambio iónico, coagulación-adsorción de sales de hierro y aluminio, oxidación-reducción, separación sólido-líquido, ablandamiento de cal, hidróxido de hierro granular, , alúmina activada filtración directa de

hierro, ósmosis inversa y nanofiltración, electrodiálisis inversa, entre otras. (Castro, M.L.;CEPIS/SDE/OPS, 2004)

Existen más de 13 tecnologías que pueden eliminar el arsénico del agua, con niveles de eficiencia que van del 70% hasta el 99%. Usualmente, los métodos de coagulación, floculación y ablandamiento con cal, se usan en sistemas grandes, en lugar de usarse específicamente para eliminar el arsénico. En sistemas pequeños, se pueden aplicar nanofiltración, ósmosis inversa, intercambio iónico, alúmina activada o electrodiálisis. Las nuevas tecnologías incluyen óxido de hierro sobre arena, hidróxido de hierro granular, filtración directa de hierro agregado, hierro modificado con azufre, eliminación convencional de hierro y manganeso y filtración de zeolita. La eficiencia del proceso seleccionado depende de la concentración inicial, el estado de oxidación y el pH del arsénico. (Castro, M.L.;CEPIS/SDE/OPS, 2004)

#### **2.2.4. Proceso de coagulación – floculación**

La Coagulación - floculación es un proceso en el que las partículas se aglomeran en pequeños grupos cuya gravedad específica es mayor que la del agua, denominados flóculos. Este proceso se utiliza principalmente para eliminar la turbidez orgánica o inorgánica que no puede asentarse rápidamente, eliminar el color, eliminar organismos patógenos separables y eliminar los precipitados químicos en suspensión. La coagulación entonces

implica la inestabilidad de las partículas en suspensión o su desestabilización, es decir, la remoción de la fuerza que las separa, comienza al mismo tiempo que se agrega el coagulante al agua y dura solo una fracción de segundo. (Romero, 1999)

Cuando hablamos de floculación, nos referimos a la aglutinación de partículas coaguladas para convertirse en flóculos; la floculación es el proceso a través del cual, ya desestabilizados estos coloides, debe proporcionarse una mezcla suave en las partículas para aumentar las colisiones o encuentros entre estas sin romper o fracturar los agregados ya formados. Este proceso es influenciado por fuerzas fisicoquímicas como la concentración de los electrolitos, la carga eléctrica y tamaño de las partículas y la capacidad de intercambio. Continuando con el proceso, luego de agregar y mezclar el coagulante, se aplica una agitación prolongada para que las partículas coaguladas se pongan en contacto unas con otras, es en este momento en que las partículas se aglutinan, incrementan su tamaño y adquieren una mayor densidad. (Romero, 1999)

La coagulación es el proceso de neutralización de la carga o desestabilización mientras la floculación es la etapa de formación de flóculos (partículas aglomeradas). Sin embargo, varios autores se refieren indistintamente a estas dos etapas como “coagulación”. Los principales

agentes coagulantes utilizado son las sales de hierro o aluminio. (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

### **2.2.5. Proceso de coagulación –filtración para la remoción de arsénico**

El arsénico, manganeso, hierro, fluoruro, fosfato entre otras materias en suspensión, pueden ser removidas por coagulación. Para el arsénico, este proceso de remoción está basado en que la formación de hidróxidos metálico que en el agua tendría carga positiva, mientras que en el caso específico del arsénico con valencia cinco (As V), está formando arseniatos con carga negativa. Los mecanismos por los cuales, el arsénico puede ser removido en la coagulación son: (Sancha A., 2003)

- a) La adsorción: El arsénico disuelto es adsorbido en la superficie del hidróxido metálico insoluble.
- b) La precipitación: Una vez adsorbido el arsénico se forman compuestos insolubles, como arseniatos de hierro o aluminio ( $\text{FeAsO}_4$  o  $\text{AlAsO}_4$ ).
- c) La oclusión: Los hidróxidos metálicos atrapan en su interior al arsénico, ya que están formando parte de estos.

Los principales mecanismos por los que son removidas las diferentes especies de arsénico son la adsorción y/u oclusión debido a los hidróxidos metálicos que lo atrapan. Se debe tener en cuenta que el arsénico debe presentarse en concentraciones considerables, esto es que el producto de

solubilidad del sólido esté en exceso, ya que de esto depende la precipitación de los sólidos formados que incluyen al arsénico. (Meng, Bang, & Korfiatis, 2000)

Cuando son elevadas las dosis de coagulante, la adsorción del arsénico en los hidróxidos de aluminio o hierro recién formados (frescos) es el principal mecanismo que va a remover el arsénico. Luego de que el arsénico es adsorbido, estas partículas pueden ser removidas por sedimentación y luego una filtración. La eficiencia de la remoción de arsénico alcanza hasta un 90% cuando además de la coagulación y sedimentación, que solo alcanza un 30% de eficacia, se continúa con un proceso de filtración. (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

Es necesario que se logre un buen desempeño del proceso de filtración ya que evita la ruptura de las finas partículas coloidales de hidróxidos de hierro (III) sobre las cuales ha sido adsorbido el arsénico. La ruptura de estos coloides puede conllevar en un aumento de la concentración total de arsénico residual (arsénico particulado más arsénico disuelto) en el agua tratada. (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

Las dosis mínimas de coagulante adecuados y los rangos de pH para el tratamiento de remoción de arsénico van a depender de la solubilidad del precipitado metálico formado, por lo que puede mejorarse la eficiencia en la



remoción de arsénico (V) si se aumenta la dosis del coagulante. Este proceso se realiza con un pretratamiento del agua con algún ácido para alcanzar el pH óptimo y luego agregar el coagulante, o en su defecto, adicionando sólo coagulante. Para el primer caso, se requeriría una dosis menor de coagulante.

Aplicar el proceso coagulación en la remoción de arsénico soluble posiblemente conlleve a no tener las mejores condiciones para remover otras sustancias del agua, como fluoruros o fosfatos de remoción, a pesar de contar con las mejores condiciones para el caso del arsénico. (Newcombe & Möller, 2006)

Aún bajo condiciones óptimas de coagulación-floculación, la efectividad total del proceso de remoción de arsénico, estará sujeta al proceso de filtración subsiguiente. Por este motivo se requiere que proceso de filtración sea bastante eficiente, esto implica una buena remoción de las partículas coloidales que han adsorbido el arsénico, evitando así el aumento en la concentración de arsénico residual en el agua sometida a tratamiento, en formas particuladas y solubles. Por este motivo, la turbiedad residual es considerada como un indicador indirecto de arsénico residual en el agua. Una mejor remoción del arsénico será el reflejo de cualquier mejoramiento en el proceso de filtración. (Franco & Carro, 2014). El papel de filtro Whatman No 40 (o equivalente) proporciona una buena simulación de un filtro de arena. (Zeta-Meter, Inc., 1993)

### **2.2.6. Potencialidad del proceso de coagulación**

La mayoría de los estudios realizados usando procesos de coagulación para remover arsénico del agua se han orientado a la remoción del arsénico como especie pentavalente, y la eficiencia del proceso de coagulación para remover esta forma de arsénico ha sido ampliamente demostrada en estudios a escala de laboratorio (Hering, J., Chen, P.Y., Wilkie, J.A., Elimelech, M. & Liang S., 1996, Hering, J., Chen, P., Wilkie J., Elimelech, M., 1997 citando en Litter, Sancha, et al., 2010), escala piloto y planta de tratamiento (Cheng R., et. al. 1994, Sancha, A.M., 1994, Scott, K., 1995, Mcneill, L.S., 1997, Mcneill, L., 1997 citado en Litter, Sancha, et al., 2010). Muchos de estos estudios tuvieron como meta alcanzar, en el agua tratada, una concentración de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  y sólo en los estudios más recientes (Edwards, M., 1994, Hering, J., 1996, Cheng, R., 1994, Chang, D., 1994, Ramberg, S.H., 1995, Granada, J., 2003, citado en Litter, Sancha, et al., 2010) se ha probado su potencialidad para producir aguas con concentraciones de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  de acuerdo a las últimas recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization (WHO), 1993, citando en Litter, Sancha, et al., 2010). Las Tablas 8 y 9 muestran las ventajas y desventajas de la aplicación de esta tecnología e identifican los principales factores que pueden incidir en la eficiencia de remoción de arsénico por este proceso. (Litter, Morgada, & Bundschuh, 2010)

**Tabla 8**

*Ventajas y desventajas del uso de procesos de coagulación en la remoción de arsénico*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Remueve arsénico.</li><li>• Remueve turbiedad, color, Fe, Mn, F.</li><li>• Reduce materias orgánicas naturales.</li><li>• Reduce cantidad de microorganismos.</li><li>• Permite tratar grandes volúmenes de agua.</li><li>• Produce pocas pérdidas de agua.</li><li>• Requiere insumos de fácil obtención.</li><li>• Tiene bajos costos de operación y Manutención.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere ajuste de pH y oxidación del As.</li><li>• La presencia en la matriz de agua de fosfatos y sílice reduce la eficiencia.</li><li>• Los costos pueden resultar elevados para sistemas pequeños.</li><li>• Requiere operadores entrenados.</li><li>• Se deben disponer los residuos generados.</li></ul>

**Fuente:** (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

**Tabla 9**

*Factores que influyen en la eficiencia de remoción de arsénico por procesos de coagulación*

<b>Factores</b>	<b>Efectos en el proceso</b>
pH	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Influencia en la especiación de As y la composición de los grupos funcionales de la superficie de los oxihidróxidos férricos.</li> <li>– La disminución de pH del agua cruda aumenta la remoción de As(V).</li> <li>– La adición de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> reduce la dosis de coagulante requerida.</li> </ul>
Matriz de agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Silicato: compite por sitios de adsorción.</li> <li>– Fosfato: compite por sitios de adsorción.</li> <li>– Carbonato: compite por sitios de adsorción.</li> <li>– Calcio puede mejorar la remoción.</li> <li>– COD (sustancias húmicas): compite por sitios de adsorción.</li> <li>– Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>3-</sup>, F<sup>-</sup>: efecto muy poco significativo.</li> </ul>
Dosis de coagulante	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Determina de manera directa el área superficial del hidróxido sobre el cual se adsorbe el arsénico.</li> </ul>
Variaciones en la composición del agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Por debajo de pH 8 la remoción de As(V) es relativamente muy poco sensible a variaciones en la composición del agua.</li> </ul>

**Fuente:** (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

En el proceso de coagulación, la presencia en el agua de componentes que pudieran competir con el arsénico por los sitios de adsorción de los

hidróxidos formados para este efecto, representa un factor que podría limitar la eficiencia del proceso. En la práctica, la eficiencia del proceso de coagulación para remover arsénico depende, principalmente, de factores tales como especiación del arsénico, pH del agua, dosis de agente coagulante, tasa de filtración y tiempo de duración de las carreras de filtración o intervalo entre lavados del filtro. Todos estos factores pueden ser controlados y ajustados durante la operación del proceso. (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

#### **2.2.7. Proceso de floculación**

La floculación tiene como objetivo principal juntar las partículas desestabilizadas y aglutinarlas para formar aglomeraciones que sedimenten con mayor eficiencia debido a que poseen un mayor peso y tamaño. Por lo general, este proceso se analiza como una consecuencia del choque entre partículas. (CEPIS/OPS, 2004)

En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- a) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
  
- b) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.

c) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, es necesaria la floculación pericinetica para que comience la aglomeración de los coloides más pequeños (menos de un micrómetro); sobre estas partículas actúa el movimiento browniano, por el tamaño, promoviendo la formación de microfloculos. Una vez alcanzado el micrómetro de tamaño, la floculación ortocinetica comienza, promoviendo el crecimiento del microfloculo (CEPIS/OPS, 2004)

La eficiencia del proceso de floculación será influenciada principalmente por los siguientes factores:

- La composición del agua: Tanto la coagulación como la floculación son sensibles a las propiedades físicas del agua cruda, como son: la alcalinidad, turbiedad, color, sólidos suspendidos. Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio fisicoquímico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman o en la interacción de estos polímeros con los coloides, esto influirá en el tiempo de floculación.

- Las variaciones de caudal: Cuando se varía el caudal con el que se trabaja en planta, tanto los gradientes de velocidad y los tiempos de residencia en el floculador cambian, por lo que se obtiene diferentes resultados a los obtenidos en las pruebas de jarras.
- La intensidad de agitación: En la floculación, es conveniente reducir la velocidad de agitación para evitar los efectos de cizallamiento y como consecuencia el rompimiento de los flóculos: además es muy importante determinar la intensidad de agitación que ayuden a las cadenas de polímeros y las partículas a colisionar formando enlaces para formar los agregados.
- El tiempo de floculación: Nos referimos a la velocidad con la que se aglutinan las partículas siendo este proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones se puede tener un tiempo óptimo que, por lo general, se encuentra entre 15 y 30 minutos. Este parámetro puede ser hallado utilizando la prueba de jarras. La ineficiencia en los resultados pueden ser consecuencia de un tiempo de residencia del agua en el floculador mayor o menor al tiempo óptimo, es necesario considerar el tiempo óptimo para obtener los mejores resultados.

### **2.2.7.1. El Floclador**

El floclador es un contenedor que promueve suave y lentamente la mezcla, y que posee un tiempo de residencia bastante largo, en el cual, una vez agregado y mezclado el coagulante, las pequeñas partículas coaguladas entran en contacto unas con otras a través de una agitación lenta y prolongada, es en el floclador donde las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad. (Romero, 1999)

### **2.2.7.2. Tipos de flocladores**

En la floclación, la mezcla lenta puede ser mecánica, haciendo uso de rotores de paletas, o puede ser una mezcla hidráulica, usando solo la fuerza del agua.

#### **2.2.7.2.1. Flocladores hidráulicos**

Este tipo de flocladores proveen una floclación efectiva, ya que proporcionan una adecuada velocidad de flujo y poseen los baffles necesarios para asegurar suficientes curvas en el movimiento del agua a tratar.

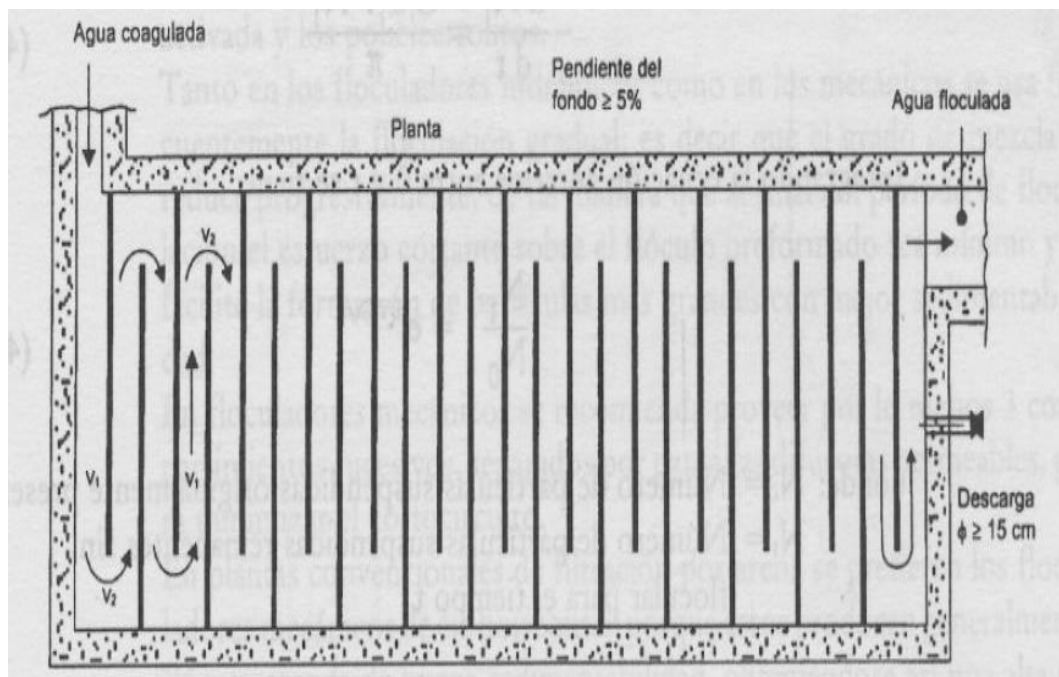
Se puede señalar como desventajas, en comparación con los flocladores mecánicos, que flocladores hidráulicos poseen una elevada pérdida de carga (30 – 150 cm) y son poco flexible en cuanto al control de la mezcla para en



caudales variables. Como ventajas, es evidente la ausencia de equipo mecánico por lo que requiere un mantenimiento mínimo. (Romero, 1999)

### Floculadores de flujo horizontal

Consiste en un tanque de concreto dividido por baffles, tabiques o pantallas de madera u otro material, de modo que el agua realice un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos de los baffles. En la práctica, para plantas pequeñas con caudales menores a 50 l/s se utiliza este tipo de floculadores; los de flujo vertical, que son construidos a mayor profundidad (2 – 3 m), para plantas mucho más grandes. (Romero, 1999)

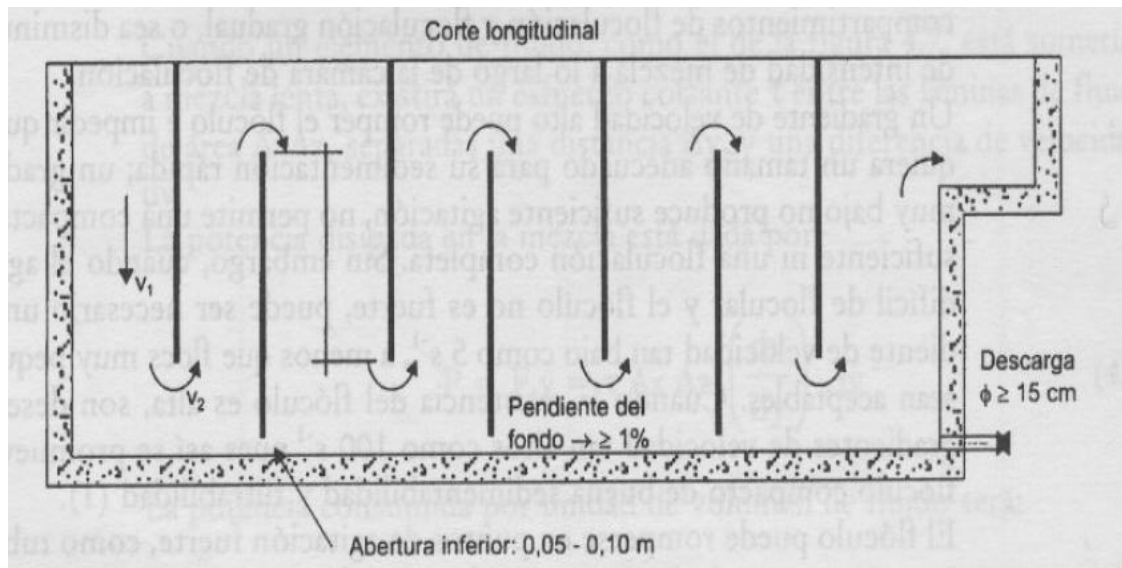


**Figura 9:** Esquema de un floculador hidráulico de flujo horizontal.

**Fuente:** (Romero, 1999)

### Floculadores de flujo vertical

En este tipo de floculador, el flujo del agua es hacia arriba y hacia abajo, yendo por encima y por debajo de los tabiques que dividen el contenedor.



**Figura 10:** Floculador hidráulico de flujo vertical.

**Fuente:** (Romero, 1999)

#### 2.2.7.2.2. Floculadores mecánicos

En estos floculadores se mueve al agua mediante agitadores mecánicos para lograr la mezcla lenta. El tipo de floculador mecánico más frecuente es el de paletas, de eje vertical u horizontal, estos imparten un movimiento rotatorio al agua además de turbulencia interna. También existen impulsores de flujo axial y de turbina. Se recomienda que el equipo agitador mecánico sea de velocidad variable ya que, según la calidad del agua, el grado de mezcla óptimo puede ser variable. (Romero, 1999)

### 2.2.7.3. Consideraciones de diseño

La intensidad de la agitación de agua por una mezcla hidráulica o mecánica produce un gradiente de velocidad que va controlar el grado de floculación. El gradiente de velocidad está directamente relacionado con la cantidad de colisiones de las partículas. El gradiente de velocidad va a determinar qué tan efectiva se realice la floculación. El período de floculación debe ser inmediatamente después de la mezcla rápida. Cuando este periodo es prolongado, algunas aguas tienden a aumentar la rotura del floc y producen propiedades de sedimentación inferiores. Por el contrario, es posible que un corto período de floculación no sea suficiente para la formación completa de los flocs. La presencia de la floculación en el tratamiento de agua no siempre es necesario, pero por ejemplo, para en el tratamiento de aguas turbia y coloreadas en plantas, en la que el coagulante se aplica en la entrada a los filtros de agua, este proceso resulta de vital importancia. (Romero, 1999)

Los principales criterios que controlan el proceso de floculación son el período de agitación y la intensidad de la mezcla. Según Camp y Stein, la relación básica para caracterizar el proceso de floculación es como se describe a continuación:

$$N = \frac{GN_1N_2(d_1 + d_2)^3}{6} \quad [1]$$

Donde G, gradiente de velocidad se refiere a la intensidad de la mezcla, y N representa el número de colisiones, en una unidad de tiempo, entre  $N_1$ , partículas de diámetro  $d_1$ , y  $N_2$ , partículas de diámetro  $d_2$ .

De acuerdo con Hudson, suponiendo que  $N_1$  son partículas en suspensión que provocan turbiedad, generalmente de diámetro  $d_1$ , bastante pequeño, menor de  $10 \mu\text{m}$ , el término  $d_1$  puede ser despreciado. Por otra parte, suponiendo que las partículas  $N_2$ , son flóculos de tamaño  $d_2$  notoriamente mayor que  $d_1$  ( $100 - 2000 \mu\text{m}$ ), las que se adhieren al colisionar, podemos escribir lo siguiente:

$$N = -\frac{dN_1}{dt} = \frac{G\theta N_1 N_2 d_2^3}{6} \quad [2]$$

Donde  $\theta$  es un coeficiente que va a denotar que no todas las partículas que colisionan se logran adherir unas con otras o sea, vendría a ser el factor de adherencia.

El volumen de flóculo, suponiendo que tiene un diámetro constante, sería:

$$V = \frac{N_2 \pi d_2^3}{6} \quad [3]$$

Por lo tanto,

$$-\frac{dN_1}{dt} = \frac{G\theta VN_1}{\pi} \quad [4]$$

Integrando la ecuación anterior entre 0 y t se tiene;

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\theta VNt/\pi} \quad [5]$$

Donde:

$N_0$  = Número de partículas suspendidas originalmente presentes.

$N_t$  = Número de partículas suspendidas remanentes sin flocular para el tiempo t

Sea,

$$N_t = N_0 e^{-\theta VNt/\pi} \quad [6]$$

La ecuación anterior señala cuan importante es el volumen del flóculo y de Gt en la floculación; siendo la floculación proporcional al volumen del flóculo V y al producto Gt; sin embargo, no se tiene en cuenta que a valores muy grandes de Gt el flóculo podría romperse dañando la floculación. Diversos estudios sobre el proceso de floculación demuestran consecuencias desfavorables de muy poca o mucha agitación, así como las ventajas de contar con varias secciones de floculación y floculación gradual, de esta manera

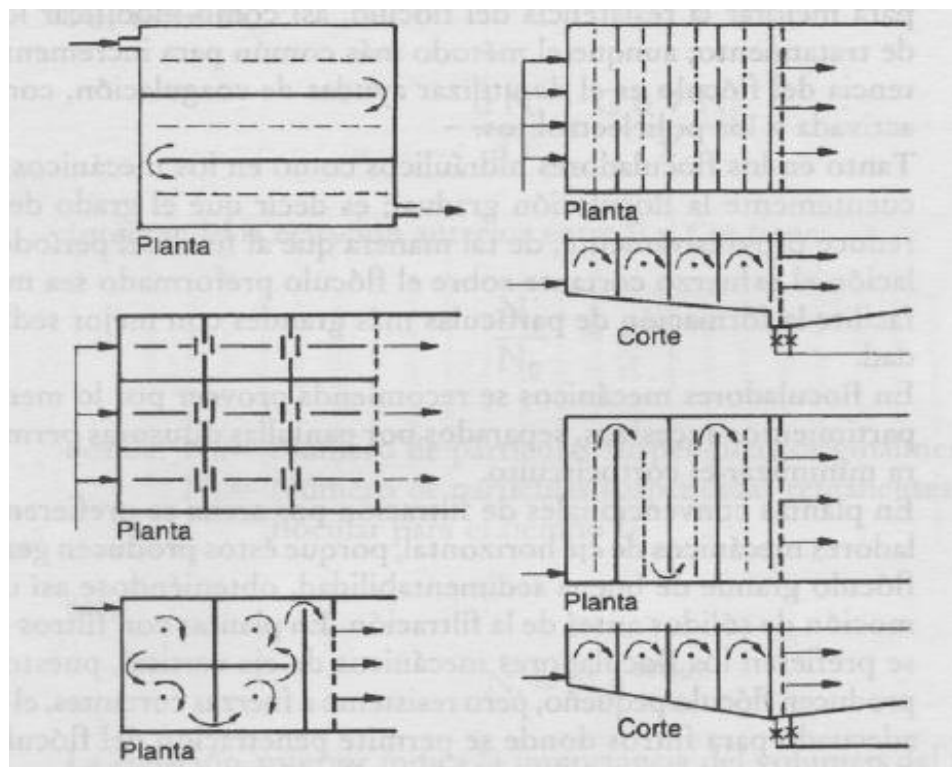
promover la disminución de intensidad de mezcla en toda la extensión de la cámara de floculación. (Romero, 1999)

A un alto gradiente de velocidad se puede romper el flóculo impidiendo que logre el tamaño necesario para una rápida sedimentación; por el contrario, un gradiente muy bajo al no producir suficiente agitación, no permite una buena compactación ni una floculación completa. No obstante, cuando el agua no se flocula fácilmente el flóculo es débil, puede llegar a ser necesario un bajo gradiente como  $5 \text{ s}^{-1}$ , a menos que sean aceptables los pequeños flóculos formados. Sí la resistencia del flóculo es alta, preferentemente se pueden emplear gradientes de velocidad tan altos como  $100 \text{ s}^{-1}$  de esto modo se promueve la compactación del flóculo con una buena sedimentación y filtración.

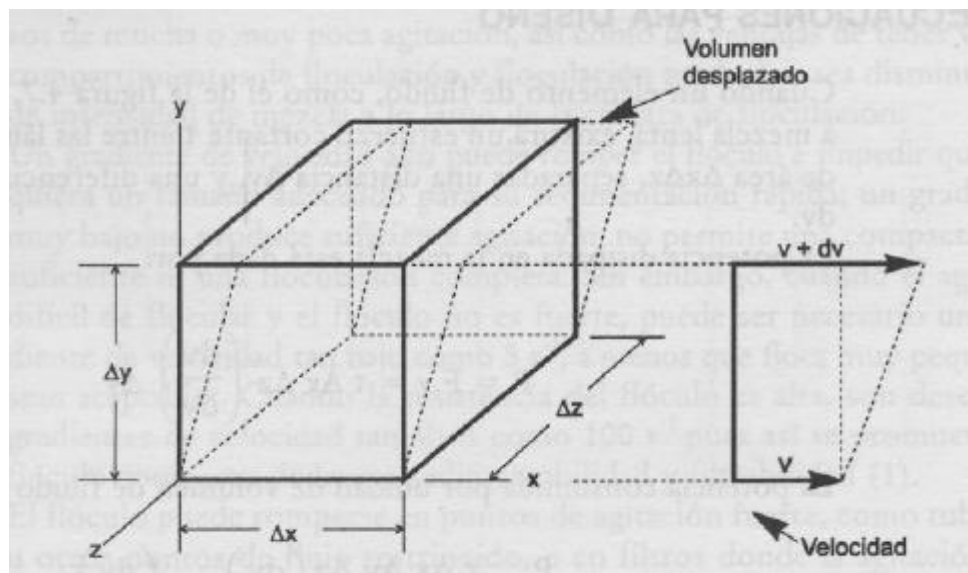
En lugares donde hay una agitación fuerte, como tuberías u otros puntos de flujo restringido o en filtros, el flóculo podría romperse, debido a que la agitación no logra ser suficiente para que el flóculo pase completamente través de ellos. Es pertinente poder modificar la intensidad de la floculación para optimizar el tiempo de residencia del flóculo, así también cambiar los caudales de tratamiento; sin embargo, para incrementar la resistencia del flóculo comúnmente se usa diversos coadyuvantes de coagulación como los polielectrolitos y la sílice activada. (Romero, 1999)

En ambos tipos de flocladores, mecánicos e hidráulicos frecuentemente se utiliza una la floclación gradual; es decir que el grado de mezcla se va reduciendo, de esta forma, al final de la floclación el esfuerzo cortante que se ejerce sobre el flóculo preformado es mínimo y facilitando la formación de partículas más grandes con un mejor índice de sedimentación.

En la Figura 11 se observan algunos modelos para floclación:



**Figura 11:** Esquemas de Flocladores  
**Fuente:** (Romero, 1999)



**Figura 12:** Elementos de fluido sometido a mezcla lenta.  
**Fuente:** (Romero, 1999)

#### 2.2.7.4. Ecuaciones para diseño

Cuando un elemento de fluido, como el de la figura anterior (Figura 12), es sometido a una mezcla lenta, va existir un esfuerzo cortante  $\tau$  entre las láminas de fluido cuya área es  $\Delta x \Delta z$ , separadas por una distancia  $\Delta y$ , y una diferencia de velocidad,  $dv$ . (Romero, 1999)

Por lo tanto, la potencia disipada en la mezcla es:

$$P = F \cdot v = \tau \Delta x \Delta z \left( \frac{dv}{dy} \right) \Delta y \quad [7]$$

La potencia consumida por unidad de volumen de fluido entonces es:



$$\frac{P}{V} = \frac{\tau \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta x \Delta y \Delta z} \left( \frac{dv}{dy} \right) = \tau \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad [8]$$

Teniendo en cuenta la Ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad [9]$$

Por lo tanto,

$$\frac{P}{V} = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [10]$$

Por definición,

$$G = \frac{dv}{dy} \quad [11]$$

Luego,

$$\frac{P}{V} = \mu G^2 \quad [12]$$

Y,

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad [13]$$

Donde:

G = Gradiente de velocidad, s<sup>-1</sup>  
P = Potencia disipada en la mezcla, W  
μ = Viscosidad dinámica del fluido, N. s/m<sup>2</sup>, Pa.s, kg/m.s  
V = Volumen, m<sup>3</sup>

Para la turbulencia hidráulica en un tanque con baffles:

$$P = \gamma QH \quad [14]$$

$$P = \frac{\gamma V H}{t} \quad [15]$$

$$\frac{P}{V} = \frac{\gamma H}{t} = \frac{\rho g H}{t} \quad [16]$$

Reemplazando en la ecuación 13 se tiene:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma H}{\mu t}} = \sqrt{\frac{\rho g H}{\mu t}} = \sqrt{\frac{g h}{\nu t}} \quad [18]$$

Donde:

G = Gradiente de velocidad, s<sup>-1</sup>  
H = Pérdida de energía en el tanque, m  
ρ = Densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>  
γ = Peso específico del fluido, N/m<sup>3</sup>  
μ = Viscosidad dinámica del fluido, N. s/m<sup>2</sup>, Pa.s, kg/m.s  
ν = Viscosidad cinemática, m<sup>2</sup>/s  
V = Volumen, m<sup>3</sup>  
t = Tiempo de retención, s  
g = Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

### 2.2.7.5. Criterios para el diseño de floculadores hidráulicos

Los floculadores hidráulicos hacen uso de la energía hidráulica disponible mediante una pérdida de carga general o específica. Los floculadores hidráulicos que se usan con mayor frecuencia son los de pantallas, de flujo vertical o de flujo horizontal. (CEPIS/OPS, 2004)

De manera general, en los floculadores de flujo horizontal, la pérdida de carga total es la suma de la pérdida de carga dada por la fricción en el canal y una pérdida de carga debida a los cambios de dirección en el recorrido del agua mientras, siendo esta la más importante. Este valor puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$h_1 = \left[ \frac{nv}{R_h^{2/3}} \right]^2 L \quad [19]$$

Donde:

n : Coeficiente de fricción de Manning

V: Velocidad de flujo

r : Radio hidráulico de los canales

L : longitud del recorrido

La pérdida de carga debida a las vueltas:

$$h_2 = K \frac{v^2}{2g} \quad [20]$$

Donde:

K : Coeficiente de pérdida de carga

g : Gravedad  $9,81\text{m/s}^2$

En los floculadores de flujo vertical, la pérdida de carga, para flujo sobre cada bafle, se calcula por la fórmula para vertedero ahogado rectangular de pared delgada, sin contracciones. La pérdida de carga por flujo por debajo de cada bafle, igual a la de un orificio ahogado. La altura de los tabiques para paso por encima se va disminuyendo, de acuerdo con la pérdida, con el fin de mantener constante la altura del agua. Para evitar la formación de lodo fondo del tanque, se deja un espacio en los tabiques al ras del piso, con un área correspondiente al 5 % del área horizontal de cada canal entre tabiques.

- Según Smethurst:

$$G = 20 - 100\text{s}^{-1}$$

$$Gt = 20000 - 150000$$

$$t = 10 - 60\text{min}$$

$$H = h_f + h$$

La pérdida de carga por fricción,  $h_f$ , es calculada por la fórmula de Hazen Williams con  $C = 50$ . La pérdida de carga adicional en las curvas,  $h$ , en un floculador hidráulico de flujo horizontal o vertical, se calcula por:

$$h = \frac{nv_1^2 + (n-1)v_2^2}{2g} \quad [21]$$

Donde:

$h$  = Pérdida adicional por curvas en el canal, m

$n-1$  = Número de baffles

$v_1$  = Velocidad de flujo entre los baffles, m/s

$v_2$  = Velocidad de flujo en la abertura de los baffles, m/s

$H$  = Pérdida de energía en el floculador, m

La velocidad de flujo = 0,15 – 0,5 m/s

La pérdida de carga, usualmente entre 0,15 – 0,6 m

- Según Arboleda, para floculadores hidráulicos tenemos:

$$G = 10 - 100s^{-1}$$

$$t = 15 - 20 \text{ min}$$

$$H = h_f + h$$

La pérdida por fricción,  $h_f$ , se calcula empleando la fórmula de Manning, con  $n = 0,013$  para superficies de cemento, y  $n = 0,012$  para superficies de asbesto – cemento. La pérdida de carga adicional,  $h$ , en floculadores de flujo horizontal, es calculada mediante:

$$h = \frac{3(N-1)v^2}{2g} \quad [22]$$

Donde:

$h$  = Pérdida adicional por curvas en el canal, m

$N-1$  = Número de tabiques

$v$  = Velocidad promedio de flujo

$H$  = Pérdida de energía en el floculador, m

Mientras que la velocidad de flujo se encuentra entre: 0,10 – 0,60 m/s

La distancia entre los baffles y la pared, es igual a 1,5 veces la separación entre baffles. Sin embargo, para minimizar el efecto del flujo a lo largo del canal, sin crear bloques ni efecto de contraflujo en las curvas, es recomendable un espaciamiento igual a 0,5 veces la separación entre baffles.

- Insfopal sugiere, para floculadores de flujo horizontal:

$$t = 15 - 60 \text{ min}$$

$$\text{Altura mínima} = 0,90 \text{ m}$$

$$\text{Separación mínima entre tabique} = 0,45 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad de flujo} = 0,15 - 0,45 \text{ m/s}$$

- Hardenbergh y Rodie, sugieren:

$$H = h_r + h \quad [23]$$

Para  $t = 20 - 50$  min y la pérdida de carga por fricción es calculada mediante cualquier fórmula clásica de hidráulica. La pérdida de carga adicional,  $h$ , es calculada por:

$$h = \frac{3,2(N-1)v^2}{2g} \quad [24]$$

Siendo:

$h$  = Pérdida adicional por curvas en el canal, m

$N-1$  = Número de tabiques

$v$  = Velocidad promedio de flujo, m/s

$H$  = Pérdida de energía en el floculador, m

Siendo la velocidad de flujo =  $0,15 - 0,45$  m/s

La altura mínima en floculadores de flujo horizontal =  $0,90$  m

Y la separación mínima entre bafles =  $0,45$  m

La distancia de los bafles a la pared del contenedor deberá ser igual a  $1,5$  veces la separación entre bafles; y debe ser mayor a  $0,60$  m. Para floculadores de flujo vertical la profundidad preferible es de  $2$  a  $3$  veces la separación entre bafles. La abertura superior, entre la superficie libre del agua y el borde superior del baffle, o la inferior, entre el borde inferior del baffle y el fondo del tanque, igual a  $1,5$  veces la separación entre bafles.

- Según Fair y Geyer:

$$t = 10 - 90 \text{ min}$$

$$\text{Velocidad de Flujo} = 0,1 - 0,9 \text{ m/s}$$

$$\text{Pérdida de energía, entre } 0,3 \text{ y } 0,9$$

- Según la AWWA (American Water Works Association: Asociación Americana de Servicios de Aguas):

$$G = 5 - 100 \text{ s}^{-1}$$

$$Gt = 30000 - 150000$$

$$t = 10 - 60 \text{ min}$$

$$\text{Velocidad de flujo} = 0,09 - 0,30 \text{ m/s}$$

#### **2.2.7.6. Consideraciones de diseño según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento**

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento a través de la Resolución Ministerial N° 013 – 2019 – VIVIENDA, dispuso y aprobó la Norma Técnica "Guía de Diseños Estandarizados para Infraestructura Sanitaria Menor en Proyectos de Saneamiento en el Ámbito Urbano - Etapa 1", mediante el cual se pretende "Estandarizar los diseños de infraestructura sanitaria y simbología a utilizarse en los proyectos de saneamiento para el ámbito urbano a nivel nacional, de tal forma que permitan la elaboración



rápida y eficiente de los estudios definitivos para proyectos de saneamiento urbano.” Siendo esta norma de aplicación obligatoria para todos los proyectos urbanos de saneamiento del Perú, en particular, en localidades con 20 000 habitantes a partir de 2001 habitantes o en proyectos que cuenten con una población dentro del rango demográfico citado previamente. (VIVIENDA, 2019)

Las referencias normativas tomadas fueron: Norma OS. 010 Captación y conducción de agua para consumo humano, el apartado de “Variaciones de consumo” y de la Norma OS.020 Planta de tratamiento de agua para consumo humano. El apartado “Floculadores”.

### **Norma Os.100: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria**

#### **Variaciones de consumo**

Los coeficientes de las variaciones de consumo se refieren al promedio diario anual de la demanda para las conexiones domiciliarias, estos son fijados en base a información estadística corroborada. De no ser así, se puede tener en cuenta los siguientes valores para los coeficientes:

- Para un máximo anual de la demanda diaria: 1,3
- Para un máximo anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5

## **Norma Os.020: Plantas de tratamiento de agua para consumo humano**

### **Requisitos generales**

- Para plantas con una capacidad mayor a 50 l/s, los parámetros de diseño de la unidad, tiempo de retención (T) y gradiente de velocidad (G) deberán seleccionarse mediante simulaciones del proceso utilizando el probador de jarras.
- Dependiendo el tipo de agua se obtendrá la ecuación que relacione los parámetros del proceso, bajo la forma  $Gn.T=K$ , donde (n) y (K) son específicos para cada fuente de agua y sus variantes.
- Para sistemas con una capacidad menor a 50 l/s, se tiene en cuenta un rango de gradientes de velocidad de 20 a 70  $s^{-1}$  y un tiempo de residencia aproximado de 20 minutos.
- Los gradientes de velocidad a lo largo del tanque deberán ir descenso, para promover la formación y crecimiento del flóculo.
- Para todos los casos se debe diseñar un sistema de desagüe que posibilite el vaciado completo de la unidad.

### **Criterios para los floculadores hidráulicos de pantallas**

a) Par sistemas de menos de 50 l/s de capacidad son convenientes las unidades de flujo horizontal; en sistemas con mayor capacidad debe usarse exclusivamente unidades de flujo vertical.

b) Las pantallas deben ser removibles considerándose materiales como: bafles de concreto prefabricados, fibra de vidrio, madera machihembrada, planchas de asbesto-cemento corrugadas o planas, etc.

Debe evitarse el uso de las planchas de asbesto-cemento en lugares con frecuencia de movimientos telúricos ya que implican un riesgo, así como, en lugares donde no haya garantía de un adecuado nivel de operación y mantenimiento de la unidad.

### **Unidades de flujo horizontal**

a) El ancho de las vueltas deberá ser 1,5 veces el espacio entre pantallas.

b) El coeficiente de pérdida de carga para las vueltas (K) deberá ser 2.

c) El ancho de la unidad debe seleccionarse en función de que los bafles en el último tramo se entrecrucen, mínimamente, en un 1/3 de su longitud.

d) Se deberá diseñar con tirantes de agua de 1 a 3 m, dependiendo del material de la pantalla. (VIVIENDA, 2019)

### **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS**

#### **Afluente**

Se refiere al agua que entra a cualquier unidad de tratamiento, empieza una etapa, o pasa por todo el proceso de tratamiento. (VIVIENDA, 2019)

#### **Agua potable**

Agua que cumple con las condiciones necesarias para ser consumida por el ser humano. (VIVIENDA, 2019)

#### **Coagulación**

Proceso por el cual se suprime la carga eléctrica desestabilizando las partículas de una solución coloidal, a través de la acción de un coagulante para luego aglutinarse en el floculador. (Romero, 1999)

#### **Efluente**

Es el agua que sale de un acopio, termina una etapa o pasa por todo el proceso de tratamiento de agua. (VIVIENDA, 2019)

## **Filtración**

Es un proceso utilizado para separar los sólidos del agua, así como material mas fino que no pudo a ser removido en anteriores procesos, aplicándose luego de la sedimentación.

## **Floculación**

Formación de partículas aglomeradas o flóculos. Sucede inmediatamente después de la coagulación. (Romero, 1999)

## **Floculador**

Es una estructura diseñada en la que se crean las condiciones necesarias para aglutinar partículas previamente desestabilizadas en la coagulación y de este modo obtener flóculos lo suficientemente grandes y pesados para que decanten rápidamente, además de ser resistentes a los esfuerzos cortantes generados en un filtro. (VIVIENDA, 2019)

## **Flóculos**

Partículas que han sido desestabilizadas en la coagulación y aglutinadas por efectos de un coagulante. (VIVIENDA, 2019)

### **Mezcla rápida**

El mecanismo para obtener una distribución rápida y uniformemente del coagulante que se aplica al agua. (VIVIENDA, 2019)

### **Pantallas (baffles o placas)**

Muros o paredes que son instaladas en un tanque de floculación o sedimentación que dirigen la dirección del flujo, evitando que se formen espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos. (VIVIENDA, 2019)

### **Partículas floculentas**

Son partículas en suspensión que se aglomeran entre sí y van cambiando de tamaño, forma y peso específico al descender en la masa de agua. (VIVIENDA, 2019)

### **Remoción**

Término empleado para hacer referencia a toda acción de quitar, trasladar, desplazar o eliminar, sustancias contaminantes de una fuente de agua, alcanzando una determinada eficiencia, para su posterior uso. (Litter, Sancha, & Ingallinella, 2010)

## **Sedimentación**

Proceso que permite remoción de partículas haciendo uso de la gravedad. (VIVIENDA, 2019)

## **Tratamiento de agua**

Remoción por métodos artificiales o naturales de cualquier tipo de materia objetable en el agua que permite cumplir con los parámetros especificadas en la normativa de calidad de agua para el consumo humano. (Romero, 1999)

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

- Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de información es prospectivo.
- Según el periodo y secuencia de estudio se enmarca como transversal.
- Según el análisis y alcance de los resultados se puede clasificar como experimental evaluativo.

El presente trabajo de investigación se basó en pruebas experimentales existiendo una relación de tipo causa-efecto. Se aplicó un diseño factorial fraccionado (SCREENING) para determinar los principales factores significativos en el área de exploración, luego de un tamiz, se realizó el análisis del efecto producido por el manejo de tres factores ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ ) sobre dos factores respuesta ( $y_1$ : arsénico total, mg/l y  $y_2$ : hierro total, mg/l). Para realizar el análisis de datos se utilizó la metodología de superficie de respuesta con un diseño de Box-Behnken.

#### **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

La muestra a estudiar fue una muestra representativa de agua del Río Locumba con Coordenadas 17°51'37.2"S 70°57'50.1"W a la entrada de la



Planta de Tratamiento de Agua de Ite (dentro de los límites del distrito de Ite ubicada en la provincia de Jorge Basadre), esta agua tiene concentraciones de arsénico promedio de 0,5 mg/L.



Figura 13: Ubicación del punto de muestreo.  
Fuente: Google Earth Pro

### 3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En la Tabla 10 es presentada la operacionalización de las variables.

**Tabla 10***Operacionalización de variables para el screening*

<b>Variables dependientes</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
Arsénico total residual	Concentración de arsénico	Análisis de arsénico total (mg/L)
Hierro total residual	Concentración de hierro	Análisis de hierro total (mg/L)
pH final	Concentración de H <sup>+</sup>	Detección de pH
<b>Variables independientes</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
Dosis de cloruro férrico	Volumen de cloruro férrico	Volumen de cloruro férrico (ppm)
Gradiente de floculación	Velocidad	Velocidad de floculación (rpm)
pH inicial	Concentración de H <sup>+</sup>	Detección de pH
Tiempo de floculación	Tiempo	Registro del tiempo de floculación (min)
Tiempo de sedimentación	Tiempo	Registro del tiempo de sedimentación (min)

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.4.1 Instrumentos, equipos, materiales y reactivos

##### a) Equipos e instrumentos

- 01 medidor de pH Checker by HANNA
- 01 balanza analítica KERN ABS-N
- 01 agitador magnético MS-H280-Pro Lb Pro
- 01 turbidímetro Hach 2 100p (2 100Q portable, rango 0-1000 NTU)

- 01 probador de jarras VELP SCIENTIFICA JLT 6
- 01 cocina eléctrica tipo plancha Práctika

b) Materiales

- 20 matraces erlenmeyers de 250 ml
- 16 matraces erlenmeyer de 100 ml
- 12 vasos de precipitados de 1000 ml
- 10 vasos de precipitados de 100 ml
- 06 vasos de precipitados de 250 ml
- 06 vasos de precipitados de 50 ml
- 02 pipetas graduadas de 5 ml
- 02 fioles de 50 ml
- 01 propipeta
- 01 probeta de 100 ml
- 01 probeta de 50 ml
- 01 probeta de 25 ml
- 01 bureta de 25 ml
- 01 fiola de 1000 ml
- 01 caja de papel filtro Whatman No 42
- 01 caja de papel filtro Whatman No 40
- 01 espátula con cucharilla
- Varillas de vidrio

- Jeringas de 5 ml
- Jeringas de 10 ml
- Jeringas de 60 ml
- Rejillas
- Gradilla para tubos
- Papel indicador Universal rango de pH 1-14
- Frascos de plástico de 120 ml para muestras

c) Reactivos

- 01 litro de cloruro férrico al 40 %
- 02 kits de Test Arsenico 0,005 – 0,010 – 0,025 – 0,05 – 0,10 – 0,25 – 0,50 mg/l As MQuant® Merckoquant Arsénico ultrasensible Rinde, 100 varillas.
- 01 kit de Test Hierro 0,1-0,2-0,3-0,5- 500 TESTS
- Ácido sulfúrico concentrado grado p.a. EMSURE® ISO
- Ácido nítrico concentrado grado p.a. (max. 0,005 ppm Hg) EMSURE® Reag. Ph Eur,ISO
- Ácido clorhídrico concentrado grado p.a. EMSURE® ACS,ISO,Reag. Ph Eur
- 01 kg de hidróxido de sodio en lentejas p.a. (max. 0,02 % K) EMSURE® ACS,Reag. Ph Eur,ISO
- Agua destilada

### 3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos se realizaron de acuerdo a cada etapa de la investigación. Para el análisis fisicoquímico de las muestras se utilizaron las siguientes técnicas:

- Para la toma y conservación de las muestras de agua se tomó como referencia la Resolución Jefatural No 010-2016-ANA Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.
- NTP 214.029 2000. Agua para consumo humano. Determinación de pH. Método electrométrico.
- NTP 311.329 1997. Cloruro férrico. Coagulante para el tratamiento de agua.
- Test Kit de Arsénico – método colorimétrico con tiras de ensayo y reactivos rango 0,005–0,5 mg/L marca MQuant.
- Tes Kit de Hierro – Método colorimétrico con disco comparador y reactivos rango 0 – 5 mg/L Fe marca MQuant.
- EPA 200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (Validado).2016. Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

Mientras que para el procesamiento de datos se utilizó los softwares y paquetes estadísticos como Excel, Minitab 2019 y Statgraphics Centurion.

### **3.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

La estrategia utilizada para el análisis de datos es utilizar la metodología de diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ , como screening, para luego establecer un diseño de superficie de respuesta de Box-Behken, el cual permitió estimar la función cuadrática de este experimento. Habiendo definido el propósito experimental, se procedió a realizar lo siguiente:

- a) Prueba de exploración: Consistió en realizar una prueba exploratoria utilizando los diferentes niveles de una cantidad amplia de factores, en este caso 5.
- b) Tamizado: Consistió en reducir la cantidad de factores que pueden estar involucrados en la experimentación.
- c) Caracterización: Consistió en cuantificar la influencia de cada uno de los factores incluidos en la etapa de experimentación.
- d) Optimización: Consistió en averiguar aquellas condiciones del proceso, es decir, aquellos niveles de los factores en los cuales se obtiene los mejores resultados.

En la Tabla 11 se muestra el arreglo experimental factorial fraccionado realizado como screening.

**Tabla 11***Arreglo experimental factorial fraccionado  $2^{5-1}$* 

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>		
	<b>Bajo (-1)</b>	<b>Medio (0)</b>	<b>Alto (+1)</b>
<b>X1</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
<b>X2</b>	<b>7</b>	<b>7,5</b>	<b>8</b>
<b>X3</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>X4</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>X5</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>

Fuente: Elaboración propia

Las variables respuestas fueron arsénico total (mg/l), hierro total (mg/l) y pH final. El diseño se realizó con cuatro puntos centrales y un solo bloque con 20 experimentos. Los niveles de los factores se denotaron como -1 (bajo), 0 (punto central) y +1 (alto). Los detalles se presentan en la Tabla 12

Donde:

X1 = Dosis de cloruro férrico (ppm)

X2 = pH inicial

X3 = Velocidad de floculación (rpm)

X4 = Tiempo de floculación (min)

X5 = Tiempo de sedimentación (min)

**Tabla 12***Delineamiento estadístico del diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$* 

N°	Variables de nivel codificado					Variables de nivel real					Respuesta		
	Dosis (ppm)	pH	V_f (rpm)	t_f (min)	t_s (min)	Dosis (ppm)	pH	V_f (rpm)	t_f (min)	t_s (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X2	X3	X4	X5	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	-1	-1	1	40	7	30	20	60			
2	1	-1	-1	-1	-1	50	7	30	20	30			
3	-1	1	-1	-1	-1	40	8	30	20	30			
4	1	1	-1	-1	1	50	8	30	20	60			
5	-1	-1	1	-1	-1	40	7	50	20	30			
6	1	-1	1	-1	1	50	7	50	20	60			
7	-1	1	1	-1	1	40	8	50	20	60			
8	1	1	1	-1	-1	50	8	50	20	30			
9	-1	-1	-1	1	-1	40	7	30	30	30			
10	1	-1	-1	1	1	50	7	30	30	60			
11	-1	1	-1	1	1	40	8	30	30	60			
12	1	1	-1	1	-1	50	8	30	30	30			
13	-1	-1	1	1	1	40	7	50	30	60			
14	1	-1	1	1	-1	50	7	50	30	30			
15	-1	1	1	1	-1	40	8	50	30	30			
16	1	1	1	1	1	50	8	50	30	60			
17	0	0	0	0	0	45	7.5	40	25	45			
18	0	0	0	0	0	45	7.5	40	25	45			
19	0	0	0	0	0	45	7.5	40	25	45			
20	0	0	0	0	0	45	7.5	40	25	45			

Fuente: Elaboración propia.



El diseño Box-Behnken se implementó para optimizar la remoción de arsénico. Dados los resultados obtenidos en el diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$  (20 experimentos), las variables analizadas fueron solo tres de las anteriores, pero los intervalos fueron ampliados para obtener una mayor área de exploración. El arreglo experimental del diseño de superficie de respuesta de Box-Behnken con cuatro puntos centrales y 16 experimentos se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Arreglo experimental de Box –Behken*

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>		
	<b>Bajo (-1)</b>	<b>Medio (0)</b>	<b>Alto (+1)</b>
<b>X1</b>	30	40	50
<b>X2</b>	20	40	60
<b>X3</b>	40	60	80

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

X1 = Dosis de cloruro férrico (ppm)

X2 = Gradiente de floculación (rpm)

X3 = Tiempo de sedimentación (min)

**Tabla 14***Delineamiento estadístico del diseño de superficie de respuesta de Box – Behken*

Nº	Variables de nivel codificado			Variables de nivel real			Respuesta		
	Dosis (ppm)	V_f (rpm)	t_s (min)	Dosis (ppm)	V_f (rpm)	t_s (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X3	X5	X1	X3	X5	Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	0	30	20	60			
2	+1	-1	0	50	20	60			
3	-1	+1	0	30	60	60			
4	+1	+1	0	50	60	60			
5	-1	0	-1	30	40	40			
6	+1	0	-1	50	40	40			
7	-1	0	+1	30	40	80			
8	+1	0	+1	50	40	80			
9	0	-1	-1	40	20	40			
10	0	+1	-1	40	60	40			
11	0	-1	+1	40	20	80			
12	0	+1	+1	40	60	80			
13	0	0	0	40	40	60			
14	0	0	0	40	40	60			
15	0	0	0	40	40	60			
16	0	0	0	40	40	60			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 14 muestra delineamiento estadístico del diseño de superficie de respuesta de Box – Behken con cuatro puntos centrales y 16 experimentos.

Para estimar la varianza se utiliza la Tabla 15:

**Tabla 15**

*Análisis de varianza*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
<b>Regresión</b>	SSR	p	MSR	MSR/MSE
<b>Error residual</b>	SSE	n-p-1	MSE	
<b>Total</b>	SST	n-1		

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

Donde:

SSR: Suma de los cuadrados de la regresión:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = SST - SSE \quad [25]$$

SSE: Suma de los cuadrados del error:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = (Y - XB)'(Y - XB) \quad [26]$$

SST: Suma total de los cuadrados:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = Y'Y - n(\bar{Y})^2 \quad [27]$$

Para el estadístico F:

$$F = \frac{SSR/(p)}{SSE/(n-p-1)} \quad [28]$$

Donde:

$p$  : N° de coeficientes excluyendo  $\beta_0$

Los parámetros estadísticos que se utilizó en la regresión múltiple son:

Coefficientes de determinación múltiple  $R^2$  y  $R^2$  ajustado.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad [29]$$

$$R^2_{ajustada} = 1 - \frac{SSE/(n-p)}{SST/(n-1)} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad [30]$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA CRUDA Y TRATAMIENTO UTILIZANDO CLORURO FÉRRICO

##### 4.1.1. Acondicionamiento de agua cruda

Al agua cruda utilizada fue recolectada del punto de captación de la Planta de Tratamiento de Ite, las características fisicoquímicas obtenidas luego de analizarlas en el laboratorio se observan en la Tabla 16.

**Tabla 16**

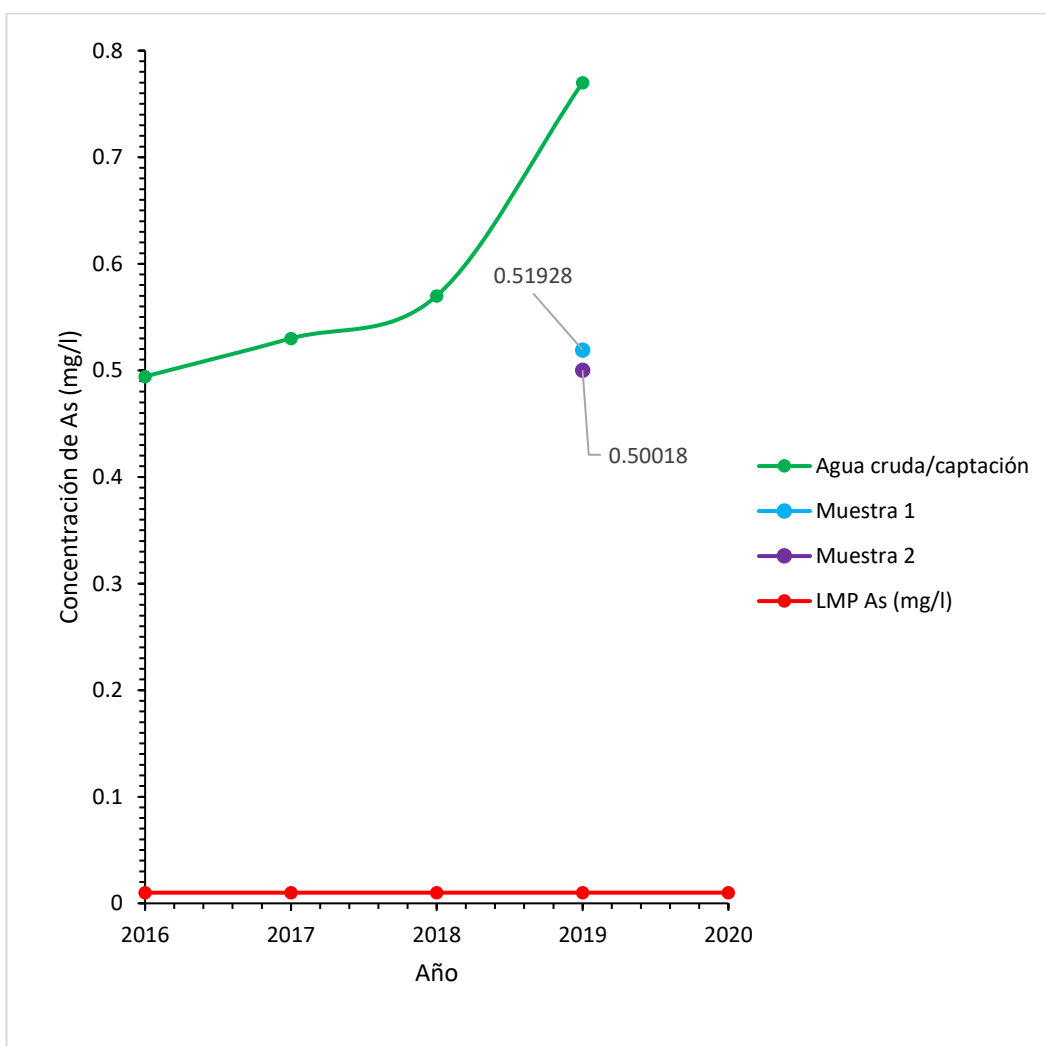
*Características fisicoquímicas del agua cruda*

Agua Cruda/ Captación	pH	Turbiedad (NTU)	As (mg/l)	Fe (mg/l)
Muestra 1	8,31	14 – 17,8	0,51928	0,0576
Muestra 2	8,45	11 – 14,5	0,50018	0,2573
<b>LMP</b>	6,5 – 8,5	5	0,01	0,3

**Fuente:** Elaboración propia.

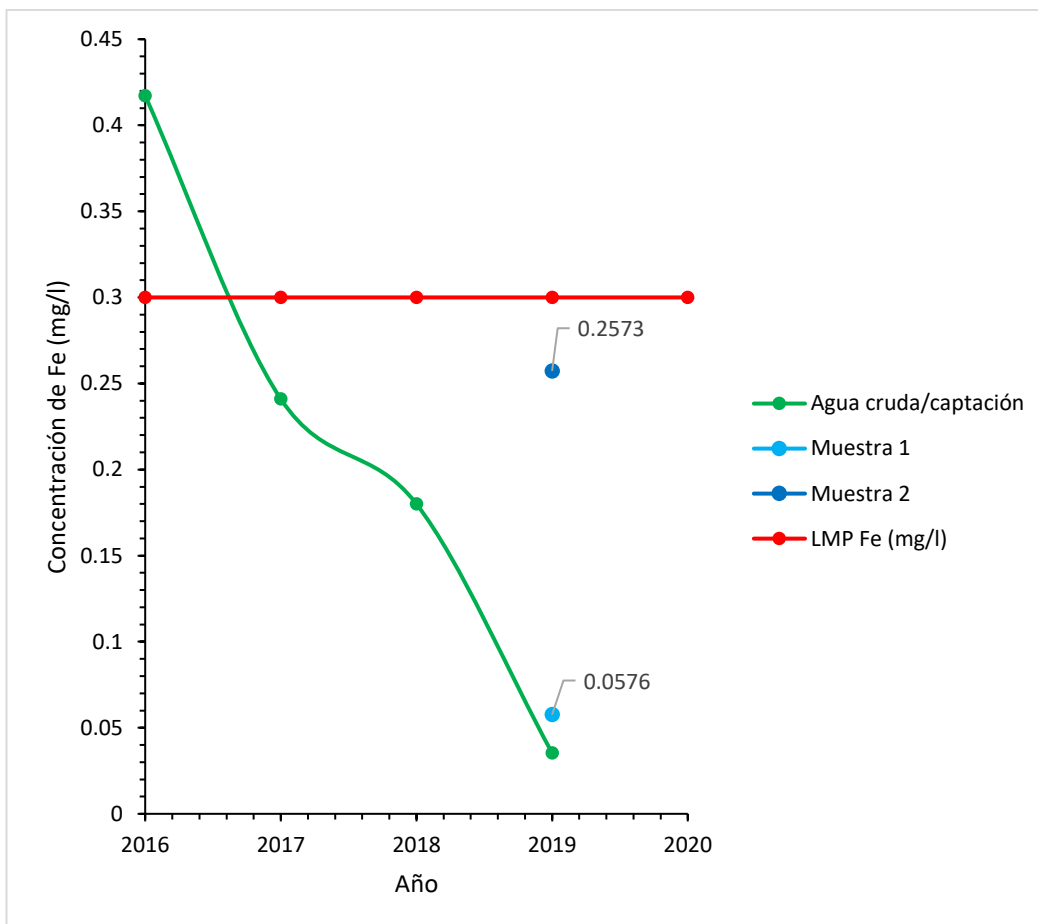
El valor de la concentración de arsénico en ambas muestras superó los límites máximos permisibles establecidos por la norma que es 0,01 mg/l As, mientras que en el Fe no hubo mayor inconveniente, ya que todos los valores obtenidos del agua cruda no superan los LMP que es 0,3 mg/l Fe. Estos resultados son coherentes con

los datos obtenidos por los monitoreos de la Dirección Regional de Salud – Tacna realizados a la Planta de tratamiento de agua de Ite en la zona de captación de agua cruda, en los últimos cuatro años, en las Figuras 14 y 15 se compara estos datos con los obtenidos en el análisis fisicoquímico del agua y la norma (DS N° 031-2010-SA).



**Figura 14:** Concentración de arsénico en el Río Locumba en los últimos 4 años

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 15:** Concentración de hierro en el Río Locumba en los últimos 4 años

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 16, el pH del agua cruda es de 8,47 en promedio, por lo que fue necesario su acondicionamiento para aplicar el tratamiento propuesto, para esto se utilizó ácido sulfúrico 0,1 M, agregando el volumen necesario dependiendo del pH requerido, cuyos valores estuvieron entre 7 y 8.

#### **4.1.2. Aplicación del cloruro férrico en el test de jarras**

Para el tratamiento del agua cruda se utilizó cloruro férrico como único coagulante. El porcentaje de pureza de este reactivo fue de 40 %, habiéndose realizado los cálculos respectivos para utilizar en la prueba de jarras una concentración de cloruro férrico que va desde 30 mg/L hasta 50 mg/L (ver anexo 3) en los diseños experimentales realizados.

Para realizar las pruebas se utilizó el test de jarras, el que consiste en una serie de recipientes a los que se adicionan distintas dosis de coagulantes. (Arboleda V., 1973). Con este método se puede determinar las mejores condiciones de operación para el tratamiento de agua, permitiendo ajustar el pH, realizar variaciones en las dosis de coagulantes y coadyuvantes, alternar velocidades de mezcla y recrear a escala de laboratorio las condiciones para un dimensionamiento a escala real.

El procedimiento experimental de coagulación – floculación realizado constó de las siguientes fases:

- Preparación de la muestra: En varios vasos de precipitados se agregó 1000 ml de la muestra a tratar. A continuación, se les añadió ácido sulfúrico 0,1 M para disminuir el pH hasta el valor seleccionado de acuerdo al diseño experimental.
- Coagulación: Se introdujo las paletas del probador de jarras en el interior de cada vaso, se inició la agitación con una velocidad de 200 rpm y se aplicó el coagulante, manteniendo esta velocidad durante 1 minuto.



- Floculación: Se modificó la velocidad de floculación y el tiempo de floculación de acuerdo al diseño establecido.
- Sedimentación: Se dejó reposar el contenido del vaso durante el tiempo establecido en el diseño experimental.

Luego de terminado el tratamiento se extrajo 300 ml de cada muestra, de las cuales 100 ml fueron conservados filtrados con papel Whatman No 40, 100 ml fueron conservados sin filtrar, y 100 ml fueron utilizados para el análisis en el laboratorio utilizando los kits de arsénico y hierro para determinar la concentración de estos metales, así como también el pH final y la turbiedad final de cada tratamiento.

Las muestras reservadas, siguiendo la Resolución Jefatural No 010-2016-ANA Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (anexo 4), se sometieron a una digestión suave (ver anexo 5), utilizando 50 µl ácido clorhídrico concentrado y 100 µl de ácido nítrico concentrado para 7 ml de muestra, se sometieron a un calentamiento uniforme de 95 °C por 150 min en un digestor de multicelda. Previo al análisis, las muestras ya digeridas y enrasadas a su volumen original pasaron por un microfiltro de 45 µm. La obtención de los datos se realizó por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), instrumento cuya precisión de análisis es de  $10^{-5}$ , por lo que los datos obtenidos dieron un dato preciso y la confirmación de los rangos obtenidos mediante kit de análisis cualitativos.

## **4.2. RESULTADOS DE LA MATRIZ DE DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO $2^{5-1}$ EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y HIERRO TOTAL**

### **4.2.1. Resultado del diseño factorial fraccionado $2^{5-1}$ para el agua tratada con filtración**

En la Tabla 17 se muestra el arreglo experimental del diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ , con las variables independientes dosis de cloruro férrico (x1), pH inicial (x2), velocidad de floculación (x3), tiempo de floculación (x4) y tiempo de sedimentación (x5); y los resultados que se obtuvieron de las concentraciones de arsénico total, hierro total y pH final (variables dependientes), en el agua tratada y filtrada.

**Tabla 17**

*Matriz de diseño experimental, para arsénico, hierro total y pH final en muestras filtradas*

N°	Variables de nivel real					Respuesta		
	Dosis (ppm)	pH	V_f (rpm)	t_f (min)	t_s (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
1	40	7	30	20	60	0,006515	0,070841	6,85
2	50	7	30	20	30	0,009874	0,077585	6,82
3	40	8	30	20	30	0,004829	0,085146	7,06
4	50	8	30	20	60	0,006399	0,046311	7,04
5	40	7	50	20	30	0,006707	0,072787	6,73
6	50	7	50	20	60	0,005567	0,081778	6,69
<b>7</b>	<b>40</b>	<b>8</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>0,010028</b>	<b>0,045451</b>	<b>7,34</b>
8	50	8	50	20	30	0,007612	0,088361	7,27
9	40	7	30	30	30	0,006315	0,059908	6,86
10	50	7	30	30	60	0,005153	0,104405	6,79
<b>11</b>	<b>40</b>	<b>8</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>0,010023</b>	<b>0,047624</b>	<b>7,37</b>
12	50	8	30	30	30	0,005822	0,059112	7,42
13	40	7	50	30	60	0,006146	0,058312	6,57
14	50	7	50	30	30	0,004385	0,073476	6,73
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>8</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>0,011467</b>	<b>0,080269</b>	<b>7,15</b>
16	50	8	50	30	60	0,006931	0,079911	7,17
17	45	7,5	40	25	45	0,006658	0,084661	6,97
18	45	7,5	40	25	45	0,008632	0,122855	7,03
19	45	7,5	40	25	45	0,007702	0,098268	7,01
20	45	7,5	40	25	45	0,008132	0,103884	6,98

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 17, solo tres resultados obtenidos de los veinte experimentos superaron el límite máximo permisible de la concentración de arsénico que es 0,01 mg/l As. Así también, los valores obtenidos de hierro residual se encontraron ampliamente por debajo de su límite máximo permisible que es 0,3 mg/l Fe, siendo entonces necesario solo el análisis de los resultados obtenidos en la remoción de arsénico.

Un diseño factorial fraccionado tiene la limitación de solo mostrar comportamientos lineales de las variables, por lo que no se puede determinar la no linealidad de los factores principales, y por lo tanto aquellas variables independientes que tienen un mayor efecto en el experimento. El diseño utilizado ( $2^{5-1}$ ) permitió identificar los factores significativos, estos factores fueron luego utilizados para plantear un diseño de superficie de respuesta (Box – Behnken).

En la Figura 16 se puede observar que la dosis y el pH son los factores que muestran mayor variación, siendo factores significativos, por lo tanto propuestos para el diseño de superficie de respuesta; sin embargo, según el Reglamento de Calidad de Agua para el consumo humano DS N° 031-2010-SA el pH mínimo para el agua potable es 6,5 siendo esto un limitante en el proceso, a medida que se aumenta la dosis, el pH disminuye; por consiguiente, el pH no sería un factor a modificar, sino que se estableció un mínimo óptimo de 7. Viendo los resultados con un pH 7 a diferentes dosis no se alcanza un valor menor al de la norma previamente mencionada.

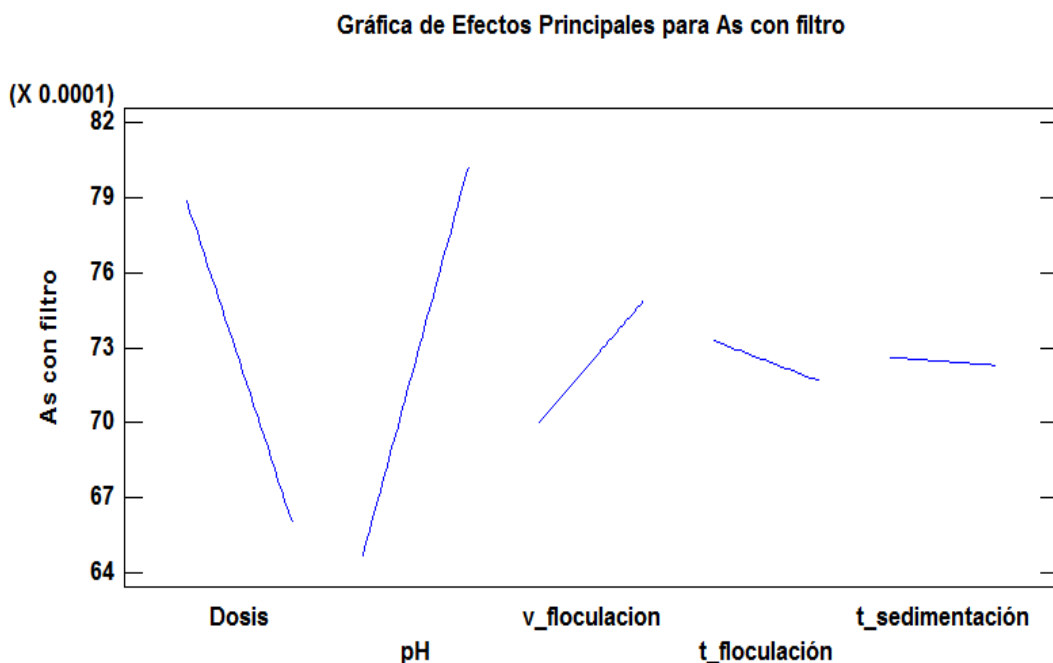


Figura 16: Diagrama de efectos principales para el arsénico total con filtro  
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la Figura 16 también se observa que la velocidad de floculación también presenta una variación considerable. En el rango dado de 30 rpm a 50 rpm se observó que a menor velocidad de floculación mayor remoción de arsénico, por lo que es una variable que se utilizó en un rango más amplio para observar si tiene un comportamiento no lineal y por ende se pueda hallar un óptimo.

Por otro lado, el tiempo de floculación no muestra variación por lo que se puede tomar un valor intermedio como constante en el siguiente diseño. El tiempo de sedimentación mostró menor variación, siendo poco significativo en los resultados obtenidos en cuanto a remoción de arsénico.

#### **4.2.2. Resultado del diseño factorial fraccionado $2^{5-1}$ para el agua tratada sin filtración**

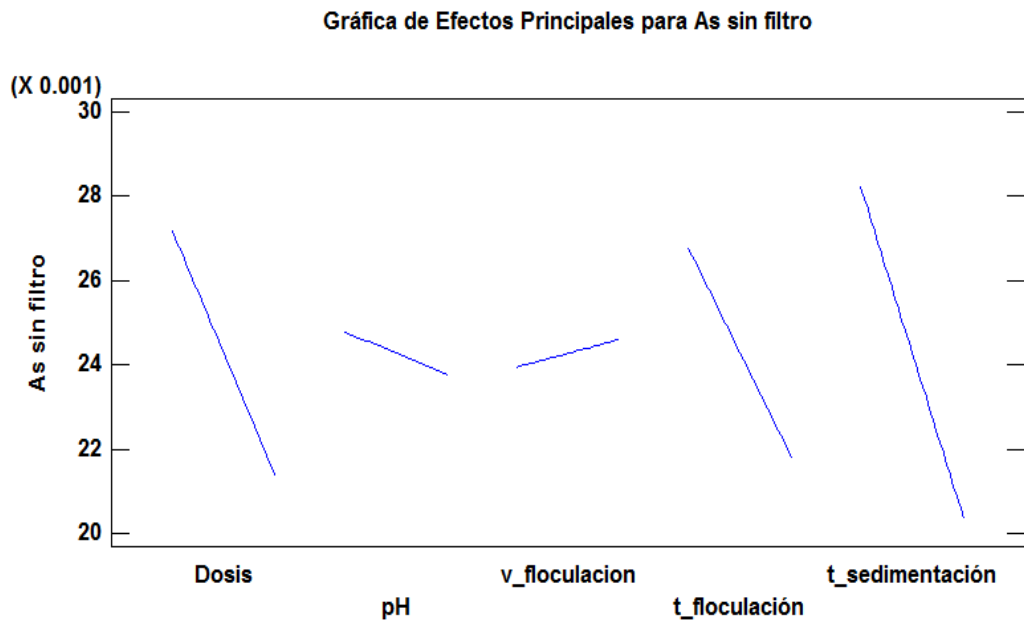
El último factor principal respecto al siguiente diseño (Diseño de superficie de respuesta), fue el factor que mostró mayor variación en las muestras sin filtrar para el mismo diseño factorial fraccionado, estos resultados se observan en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total y pH final en muestras sin filtrar*

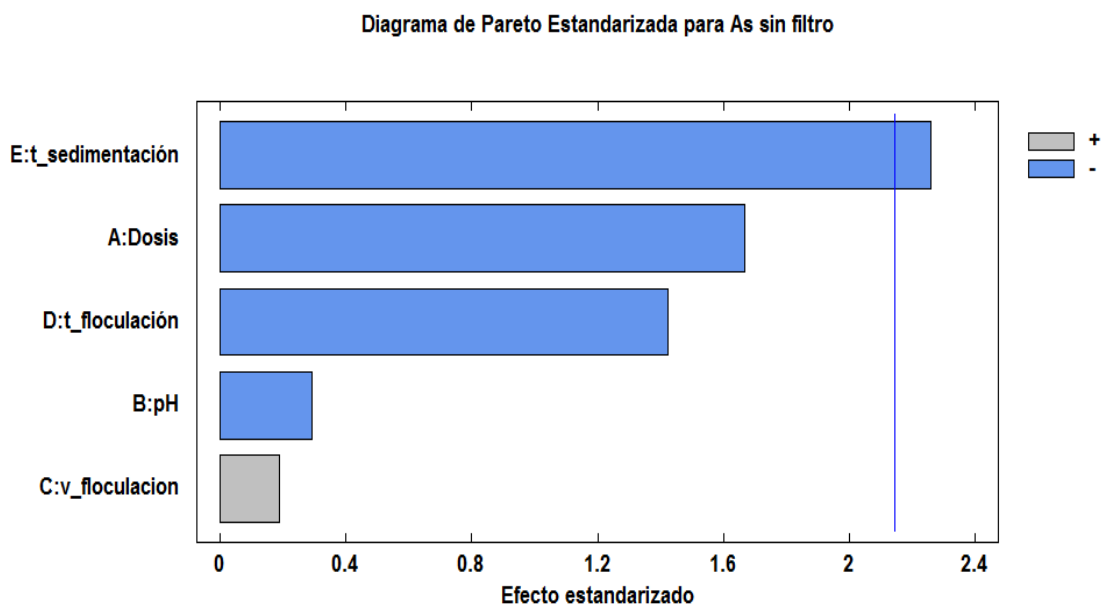
N°	Variables de nivel real					Respuesta		
	Dosis (ppm)	pH	V_f (rpm)	t_f (min)	t_s (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
1	40	7	30	20	60	0,035339	0,841843	6,85
2	50	7	30	20	30	0,034947	0,753321	6,82
3	40	8	30	20	30	0,021186	0,638172	7,06
4	50	8	30	20	60	0,026521	0,728158	7,04
5	40	7	50	20	30	0,036626	0,914641	6,73
6	50	7	50	20	60	0,016539	0,730413	6,69
7	40	8	50	20	60	0,02564	0,555446	7,34
8	50	8	50	20	30	0,027527	0,828255	7,27
9	40	7	30	30	30	0,026546	0,640615	6,86
10	50	7	30	30	60	0,014083	0,462606	6,79
11	40	8	30	30	60	0,02261	0,481439	7,37
12	50	8	30	30	30	0,020587	0,629546	7,42
13	40	7	50	30	60	0,017838	0,461253	6,57
14	50	7	50	30	30	0,026614	0,81803	6,73
15	40	8	50	30	30	0,041949	0,949368	7,15
16	50	8	50	30	60	0,01436	0,393956	7,17
17	45	7,5	40	25	45	0,017117	0,476475	6,97
18	45	7,5	40	25	45	0,019379	0,503623	7,03
19	45	7,5	40	25	45	0,01917	0,541906	7,01
20	45	7,5	40	25	45	0,020944	0,534973	6,98

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 17:** Gráfica de efectos principales para el arsénico sin filtro

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI



**Figura 18:** Diagrama de Pareto Estandarizado para el arsénico sin filtro

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI



En la Figura 17 se muestra la gráfica de efectos principales para la remoción de arsénico en muestras tratadas sin filtrar, como se puede apreciar, la dosis sigue siendo un factor relevante, los factores pH y la velocidad de floculación no muestran gran variación; sin embargo, es posible distinguir que el tiempo de floculación y el tiempo de sedimentación muestran gran variación; siendo este efecto más pronunciado en el tiempo de sedimentación, a mayor tiempo de sedimentación menor concentración de arsénico. Del mismo modo, en la Figura 18 se muestra el diagrama de Pareto Estandarizado para las pruebas de remoción de arsénico sin filtro en el que se observó que el factor de mayor influencia es el tiempo de sedimentación.

Este screening o diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ , dio como resultado la selección de las variables (factores principales) que fueron utilizadas para el diseño experimental de superficie de respuesta de Box-Behnken, con tres variables independientes: Dosis de coagulante, Velocidad de floculación y tiempo de sedimentación

### **4.3. RESULTADOS DE LA MATRIZ DE SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL DISEÑO DE BOX-BEHKEN PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y HIERRO TOTAL**

#### **4.3.1. Agua tratada con filtración**

En la Tabla 19 se observa el arreglo del diseño Box – Behnken, con las variables independientes Dosis (x1), Velocidad de floculación (x2) y tiempo de

sedimentación (x3) y los resultados que se obtuvieron de arsénico total, hierro total y pH final (variables dependientes), en el agua tratada con filtración.

**Tabla 19**

*Matriz del diseño experimental de Box – Benhken, respuesta de arsénico, hierro total y pH final – Agua filtrada*

N°	Variables de nivel codificado			Variables de nivel real			Respuesta		
	Dosis (ppm)	Vel. Floc. (rpm)	T de sedim (min)	Dosis (ppm)	Vel. Floc. (rpm)	T de sedim (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X3	X5	X1	X3	X5	Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	0	30	20	60	0,009916	0,075212	6,88
2	+1	-1	0	50	20	60	0,00393	0,070796	6,78
3	-1	+1	0	30	60	60	0,006703	0,058544	6,89
4	+1	+1	0	50	60	60	0,004689	0,084448	6,63
5	-1	0	-1	30	40	40	0,008594	0,088642	6,84
6	+1	0	-1	50	40	40	0,003791	0,093545	6,78
7	-1	0	+1	30	40	80	0,008719	0,077015	6,82
8	+1	0	+1	50	40	80	0,00373	0,075661	6,77
9	0	-1	-1	40	20	40	0,007005	0,100336	6,84
10	0	+1	-1	40	60	40	0,004409	0,079151	6,78
11	0	-1	+1	40	20	80	0,003525	0,016347	6,76
12	0	+1	+1	40	60	80	0,004074	0,060485	6,72
13	0	0	0	40	40	60	0,005098	0,095465	6,78
14	0	0	0	40	40	60	0,005633	0,110538	6,76
15	0	0	0	40	40	60	0,006905	0,075391	6,84
16	0	0	0	40	40	60	0,005663	0,120816	6,86

**Fuente:** Elaboración propia.

De los resultados obtenidos de concentración de arsénico y hierro total del agua tratada con filtración, que se observan en la Tabla 19, se puede dilucidar que todos los resultados de análisis de arsénico total están por debajo de los límites máximos permisible establecidos en el Reglamento de Calidad de Agua para el consumo humano DS N° 031-2010-SA (Ver anexo 1), del mismo modo, en todos los resultados la concentración de hierro total no supera los 0,03 mg/L Fe como establece la norma anteriormente mencionada; y por lo tanto, no es necesario realizar un análisis estadístico de esta condición experimental.

#### **4.3.2. Agua tratada sin filtración**

En la Tabla 20 es mostrado el arreglo del diseño Box – Behnken, con las variables independientes dosis (x1), velocidad de floculación (x2) y tiempo de sedimentación (x3), y los resultados logrados de arsénico total, hierro total y pH final (variables dependientes), en el agua tratada sin filtración. Las muestras obtenidas de este diseño experimental fueron analizadas en un laboratorio de ensayo acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL – DA con registro N° LE-002, mediante método de ensayo: EPA 200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (Validado) 2016, para metales totales. (Ver anexo 6)

**Tabla 20**

*Matriz del diseño experimental de Box – Benhken, respuesta de arsénico, hierro total y pH final – Agua sin filtración*

N°	Variables de nivel codificado			Variables de nivel real			Respuesta		
	Dosis (ppm)	Vel. Floc. (rpm)	T de sedim (min)	Dosis (ppm)	Vel. Floc. (rpm)	T de sedim (min)	As (mg/l)	Fe (mg/l)	pH final
	X1	X3	X5	X1	X3	X5	Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	0	30	20	60	0,03671	1,1162	6,88
2	+1	-1	0	50	20	60	0,01739	0,9037	6,78
3	-1	+1	0	30	60	60	0,01601	0,4828	6,89
4	+1	+1	0	50	60	60	0,01056	0,5795	6,63
5	-1	0	-1	30	40	40	0,02018	0,6612	6,84
6	+1	0	-1	50	40	40	0,01061	0,592	6,78
7	-1	0	+1	30	40	80	0,01695	0,4487	6,82
<b>8</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>80</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,4099</b>	<b>6,77</b>
9	0	-1	-1	40	20	40	0,02304	0,902	6,84
10	0	+1	-1	40	60	40	0,01547	0,6412	6,78
11	0	-1	+1	40	20	80	0,02161	0,8755	6,76
12	0	+1	+1	40	60	80	0,00924	0,3961	6,72
13	0	0	0	40	40	60	0,01228	0,5618	6,78
14	0	0	0	40	40	60	0,01338	0,5605	6,76
15	0	0	0	40	40	60	0,01238	0,4847	6,84
16	0	0	0	40	40	60	0,01484	0,5532	6,86

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.2.1. Análisis estadístico para la remoción de arsénico sin filtración

En la Tabla 21 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), para la variable independiente Arsénico total (mg/l), en la que se visualizan las fuentes de variación debido a la regresión y errores residuales, así como el estadístico F cuyo valor es 27,31, lo que indica que el modelo es significativo. Los resultados se han evaluado a partir del modelo de regresión múltiple utilizando mínimos cuadrados (anexo 7).

**Tabla 21**

*Análisis de varianza para el arsénico total*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
<b>Debido a la regresión</b>	0,000711404	9	$7,9044 \times 10^{-5}$	27,31205
<b>Debido a los errores residuales</b>	$1,73648 \times 10^{-5}$	6	$2,89414 \times 10^{-6}$	
<b>Total</b>	0,00072877	15		

Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes del modelo, los efectos principales y efectos de las interacciones, el error típico de cada factor, así como la probabilidad para el diseño de superficie Box-Behnken son presentados en la Tabla 22.

**Tabla 22***Análisis de la regresión múltiple para la remoción de arsénico*

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Constante	0,115159	-0,115141635	15,54	0
A: Dosis (ppm)	-0,00274688	0,002764245	-8,93	0,0001
B: Vel de floculación (rpm)	-0,00183794	0,001855305	-9,87	0,0001
C: Tiempo de sedimentación (min)	0,000297125	-0,00027976	-2,74	0,0336
AA	1,80875x10 <sup>-5</sup>	-7,2267x10 <sup>-7</sup>	2,13	0,0776
AB	1,73375x10 <sup>-5</sup>	2,7325x10 <sup>-8</sup>	4,08	0,0065
AC	1,15x10 <sup>-6</sup>	1,6215x10 <sup>-5</sup>	0,27	0,7659
BB	1,28469x10 <sup>-5</sup>	4,5179x10 <sup>-6</sup>	6,04	0,0009
BC	-3x10 <sup>-6</sup>	2,0365x10 <sup>-5</sup>	-1,41	0,208
CC	-2,55x10 <sup>-6</sup>	1,9912x10 <sup>-5</sup>	-1,2	0,2762

Fuente: Elaboración propia.

Se observa además que los factores principales A (Dosis), B (Velocidad de floculación) y C (tiempo de sedimentación), así como las interacciones AB (Dosis\* Velocidad de floculación), y BB (cuadrado de la Velocidad de floculación), son significativos con un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0,05$ ). Así también, el modelo ajustado muestra un coeficiente de correlación  $R^2$  igual a 0,97617 que explica que la variabilidad en la variable dependiente arsénico total está determinada por las variables independientes (Dosis, tiempo de floculación y tiempo de sedimentación), alcanzando un  $R^2$  ajustado de 94,894 %, este último valor deberá estar por encima del 70 %, valor sugerido como mínimo para fines de optimización. (Gutiérrez & de la Vara Salazar, 2012)

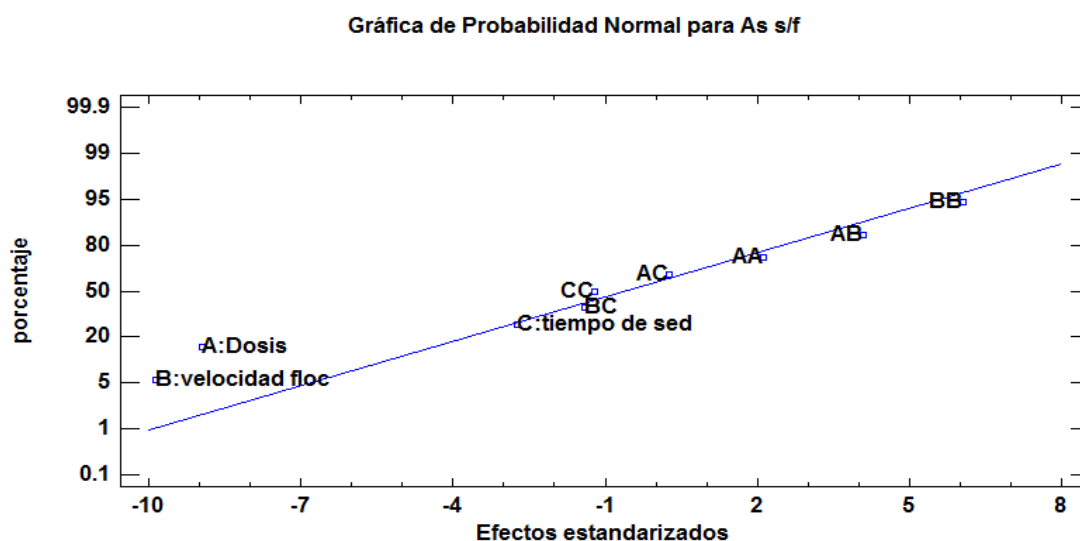
**Tabla 23**

*Resumen de ajuste estadístico para la variable arsénico total*

Estadística de regresión	
Coefficiente de determinación $R^2$	0,97617
$R^2$ ajustado	0,94894
Observaciones	16

Fuente: Elaboración propia.

Con el afán de evaluar cada factor y su interacción, se encuentra la gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados para dicha remoción, en la Figura 19.

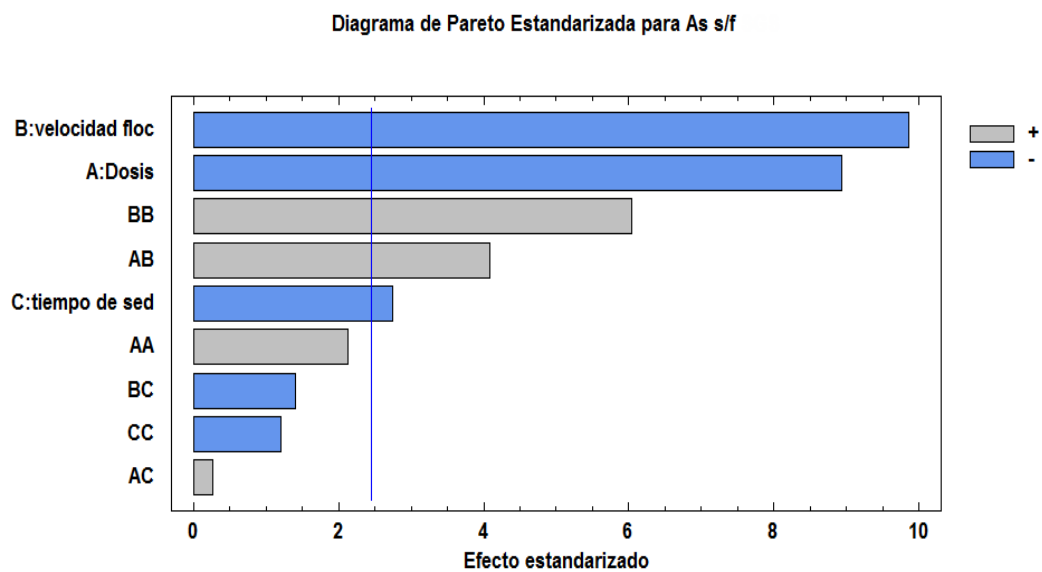


**Figura 19:** Gráfica de probabilidad normal para arsénico total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

Esta gráfica muestra básicamente dos regiones, la región que se encuentra inferior al 50 %, donde los factores y sus interacciones presentan coeficientes negativos (A: Dosis, B: Velocidad de floculación, BC y CC) y la región superior al

50 % donde los factores presentan coeficientes positivos (C: Tiempo de sedimentación, AA, AB, AC y BB). Las interacciones y factores se encuentran lejos de la línea van a ser significativos, por otro lado, los que se encuentren sobre la línea, van a corresponder a la estimación de los errores de los efectos, por lo que no son significativos. Los valores positivos de los efectos nos indican que al incrementarse sus niveles consiguen un incremento en el porcentaje de remoción. Contrariamente, los valores negativos de los efectos, cuando son aumentados sus niveles, van a conducir a una disminución de la respuesta (Porcentaje de remoción).



**Figura 20:** Diagrama de Pareto estandarizada para el arsénico total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

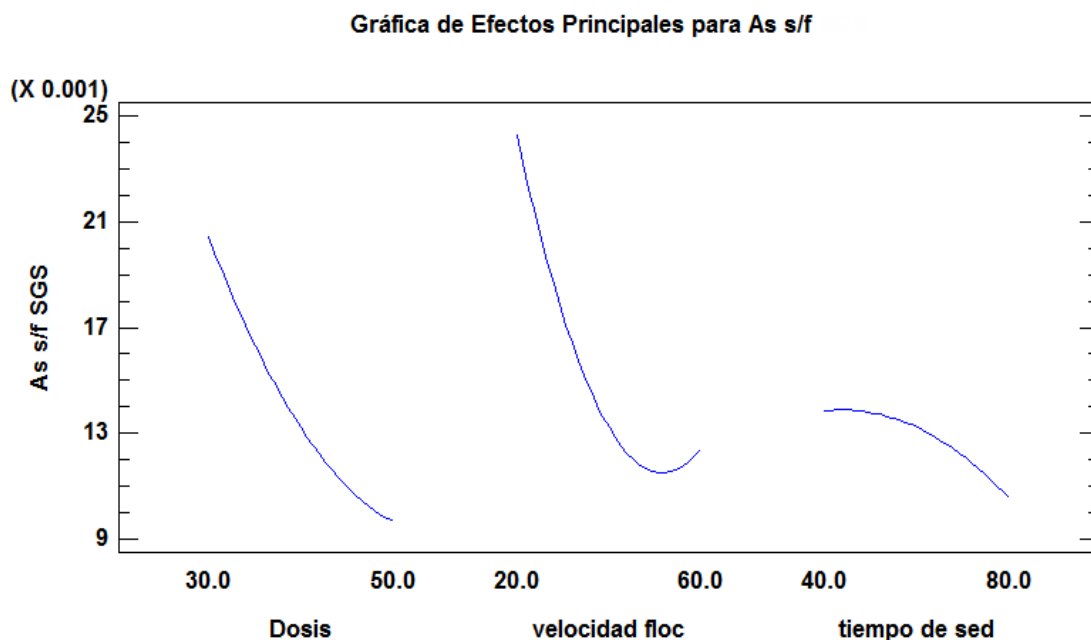
En la Figura 20 De igual manera, se observa el diagrama de Pareto en el que se representan los efectos estandarizados con  $p = 0,05$ . Se puede observar que los factores A: Dosis, B: Velocidad de floculación y su forma cuadrática BB son los



más significativos con igual efecto al observado en la gráfica anterior, siendo significativos también, pero en menor nivel la interacción entre la dosis y velocidad de floculación AB y el tiempo de sedimentación C. La longitud de las barras corresponde al valor absoluto del efecto estandarizado. De esta manera, se confirma que el modelo presenta una curvatura, provocada ante todo, por el gran aporte del efecto del término cuadrático BB.

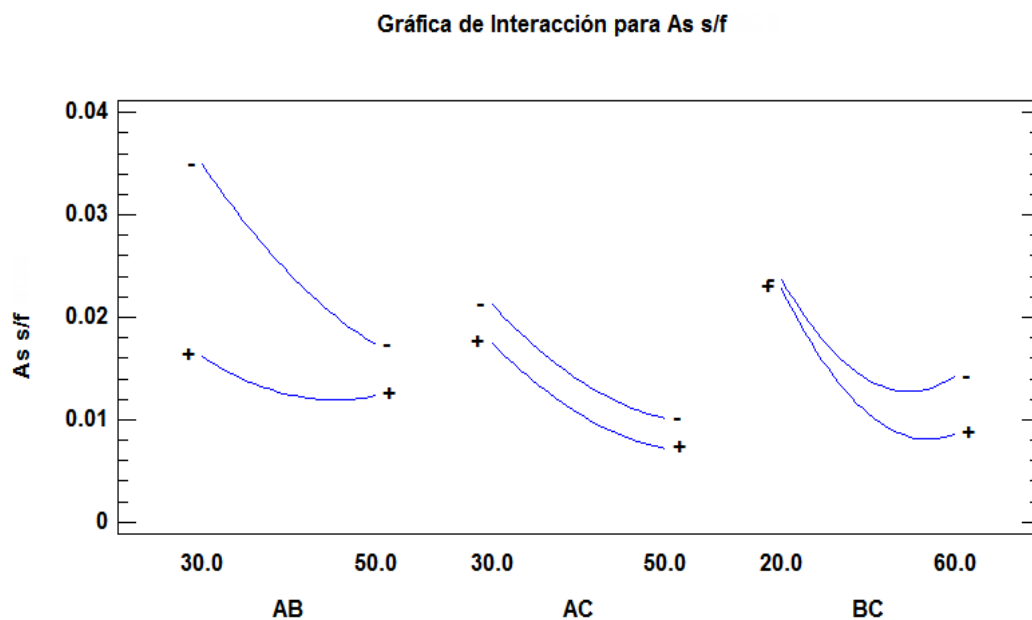
Analizando la Figura 20 y los valores de la Tabla 22, puede establecerse que la dosis y la velocidad de floculación fueron las variables más importantes de todo el proceso de remoción de arsénico.

El tercer efecto más importante fue el factor cuadrático BB, el que indica la presencia de una curvatura en el modelo y por lo tanto un posible máximo porcentaje de remoción para ciertos valores de las variables analizadas. Dicha curvatura se puede observar en la Figura 21, en la que se muestra el efecto de las principales variables con relación a la variable respuesta. Mientras que en la Figura 22, de las interacciones, la más significativa es la de dosis – velocidad de floculación.



**Figura 21:** Gráfica de efectos principales para el arsénico

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI



**Figura 22:** Gráfica de interacciones para el arsénico total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

#### **4.3.2.2. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el arsénico sin filtración**

El diseño de superficie de respuesta de Box – Behnken se utilizó para encontrar la relación entre la variable dependiente Y1: Arsénico total (mg/l) y las variables independientes x1: Dosis, x2: Velocidad de floculación y x3: Tiempo de sedimentación, la que se manifiesta a través de una ecuación empírica que identifica dicha relación. Utilizando los valores de los coeficientes (Tabla 22) hallados por mínimos cuadrados (Ver anexo 7) se obtiene el modelo empírico final para la remoción de arsénico, el que se muestra en la siguiente ecuación:

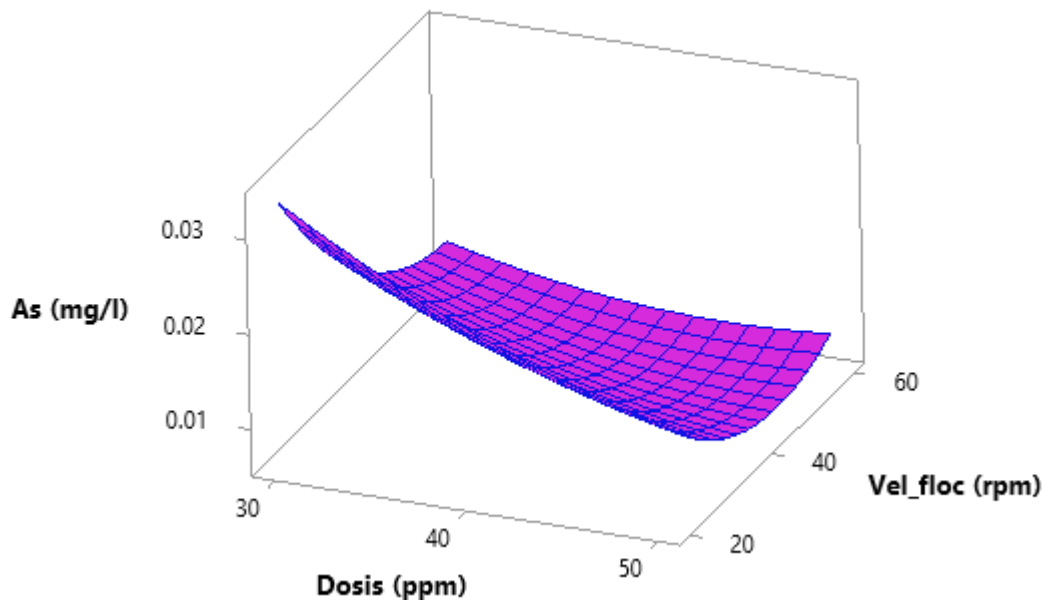
$$y_1 = 0,11515875 - 0,00274687x_1 - 0,00183794x_2 - 0,000297125x_3 + 1,73375 \times 10^{-5} x_1x_2 + 1,15 \times 10^{-6} x_1x_3 - 3 \times 10^{-6} x_2x_3 + 1,80875 \times 10^{-5} x_1^2 + 1,28469 \times 10^{-5} x_2^2 - 2,5469 \times 10^{-6} x_3^2 \quad [31]$$

#### **4.3.2.3. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico.**

Para poder apreciar los efectos combinados de los tres factores sobre la remoción de arsénico, se llevó a cabo la metodología de superficie de respuesta y se construyeron gráficos en tres dimensiones, utilizando como valores constantes las condiciones del experimento en los cuales hubo una mayor remoción de arsénico.

En la figura 23 se muestra la superficie de respuesta en una gráfica tridimensional con dos variables, Dosis y velocidad de floculación ante la

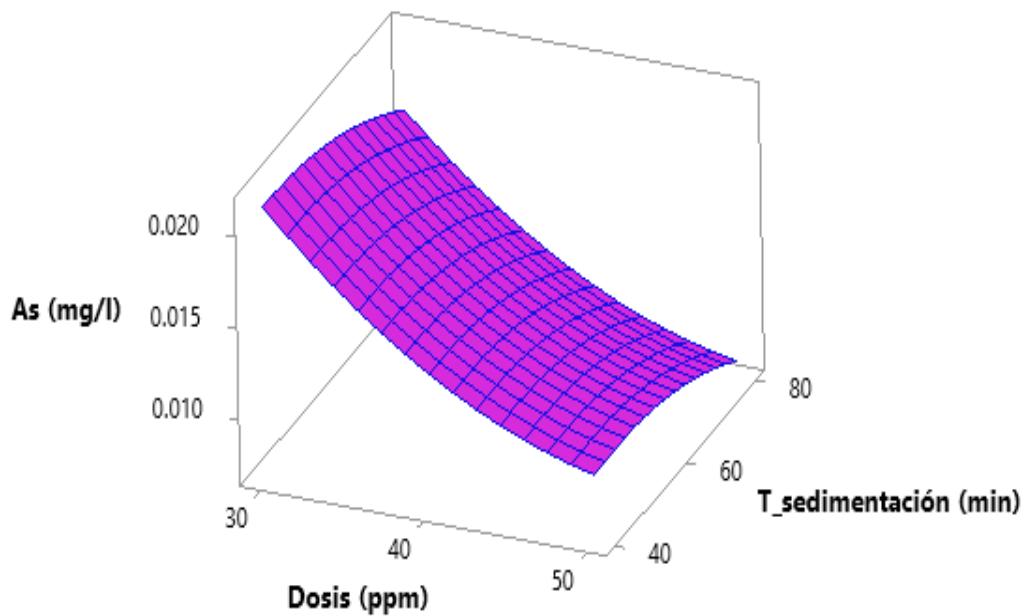
concentración de arsénico total, manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min. Se puede observar que a medida que aumenta la dosis de cloruro férrico, la remoción de arsénico aumenta en todo el rango, así mismo, se puede observar una curvatura en la velocidad de floculación, lo cual indica la presencia de un punto óptimo, muy cercano al valor de 40 rpm.



**Figura 23:** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. las variables independientes dosis (ppm) y velocidad de floculación (rpm), manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

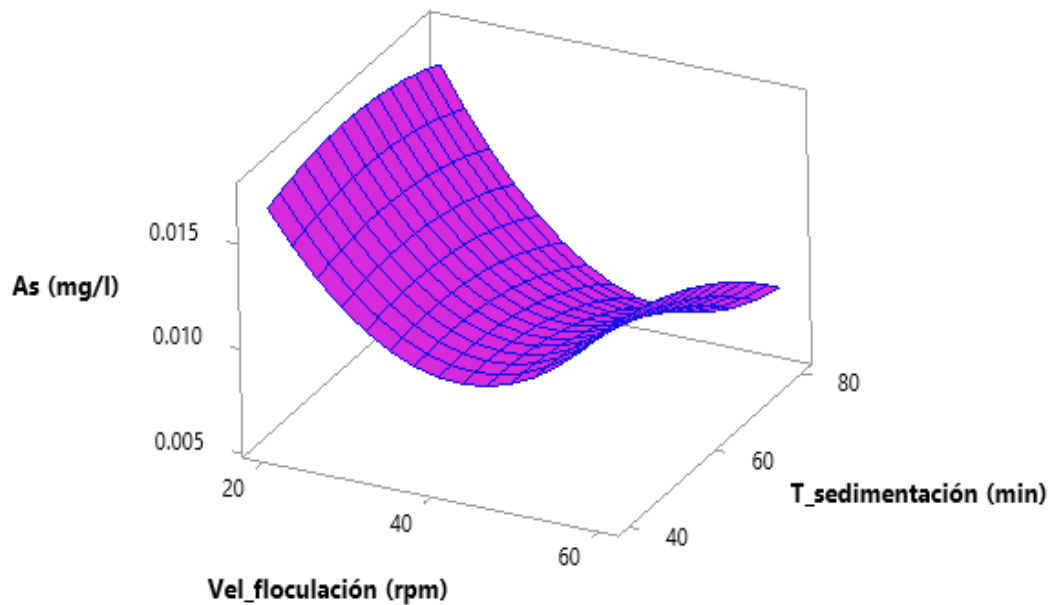
En la Figura 24 se muestra la superficie de respuesta en tres dimensiones, del efecto combinado de la dosis (ppm) y tiempo de sedimentación (min) con una velocidad de floculación de 40 rpm, se observa nuevamente que en todo el rango de tiempo de sedimentación hay remoción de arsénico, mientras que la remoción aumenta a medida que aumenta la dosis.



**Figura 24:** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. las variables independientes dosis (ppm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la velocidad de floculación a 40 rpm

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019.

En la Figura 25 se puede observar con mayor claridad, que para el tiempo de floculación existe un punto óptimo en el que existe una mayor remoción de arsénico, siendo beneficiado por el aumento del tiempo de sedimentación, la remoción aumenta a mayor tiempo de sedimentación, manteniendo una dosis constante de 50 mg/L de cloruro férrico.



**Figura 25:** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total (mg/l) vs. la velocidad de floculación (rpm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la dosis a 50 ppm.

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019.

#### **4.3.2.4. Determinación de las mejores condiciones de operación de dosis, velocidad de floculación y tiempo de sedimentación en la remoción de arsénico**

Para determinar las mejores condiciones de operación se utilizó la ecuación del modelo de regresión múltiple hallada (ecuación 31) y se aplicó el criterio del Hessiano o de la segunda derivada.

Para hallar los puntos críticos se derivó parcialmente la ecuación, una vez halladas las ecuaciones lineales se igualaron a cero. Del desarrollo matemático correspondiente (ver anexo 8) se obtuvieron los siguientes puntos críticos:

$$x_1: 55,4017$$

$$x_2: 39,6906$$

$$x_3: 47,4631$$

Se utilizó el criterio del Hessiano para clasificar los puntos críticos obtenidos, de modo que sean un mínimo local, y máximo local o un punto silla. (Malakhaltsev & Arteaga, 2013). Luego, el criterio dice que:

Si  $H_1(f) > 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local

Si  $H_1(f) < 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local

Si  $H_1(f) \neq 0; H_2(f) \neq 0$  y  $H_3(f) \neq 0$ , y no satisface ninguna de las anteriores entonces  $f$  posee un punto silla

De las determinantes halladas  $Hf(x_1, x_2, x_3)$ :

$$H_1(f) = 3,6175 \times 10^{-5} > 0$$

$$H_2(f) = 6,28882 \times 10^{-10} > 0$$

$$H_3(f) = -3,68255 \times 10^{-15} < 0$$

Donde  $y_1 = f$

Analizando la matriz hessiana para clasificar el punto crítico de la función  $y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$ , utilizando el criterio de la segunda derivada se observa que los valores no satisfacen las primeras dos condiciones, por lo tanto, no hay extremos locales (mínimo o máximo), por lo tanto, teniendo en cuenta la última condición se puede afirmar que el punto crítico es un punto silla.

Evaluando el punto  $(x_1: 55,4017; x_2: 39,6906; x_3: 47,4631)$ , donde  $x_1$  es la dosis,  $x_2$  la velocidad de floculación y  $x_3$  el tiempo de sedimentación, en la ecuación de regresión (ecuación 31) se obtiene que el valor de la concentración de arsénico  $y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$  es 0,00964 mg/l As, obteniendo un porcentaje de remoción del 97,79 %.

Contrastando los datos obtenidos con los gráficos de superficie de respuesta, se puede observar que los datos más bajos de arsénico final fueron hallados en el extremo mayor del tiempo de sedimentación (80 min), por otro lado, el valor hallado de la velocidad de floculación es muy próximo al hallado en el punto crítico; mientras que, en la variables dosis, también se observó que la mayor remoción de arsénico se logra a mayor dosis, pero el valor de concentración de arsénico obtenido en el punto crítico supera el rango propuesto.

Con el fin de obtener una mejor aproximación de los parámetros de operación que permitan la mayor remoción de arsénico, se utilizó el software Minitab 2019 del que se obtuvo los datos mostrados en la Tabla 24.

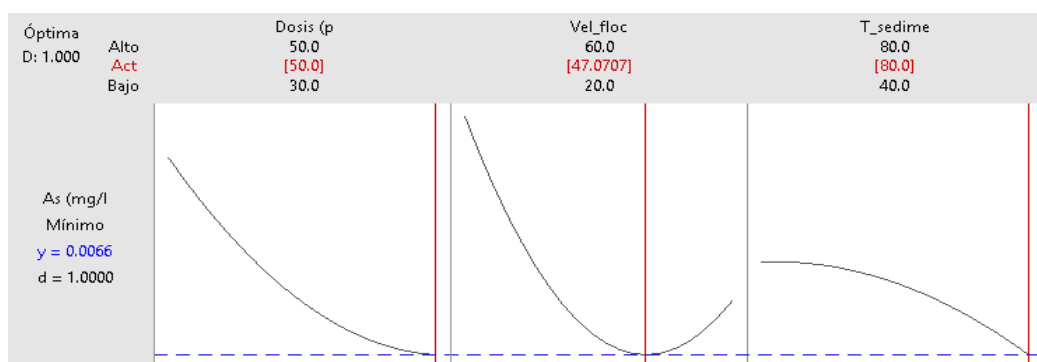
**Tabla 24**  
*Predicción de respuesta múltiple para la variable arsénico total*

<b>Variable</b>	<b>Valor de configuración</b>
Dosis (ppm)	50
Vel. de floculación (rpm)	47,0707
Tiempo de sedimentación (min)	80

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019



Evaluando nuevamente los valores obtenidos en la ecuación de regresión (ecuación 31) se obtiene que el valor de la concentración de arsénico  $y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$  es 0,00656 mg/l As, obteniendo un porcentaje de remoción del 98,50 %.



**Figura 26:** Curvas de predicción para la optimización de la respuesta arsénico total (mg/l)  
**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

En la Figura 26 se observa la optimización de las variables dosis (x1), velocidad de floculación (x2) y tiempo de sedimentación (x3) para la obtención de una mayor remoción de arsénico.

#### 4.3.2.5. Análisis estadístico para el hierro total sin filtración

En la Tabla 25 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), para la variable independiente hierro total (mg/l) o hierro residual, además se visualizan las fuentes de variación debido a la regresión y errores residuales, así como el estadístico F cuyo valor es 35,33, lo que indica que el modelo es significativo. Los resultados se han evaluado a partir del modelo de regresión múltiple (ver anexo 9).

**Tabla 25***Análisis de varianza para el hierro total*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
<b>Debido a la regresión</b>	0,63240301	9	0,070266959	35,3266427
<b>Debido a los errores residuales</b>	0,0119344	6	0,001989064	
<b>Total</b>	0,644337	15		

**Fuente:** Elaboración propia.

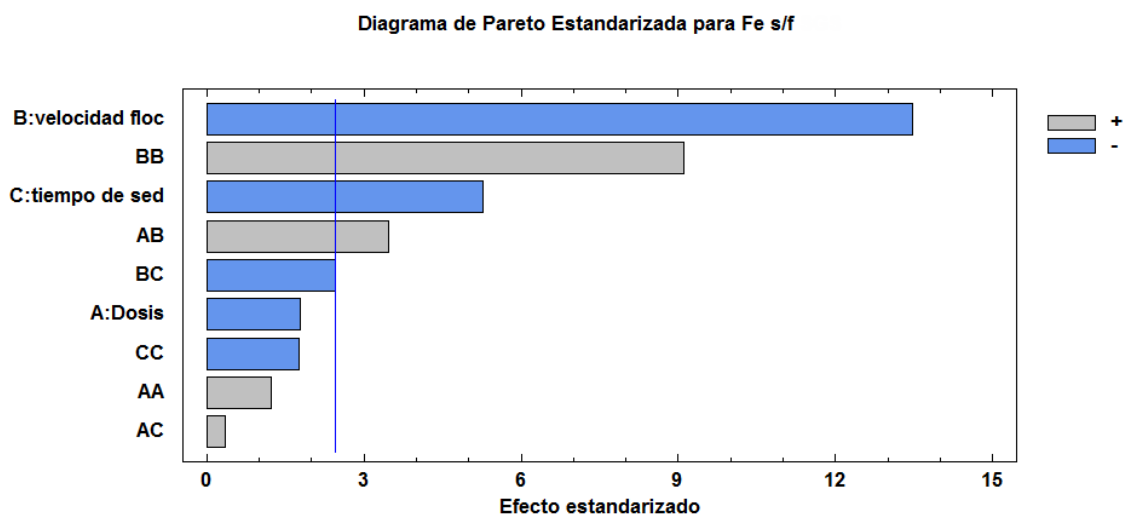
Los coeficientes del modelo, los efectos principales y efectos de las interacciones, el error típico de cada factor y la probabilidad para el diseño de superficie Box-Behnken para la variable dependiente hierro total o residual se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26***Análisis de la regresión múltiple para el hierro total o hierro residual*

<b>Parámetro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>
Constante	2,60315	-2,5912156	24,22	0
A: Dosis (ppm)	-0,0424375	0,0543719	-1,77	0,1264
B: Vel de floculación (rpm)	-0,0584988	0,0704332	-13,46	0
C: Tiempo de sedimentación (min)	0,0116238	0,0003106	-5,28	0,0019
AA	0,00027375	0,01166065	1,23	0,2656
AB	0,0003865	0,0115479	3,47	0,0134
AC	$3,80 \times 10^{-5}$	0,0118964	0,34	0,7449
BB	0,000507813	0,011426587	9,11	0,0001
BC	-0,000136625	0,012071025	-2,45	0,0497
CC	$-9,87 \times 10^{-5}$	0,012033088	-1,77	0,1271

**Fuente:** Elaboración propia.

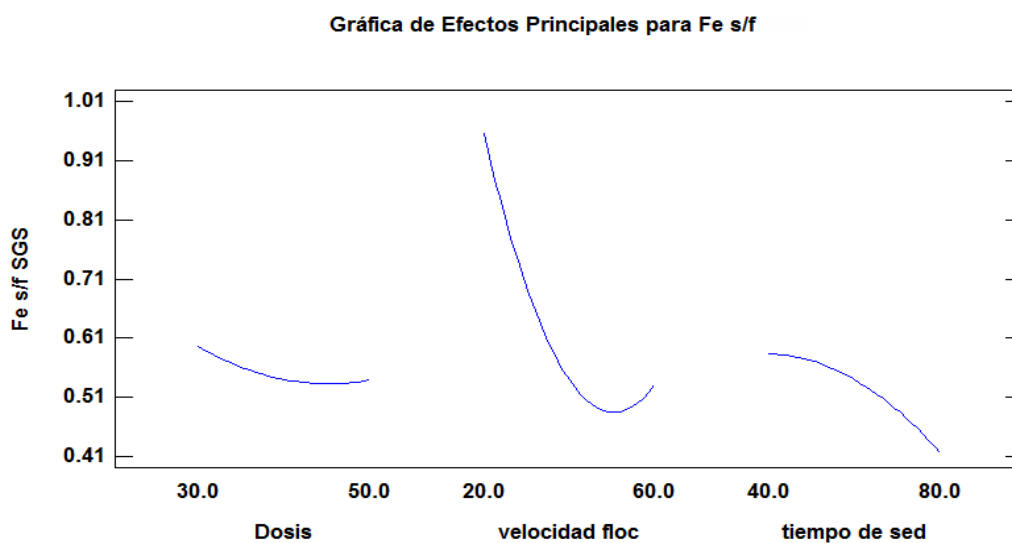
Se observa además que dos factores principales B (Velocidad de floculación) y C (Tiempo de sedimentación), así como las interacciones AB (Dosis\*Velocidad de floculación) y BC (Velocidad de floculación\*Tiempo de sedimentación) y BB (cuadrado de la velocidad de floculación), son significativos con un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0,05$ ). Así también, el modelo ajustado presenta un coeficiente de correlación  $R^2$  igual a 98,15 % que explica que la variabilidad en la variable dependiente hierro total está determinada por las variables independientes (Dosis, tiempo de floculación y tiempo de sedimentación), alcanzando un  $R^2$  ajustado de 96,03 %, este último valor cumple en estar por encima del 70 %, valor sugerido como mínimo para fines de optimización. (Gutiérrez & de la Vara Salazar, 2012)



**Figura 27:** Diagrama de Pareto estandarizada para el hierro total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

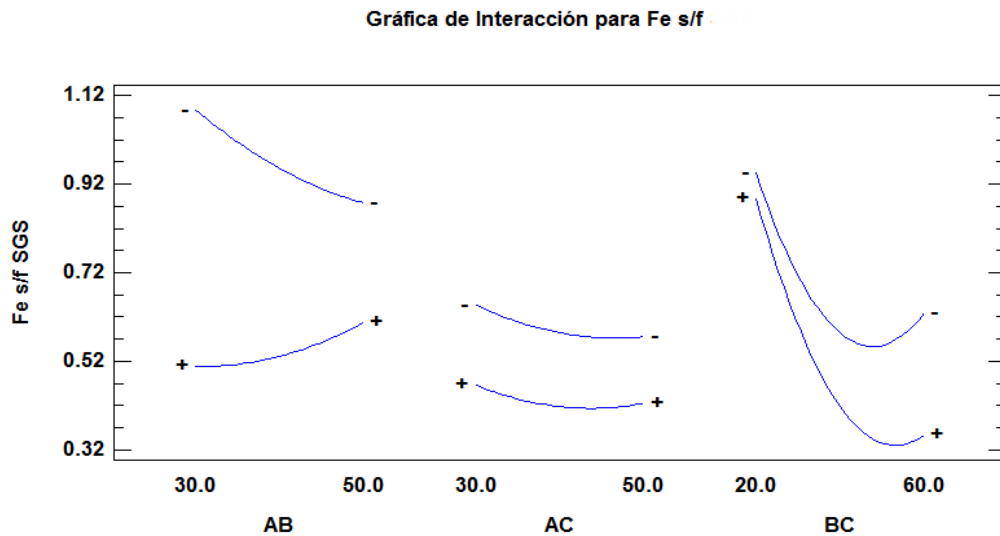
En el diagrama de Pareto para el hierro total (mg/l), Figura 27, se representan los efectos estandarizados con  $p = 0,05$ . Se observa que los factores B: Velocidad de floculación y BB son los más significativos.



**Figura 28:** Gráfica de efectos principales para el hierro total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

Al analizar la Figura 27 y los valores de la Tabla 26, se puede establecer que la velocidad de floculación fue el factor más importante para el hierro total o residual, así mismo, la interacción más importante fue BB, lo cual señala la presencia de una curvatura en el modelo, tal como se puede apreciar mejor en la Figura 28. Mientras que en la Figura 29, de las interacciones, la más significativas es la de dosis – velocidad de floculación.



**Figura 29:** Gráfica de interacciones para el hierro total

**Fuente:** Elaboración propia con el software Statgraphics Centurion XVI

#### 4.3.2.6. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el hierro total o residual

La ecuación del modelo de regresión que manifiesta la relación entre la variable dependiente Y2: Hierro total (mg/l) y las variables independientes x1: Dosis, x2: Velocidad de floculación y x3: Tiempo de sedimentación es expresada como sigue:

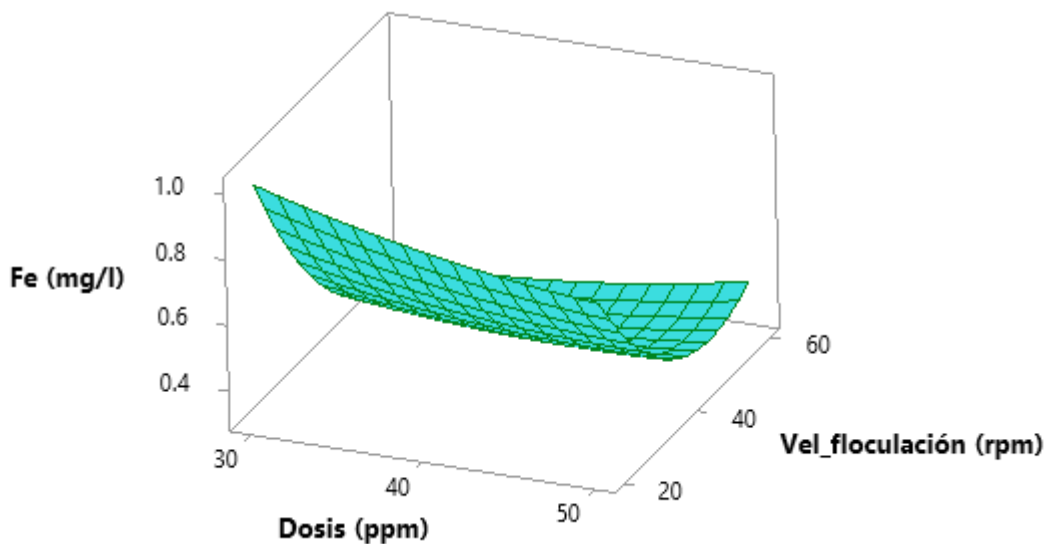
$$\begin{aligned}
 y_2 = & 2,60315 - 0,0424375x_1 - 0,05849875x_2 + 0,01162375x_3 \\
 & + 0,0003865x_1x_2 + 3,8 \times 10^{-5}x_1x_3 - 0,00013663x_2x_3 \\
 & + 0,00027375x_1^2 + 0,000507813x_2^2 - 9,8688 \times 10^{-5}x_3^2
 \end{aligned}
 \quad [32]$$

Se utilizaron los valores de los coeficientes (Tabla 27) hallados por mínimos cuadrados (Ver anexo 9) para obtener el modelo empírico final para el hierro total o residual.

#### **4.3.2.7. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre el hierro total o residual**

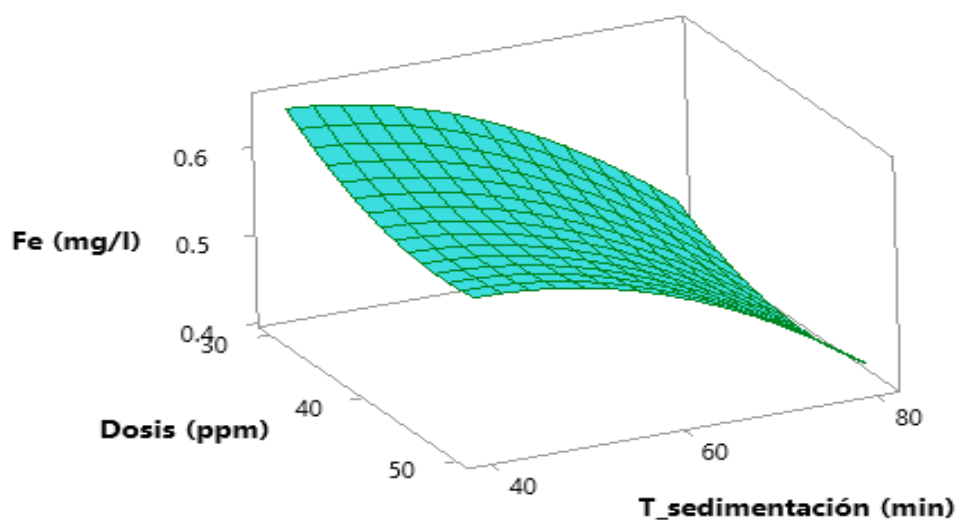
Para poder apreciar los efectos combinados de los tres factores sobre el hierro total o residual, se utilizó la metodología de superficie de respuesta y se construyeron gráficos tridimensionales, utilizando como valores constantes las condiciones del experimento en los cuales se logró una mayor remoción de hierro total, los que coinciden con el mejor resultado de remoción de arsénico.

En la Figura 30 se muestra la superficie de respuesta en una gráfica tridimensional con dos variables, dosis y velocidad de floculación ante la concentración de hierro total, manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min. Se puede observar una curvatura en la velocidad de floculación, lo cual indica la presencia de un punto óptimo, muy cercano al valor de 40 rpm.



**Figura 30:** Superficie de respuesta para la variable dependiente de hierro total (mg/l) vs. las variables independientes dosis (ppm) y velocidad de floculación (rpm), manteniendo constante el tiempo de sedimentación a 80 min.

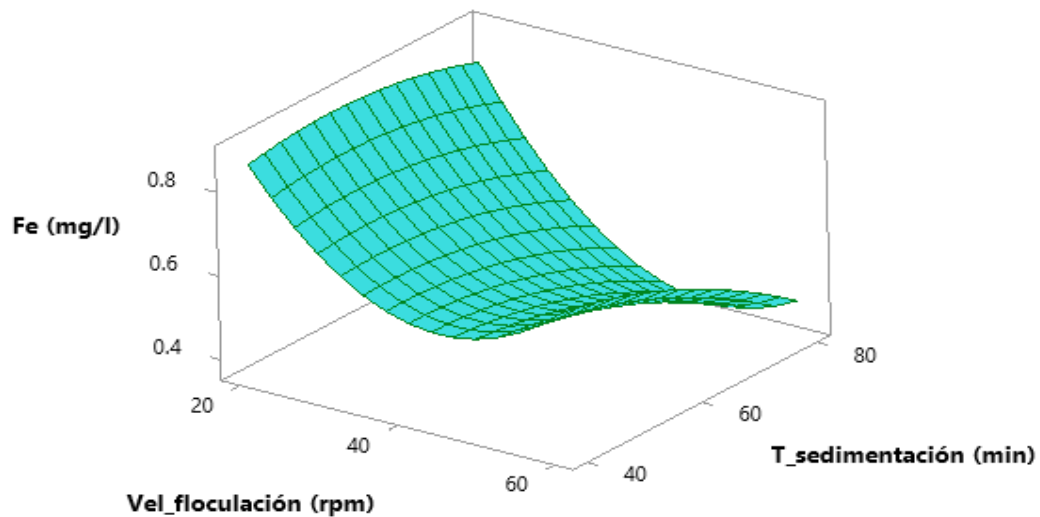
**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019



**Figura 31:** Superficie de respuesta para la variable dependiente hierro total (mg/l) vs. las variables independientes dosis (ppm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la velocidad de floculación a 40 rpm.

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

En la Figura 31 se muestra una superficie de respuesta tridimensional, del efecto combinado de la dosis (ppm) y tiempo de sedimentación (min) con una velocidad de floculación de 40 rpm, se puede observar claramente que a medida que se aumenta el tiempo de sedimentación se obtiene una menor concentración de hierro total o residual.



**Figura 32:** Superficie de respuesta para la variable dependiente hierro total (mg/l) vs. la velocidad de floculación (rpm) y el tiempo de sedimentación (min), manteniendo constante la dosis a 50 ppm  
**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

En la Figura 32 se puede observar claramente, que para la velocidad de floculación existe un punto óptimo en el que se obtiene una menor concentración de hierro total o residual, siendo beneficiado por el aumento del tiempo de sedimentación.



#### 4.3.2.8. Determinación de las mejores condiciones de operación de dosis, velocidad de floculación y tiempo de sedimentación en el hierro total o residual

Partiendo de la ecuación de la regresión múltiple y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (matriz Hessiana).

Haciendo uso de las primeras derivadas parciales e igualando a 0 la ecuación 32 se hallaron los puntos críticos (ver anexo 10):

$$x_1: 42,4923$$

$$x_2: 46,1533$$

$$x_3: 35,1248$$

Se utilizó el criterio del Hessiano para clasificar los puntos críticos obtenidos, de modo que sean un mínimo local, y máximo local o un punto silla (Malakhaltsev & Arteaga, 2013). Luego, el criterio dice que:

Si  $H_1(f) > 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local

Si  $H_1(f) < 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local

Si  $H_1(f) \neq 0; H_2(f) \neq 0$  y  $H_3(f) \neq 0$ , y no satisface ninguna de las anteriores entonces  $f$  posee un punto silla

De las determinantes halladas  $Hf(x_1, x_2, x_3)$ :

$$H_1(f) = 0,0005475 > 0$$

$$H_2(f) = 4,06672 \times 10^{-7} > 0$$

$$H_3(f) = -9,59666 \times 10^{-11} < 0$$

Donde  $y_2 = f$

Analizando la matriz hessiana para clasificar el punto crítico de la función  $y_2 = f(x_1, x_2, x_3)$ , utilizando el criterio de la segunda derivada se observa que los valores no satisfacen las primeras dos condiciones, por lo tanto, no hay extremos locales (mínimo o máximo), por lo tanto, teniendo en cuenta la última condición se puede afirmar que el punto crítico es un punto silla.

Evaluando el punto  $(x_1:42,4923 ; x_2:46,1533 ; x_3:35,1248)$ , donde  $x_1$  es la dosis,  $x_2$  la velocidad de floculación y  $x_3$  el tiempo de sedimentación, en la ecuación de regresión (ecuación 32) se obtiene que el valor de la concentración de hierro  $y_2 = f(x_1, x_2, x_3)$  es 0,5557 mg/l Fe.

Contrastando los datos obtenidos con los gráficos de superficie de respuesta, se puede observar que los datos más bajos de hierro total fueron hallados en el extremo mayor del tiempo de sedimentación (80 min), pero el valor correspondiente al tiempo de sedimentación obtenido en el punto crítico es mucho menor; el valor hallado de la velocidad de floculación es cercano al hallado en el punto crítico; mientras que, en la variables dosis, el punto crítico nos indica una menor dosis para obtener una menor concentración de hierro residual.

Con el fin de obtener una mejor aproximación de los parámetros de operación óptimos, se utilizó el software Minitab 2019 del que se obtuvo los siguientes datos mostrados en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Predicción de respuesta múltiple para el Hierro total*

Variable	Valor de configuración
Dosis (ppm)	32,4242
Vel. de floculación (rpm)	55,9596
Tiempo de sedimentación (min)	80

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

Evaluando nuevamente los valores obtenidos en la ecuación de regresión (ecuación 32) se obtiene un valor menor en la concentración de hierro total

$y_2 = f(x_1, x_2, x_3)$  es 0,3181 mg/l Fe.

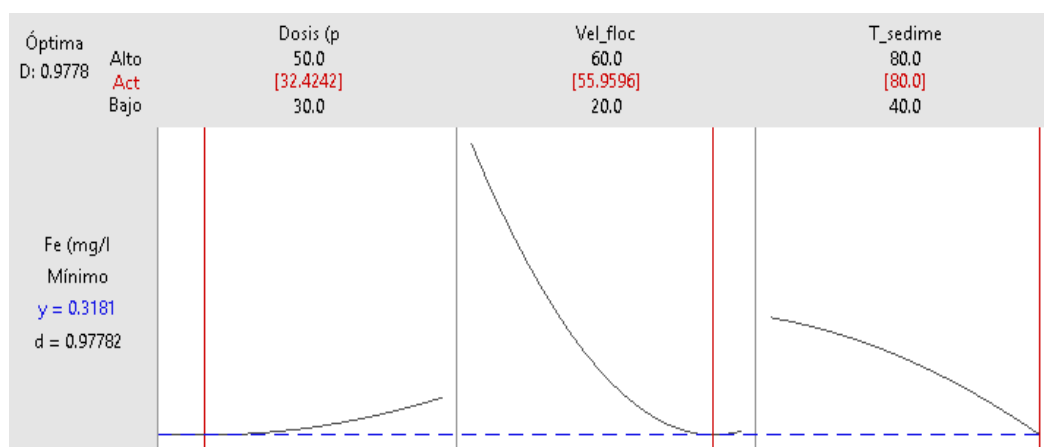


Figura 33: Curvas de predicción para la optimización de la respuesta hierro total (mg/l)

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab 2019

En la Figura 33 se observa la optimización de las variables dosis ( $x_1$ ), velocidad de floculación ( $x_2$ ) y tiempo de sedimentación ( $x_3$ ) para la obtención de una menor concentración de hierro total o residual.

#### 4.3.2.9. Optimización de las condiciones de operación para el arsénico total y el hierro total

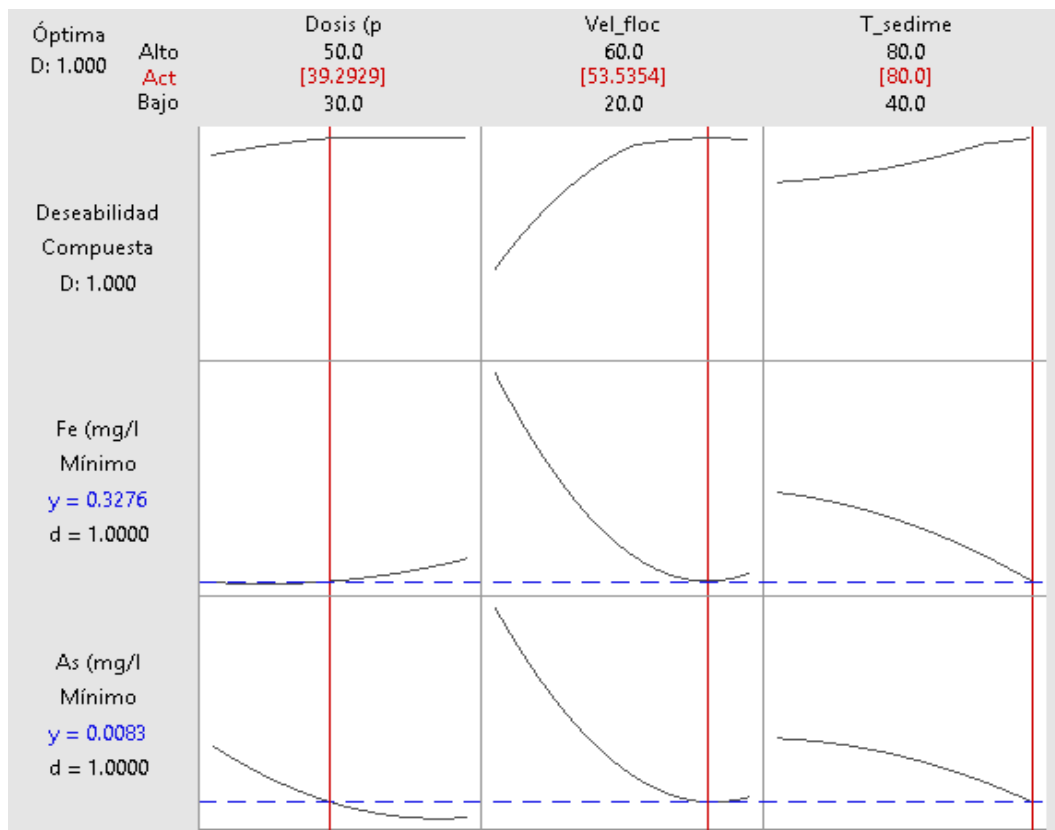
Luego de realizar el análisis estadístico de ambas variables independientes (arsénico total y hierro total) y de encontrar los valores óptimos en cada caso, se realizó la optimización de ambas variables para hallar los valores de las variables independientes dosis (x1), velocidad de floculación (x2) y tiempo de sedimentación (x3) que mejor satisfagan la obtención de las menores concentraciones de arsénico total (mg/l) y hierro total (mg/l), los resultados obtenidos luego de la optimización se observan en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Predicción de respuesta múltiple para el arsénico total y hierro total*

<b>Variable</b>	<b>Valor de configuración</b>
Dosis (ppm)	39
Vel. de floculación (rpm)	53,5354
Tiempo de sedimentación (min)	80

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019



**Figura 34:** Curvas de predicción para la optimización de la respuesta hierro total (mg/l)

**Fuente:** Elaboración propia con el software Minitab 2019

En la Figura 34 se observa la optimización de las variables dosis (x1), velocidad de floculación (x2) y tiempo de sedimentación (x3) para la obtención de una menor concentración de arsénico total y hierro total o residual.

#### 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El agua cruda utilizada en el diseño de screening presentó mayor turbiedad de la habitual, superando las 100 NTU, por lo que se tuvo que sedimentar para alcanzar la turbiedad normal que presenta este río que es alrededor 10 NTU; sin

embargo, esta agua contenía las concentraciones de arsénico y hierro promedio, las que fueron corroboradas en el historial registrado por la DIRESA y la ALA.

Observado los datos estadísticos obtenidos se puede afirmar que el efecto de la dosis de coagulante influye en la remoción de arsénico, se encontró que en un máximo de 50 mg/L se obtuvo la mayor remoción, sin embargo, no se aumentó la dosis debido a la disminución de pH, concordando esto con lo dicho por Franco (2014) que afirma que a concentraciones mayores de 50 mg/l la eficiencia de remediación (remoción) disminuye. Otro trabajo que respalda la dosis óptima hallada, se observa en el trabajo de Aguilar (2005) en el que dice que la dosis que logró remover totalmente al arsénico fue la de 60 mg/l de cloruro férrico; a pesar de este resultado, no se necesita una dosis tan alta, ya que aumenta el hierro residual. Así también Gutiérrez (2019) afirma que una concentración de del 60 ppm de cloruro férrico con 40 ppm de almidón de yuca logra remover de manera eficiente el arsénico del agua turbia, sin embargo, esta dosis es cercana a la hallada 50 ppm en este trabajo, con la que se alcanzó una eficiente remoción de arsénico aún sin filtración.

En cuanto al pH, se mantuvo constante en el Diseño de superficie de respuesta Box – Behnken con un valor de 7, que es un valor que permite el uso de la dosis de coagulante establecida y además permite una buena remoción de arsénico. La eficiencia de este valor se confirma en el trabajo de Bordoloi (2013) en el que afirma

que se logró reducir el arsénico de 0,1 mg/l – 0,5 mg/l a concentraciones alrededor de 5 ug/l a condiciones de pH de 7 a 7,5.

La aplicación del proceso de coagulación – floculación y filtración ha demostrado tener una eficacia de remoción de arsénico en las muestras con filtro de un 98,35 %, mientras que en las muestras sin filtrar es de 96,30 %, siendo esto afirmado en los trabajos de Ingallinella (2003) y Litter et al (2008) en los que se menciona que esta tecnología ha demostrado alcanzar el 80-90 % de la remoción de arsénico; siendo este rango ampliamente superado en el trabajo experimental ejecutado. Así mismo, este sistema demostró una reducción de arsénico por debajo de la norma (0,01 mg/l) utilizando una dosis de 12 mg/l de cloruro férrico. (Rojas Ch., Vargas B., Araya O., Romero E., & Valverde C., 2015)

Los parámetros de operación óptimos para la prueba de jarras, fueron hallados, comparados para cada variable respuesta, arsénico total y hierro total, encontrando un óptimo para cada uno; el principal parámetro fue la velocidad de floculación con un valor de 47 rpm, el cual proporciona la mejor remoción de arsénico y la menor cantidad de hierro residual. El otro parámetro necesario para realizar la propuesta de dimensionamiento fue el tiempo de floculación, el cual fue establecido a partir de no encontrar mayor variación en el diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ , para el cual se estableció el valor intermedio del rango del diseño que fue 25 min.

#### **4.5. PROPUESTA DE DIMENSIONAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HORIZONTAL**

Para el diseño del floculador se tuvieron en cuenta los criterios generales y específicos descritos anteriormente en la Norma SO.100 y 200 que son parte de la guía de emitida por el Ministerio de Vivienda en el año 2019, así como las ecuaciones generales de diseño propuestas por diversos autores.

Parámetros obtenidos de la parte experimental:

- Velocidad de floculación o gradiente que presenta una elevada remoción de arsénico y un mínimo de hierro residual: 47 rpm
- Tiempo de floculación o tiempo de residencia: 25 min

Parámetros de funcionamiento reales:

Caudal ( $Q_d$ ): La planta de tratamiento de agua tratada de Ite (PTAT – Ite) tiene un caudal de entrada de 12 l/s; sin embargo, luego de pasar por el desarenador, es bombeada al canal de mezcla rápida y luego al floculador, siendo el caudal de entrada al floculador de 8 l/s, por lo tanto, el diseño ideal es el de un floculador de flujo horizontal, ya que el caudal es muy bajo (caudal menor a 50 l/s).

Para obtener el caudal máximo de diseño:

$$Q_{md} = Q_d \times k \quad [33]$$

Donde,  $k$  : Coeficiente de variación de consumo (1,3)



$$Q_{md} = 8l/s \times 1,3$$

$$Q_{md} = 10,4l/s$$

**4.5.1. Para el dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal de 1 sola cámara:**

Para el dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal de una sola cámara se ha propuesto el valor de la velocidad de flujo 0,135 m/s; siendo este corroborado comparando con el valor del gradiente obtenido en las pruebas de jarras.

La longitud del recorrido del agua dentro del floculador será:

$$L = v \cdot t \quad [34]$$

Donde,

v: velocidad del flujo

t: tiempo de floculación

$$L = 0,134 \frac{m}{s} \cdot 25 \cancel{\text{min}} \frac{60 \cancel{s}}{1 \cancel{\text{min}}}$$

$$L = 201m$$

El área mojada será:

$$A_m = \frac{Q_{md}}{v} \quad [35]$$

$$A_m = \frac{10,4l/s}{0,134m/s} \left( \frac{1m^3}{1000l} \right)$$

$$A_m = 0,078m^2$$

El ancho del canal, se refiere a la separación entre placa y placa, esta será:

$$a = \frac{A_m}{h} \quad [36]$$

h : Altura del canal

La altura del canal generalmente se asume como 1 m, por lo tanto:

$$a = \frac{0,078m^2}{1m}$$

$$a = 0,078m$$

Luego, el ancho de vuelta será:

$$d = 1,5a \quad [37]$$

$$d = 1,5(0,078m)$$

$$d = 0,116m$$

El ancho de pantalla será:

$$B_p = B_t - d \quad [38]$$

Donde,  $B_t$  : Ancho total del floculador

El valor del ancho total del floculador también se asume, y puede estar en 3 a 5 m, por lo que este caso, se asumió el valor de 3 m, por lo tanto:

$$B_p = B_t - d$$

$$B_p = 3m - 0,116m$$

$$B_p = 2,884m$$

La distancia de cruce de pantallas será:

$$C = B_t - 2d \quad [39]$$

$$C = 3m - 2(0,116m)$$

$$C = 2,768m$$

Al llegar a esta etapa se debe evaluar si C es mayor a un tercio del ancho del floculador, evaluando:

$$C > \frac{B_t}{3}$$

$$2,768 > \frac{3}{3}$$

$$2,768 > 1$$

Al ser C mayor, se continúa con el procedimiento.

Por lo tanto, el número de canales será:

$$N = \frac{L}{B_t} \quad [40]$$

$$N = \frac{201m}{3m}$$

$$N = 67 \text{ canales}$$

Siendo el número de pantallas  $N - 1$ , por lo tanto, son 66 pantallas.

La longitud del floculador será:

$$L' = N.a + (N-1)e' \quad [41]$$

Donde,  $e'$ : Espesor de cada placa

El espesor de cada placa depende del material, considerando que son placas de madera, se consideró un espesor de 1,5 cm, luego:

$$L' = N.a + (N-1)e' \quad [42]$$

$$L' = 67(0,078m) + (67-1)0,015m$$

$$L' = 6,19m$$

El perímetro mojado será:

$$P = 2h + a \quad [43]$$

$$P = 2(1m) + 0,078m$$

$$P = 2,078m$$

El radio hidráulico será:

$$R_h = \frac{A_m}{P} \quad [44]$$

$$R_h = \frac{0,078m^2}{2,078m}$$

$$R_h = 0,037m$$

Para determinar la pérdida de carga, se considera que la pérdida de carga total es la suma de dos pérdidas de carga parciales. La primera se debe a la fricción en el canal, para la que se utiliza la ecuación 19:

$$h_1 = \left[ \frac{nv}{R_h^{2/3}} \right]^2 L$$

Donde:

n : Coeficiente de fricción de Manning

Para este caso que el material es madera, el coeficiente de fricción de Manning es 0,3, por lo tanto reemplazando los datos se obtiene:

$$h_1 = \left[ \frac{nv}{R_h^{2/3}} \right]^2 L$$

$$h_1 = \left[ \frac{0,3 \times 0,134 \text{ m/s}}{(0,37 \text{ m})^{2/3}} \right]^2 \times 201 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,049 \text{ m}$$

Y la segunda pérdida de carga parcial es la pérdida de carga debida a las vueltas, dada por la ecuación 20:

$$h_2 = K \frac{v^2}{2g} N$$

Donde:

K : Coeficiente de pérdida de carga

g : Gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Para K igual a 2, se tiene:

$$h_2 = 2 \times \frac{(0,134 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \times 7$$

$$h_2 = 0,123 \text{ m}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga total será:

$$h_T = h_1 + h_2$$

$$h_T = 0,049 \text{ m} + 0,123 \text{ m}$$

$$h_T = 0,172 \text{ m}$$

Para comprobar que el diseño propuesto es correcto, se halla el gradiente de velocidad con la ecuación 18, y se tiene:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma H}{\mu t}}$$

Donde:

$\gamma$  : Peso específico, N/m<sup>3</sup>

$\mu$  : Viscosidad dinámica, N.s/m<sup>3</sup>

Tanto el peso específico como la viscosidad del agua dependen de la temperatura. La temperatura promedio del agua fue 15 °C, por lo tanto, se halla en tablas los datos a esa temperatura:

$$\gamma_{15^{\circ}C} : 9798 \text{ N/m}^3$$

$$\mu_{15^{\circ}C} : 1,139 \text{ N.s/m}^3$$

Por lo tanto, reemplazando los datos se tiene:

$$G = \sqrt{\frac{9798 \text{ N/m}^3 \times 0,172 \text{ m}}{1,139 \text{ N.s/m}^3 \times 25 \text{ min} \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)}}$$

$$G = 31,63 \text{ s}^{-1}$$

Para compararlo con el gradiente hallado en la prueba de jarras, 47 rpm, se convierte este valor utilizando la relación de gradiente y revoluciones por minuto que es la siguiente: (Núñez, 2015)

$$RPM = 3G^{0,8} \quad [45]$$

Despejando,

$$G = \sqrt[0,8]{\frac{RPM}{3}} \quad [46]$$

Reemplazando los valores en la ecuación 46 se tiene:

$$G = \sqrt[0,8]{\frac{47 \text{ rpm}}{3}}$$

$$G = 31,17 \text{ s}^{-1}$$

Al poseer ambos gradientes casi iguales, se puede afirmar que los valores asumidos, así como la velocidad propuesta son adecuados para el diseño, de lo contrario, se debe hallar los valores correspondientes hasta hallar la igualdad.

Los valores de gradiente de velocidad obtenidos pueden también obtenidos por aproximación en el gráfico de Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ) por Revoluciones por minuto (RPM) de Arboleda (1973), tal como se observa en el Anexo 3.

#### 4.5.2. Para el dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras:

Para este caso, se utilizó los siguientes parámetros de operación:

**Tabla 29**

*Parámetros de operación para un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras*

Tramo	Velocidad de floculación		Tiempo de floculación (min)	Velocidad de flujo (m/s)
	RPM	Gradiente ( $s^{-1}$ )		
1	50	33,68	8,33	0,140
2	<b>47</b>	<b>31,17</b>	16,66	0,134
3	44	28,7	<b>25</b>	0,127

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de floculación fue considerada como término central proponiendo los extremos de 44 y 50 rpm como extremos, mientras que el total de tiempo de floculación (tiempo de residencia) de las tres cámaras es de 25 min, siendo el tiempo para cada cámara de 8,333 min.

Los cálculos realizados fueron los mismos que se realizaron para el floculador hidráulico horizontal de una sola cámara. Los resultados de los parámetros de dimensionamiento para el floculador hidráulico de tres cámaras se presentan en la Tabla 30.



**Tabla 30**

*Parámetros de dimensionamiento para un floculador hidráulico de flujo horizontal de tres cámaras*

Parámetro	Tramo		
	1	2	3
Gradiente ( $s^{-1}$ )	33,68	31,17	28,70
Tiempo de floculación (min)	8,333	8,333	8,333
Velocidad de flujo (m/s)	0,140	0,134	0,127
Longitud del recorrido, m	70,0	67,0	63,5
Área mojada, $m^2$	0,074	0,078	0,082
Ancho de canal, m	0,074	0,078	0,082
Ancho de vuelta, m	0,011	0,116	0,123
Ancho de pantalla, m	2,88	2,88	2,88
Cruce, m	2,78	2,76	2,75
Número de Canales (N)	23	22	21
Número de pantallas (N-1)	22	21	20
Longitud del tramo, m	2,068	2,05	2,04
Perímetro mojado, m	2,074	2,078	2,082
Radio hidráulico, m	0,036	0,037	0,039
Pérdida de carga lineal, m	0,020	0,016	0,013
Pérdida de carga de la vuelta, m	0,047	0,041	0,035
Pérdida total del tramo, m	0,067	0,057	0,048

**Fuente:** Elaboración propia.

Cabe mencionar que cada tramo tiene un ancho de 3 m y una profundidad de 1 m, así como que se consideró la temperatura del agua  $15^{\circ}$  C, siendo un total de 63 pantallas para este diseño y una pérdida de carga total de 0,172 m. Así también, se evaluaron los gradientes con la ecuación 18 para comprobar que los parámetros propuestos para este dimensionamiento son correctos.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró determinar los parámetros de operación óptimos utilizando el test de jarras, (dosis, velocidad de floculación y tiempo de sedimentación) con los cuales se obtuvo una concentración final de arsénico total de 0,0083 mg/l As logrando un porcentaje de remoción del 98,30 % mientras que el hierro total fue de 0,4099 mg/l Fe, en las muestra de agua tratada sin filtrar, permitiendo realizar la propuesta de dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal, el cual sería parte de un circuito de tratamiento al que posteriormente sigue un filtro de arena. Cabe mencionar que tanto los valores del arsénico y hierro total en las muestras filtradas en el diseño de superficie de respuesta Box - Behnken, se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento de Calidad de Agua para el consumo humano DS N° 031-2010-SA.

Se logró acondicionar el agua cruda proveniente del río Locumba de la localidad de Ite, partiendo con un pH de 8,37, utilizando ácido sulfúrico 0,1 M hasta un pH óptimo de 7, con el cual se logró el tratamiento con dosis de cloruro férrico al 40 % desde una concentración de 20 ppm hasta 50 ppm.

En el análisis de varianza realizado para la remoción de arsénico en el agua del Río Locumba – Ite, los factores que influyen significativamente fueron pH, dosis, velocidad de floculación y el cuadrado de la velocidad de floculación. Además, es la velocidad de floculación también fue un factor importante en la concentración final de hierro total, con

una significancia del 0; tiempo de sedimentación con un 0,0019 y el cuadrado de esta variable con 0,0001.

Se determinó las condiciones de operación óptimas para lograr una elevada remoción de arsénico y obtener un mínimo de hierro residual luego del tratamiento, las cuales fueron dosis 50 ppm, velocidad de floculación 47 rpm y tiempo de sedimentación 80 min.

El gradiente de velocidad con el que se logra una elevada remoción de arsénico fue de 47 rpm, a un tiempo de floculación de 25 min, parámetros con los que se logró realizar el dimensionamiento de un floculador de flujo horizontal (de una cámara y de 3 cámaras) para un caudal de 8 l/s, utilizando cloruro férrico.

## **RECOMENDACIONES**

Para realizar el muestreo, se recomienda tener en cuenta la época de lluvias, ya que la calidad fisicoquímica del agua varía, impidiendo tener una investigación objetiva del problema a resolver.

En cuanto al dimensionamiento del floculador hidráulico de flujo horizontal, se tuvo en cuenta el espacio original que ocupa este en la PTAT – Ite, siendo ambas propuestas muy similares en cuanto a pérdida de carga, volumen y número de canales (0,17 m; 18,5 m<sup>3</sup> y 66 a 67 canales, respectivamente), por lo tanto, se recomienda tener en cuenta las propuestas realizadas como alternativa de mejoramiento de la PTAT – Ite para mejorar la producción de agua tratada a agua para el consumo humano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar L., K. (2005). *Remoción de Arsénico en Aguas Subterráneas de la Comarca Lagunera*. Obtenido de INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY.
- ALA, C. L. (2016). *INFORME TÉCNICO DEL MONITOREO PARTICIPATIVO DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL 2016-1 EN LA CUENCA LOCUMBA Y SAMA*. Tacna.
- ALA-Tacna. (Diciembre de 2010). *EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS CUENCAS DE LOS RIOS LOCUMBA Y SAMA VOL. I*. Obtenido de Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos Área de Aguas Superficiales: [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/evaluacion\\_de\\_rh\\_superficiales\\_locumba\\_-\\_sama\\_0.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/evaluacion_de_rh_superficiales_locumba_-_sama_0.pdf)
- ANA. (Octubre de 2013). *Plan de Gestión de los RRHH de la cuenca Caplina - Locumba RESUMEN EJECUTIVO*. Obtenido de PROYECTO DE MODERNIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS: [http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/11/ANA0000226\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/11/ANA0000226_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Arboleda V., J. (1973). CONTROL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN. En C. P. (CEPIS), *TEORÍA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA* (págs. 158-162).

Avendaño, E., Mamani, E., & Fabián. (2013). *Remoción de arsénico del río Sama utilizando la metodología de hierro cero valente (Cuenca del río Sama, Provincia de Tacna)*. Tacna.

Baskan, M., & Pala, A. (2009). *Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology*. Obtenido de Journal of Hazardous Materials, 166(2-3) 796-801.: <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.131.pdf>

Bordoloi, S., Nath, S., Gogoi, S., & Dutta, R. (2013). *Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation-coagulation at optimized pH: Laboratory and field studies*. Obtenido de Journal of Hazardous Materials, 260, 618-626.: <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.017>.

Bunds Schuh, J., & Litter, M. (2010). *Situación de América Latina con relación al problema global del arsénico. IBEROARSEN: Situación del arsénico en la Región Ibérica e Iberoamericana. Posibles acciones articuladas e integradas para el abatimiento del arsénico en zonas aisladas*. Argentina.

Castro de Esparza, M. (Abril de 1999). *Remoción de Arsénico a nivel Domiciliario*. Obtenido de HDT – CEPIS NO 74: <http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/hdt/hdt74.pdf>

Castro, M.L.; CEPIS/SDE/OPS. (08 de noviembre de 2004). Tercer Seminario Internacional sobre evaluación y manejo de las fuentes de agua de bebida contaminadas con arsénico. Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile.

CEPIS/OPS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/OMS).

Consorcio Locumba. (2017). *Estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos e infraestructura hidráulica para el plan de aprovechamiento en la cuenca del río Locumba, en la región Tacna. En plan de aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Locumba* (pág. 210). Lima: OFITECO.

Enriqueta, J., Muñoz, C., Piña, M., & Martín, A. (2000). *Remoción de hierro y arsénico de agua para consumo humano mediante precipitación en Zimapán, Hidalgo, México*. Obtenido de *Engenharia Sanitaria e Ambiental* (pp.1-8): <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/ii-066.pdf>.

EPA Ohio. (2010). *Guidelines for Arsenic Removal Treatment for Small Public Drinking Water Systems*. Obtenido de pp. 98: <http://www.epa.ohio.gov/portals/28/documents/engineering/ArsenicManual.pdf>.

Flora, S. (2018). Arsenic: Exposure, Toxicology, Use, and Misuse. En *Encyclopedia of the Anthropocene* (págs. 215-224). Elsevier.

Flora, S. J. (2014). 1. Arsenic Chemistry, Occurrence, and Exposure. En S. J. Flora, *Handbook of Arsenic Toxicology* doi:10.1016/B978-0-12-418688-0.00001-0 (págs. 1-50). Elsevier.

Franco M., F., & Pérez, M. (mayo de 2014). *SciELO*. Obtenido de remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200005)

Franco, M., & Carro, M. (Abril de 2014). *Remoción del arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación*. Obtenido de Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 30(02), 177-190:  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n2/v30n2a5.pdf>

Gutiérrez, H., & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos 3ed*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A.

Gutiérrez, P. G. (2019). *Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del río Uchusuma (Provincia, Tacna) y propuesta de diseño de un reactor*. Tacna: UNJBG.

INGEMMET. (2009). Hidrogeología de la cuenca del río Locumba. *Hidrogeología Boletín N°2 Serie H*, 89-90.

Kausley, S. B., Dastane, G. G., Kumar, J. K., Desai, K. S., Doltade, S. B., & Pandit, A. B. (2018). *Clean Water for Developing Countries: Feasibility of Different Treatment Solutions*. Obtenido de Elsevier: Encyclopedia of Environmental Health, 2nd Edition, 2, (2018) 1-10. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.11079-6



- Larico, P. (2019). *Estudio de la remoción de arsénico del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de acero complementado con aireación y propuesta de diseño de un reactor batch*. Tacna.
- Lawson, J., Madrigal, J. L., & Erjavec, J. (1992). *Estrategias Experimentales para el mejoramiento de la calidad en la industria*. México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Litter, M. I. (2008). *Distribución del arsénico en la región Ibérica e Iberoamericana*. Buenos Aires, Argentina: CYTED.
- Litter, M. I., Sancha, A., & Ingallinella, A. (2010). *IBEROARSEN Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas*. Buenos Aires: CYTED.
- Litter, M., Morgada, M., & Bundschuh, J. (2010). *Possible treatments for arsenic removal in Latin America waters for human consumption*. Obtenido de *Environmental Pollution*, 158(5), 1105-1118.: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.028>.
- Litter, M., Sancha, A., & Ingallinella, A. (2010). *Iberoarsen Tecnologías Económicas para el abatimiento de arsenénico en aguas*. Buenos Aires: IBEROARSEN CYTED.
- Malakhaltsev, M., & Arteaga, J. R. (2013). *Cálculo Vectorial*. Bogotá: Cengage Learning de Colombia.

- Mamani, E. (2014). *Remoción de arsénico de las aguas de consumo humano del Distrito de Huanuara – Tacna*. Tacna.
- Meng, X., Bang, S., & Korfiatis, G. (2000). *Effects of silicate, sulfate and carbonate on arsenic removal by ferric chloride*.
- Mondal, P., Majumder, C., & Mohanty, B. (28 de Febrero de 2006). *Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: Recent developments*. *Journal of Hazardous Materials B137 (2006) 464–479*. Obtenido de ELSEVIER - ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406001786?via%3Dihub>
- Newcombe, R., & Möller, G. (2006). *Arsenic removal from drinking water: A review*. Obtenido de <http://www.blueh2o.net/docs/asreview%20080305.pdf>.
- Núñez C., M. A. (2015). *Definición de opciones de mejora en una planta de agua potable*. Quito: Repositorio de la Universidad Central del Ecuador.
- Pal, P. (2016). Chapter 1 - Introduction to the Arsenic Contamination Problem. En P. Pal, *Groundwater Arsenic Remediation*. doi:10.1016/B978-0-12-801281-9.00001-1 (págs. 1-23). Elsevier.
- Rinne, T. (2011). *XXII Congreso de Centroamerica y Panama de Ingenieria Sanitaria y Ambiental “Superacion Sanitaria y ambiental: El reto”*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>

- Rojas Ch., P., Vargas B., M., Araya O., A., Romero E., L., & Valverde C., J. (2015). Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología en Marcha*, 54-65.
- Romero, J. (1999). *Potabilización del agua*. México, D.F.: Alfaomega.
- Sancha A., M. (2003). Removing Arsenic from Drinking Water: A Brief Review of some Lessons Learned and Gaps arisen in Chilean Water Utilities. *Arsenic Exposure and Health Effects V*, 471-481.
- US EPA. (2005). *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems*. Office of Water (4606M) EPA 816-R-03-014. [www.epa.gov/safewater](http://www.epa.gov/safewater).
- USGS. (25 de octubre de 2019). *USGS science for a changing world*. Obtenido de The distribution of water on, in, and above the Earth: <https://www.usgs.gov/media/images/distribution-water-and-above-earth>
- VIVIENDA. (22 de enero de 2019). *gob.pe Plataforma única del Estado peruano*. Obtenido de Resolución Ministerial N° 013-2019-VIVIENDA: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/287113/RM\\_-\\_013-2019-VIVIENDA.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/287113/RM_-_013-2019-VIVIENDA.pdf)
- Wang, Y., Duan, J., Li, W., Van Leeuwen, J., & Mulcahy, D. (2014). *Removal of As(III) and As (V) by ferric salts coagulation - Implications of particle size and zeta potencial of precipitates*. Obtenido de *Separation and Purification Technology*, 135, 64-71: <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.004>.

Zeta-Meter, Inc. (1993). *Everything you want to know... Coagulation and Flocculation*.

Virginia: Zeta-Meter, Inc.

## ANEXOS

### Anexo 1

#### 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)	$\mu\text{mho/cm}$	1500
7. Sólidos totales disueltos	$\text{mg L}^{-1}$	1000
8. Cloruros	$\text{mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$	250
9. Sulfatos	$\text{mg SO}_4^{-1} \text{ L}^{-1}$	250
10. Dureza total	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	500
11. Amoníaco	$\text{mg N L}^{-1}$	1,5
12. Hierro	$\text{mg Fe L}^{-1}$	0,3
13. Manganeseo	$\text{mg Mn L}^{-1}$	0,4
14. Aluminio	$\text{mg Al L}^{-1}$	0,2
15. Cobre	$\text{mg Cu L}^{-1}$	2,0
16. Zinc	$\text{mg Zn L}^{-1}$	3,0
17. Sodio	$\text{mg Na L}^{-1}$	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica

## LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS QUÍMICOS

### INORGÁNICOS

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

Nota 1: En caso de los sistemas existentes se establecerá en los Planes de Adecuación Sanitaria el plazo para lograr el límite máximo permisible para el arsénico de 0,010 mgL<sup>-1</sup>.

Nota 2: Para una desinfección eficaz en las redes de distribución la concentración residual libre de cloro no debe ser menor de 0,5 mgL<sup>-1</sup>.

## Anexo 2

### Informes de análisis de calidad de agua de la DIRESA – Tacna a la planta de tratamiento de agua – Ite (2016 – 2019)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE-029



Registro N° LE - 029

FDT 001 - 02

## INFORME DE ENSAYO: 25529/2016

### RESULTADOS ANALITICOS

Muestras del ítem: 1

N° ALS - CORPLAB

Fecha de Muestreo

Hora de Muestreo

Tipo de Muestra

Identificación

259728/2016-1.0

12/07/2016

10:44:00

Aguas Superficiales

CANAL DE INGRESO

PLANTA ITE

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD	
<b>003 ANALISIS FISICOQUIMICOS</b>				
Amoniaco	13322	mg NH3/L	0,005	0,049 ✓
Dureza Total	1829	mg CaCO3/L	1,0	575,7 ✓
Sólidos Totales Disueltos	1842	mg/L	2	1568 ✓
<b>005 ANÁLISIS POR CROMATOGRAFÍA - ANIONES</b>				
Cloruros, Cl-	16189	mg/L	0,020	383,1 ✓
Nitratos, (como N)	16189	mg/L	0,003	< 0,003
Nitritos, (como N)	16189	mg/L	0,001	< 0,001
Sulfatos, SO4-2	16189	mg/L	0,015	420,2 ✓
<b>007 ANALISIS DE METALES TOTALES ICP MS</b>				
Aluminio (Al)	11420	mg/L	0,002	0,406 ✓
Antimonio (Sb)	11420	mg/L	0,00004	0,00865
Arsénico (As)	11420	mg/L	0,00003	0,4943
Bario (Ba)	11420	mg/L	0,0001	0,0500
Berilio (Be)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Bismuto (Bi)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Boro (B)	11420	mg/L	0,002	9,024
Cadmio (Cd)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001
Calcio (Ca)	11420	mg/L	0,10	149,8
Cobalto (Co)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001
Cobre (Cu)	11420	mg/L	0,00003	0,00230 ✓
Cromo (Cr)	11420	mg/L	0,0001	< 0,0001
Estaño (Sn)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003
Estroncio (Sr)	11420	mg/L	0,0002	0,9208
Fosforo (P)	11420	mg/L	0,015	0,086
Hierro (Fe)	11420	mg/L	0,0004	0,4172 ✓
Litio (Li)	11420	mg/L	0,0001	0,9362
Magnesio (Mg)	11420	mg/L	0,003	38,62
Manganeso (Mn)	11420	mg/L	0,00003	0,1054 ✓
Mercurio (Hg)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003
Molibdeno (Mo)	11420	mg/L	0,00002	0,00751
Níquel (Ni)	11420	mg/L	0,0002	0,0006
Plata (Ag)	11420	mg/L	0,000003	< 0,000003
Plomo (Pb)	11420	mg/L	0,0002	0,0005
Potasio (K)	11420	mg/L	0,04	28,96
Selenio (Se)	11420	mg/L	0,0004	< 0,0004
Silicio (Si)	11420	mg/L	0,2	23,6
Sodio (Na)	11420	mg/L	0,006	283,7
Talio (Tl)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Titanio (Ti)	11420	mg/L	0,0002	0,0158
Uranio (U)	11420	mg/L	0,000003	0,003203
Vanadio (V)	11420	mg/L	0,0001	0,0070
Zinc (Zn)	11420	mg/L	0,0100	< 0,0100

## RESULTADOS ANALITICOS

Muestras del ítem: 2

N° ALS - CORPLAB  
Fecha de Muestreo  
Hora de Muestreo  
Tipo de Muestra

259730/2016-1.0 12/07/2016 11:15:00 Agua de Bebida  CISTERNA DE ALMACENAMIE TO DE AGUA TRATADA R1	259733/2016-1.0 12/07/2016 11:35:00 Agua de Bebida  RESERVORIO DE DISTRIBUCION DE AGUA TRATADA R2	259742/2016-1.0 12/07/2016 11:50:00 Agua de Bebida RESERVORIO DE DISTRIBUCION DE AGUA SUBTERRANEA R3
---	---	--

Identificación

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD			
<b>003 ANALISIS FISICOQUIMICOS</b>						
Amoniaco	13322	mg NH3/L	0,005	0,028	0,026	0,029
Dureza Total	1829	mg CaCO3/L	1,0	609,7	607,8	228,8
Sólidos Totales Disueltos	1842	mg/L	2	1567	1565	403
<b>005 ANALISIS POR CROMATOGRAFIA - ANIONES</b>						
Cloruros, Cl-	16189	mg/L	0,020	398,9	395,1	24,76
Nitratos, (como N)	16189	mg/L	0,003	0,136	0,114	0,689
Nitritos, (como N)	16189	mg/L	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Sulfatos, SO4-2	16189	mg/L	0,015	422,5	420,7	89,15
<b>007 ANALISIS DE METALES TOTALES ICP MS</b>						
Aluminio (Al)	11420	mg/L	0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Antimonio (Sb)	11420	mg/L	0,00004	0,00852	0,00858	< 0,00004
Arsénico (As)	11420	mg/L	0,00003	0,2314	0,2198	0,01195
Bario (Ba)	11420	mg/L	0,0001	0,0379	0,0381	0,0134
Berilio (Be)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Bismuto (Bi)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Boro (B)	11420	mg/L	0,002	7,794	12,43	0,959
Cadmio (Cd)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Calcio (Ca)	11420	mg/L	0,10	150,7	145,2	67,43
Cobalto (Co)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Cobre (Cu)	11420	mg/L	0,00003	0,00102	0,00097	< 0,00003
Cromo (Cr)	11420	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0023	< 0,0001
Estaño (Sn)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Estroncio (Sr)	11420	mg/L	0,0002	0,9500	0,8882	0,1952
Fosforo (P)	11420	mg/L	0,015	< 0,015	0,022	< 0,015
Hierro (Fe)	11420	mg/L	0,0004	0,0208	0,0282	0,0364
Litio (Li)	11420	mg/L	0,0001	0,9983	1,030	0,0290
Magnesio (Mg)	11420	mg/L	0,003	37,53	38,24	9,732
Manganeso (Mn)	11420	mg/L	0,00003	0,00125	0,00083	0,00080
Mercurio (Hg)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Molibdeno (Mo)	11420	mg/L	0,00002	0,00773	0,00768	0,00112
Níquel (Ni)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	0,0010	< 0,0002
Plata (Ag)	11420	mg/L	0,000003	< 0,000003	< 0,000003	< 0,000003
Plomo (Pb)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Potasio (K)	11420	mg/L	0,04	29,65	28,85	2,57
Selenio (Se)	11420	mg/L	0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004
Silicio (Si)	11420	mg/L	0,2	21,7	23,7	25,9
Sodio (Na)	11420	mg/L	0,006	275,6	287,7	40,75
Talio (Tl)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Titanio (Ti)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Uranio (U)	11420	mg/L	0,000003	0,003082	0,003097	0,001127
Vanadio (V)	11420	mg/L	0,0001	0,0027	0,0026	0,0079
Zinc (Zn)	11420	mg/L	0,0100	< 0,0100	< 0,0100	< 0,0100





LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE-029



Registro N° LE - 029

## INFORME DE ENSAYO: 25529/2016

FDT 001 - 02

### RESULTADOS ANALITICOS

N° ALS - CORPLAB  
Fecha de Muestreo  
Hora de Muestreo  
Tipo de Muestra

259743/2016-1.0  
12/07/2016  
13:43:00

Agua de Bebida  
CAÑO VIVIENDA  
INICIAL FAMILIA  
CONDORI

Identificación

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD	
<b>003 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS</b>				
Amoniaco	13322	mg NH3/L	0,005	0,022
Dureza Total	1829	mg CaCO3/L	1,0	611,7
Sólidos Totales Disueltos	1842	mg/L	2	1566
<b>005 ANÁLISIS POR CROMATOGRAFÍA - ANIONES</b>				
Cloruros, Cl-	16189	mg/L	0,020	400,6
Nitratos, (como N)	16189	mg/L	0,003	0,118
Nitritos, (como N)	16189	mg/L	0,001	< 0,001
Sulfatos, SO4-2	16189	mg/L	0,015	425,0
<b>007 ANÁLISIS DE METALES TOTALES ICP MS</b>				
Aluminio (Al)	11420	mg/L	0,002	< 0,002
Antimonio (Sb)	11420	mg/L	0,00004	0,00922
Arsénico (As)	11420	mg/L	0,00003	0,2429
Bario (Ba)	11420	mg/L	0,0001	0,0411
Berilio (Be)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Bismuto (Bi)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Boro (B)	11420	mg/L	0,002	7,360
Cadmio (Cd)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001
Calcio (Ca)	11420	mg/L	0,10	159,6
Cobalto (Co)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001
Cobre (Cu)	11420	mg/L	0,00003	0,00221
Cromo (Cr)	11420	mg/L	0,0001	< 0,0001
Estaño (Sn)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003
Estroncio (Sr)	11420	mg/L	0,0002	0,9505
Fosforo (P)	11420	mg/L	0,015	< 0,015
Hierro (Fe)	11420	mg/L	0,0004	< 0,0004
Litio (Li)	11420	mg/L	0,0001	1,083
Magnesio (Mg)	11420	mg/L	0,003	43,23
Manganeso (Mn)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003
Mercurio (Hg)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003
Molibdeno (Mo)	11420	mg/L	0,00002	0,00727
Níquel (Ni)	11420	mg/L	0,0002	0,0010
Plata (Ag)	11420	mg/L	0,000003	< 0,000003
Plomo (Pb)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002
Potasio (K)	11420	mg/L	0,04	32,21
Selenio (Se)	11420	mg/L	0,0004	< 0,0004
Silicio (Si)	11420	mg/L	0,2	25,0
Sodio (Na)	11420	mg/L	0,006	323,7
Talio (Tl)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002
Titanio (Ti)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002
Uranio (U)	11420	mg/L	0,000003	0,003292
Vanadio (V)	11420	mg/L	0,0001	0,0027
Zinc (Zn)	11420	mg/L	0,0100	< 0,0100

**INFORME DE ENSAYO N.° 0568-2017-LM**

Pág. 1 de 3

Expediente N.° 51292-2017-DRS

**Solicitante:** AGU-DCOVI-DIGESA/DIRESA TACNA  
**Domicilio:** Las Amapolas 350 Lince, Lima  
**Muestra declarada:** Agua. Muestra proporcionada por el solicitante  
**Cantidad de muestras:** 18 frascos proporcionados por la DIRESA  
**Fecha de ingreso:** 2017-10-24  
**Lugar de ensayo:** Laboratorio sede La Molina

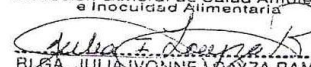
**Identificación de la muestra**

Código laboratorio	Código campo	Matriz / Punto de muestreo / Distrito / Provincia / Departamento	Fecha de muestreo
02993	01-FQ	Agua natural / Canal Locumba Ingreso de PTAP de Ite / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18
02994	02-FQ	Agua para uso y consumo humano / Salida de filtros PTAP Ite / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18
02995	03-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R1 de agua tratada / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18
02996	04-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño vivienda inicial familia Quispe Alanocá Pampa alta / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18
02997	06-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R3 de Pampa baja / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18
02998	08-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño vivienda final familia Tito Melchor Pampa baja / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2017-10-18

Nota: Los datos de las muestras son proporcionados por el solicitante.

**Resultados**

Código laboratorio	Aluminio (mg/L)	Boro (mg/L)	Bario (mg/L)	Berilio (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobalto (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Hierro (mg/L)	Litio (mg/L)	Magnesio (mg/L)
02993	0,21	9,94	0,043	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,013	0,241	1,37	45,5
02994	0,11	10,1	0,040	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,019	0,087	1,37	45,1
02995	0,08	9,92	0,040	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,014	0,052	1,35	45,0
02996	0,10	9,70	0,041	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,012	0,055	1,33	43,8
02997	0,17	10,1	0,041	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,012	0,126	1,37	45,6
02998	0,06	9,86	0,040	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,015	0,054	1,36	44,8
LC	0,03	0,01	0,0005	0,0002	0,0005	0,003	0,001	0,002	0,005	0,01	0,008
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02

**MINISTERIO DE SALUD**  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria  
  
**B.G.A. JULIA VONNE LOAYZA RAMOS**  
 CESTP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL DIGESA



Lima, 2017-11-03  
 JLR/CLA/Ing

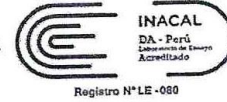
F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sid.pe](http://www.digesa.sid.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430



INFORME DE ENSAYO N.º 0568-2017-LM

Código laboratorio	Manganeso (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Sodio (mg/L)	Niquel (mg/L)	Plomo (mg/L)	Antimonio (mg/L)	Selenio (mg/L)	Vanadio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Arsénico (mg/L)
02993	0,074	0,008	317	<0,005	<0,007	<0,02	<0,03	0,007	0,030	0,53
02994	0,015	0,009	323	0,010	<0,007	<0,02	n.a.	0,007	0,048	0,53
02995	0,010	0,008	314	0,006	<0,007	<0,02	n.a.	0,007	0,027	0,52
02996	0,011	0,008	308	<0,005	<0,007	0,02	n.a.	0,007	0,025	0,51
02997	0,015	0,008	321	<0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,007	0,025	0,53
02998	0,009	0,008	314	0,006	<0,007	<0,02	n.a.	0,007	0,029	0,51
LC	0,0005	0,002	0,07	0,005	0,007	0,02	0,03	0,002	0,008	0,01
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02	2017-11-02

n.a.: No aplica

LC: Límite de cuantificación

Métodos:

EPA Method 200.7, Rev 4.4 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry

MINISTERIO DE SALUD  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria  
 BILGA JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS  
 CBP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL  
 DIGESA



Lima, 2017-11-03

JLR/CLA/Ing

F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430

INFORME DE ENSAYO N.º 0555-2018-LM

Pág. 1 de 2

Expediente N.º 53362-2018-DRS

Solicitante: AGU-DCOVI-DIGESA/DIRESA TACNA  
 Domicilio: Las Amapolas 350 Lince, Lima  
 Muestra declarada: Agua. Muestra proporcionada por el solicitante  
 Cantidad de muestras: 7 frascos proporcionados por la DIRESA  
 Fecha de ingreso: 2018-10-23  
 Lugar de ensayo: Laboratorio sede La Molina

Identificación de la muestra

Código laboratorio	Código campo	Matriz / Punto de muestreo / Distrito / Provincia / Departamento	Fecha de muestreo
03650	01-FQ	Agua natural / Canal Locumba Ingreso de PTAP Ite / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03651	02-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R1 / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03652	04-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño de vivienda familia Uyhua Mamani, calle principal s/n / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03653	06-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño de vivienda familia Tito Melchor Pampa Baja lateral D1-3 / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03654	07-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R2 / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03655	08-FQ	Agua para uso y consumo humano / Salida de Filtros PTAP Ite / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18
03656	09-FQ	Agua para uso y consumo humano / Camión Sistema de agua / Ite / Jorge Basadre / Tacna	2018-10-18

Nota: Los datos de las muestras son proporcionados por el solicitante.

Resultados

Código laboratorio	Aluminio (mg/L)	Boro (mg/L)	Bario (mg/L)	Berilio (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobalto (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Hierro (mg/L)	Litio (mg/L)	Magnesio (mg/L)
03650	0,10	10,2	0,056	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,105	0,180	0,87	42,5
03651	0,03	10,7	0,050	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,085	0,089	0,89	42,5
03652	<0,03	10,1	0,047	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,089	0,071	0,84	41,0
03653	0,05	10,4	0,048	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,025	0,073	0,86	41,4
03654	0,10	10,5	0,052	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,034	0,148	0,85	42,7
03655	0,04	10,1	0,049	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,026	0,090	0,87	41,9
03656	0,05	10,8	0,050	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,095	0,102	0,88	42,5
LC	0,03	0,01	0,0005	0,0002	0,0005	0,003	0,001	0,002	0,005	0,01	0,008
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26

MINISTERIO DE SALUD  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria  
 B. IGA. JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS  
 CBP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL DIGESA



Lima, 2018-11-06  
 JLR/CLA/ing

F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430

**INFORME DE ENSAYO N.º 0555-2018-LM**

Pág. 2 de 2

Código laboratorio	Manganeso (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Sodio (mg/L)	Níquel (mg/L)	Plomo (mg/L)	Antimonio (mg/L)	Selenio (mg/L)	Vanadio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Arsénico (mg/L)
03650	0,066	0,008	332	<0,005	<0,007	0,02	<0,03	0,006	0,021	0,57
03651	0,021	0,009	329 ✓	<0,005	<0,007	0,02	n.a.	0,006	0,022	0,59 ✓
03652	0,020	0,008	307 ✓	<0,005	<0,007	0,02	n.a.	0,006	0,019	0,54 ✓
03653	0,012	0,008	314 ✓	0,007	<0,007	0,02	n.a.	0,006	0,026	0,57 ✓
03654	0,025	0,008	316 ✓	0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,006	0,019	0,56 ✓
03655	0,015	0,008	320 ✓	<0,005	<0,007	0,02	n.a.	0,006	0,015	0,57 ✓
03656	0,024	0,009	316 ✓	<0,005	<0,007	0,02	n.a.	0,006	0,021	0,59 ✓
LC	0,0005	0,002	0,07	0,005	0,007	0,02	0,03	0,002	0,008	0,01
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26	2018-10-26

n.a.: No aplica

LC: Límite de cuantificación

Método:

EPA Method 200.7, Rev 4.4 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry

**MINISTERIO DE SALUD**  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria  
  
**BLGA. JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS**  
 CBP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL  
**DIGESA**



Lima, 2018-11-06

JLR/CLA/Ing

F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430

**INFORME DE ENSAYO N.° 0135-2019-LM**

Pág. 1 de 2

Expediente N.° 14761-2019-DRS

**Solicitante:** AGU-DCOVI-DIGESA/DIRESA TACNA  
**Domicilio:** Las Amapolas 350 Lince, Lima  
**Muestra declarada:** Agua . Muestra proporcionada por el solicitante  
**Cantidad de muestras:** 7 frascos proporcionados por la DIRESA  
**Fecha de Ingreso:** 2019-03-14  
**Lugar de ensayo:** Laboratorio sede La Molina

**Identificación de la muestra**


Código laboratorio	Código campo	Matriz / Punto de muestreo / Localidad / Distrito / Provincia / Departamento	Fecha de muestreo
00881	01-FQ	Agua natural / Captación Ingreso PTAP Ite / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00882	02-FQ	Agua para uso y consumo humano / Salida de filtros PTAP ITE / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00883	03-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R1 ITE / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00884	04-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño de vivienda familia Uyhua Mamanl -Calle principal s/n / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00885	05-FQ	Agua para uso y consumo humano / Camión Cisterna de Agua / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00886	06-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R2 Pampa baja / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28
00887	07-FQ	Agua para uso y consumo humano / Caño vivienda de familia Tito Melchor / - / Ite / Tacna / Tacna	2019-02-28

Nota: Los datos de las muestras son proporcionados por el solicitante.

**Resultados**

Código laboratorio	Aluminio (mg/L)	Boro (mg/L)	Bario (mg/L)	Berilio (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobalto (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Hierro (mg/L)	Litio (mg/L)	Magnesio (mg/L)
00881	40,2	8,21	0,379	0,001	0,003	0,042	0,003	0,103	35,3	0,82	56,0
00882	44,4	7,95	0,413	<0,0002	0,003	0,045	0,005	0,114	39,5	0,80	56,2
00883	0,12	8,51	0,045	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,009	0,034	0,78	39,0
00884	0,12	8,38	0,045	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,007	0,023	0,77	38,0
00885	0,46	9,26	0,049	<0,0002	<0,0005	<0,003	0,001	0,007	0,040	0,84	41,4
00886	0,08	10,5	0,055	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,008	0,066	0,94	47,9
00887	0,04	8,27	0,044	<0,0002	<0,0005	<0,003	<0,001	0,009	0,019	0,76	37,6
LC	0,03	0,01	0,0005	0,0002	0,0005	0,003	0,001	0,002	0,005	0,01	0,008
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11

**MINISTERIO DE SALUD**  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria

  
**BLGA. JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS**  
 CBP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL  
 DIGESA



Lima, 2019-04-12

JLR/CLA/Ing

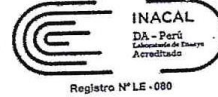
F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430



INFORME DE ENSAYO N.º 0135-2019-LM

Pág. 2 de 2

Código laboratorio	Manganeso (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Sodio (mg/L)	Níquel (mg/L)	Plomo (mg/L)	Antimonio (mg/L)	Selenio (mg/L)	Vanadio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Arsénico (mg/L)
00881	1,84	0,008	232	0,020	0,041	<0,02	<0,03	0,095	0,139	0,77
00882	1,88	0,008	231	0,025	0,045	<0,02	n.a.	0,104	0,159	0,78
00883	0,002	0,010	223	0,006	<0,007	<0,02	n.a.	0,012	<0,008	0,43
00884	0,001	0,010	223	<0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,012	<0,008	0,45
00885	0,001	0,011	246	0,006	<0,007	<0,02	n.a.	0,013	<0,008	0,50
00886	0,004	0,012	219	<0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,014	0,011	0,53
00887	0,001	0,009	301	0,008	<0,007	<0,02	n.a.	0,011	0,011	0,41
LC	0,0005	0,002	0,07	0,005	0,007	0,02	0,03	0,002	0,008	0,01
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11	2019-04-11

n.a.: No aplica

LC: Límite de cuantificación

Método: EPA Method 200.7. Rev 4.4 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry

MINISTERIO DE SALUD  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria

BLGA. JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS  
 C.B.P. 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL  
 DIGESA



Lima, 2019-04-12

F01-AC-PS-13 Rev 06

JLR/CLA/ing

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Amapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430

### Anexo 3

**Cálculos para la preparación de cloruro férrico al 40 %, recomendaciones de uso y gráfico de gradiente de velocidad por RPM.**

#### **Preparación de la solución de FeCl<sub>3</sub>**

De la hoja de seguridad del envase:

$$\rho : 1,40 - 1,44 \text{ g/ml}$$
$$\% p/p : 40\%$$

Convirtiendo a % p/v:

$$\% p/V = 40 \times 1,42$$
$$\% p/V = 56,8$$

Para realizar la solución madre, solución al 10 % p/v – 50 ml

$$C_1V_1 = C_2V_2$$
$$(56,8\%)V_1 = (10\%)(50 \text{ ml})$$
$$V_1 = 8,80 \text{ ml}$$

Para realizar la solución hija, solución al 1 % p/v – 50 ml

$$C_1V_1 = C_2V_2$$
$$(10\%)V_1 = (1\%)(50 \text{ ml})$$
$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

Para el tratamiento de un litro de agua cruda (capacidad del test de jarras), se necesita un volumen necesario de la solución hija, dependiendo de la cantidad propuesta (en ppm) por ejemplo 20 ppm:



$$\begin{aligned}
 & \text{Solución al 1\% p/V} \rightarrow 10000 \text{ ppm} \\
 & C_1V_1 = C_2V_2 \\
 & (10000 \text{ ppm})V_1 = (20 \text{ ppm})(1000 \text{ ml}) \\
 & V_1 = 2 \text{ ml}
 \end{aligned}$$

De la solución hija (FeCl<sub>3</sub> al 1%) se extrae 2 ml que son equivalente a 20 ppm para el tratamiento de agua cruda.

### **Recomendaciones de uso**

Tener en cuenta, que debe evitarse la hidrólisis de la solución de coagulante a utilizar. Por lo que a más débil una solución patrón de coagulantes, más alto será su pH, se hidroliza más rápidamente, esto es, reacciona con el agua para formar compuestos que coagulan más lentamente, por lo que debe considerarse que soluciones menores del 2 % (20 g por 1000 ml) no deben ser guardadas por más de un día.

De preferencia, tener una solución patrón concentrada (mayor del 10 %) a partir de la cual se prepare soluciones diluidas del 1 % de concentración (10 g por 1000 ml), cada vez que se va ejecutar la prueba de jarras. (Arboleda V., 1973).

Para todos los casos, la solución de coagulantes debe ser fresca, siendo muy conveniente rotular la fecha de preparación en el frasco donde se almacene Siempre se ha observado que las soluciones recientemente hechas, no dan el mismo resultado que aquellas que han sido guardadas por bastante tiempo. (Arboleda V., 1973)

### **Gráfico de gradiente de velocidad por RPM.**

El siguiente gráfico ayuda a la estimación de los gradientes de velocidad.

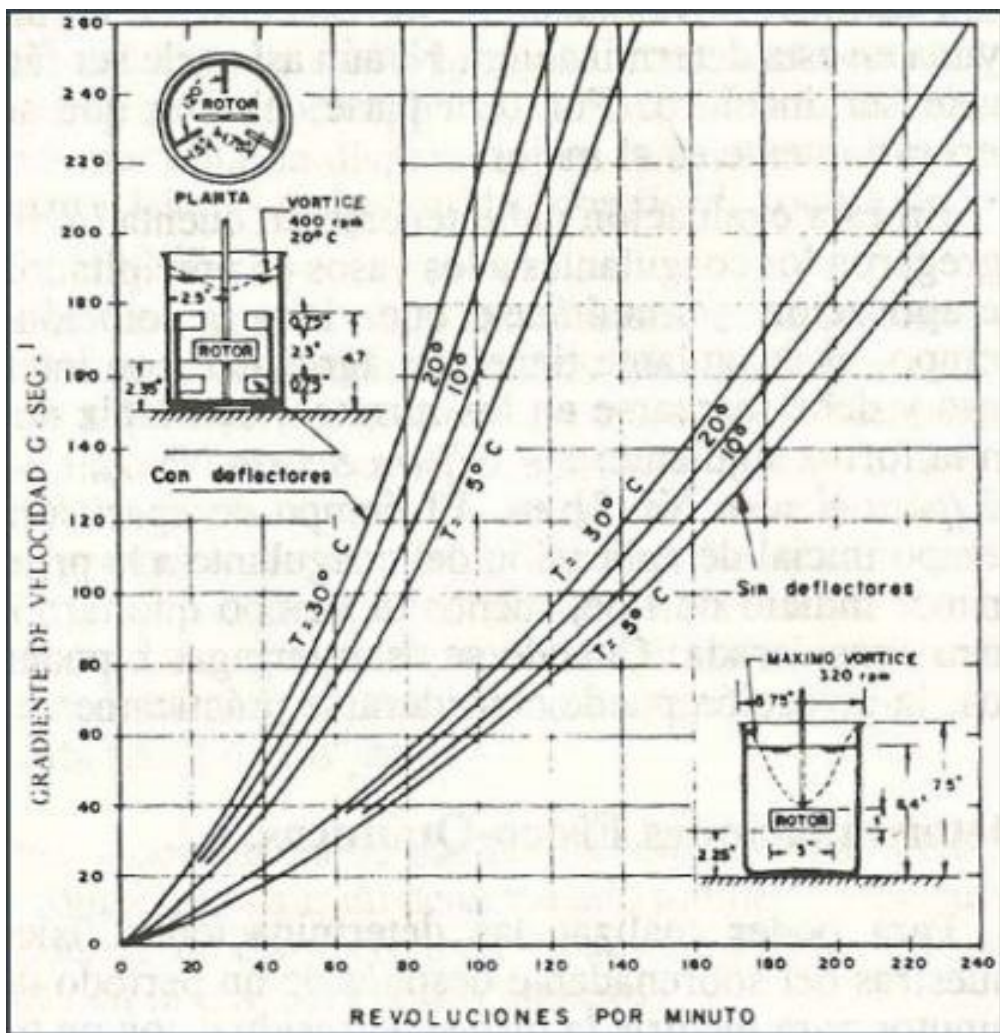


Gráfico 1: Gradiante de velocidad para un vaso de precipitado de 2 litros con o sin deflectores como se indica (Datos básicos tomados de Camp)  
Fuente: (Arboleda V., 1973)

## Anexo 4

# Resolución Jefatural No 010-2016-ANA Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales

### ANEXO VII CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO EVALUADO



PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
<b>Nutrientes</b>			
Fosfatos	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
		Congelar por debajo de -18° C.	1 mes
Fósforo total	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> o HNO <sub>3</sub>	1 mes
		Congelar por debajo de -18° C.	6 meses
Nitrógeno amoniacal	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	24 horas
	PE	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 3+0,5 con HNO <sub>3</sub>	14 días
	Vidrio o PTFE	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	14 días
	Plástico	Congelar por debajo de -18°C.	1 mes
Nitratos	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
Nitritos	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
Nitrógeno total	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
	Plástico	Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	1 mes
<b>Metales y metaloides</b>			
Corrida de metales totales	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Corrida de metales disueltos	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Aluminio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Antimonio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> . Se debería usar HCl si se usa la técnica de hidruros para análisis.	1 mes
Arsénico	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> . Se debería usar HCl si se usa la técnica de hidruros para análisis.	6 meses
Bario	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Berilio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Boro	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cadmio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Calcio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Cobalto	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Cobre	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cromo	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cromo hexavalente	Plástico o vidrio		24 horas
Hierro	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes



## **Anexo 5**

### **Para el proceso de digestión suave**

#### **Adaptación para el Método EPA 200.2, Revisión 2.8 para uso con el Sistema de digestión Environmental Express HotBlock™**

##### **1.0 Alcance y aplicación**

1.1 Los siguientes procedimientos han sido escritos como una ayuda al procedimiento de digestión 200.2 de la EPA para su uso con el Environmental Express HotBlock™.

El Método EPA 200.2 es para la determinación de analitos recuperables totales en aguas subterráneas, aguas superficiales, agua potable, aguas residuales y (con la excepción de sílice) en muestras sólidas como sedimentos, lodos y suelos. Use el Método 200.2 de la EPA como referencia mientras sigue los pasos de preparación de muestras que se detallan a continuación. Se incluye una lista completa de elementos apropiados para el análisis en el Método 200.2 de la EPA. El análisis puede realizarse por absorción atómica de llama, GF / AA, ICP e ICP-MS.

##### **2.0 Aparatos y materiales**

2.1 HotBlock™ para digestiones de metales - Número de modelo SC100, SC150 \* o SC154

2.2 Recipientes de digestión de polipropileno - Catálogo # SC475 (o SC490 para usar con HotBlock™ SC150)

2.3 Gafas de reloj acanaladas, n. ° de catálogo SC505 o tapas de reflujo, n. ° de catálogo SC506 (para usar con viales SC490 para HotBlock™ SC150, usar gafas de reloj nervadas, n. ° de catálogo SC610)

2.4 FilterMate™ - Catálogo # SC0401 (o FilterMate apropiado) para filtración de muestras si es necesario

\* Nota: Para todos los procedimientos, cuando use el bloque SC150 con los viales de digestión SC490 con una muestra de 100 ml, duplique el volumen de todos los reactivos y ácidos agregados.

### **3.0 Procedimiento, preparación de muestra acuosa**

3.1 Mezcle bien la muestra para lograr homogeneidad. Para cada procedimiento de digestión, transfiera una muestra de 50 ml (o el volumen apropiado para su laboratorio) al recipiente de polipropileno SC475. Para obtener mejores resultados, pese la muestra directamente en el recipiente en una balanza tarada.

3.2 Agregue 1 ml (1: 1) de HNO<sub>3</sub> y 0.5 ml (1: 1) de HCl, luego agite. Calentar la muestra en el HotBlock™ a 95 °C durante 2,5 horas sin hervir. Coloque un cristal de reloj acanalado (SC505) encima del recipiente de digestión.

Nota: Cuando use un reloj de vidrio, ajuste la temperatura del punto de control del HotBlock™ para que una solución de ácido al 50 % de 50 ml se caliente a 85 °C ANTES de colocar el reloj de vidrio sobre la muestra. Las pruebas de laboratorio han demostrado que la adición del vidrio de reloj acanalado agregará aproximadamente 10 °C a la

temperatura de la muestra, elevando la temperatura de la muestra hasta 95 °C. Consulte la página 7 del manual de operaciones para obtener instrucciones sobre el ajuste de temperatura HotBlock™.

3.3 Utilizando los bastidores de transferencia de policarbonato, retire las muestras del HotBlock™ y permita que se enfríen.

3.4 Después de enfriar, diluir las muestras a 50 ml con agua desionizada.

3.5 Si es necesario, filtre con SC0401 (o FilterMate apropiado) para eliminar el material insoluble.

Nota: El paso de filtración debe realizarse lentamente con poca presión sobre el émbolo. Si se produce una contrapresión excesiva, detenga la filtración y permita que los sedimentos se "sedimenten". Aplicar presión al émbolo puede hacer que la muestra "sople" permitiendo que el sedimento pase a través del filtro hacia el digestato. (Environmental Express, Inc., 2008)

## **Anexo 6**

**Análisis en Laboratorio SGS del Perú (Sede Arequipa) acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL – DA con registro N° LE-002, mediante método de ensayo: EPA 200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (Validado) 2016, para metales totales.**

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.**

AV. MIRAFLORES NRO. SN CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA)TACNA - TACNA - TACNA

ENV / LB-346516-002

Fecha de Recepción SGS : 19-12-2019

Fecha de Ejecución : Del 19-12-2019 al 26-12-2019

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
i-1
i-2
i-3
i-4
i-5
i-6
i-7
i-8
i-9
i-10

**Emitido por SGS del Perú S.A.C.**

**Impreso el 26/12/2019**



**Lizett M. Gonzales Carranza**

**C.I.P 189253**

**Jefe de Laboratorio - Sede Arequipa**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

Estación de Muestreo
i-11
i-12
i-13
i-14
i-15
i-16
i-17
C-1
C-2
C-3
C-4
C-5
C-6
C-7
C-8
C-9
C-10
C-11
C-12
C-13
v-1
v-2

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-1	i-2	i-3
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					07:15:00	07:16:00	07:34:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00758	0.00600	0.00764
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.03671	0.01739	0.01601
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0388	0.0373	0.0377
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	7.698	8.881	8.328
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	145.840	141.832	144.750
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0643	0.0632	0.0656
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00053	0.00067	0.00052
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00185	0.00219	0.00183
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0301	1.0107	1.0177
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	0.00023	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	1.1162	0.9037	0.4828
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0797	1.0309	1.0591
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	32.363	32.288	32.927
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.06769	0.06829	0.05083
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00575	0.00480	0.00582
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	0.0006	<0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.80	28.71	30.53
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0921	0.0909	0.0913
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.10 *	27.66 *	30.62 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.07	12.93	14.31
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	285.143	280.717	286.547
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0026	0.0022	0.0043
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002385	0.001677	0.002310
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0210	0.0369	0.0118
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-4	i-5	i-6
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					07:36:00	08:02:00	08:04:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00588	0.00744	0.00575
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01056	0.02018	0.01061
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0376	0.0385	0.0371
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	8.391	8.638	8.257
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	144.248	149.361	142.400
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0649	0.0660	0.0643
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00069	0.00044	0.00064
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00187	0.00174	0.00155
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-4	i-5	i-6
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					07:36:00	08:02:00	08:04:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0003	1.0393	0.9870
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.5795	0.6612	0.5920
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0793	1.1103	1.0826
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	32.791	32.580	33.294
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.05442	0.03689	0.03894
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00445	0.00605	0.00468
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0008	<0.0006	0.0009
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	30.33	31.16	29.30
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0901	0.0937	0.0896
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.06 *	31.80 *	29.55 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.05	14.86	13.81
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	285.404	284.009	285.863
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0043	0.0044	0.0038
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001558	0.002419	0.001618
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0151	0.0110	0.0196
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-7	i-8	i-9
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					08:53:00	08:57:00	09:05:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00766	0.00592	0.00627
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01695	0.00830	0.02304
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0398	0.0385	0.0382
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	8.326	8.371	7.836
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	143.172	149.321	141.364
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0674	0.0670	0.0643
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00053	0.00067	0.00057
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00171	0.00153	0.00140
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0686	1.0189	0.9952
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.4487	0.4099	0.9020
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0768	1.1078	1.0082
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	33.029	32.856	32.017
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.04746	0.04843	0.06775
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00615	0.00484	0.00492
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	0.0008

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-7	i-8	i-9
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					08:53:00	08:57:00	09:05:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Piomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.15	30.16	29.42
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0952	0.0930	0.0907
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.23 *	30.47 *	29.03 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.13	14.24	13.57
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	288.620	281.789	275.921
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0045	0.0039	0.0040
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002418	0.001746	0.001798
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0124	0.0154	0.0200
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-10	i-11	i-12
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					09:09:00	09:53:00	10:01:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00630	0.00614	0.00612
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01547	0.02161	0.00924
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0387	0.0379	0.0377
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	8.365	7.555	7.927
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	149.507	135.316	142.325
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0666	0.0643	0.0654
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00061	0.00065	0.00056
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00165	0.00113	0.00144
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0237	0.9938	1.0155
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.6412	0.8755	0.3961
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0731	0.9837	1.0353
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	34.614	32.133	33.210
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.05619	0.06943	0.05384
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00486	0.00476	0.00498
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0006	<0.0006	0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Piomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	30.73	27.86	29.69
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0930	0.0897	0.0929
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.53 *	27.42 *	29.35 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.27	12.82	13.72
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	298.200	276.419	285.698
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0044	0.0039	0.0038
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001806	0.001745	0.001848
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-10	i-11	i-12
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					09:09:00	09:53:00	10:01:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0170	0.0200	0.0128
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-13	i-14	i-15
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					10:43:00	10:52:00	11:17:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00656	0.00623	0.00624
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01228	0.01338	0.01238
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0387	0.0383	0.0375
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	7.937	8.261	7.635
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	142.929	146.610	141.970
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0675	0.0662	0.0649
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00065	0.00061	0.00059
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00119	0.00144	0.00146
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0536	1.0278	1.0171
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.5618	0.5605	0.4847
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0232	1.0529	0.9880
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	32.380	32.279	32.317
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.05317	0.05199	0.04546
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00535	0.00502	0.00515
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.16	30.34	28.71
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0958	0.0924	0.0927
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	29.19 *	30.68 *	28.22 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	13.64	14.34	13.19
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	277.522	279.711	278.175
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0043	0.0044	0.0036
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002077	0.001988	0.001936
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0139	0.0119	0.0106
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					i-16	i-17	C-1
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					11:23:00	11:46:00	11:51:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	0.227	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00653	0.00950	0.00691
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01484	0.50018	0.01052
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0371	0.0400	0.0362
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	8.028	16.156	16.382
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	145.506	146.611	144.519
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	0.00038	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0650	0.0651	0.0615
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00057	0.00034	0.00048
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00109	0.00269	0.00214
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0073	1.0072	0.9602
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	0.00015	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	0.00084	0.00036
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.5532	0.2573	0.1015
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0064	1.0196	1.0286
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	33.634	35.855	37.175
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.04413	0.05434	0.06185
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00519	0.00669	0.00573
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	0.0036
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.66	26.91	26.72
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0925	0.0914	0.0882
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	0.0023	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	30.22 *	51.62 *	48.89 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	14.13	24.13	22.85
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	288.155	297.110	311.531
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0037	0.0077	0.0041
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001993	0.002884	0.002203
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	0.0070	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0091	0.0031	0.0270
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	0.00053	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-2	C-3	C-4
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					12:32:00	12:43:00	15:10:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00517	0.00569	0.00395
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00384	0.00589	0.00468
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0360	0.0346	0.0341
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	16.645	16.766	16.091
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	144.498	141.445	138.245
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0634	0.0611	0.0598
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00067	0.00042	0.00068

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-2	C-3	C-4
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					12:32:00	12:43:00	15:10:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00166	0.00183	0.00184
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.9677	0.9275	0.9117
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0839	0.0726	0.0996
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.1579	1.0335	1.0220
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	35.402	37.605	35.229
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.06531	0.04906	0.04968
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00478	0.00561	0.00435
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0020	0.0014	0.0019
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	27.29	26.47	25.78
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0889	0.0853	0.0849
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0021	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	47.62 *	48.41 *	45.80 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	22.26	22.63	21.41
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	295.426	313.026	291.768
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0039	0.0038	0.0035
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001633	0.002162	0.001399
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0281	0.0173	0.0266
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-5	C-6	C-7
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					15:17:00	15:59:00	16:03:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00579	0.00447	0.00576
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00796	0.00282	0.00832
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0368	0.0373	0.0380
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	16.896	17.545	17.520
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	146.741	148.179	148.388
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0653	0.0654	0.0664
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00043	0.00068	0.00043
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00224	0.00269	0.00209
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.9809	0.9925	1.0082
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.1172	0.1218	0.0978
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0677	1.1005	1.0950
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	36.144	35.913	34.727
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.03592	0.03879	0.04942
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-5	C-6	C-7
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					15:17:00	15:59:00	16:03:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00610	0.00483	0.00617
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0015	0.0018	0.0013
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	27.16	27.44	27.93
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0910	0.0921	0.0930
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0021	0.0020	0.0022
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	50.37 *	49.95 *	51.48 *
Siilicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	23.55	23.35	24.06
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	299.555	295.816	282.047
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0037	0.0039	0.0035
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002354	0.001615	0.002316
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0136	0.0217	0.0140
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-8	C-9	C-10
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					16:10:00	10:32:00	16:45:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00454	0.00428	0.00464
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00333	0.00403	0.00373
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0382	0.0353	0.0361
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	18.059	16.833	17.316
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	150.647	138.006	144.867
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0677	0.0605	0.0640
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00068	0.00070	0.00068
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00211	0.00228	0.00187
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0249	0.9118	0.9528
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.1064	0.0931	0.0882
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.1228	1.0409	1.0730
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	38.726	34.727	35.494
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.05063	0.06493	0.05634
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00517	0.00480	0.00497
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0017	0.0066	0.0020
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	28.12	26.25	27.13
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0938	0.0926	0.0885
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0021	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	51.13 *	48.47 *	50.30 *
Siilicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	23.90	22.66	23.51
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	292.002	282.621	288.212
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-8	C-9	C-10
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					16:10:00	10:32:00	16:45:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0043	0.0037	0.0040
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001721	0.001633	0.001707
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0271	0.0432	0.0363
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-11	C-12	C-13
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					17:05:00	17:08:00	17:26:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>							
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00438	0.00450	0.00688
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00253	0.00323	0.49326
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0384	0.0375	0.0390
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	18.280	17.833	17.206
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	155.070	148.798	146.016
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0669	0.0645	0.0645
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00010	0.00066	0.00028
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00190	0.00188	0.00196
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	1.0041	0.9609	0.9728
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0076	0.0920	0.0608
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.1294	1.1049	1.0569
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	38.178	33.939	36.477
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00108	0.05832	0.03351
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00519	0.00515	0.00695
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0013	0.0017	0.0009
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	28.98	27.91	27.08
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0942	0.0900	0.0891
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0021	<0.0013	0.0024
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	54.51 *	52.02 *	53.01 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	25.48	24.31	24.78
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	311.526	278.462	291.183
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0038	0.0042	0.0041
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.001815	0.001823	0.002513
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003	0.0073
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0143	0.0175	0.0043
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045	<0.00045

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					v-1	v-2
FECHA DE MUESTREO					17/12/2019	17/12/2019
HORA DE MUESTREO					17:31:00	17:53:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	0.076	0.030
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	0.00776	0.00700
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.51928	0.49271
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0387	0.0379
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	19.676	17.010
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	142.882	136.033
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0693	0.0641
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00016	0.00022
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00128	0.00229
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.9526	0.8959
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0576	0.0447
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	1.0970	1.0576
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	36.745	35.893
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00603	0.03264
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00687	0.00619
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	0.0017
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	29.57	26.30
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0925	0.0860
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	0.0022
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	59.54 *	52.62 *
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	27.83	24.59
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	297.661	289.865
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0063	0.0047
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002528	0.002232
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0068	0.0060
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0080	0.0180
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

**Notas:**

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

(\* ) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL - DA , para la matriz en mención.

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

**CONTROL DE CALIDAD**

**LC:** Limite de cuantificación  
**MB:** Blanco del proceso.  
**LCS %Recovery:** Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.  
**MS %Recovery:** Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.  
**MSD %RPD:** Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.  
**Dup %RPD:** Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aluminio Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	95%	92%	0%
Antimonio Total	mg/L	0.00013	<0.00013	0 - 8%	109%	93%	0%
Arsénico Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 8%	97 - 99%	101%	3%
Bario Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 7%	93 - 97%	95%	0%
Berilio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	93 - 94%	92%	3%
Bismuto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	94 - 98%	100%	8%
Boro Total	mg/L	0.006	<0.006	0 - 8%	99 - 100%	98%	5%
Cadmio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	92 - 97%	92%	3%
Calcio Total	mg/L	0.009	<0.009	0 - 6%	97 - 100%	97%	0%
Cerio Total	mg/L	0.00024	<0.00024	0%	97 - 99%	99%	7%
Cesio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 6%	93 - 108%	101%	0%
Cobalto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0 - 8%	96 - 107%	108%	9%
Cobre Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0 - 8%	95 - 102%	99%	1%
Cromo Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	99 - 100%	99%	1%
Estaño Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0%	94 - 113%	98%	0%
Estroncio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 7%	93 - 105%	92%	1%
Fósforo Total	mg/L	0.047	<0.047	0%	99%	99%	0%
Galio Total	mg/L	0.00012	<0.00012	0 - 8%	99 - 109%	105%	1%
Germanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	98 - 99%	99%	1%
Hafnio Total	mg/L	0.00015	<0.00015	0%	96 - 102%	103%	0%
Hierro Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0 - 8%	105 - 115%	98%	1%
Lantano Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	105 - 106%	104%	0%
Litio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 8%	95 - 99%	93%	5%
Lutecio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	95 - 104%	93%	1%
Magnesio Total	mg/L	0.003	<0.003	0 - 8%	98 - 101%	96%	1%
Manganeso Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 7%	99 - 102%	98%	2%
Mercurio Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0%	99 - 100%	99%	0%
Molibdeno Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0 - 8%	96 - 98%	94%	11%
Niobio Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	96 - 97%	93%	1%
Niquel Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 8%	97 - 98%	94%	0%
Plata Total	mg/L	0.000010	<0.000010	0%	97 - 98%	95%	2%
Plomo Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	93 - 100%	94%	6%
Potasio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 7%	95%	99%	1%
Rubidio Total	mg/L	0.0009	<0.0009	0 - 8%	94 - 107%	91%	0%
Selenio Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0%	97%	98%	1%
Silice Total	mg/L	0.27	<0.27	0 - 8%	98%	109%	5%
Silicio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 8%	98%	109%	5%
Sodio Total	mg/L	0.019	<0.019	0 - 7%	99 - 107%	103%	0%
Talio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	93 - 108%	104%	1%
Tantalio Total	mg/L	0.0021	<0.0021	0%	95 - 97%	98%	0%
Teluro Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	98 - 100%	96%	2%
Thorio Total	mg/L	0.00019	<0.00019	0%	97 - 108%	99%	1%
Titanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 8%	97%	98%	3%
Uranio Total	mg/L	0.000010	<0.000010	1 - 7%	97 - 98%	93%	1%
Vanadio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	95 - 104%	105%	6%
Wolframio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	97%	99%	0%
Yterbio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	97 - 98%	99%	3%
Zinc Total	mg/L	0.0026	<0.0026	0 - 8%	96 - 97%	99%	0%
Zirconio Total	mg/L	0.00045	<0.00045	0%	97 - 102%	98%	0%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL  
MA1933044 Rev. 0**

**REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO**

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_EPA200_8_AQ	Arequipa	Metales Totales	EPA 200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (Validado).2016.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx> Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio., su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fé pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

## Anexo 7

### Determinación de la ecuación de regresión múltiple y los estadísticos para análisis de varianza para la VD arsénico total

Arreglo de la matriz para la ecuación de segundo orden:

		x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x1	x2x2	x3x3
X =	1	30	20	60	600	1800	1200	900	400	3600
	1	50	20	60	1000	3000	1200	2500	400	3600
	1	30	60	60	1800	1800	3600	900	3600	3600
	1	50	60	60	3000	3000	3600	2500	3600	3600
	1	30	40	40	1200	1200	1600	900	1600	1600
	1	50	40	40	2000	2000	1600	2500	1600	1600
	1	30	40	80	1200	2400	3200	900	1600	6400
	1	50	40	80	2000	4000	3200	2500	1600	6400
	1	40	20	40	800	1600	800	1600	400	1600
	1	40	60	40	2400	1600	2400	1600	3600	1600
	1	40	20	80	800	3200	1600	1600	400	6400
	1	40	60	80	2400	3200	4800	1600	3600	6400
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600	

X'=	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	30	50	30	50	30	50	30	50	40	40	40	40	40	40	40	40
	20	20	60	60	40	40	40	40	20	60	20	60	40	40	40	40
	60	60	60	60	40	40	80	80	40	40	80	80	60	60	60	60
	600	1000	1800	3000	1200	2000	1200	2000	800	2400	800	2400	1600	1600	1600	1600
	1800	3000	1800	3000	1200	2000	2400	4000	1600	1600	3200	3200	2400	2400	2400	2400
	1200	1200	3600	3600	1600	1600	3200	3200	800	2400	1600	4800	2400	2400	2400	2400
	900	2500	900	2500	900	2500	900	2500	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
	400	400	3600	3600	1600	1600	1600	1600	400	3600	400	3600	1600	1600	1600	1600
	3600	3600	3600	3600	1600	1600	6400	6400	1600	1600	6400	6400	3600	3600	3600	3600

X'X=	16	640	640	960	25600	38400	38400	26400	28800	60800
	640	26400	25600	38400	1056000	1584000	1536000	1120000	1152000	2432000
	640	25600	28800	38400	1152000	1536000	1728000	1056000	1408000	2432000
	960	38400	38400	60800	1536000	2432000	2432000	1584000	1728000	4032000
	25600	1056000	1152000	1536000	47520000	63360000	69120000	44800000	56320000	97280000
	38400	1584000	1536000	2432000	63360000	100320000	97280000	67200000	69120000	161280000
	38400	1536000	1728000	2432000	69120000	97280000	109440000	63360000	84480000	161280000
	26400	1120000	1056000	1584000	44800000	67200000	63360000	48720000	47520000	100320000
	28800	1152000	1408000	1728000	56320000	69120000	84480000	47520000	72960000	109440000
	60800	2432000	2432000	4032000	97280000	161280000	161280000	100320000	109440000	277760000

$(X'X)^{-1} =$	145,875	-4,45	-0,8125	-1,40625	0,01	0,015	0,00375	0,03875	0,0021875	0,0053125
	-4,45	0,19375	0,01	0,015	-0,00025	-0,000375	-2,595x10 <sup>-18</sup>	-0,002	1,75642x10 <sup>-19</sup>	-1,0436x10 <sup>-16</sup>
	-0,8125	0,01	0,0259375	0,00375	-0,00025	-1,292x10 <sup>-17</sup>	-9,375x10 <sup>-5</sup>	-2,776x10 <sup>-20</sup>	-0,000125	-2,1538x10 <sup>-17</sup>
	-1,40625	0,015	0,00375	0,0353125	0	-0,00025	-6,25x10 <sup>-5</sup>	-2,776x10 <sup>-20</sup>	-1,2279x10 <sup>-19</sup>	-0,0001875
	0,01	-0,00025	-0,00025	-3,81x10 <sup>-17</sup>	0,00000625	2,8876x10 <sup>-19</sup>	7,7355x10 <sup>-20</sup>	6,9389x10 <sup>-22</sup>	1,20447x10 <sup>-21</sup>	1,94636x10 <sup>-19</sup>
	0,015	-0,000375	1,4655x10 <sup>-19</sup>	-0,00025	0	6,25x10 <sup>-6</sup>	-8,28x10 <sup>-21</sup>	6,9389x10 <sup>-22</sup>	1,30288x10 <sup>-22</sup>	6,38031x10 <sup>-19</sup>
	0,00375	4,2633x10 <sup>-19</sup>	-9,375x10 <sup>-5</sup>	-6,25x10 <sup>-5</sup>	0	-7,105x10 <sup>-21</sup>	1,5625x10 <sup>-6</sup>	6,4349x10 <sup>-35</sup>	7,71164x10 <sup>-22</sup>	1,64741x10 <sup>-19</sup>
	0,03875	-0,002	-1,35x10 <sup>-18</sup>	-8,171x10 <sup>-17</sup>	0	-1,094x10 <sup>-19</sup>	-1,301x10 <sup>-21</sup>	0,000025	-2,9655x10 <sup>-21</sup>	7,14706x10 <sup>-19</sup>
	0,0021875	-1,258x10 <sup>-18</sup>	-0,000125	-6,495x10 <sup>-18</sup>	0	2,0961x10 <sup>-20</sup>	5,7463x10 <sup>-21</sup>	7,6267x10 <sup>-35</sup>	1,5625x10 <sup>-6</sup>	4,49944x10 <sup>-20</sup>
	0,0053125	-1,494x10 <sup>-17</sup>	-3,926x10 <sup>-18</sup>	-0,0001875	0	2,4905x10 <sup>-19</sup>	6,451x10 <sup>-20</sup>	6,5482x10 <sup>-35</sup>	6,89336x10 <sup>-22</sup>	1,5625x10 <sup>-06</sup>

$$\hat{B} = (X'X)^{-1} X'Y_1 :$$

$$\begin{array}{c}
 X'Y_1 = \\
 \left| \begin{array}{c}
 0,25895 \\
 9,9281 \\
 9,4086 \\
 15,273 \\
 361,922 \\
 585,31 \\
 552,036 \\
 393,599 \\
 398,38 \\
 950,7
 \end{array} \right|
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 (X'X)^{-1}(X'Y_1) = \\
 \left| \begin{array}{c}
 \hat{b}_0 \\
 \hat{b}_1 \\
 \hat{b}_2 \\
 \hat{b}_3 \\
 \hat{b}_4 \\
 \hat{b}_5 \\
 \hat{b}_6 \\
 \hat{b}_7 \\
 \hat{b}_8 \\
 \hat{b}_9
 \end{array} \right|
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{c}
 0,11515875 \\
 -0,002746875 \\
 -0,001837937 \\
 0,000297125 \\
 1,73375 \times 10^{-5} \\
 1,15 \times 10^{-6} \\
 -3 \times 10^{-6} \\
 1,80875 \times 10^{-5} \\
 1,28469 \times 10^{-5} \\
 -2,54688 \times 10^{-6}
 \end{array} \right|
 \end{array}$$

Por lo tanto, la ecuación cuadrática estimada fue:

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 0,11515875 - 0,00274687x_1 - 0,00183794x_2 - 0,000297125x_3 \\
 & + 1,73375 \times 10^{-5} x_1 x_2 + 1,15 \times 10^{-6} x_1 x_3 - 3 \times 10^{-6} x_2 x_3 \\
 & + 1,80875 \times 10^{-5} x_1^2 + 1,28469 \times 10^{-5} x_2^2 - 2,5469 \times 10^{-6} x_3^2
 \end{aligned} \quad [31]$$

Los valores estimados de esta ecuación son los que se indican a continuación,  $\hat{Y}_1 = X\hat{B}$

$$\hat{Y}_1 = \left| \begin{array}{c}
 0,0349425 \\
 0,01726 \\
 0,01614 \\
 0,0123275 \\
 0,02126375 \\
 0,01005625 \\
 0,01750375 \\
 0,00721625 \\
 0,02372375 \\
 0,01425625 \\
 0,02282375 \\
 0,00855625 \\
 0,01322 \\
 0,01322 \\
 0,01322 \\
 0,01322
 \end{array} \right|$$



De donde se obtuvieron los residuales siguientes:

$Y_1$		$\hat{Y}_1$		$Y_1 - \hat{Y}_1$
0,03671		0,0349425		0,0017675
0,01739		0,01726		0,00013
0,01601		0,01614		-0,00013
0,01056		0,0123275		-0,001766
0,02018		0,02126375		-0,0010838
0,01061		0,01005625		0,00055375
0,01695	-	0,01750375	=	-0,0005538
0,0083		0,00721625		0,00108375
0,02304		0,02372375		-0,0006838
0,01547		0,01425625		0,00121375
0,02161		0,02282375		-0,0012138
0,00924		0,00855625		0,00068375
0,01228		0,01322		-0,00094
0,01338		0,01322		0,00016
0,01238		0,01322		-0,00084
0,01484		0,01322		0,00162

Luego:

$$\bar{Y} = 0,25895/16 = 0,01618$$

Aplicando las ecuaciones [26], [27] y [25]:

$$SSE = (0,0017675)^2 + (0,00013)^2 + (-0,00013)^2 + \dots + (0,00162)^2 = 1,73648 \times 10^{-5}$$

$$SST = (0,03671^2 + 0,01739^2 + 0,01601^2 + \dots + 0,01484^2) - 16(0,01618)^2 = 0,00072877$$

$$SSR = SST - SSE = 0,00072877 - 1,73648 \times 10^{-5} = 0,000711403$$

El valor de F, con la ecuación [28], es:

$$F = \frac{0,000711403/9}{1,73648 \times 10^{-5}/(16-9-1)} = 27,31$$

Hallando los valores de R2 y R2 ajustado con las ecuaciones [29] y [30]:

$$R^2 = 0,000711403 / 0,00072877 = 0,97617$$

$$R^2_{ajustada} = 1 - \frac{1,73648 \times 10^{-5}/(16-9)}{0,00072877/(16-1)} = 0,9489$$

## ANEXO 8

### Determinación de las mejores condiciones de operación en la remoción de arsénico

Ecuación de regresión:

$$y_1 = 0,11515875 - 0,00274687x_1 - 0,00183794x_2 - 0,000297125x_3 + 1,73375 \times 10^{-5} x_1 x_2 + 1,15 \times 10^{-6} x_1 x_3 - 3 \times 10^{-6} x_2 x_3 + 1,80875 \times 10^{-5} x_1^2 + 1,28469 \times 10^{-5} x_2^2 - 2,5469 \times 10^{-6} x_3^2 \quad [31]$$

Calculando las derivadas parciales e igualando a cero para hallar los puntos críticos:

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = -0,00274687 + 1,73375 \times 10^{-5} x_2 + 1,150 \times 10^{-6} x_3 + 0,000036175 * x_1 = 0$$

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = -0,00183794 + 1,73375 \times 10^{-5} x_1 - 3 \times 10^{-6} * x_3 + 0,00002569375 * x_2 = 0$$

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0,000297125 + 1,150 \times 10^{-6} * x_1 - 3 \times 10^{-6} * x_2 - 5,09375 \times 10^{-6} * x_3 = 0$$

x1	x2	x3	
3,6175x10 <sup>-5</sup>	1,73375x10 <sup>-5</sup>	1,15x10 <sup>-6</sup>	0,002746875
1,73375x10 <sup>-5</sup>	2,56938x10 <sup>-5</sup>	-3x10 <sup>-6</sup>	0,001837937
1,15x10 <sup>-6</sup>	-3x10 <sup>-6</sup>	-5,09375x10 <sup>-6</sup>	-0,000297125

Del sistema de ecuaciones:

$$x_1 = 55,40171847$$

$$x_2 = 39,69056936$$

$$x_3 = 47,46312013$$

Luego el punto crítico es:

Calculando la matriz Hessiana para evaluar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o punto silla.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1 x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2 x_1} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2 x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3 x_1} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3 x_2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3^2} \end{bmatrix}$$

Si  $H_1(f) > 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local

Si  $H_1(f) < 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local

Si  $H_1(f) \neq 0; H_2(f) \neq 0$  y  $H_3(f) \neq 0$ , y no satisface ninguna de las anteriores entonces  $f$  posee un punto silla

$$Hf(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} 3,6175 \times 10^{-5} & 1,73375 \times 10^{-5} & 1,15 \times 10^{-6} \\ 1,73375 \times 10^{-5} & 2,56938 \times 10^{-5} & -3 \times 10^{-6} \\ 1,15 \times 10^{-6} & -3 \times 10^{-6} & -5,09375 \times 10^{-6} \end{vmatrix}$$

$$H_1(f) = |3,6175 \times 10^{-5}| = 3,6175 \times 10^{-5}$$

$$H_2(f) = \begin{vmatrix} 3,6175 \times 10^{-5} & 1,73375 \times 10^{-5} \\ 1,73375 \times 10^{-5} & 2,56938 \times 10^{-5} \end{vmatrix} = 6,2888 \times 10^{-10}$$

$$H_3(f) = \begin{vmatrix} 3,6175 \times 10^{-5} & 1,73375 \times 10^{-5} & 1,15 \times 10^{-6} \\ 1,73375 \times 10^{-5} & 2,56938 \times 10^{-5} & -3 \times 10^{-6} \\ 1,15 \times 10^{-6} & -3 \times 10^{-6} & -5,09375 \times 10^{-6} \end{vmatrix} = -3,68255 \times 10^{-15}$$

De las determinantes halladas  $Hf(x_1, x_2, x_3)$ , donde  $y_1 = f$ , se tiene:

$$H_1(f) = 3,6175 \times 10^{-5} > 0$$

$$H_2(f) = 6,2888 \times 10^{-10} > 0$$

$$H_3(f) = -3,68255 \times 10^{-15} < 0$$

## Anexo 9

### Determinación de la ecuación de regresión múltiple y los estadísticos para análisis de varianza para la VD hierro total

Arreglo de la matriz para la ecuación de segundo orden:

		x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x1	x2x2	x3x3
X =	1	30	20	60	600	1800	1200	900	400	3600
	1	50	20	60	1000	3000	1200	2500	400	3600
	1	30	60	60	1800	1800	3600	900	3600	3600
	1	50	60	60	3000	3000	3600	2500	3600	3600
	1	30	40	40	1200	1200	1600	900	1600	1600
	1	50	40	40	2000	2000	1600	2500	1600	1600
	1	30	40	80	1200	2400	3200	900	1600	6400
	1	50	40	80	2000	4000	3200	2500	1600	6400
	1	40	20	40	800	1600	800	1600	400	1600
	1	40	60	40	2400	1600	2400	1600	3600	1600
	1	40	20	80	800	3200	1600	1600	400	6400
	1	40	60	80	2400	3200	4800	1600	3600	6400
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
	1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600
1	40	40	60	1600	2400	2400	1600	1600	3600	

X'=	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	30	50	30	50	30	50	30	50	40	40	40	40	40	40	40	40
	20	20	60	60	40	40	40	40	20	60	20	60	40	40	40	40
	60	60	60	60	40	40	80	80	40	40	80	80	60	60	60	60
	600	1000	1800	3000	1200	2000	1200	2000	800	2400	800	2400	1600	1600	1600	1600
	1800	3000	1800	3000	1200	2000	2400	4000	1600	1600	3200	3200	2400	2400	2400	2400
	1200	1200	3600	3600	1600	1600	3200	3200	800	2400	1600	4800	2400	2400	2400	2400
	900	2500	900	2500	900	2500	900	2500	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
	400	400	3600	3600	1600	1600	1600	1600	400	3600	400	3600	1600	1600	1600	1600
	3600	3600	3600	3600	1600	1600	6400	6400	1600	1600	6400	6400	3600	3600	3600	3600

X'X=	16	640	640	960	25600	38400	38400	26400	28800	60800
	640	26400	25600	38400	1056000	1584000	1536000	1120000	1152000	2432000
	640	25600	28800	38400	1152000	1536000	1728000	1056000	1408000	2432000
	960	38400	38400	60800	1536000	2432000	2432000	1584000	1728000	4032000
	25600	1056000	1152000	1536000	47520000	63360000	69120000	44800000	56320000	97280000
	38400	1584000	1536000	2432000	63360000	100320000	97280000	67200000	69120000	161280000
	38400	1536000	1728000	2432000	69120000	97280000	109440000	63360000	84480000	161280000
	26400	1120000	1056000	1584000	44800000	67200000	63360000	48720000	47520000	100320000
	28800	1152000	1408000	1728000	56320000	69120000	84480000	47520000	72960000	109440000
	60800	2432000	2432000	4032000	97280000	161280000	161280000	100320000	109440000	277760000

$(X'X)^{-1} =$	145,875	-4,45	-0,8125	-1,40625	0,01	0,015	0,00375	0,03875	0,0021875	0,0053125
	-4,45	0,19375	0,01	0,015	-0,00025	-0,000375	-2,595x10 <sup>-18</sup>	-0,002	1,75642x10 <sup>-19</sup>	-1,0436x10 <sup>-16</sup>
	-0,8125	0,01	0,0259375	0,00375	-0,00025	-1,292x10 <sup>-17</sup>	-9,375x10 <sup>-5</sup>	-2,776x10 <sup>-20</sup>	-0,000125	-2,1538x10 <sup>-17</sup>
	-1,40625	0,015	0,00375	0,0353125	0	-0,00025	-6,25x10 <sup>-5</sup>	-2,776x10 <sup>-20</sup>	-1,2279x10 <sup>-19</sup>	-0,0001875
	0,01	-0,00025	-0,00025	-3,81x10 <sup>-17</sup>	0,00000625	2,8876x10 <sup>-19</sup>	7,7355x10 <sup>-20</sup>	6,9389x10 <sup>-22</sup>	1,20447x10 <sup>-21</sup>	1,94636x10 <sup>-19</sup>
	0,015	-0,000375	1,4655x10 <sup>-19</sup>	-0,00025	0	6,25x10 <sup>-6</sup>	-8,28x10 <sup>-21</sup>	6,9389x10 <sup>-22</sup>	1,30288x10 <sup>-22</sup>	6,38031x10 <sup>-19</sup>
	0,00375	4,2633x10 <sup>-19</sup>	-9,375x10 <sup>-5</sup>	-6,25x10 <sup>-5</sup>	0	-7,105x10 <sup>-21</sup>	1,5625x10 <sup>-6</sup>	6,4349x10 <sup>-35</sup>	7,71164x10 <sup>-22</sup>	1,64741x10 <sup>-19</sup>
	0,03875	-0,002	-1,35x10 <sup>-18</sup>	-8,171x10 <sup>-17</sup>	0	-1,094x10 <sup>-19</sup>	-1,301x10 <sup>-21</sup>	0,000025	-2,9655x10 <sup>-21</sup>	7,14706x10 <sup>-19</sup>
	0,0021875	-1,258x10 <sup>-18</sup>	-0,000125	-6,495x10 <sup>-18</sup>	0	2,0961x10 <sup>-20</sup>	5,7463x10 <sup>-21</sup>	7,6267x10 <sup>-35</sup>	1,5625x10 <sup>-6</sup>	4,49944x10 <sup>-20</sup>
	0,0053125	-1,494x10 <sup>-17</sup>	-3,926x10 <sup>-18</sup>	-0,0001875	0	2,4905x10 <sup>-19</sup>	6,451x10 <sup>-20</sup>	6,5482x10 <sup>-35</sup>	6,89336x10 <sup>-22</sup>	1,5625x10 <sup>-06</sup>

$$\hat{B} = (X'X)^{-1} X'Y_2 :$$

$X'Y_2 =$	10,169		$(X'X)^{-1}(X'Y_2) =$	$\hat{b}_0$	=	2,60315
	404,522			$\hat{b}_1$		-0,0424375
	372,804			$\hat{b}_2$		-0,05849875
	596,816			$\hat{b}_3$		0,01162375
	14884,48			$\hat{b}_4$		0,0003865
	23744,44			$\hat{b}_5$		$3,8 \times 10^{-5}$
	21747,84			$\hat{b}_6$		-0,0001366
	16610,76			$\hat{b}_7$		0,00027375
	15912,72			$\hat{b}_8$		0,000507813
	36980,16			$\hat{b}_9$		$-9,8688 \times 10^{-5}$

Por lo tanto, la ecuación cuadrática estimada fue:

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 2,60315 - 0,0424375x_1 - 0,05849875x_2 + 0,01162375x_3 \\
 & + 0,0003865x_1x_2 + 3,8 \times 10^{-5}x_1x_3 - 0,00013663x_2x_3 \\
 & + 0,00027375x_1^2 + 0,000507813x_2^2 - 9,8688 \times 10^{-5}x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Los valores estimados de esta ecuación se indican a continuación,  $\hat{Y}_2 = X\hat{B}$

	1,08805
	0,8775
	0,509
	0,60765
	0,6468
	0,57565
	0,46505
$\hat{Y}_2 =$	0,4243
	0,94455
	0,6294
	0,8873
	0,35355
	0,54005
	0,54005
	0,54005
	0,54005

De donde se obtuvieron los residuales siguientes:

$Y_2$		$\hat{Y}_2$		$Y_2 - \hat{Y}_2$
1,1162		1,08805		0,02815
0,9037		0,8775		0,0262
0,4828		0,509		-0,0262
0,5795		0,60765		-0,02815
0,6612		0,6468		0,0144
0,592		0,57565		0,01635
0,4487	-	0,46505	=	-0,01635
0,4099		0,4243		-0,0144
0,902		0,94455		-0,04255
0,6412		0,6294		0,0118
0,8755		0,8873		-0,0118
0,3961		0,35355		0,04255
0,5618		0,54005		0,02175
0,5605		0,54005		0,02045
0,4847		0,54005		-0,05535
0,5532		0,54005		0,01315

Luego:

$$\bar{Y} = 9,1491/16 = 0,6355625$$

Aplicando las ecuaciones [26], [27] y [25]:

$$SSE = (0,02815)^2 + (0,0262)^2 + (-0,0262)^2 + \dots + (0,01315)^2 = 0,011934$$

$$SST = (1,1162^2 + 0,9037^2 + 0,4828^2 + \dots + 0,5532^2) - 16(0,6355625)^2 = 0,64433702$$

$$SSR = SST - SSE = 0,64433702 - 0,011934385 = 0,632402633$$

Y el valor de F, con la ecuación [28], es:

$$F = \frac{0,632402633/9}{0,011934385/(16-9-1)} = 35,32664$$

Hallando los valores de  $R^2$  y  $R^2$  ajustado con las ecuaciones [29] y [30]:

$$R^2 = 0,632402633 / 0,64433702 = 0,981478$$

$$R^2_{ajustada} = 1 - \frac{0,011934385/(16-9)}{0,64433702/(16-1)} = 0,96031$$



## Anexo 10

### Determinación de las mejores condiciones de operación en el hierro total o residual

De la ecuación de regresión:

$$y_2 = 2,60315 - 0,0424375x_1 - 0,05849875x_2 + 0,01162375x_3 \\ + 0,0003865x_1x_2 + 3,8 \times 10^{-5}x_1x_3 - 0,00013663x_2x_3 \\ + 0,00027375x_1^2 + 0,000507813x_2^2 - 9,8688 \times 10^{-5}x_3^2 \quad [32]$$

Calculando las derivadas parciales e igualando a cero para hallar los puntos críticos:

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = -0,0424375 + 0,0003865x_2 + 3,8 \times 10^{-5}x_3 + 0,0005475x_1 = 0$$

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = -0,05849875 + 0,0003865x_1 - 0,00013663x_3 + 0,001015625x_2 = 0$$

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0,01162375 + 3,8 \times 10^{-5}x_1 - 0,00013663x_2 - 0,000197375x_3 = 0$$

x1	x2	x3	
0,0005475	0,0003865	$3,8 \times 10^{-5}$	0,0424375
0,0003865	0,001015625	-0,000136625	0,05849875
$3,8 \times 10^{-5}$	-0,000136625	-0,000197375	-0,01162375

Del sistema de ecuaciones:

$$x_1 = 42,49226519$$

$$x_2 = 46,15327551$$

$$x_3 = 35,12483755$$

Luego el punto crítico es:

Calculando la matriz Hessiana para evaluar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o punto silla.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1 x_2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_1 x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2 x_1} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_2 x_3} \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3 x_1} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3 x_2} & \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_3^2} \end{bmatrix}$$

Si  $H_1(f) > 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local

Si  $H_1(f) < 0; H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local

Si  $H_1(f) \neq 0; H_2(f) \neq 0$  y  $H_3(f) \neq 0$ , y no satisface ninguna de las anteriores  
entonces  $f$  posee un punto silla

$$Hf(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} 0,0005475 & 0,0003865 & 3,8 \times 10^{-5} \\ 0,0003865 & 0,001015625 & -0,000136625 \\ 3,8 \times 10^{-5} & -0,000136625 & -0,000197375 \end{vmatrix}$$

$$H_1(f) = \begin{vmatrix} 0,0005475 \end{vmatrix} = 0,0005475$$

$$H_2(f) = \begin{vmatrix} 0,0005475 & 0,0003865 \\ 0,0003865 & 0,001015625 \end{vmatrix} = 4,06672 \times 10^{-7}$$

$$H_3(f) = \begin{vmatrix} 0,0005475 & 0,0003865 & 3,8 \times 10^{-5} \\ 0,0003865 & 0,001015625 & -0,000136625 \\ 3,8 \times 10^{-5} & -0,000136625 & -0,000197375 \end{vmatrix} = -9,59666 \times 10^{-11}$$

De las determinantes halladas  $Hf(x_1, x_2, x_3)$ , donde  $y_2 = f$ , se tiene:

$$H_1(f) = 0,0005475 < 0$$

$$H_2(f) = 4,06672 \times 10^{-7} < 0$$

$$H_3(f) = -9,59666 \times 10^{-11} < 0$$

## Anexo 11

### Panel Fotográfico



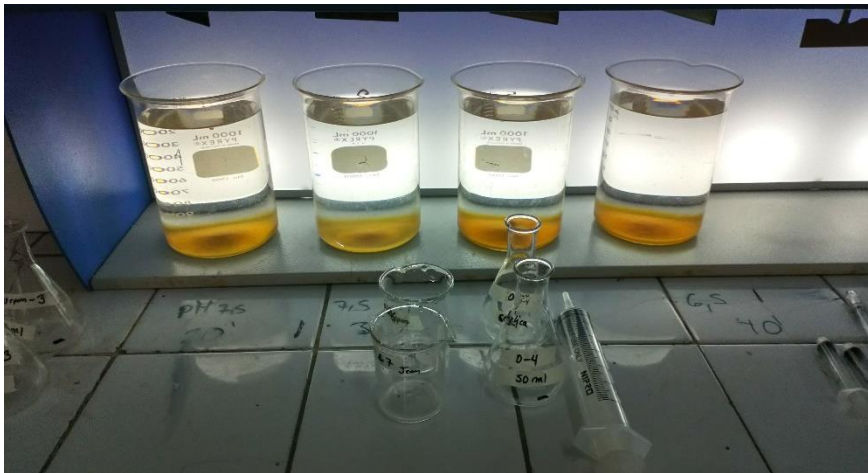
**Foto 1:** Muestreo realizado en la zona de captación.  
**Fuente:** Propia



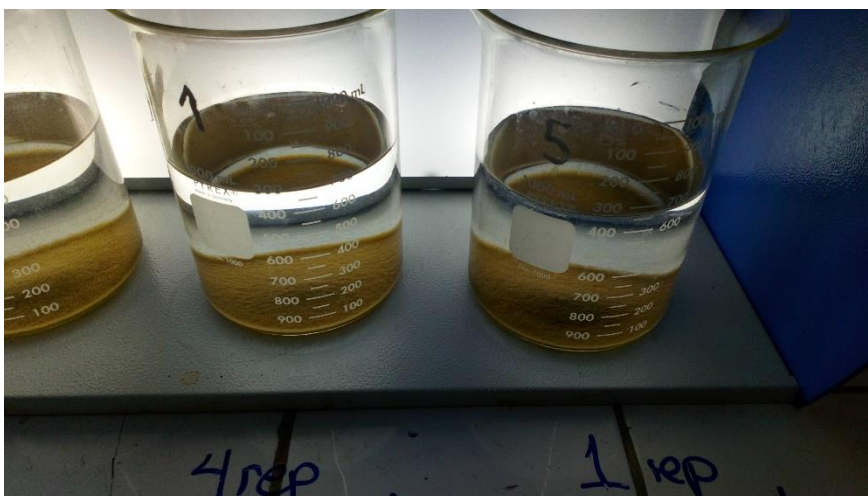
**Foto 2:** Acondicionamiento de la muestra  
**Fuente:** Propia



**Foto 3:** Proceso de coagulación  
**Fuente:** Propia



**Foto 4:** Sedimentación y toma de agua tratada.  
**Fuente:** Propia



**Foto 5:** Sedimentación de agua tratada.  
**Fuente:** Propia



**Foto 6:** Filtrado del agua tratada  
**Fuente:** Propia



**Foto 7:** Resultados preliminares utilizando el MQuant® Test Arsénico  
**Fuente:** Propia



**Foto 8:** Resultados preliminares utilizando el MQuant® Test Hierro  
**Fuente:** Propia



**Foto 9:** Kit de determinación de Arsénico MQuant® Test Arsénico  
**Fuente:** Propia



**Foto 10:** Kit de determinación de Hierro MQuant® Test Hierro  
**Fuente:** Propia