

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA DE RELAVES DE UNA EMPRESA MINERA  
EN CAJAMARCA MEDIANTE REDUCCION DE SULFATOS CON  
LECHADA DE CAL”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

- **OSCAR ALBERTO SOBRADOS QUISPE**
- **BRIAN ALEXIS TOMAS VELA MATTA**

**Callao, febrero 2017**

**PERU**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Expuesto por los Bachilleres **VELA MATTA BRIAN ALEXIS TOMAS** y **SOBRADOS QUISPE OSCAR ALBERTO**, ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° SANEZ FALCON LIDA CARMEN                      PRESIDENTE

ING° TOLEDO PALOMINO MARÍA ESTELA      SECRETARIO

ING° CHAMPA HENRIQUEZ OSCAR MANUEL VOCAL

ING° ÁNGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 1 Folio N° 11 y Acta N° 010 de Sustentación por la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de fecha **28 DE FEBRERO 2017**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

DEDICATORIA:

A Tomás, mi abuelo, por el gran amor que me brindó,  
quien no pudo ver mis sueños alcanzados,  
pero puedo estar seguro que  
se encuentra orgulloso.

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, Joel y Eva, por su incansable apoyo a mi persona a pesar de todos los obstáculos.

A mi hermana, Jimena, por quererme tanto y soportarme.

A mi abuela, Eva, por todos estos años de amor y consideración por mí.

A mis tíos y primos, por su constante aliento durante toda mi etapa de estudiante.

Al Ing. Carlos Ángeles Queriolo, por ser un guía y maestro para la consecución de este logro.

A Laura, por llegar a mi vida.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	8
<b>ABSTRACT</b>	10
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1. Identificación del problema	12
1.2. Formulación de problemas	14
1.3. Objetivos de la investigación	15
1.4. Justificación	15
1.5. Importancia	16
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1. Antecedentes del estudio	17
2.2. La industria minera y los procesos de producción	19
2.3. Drenaje ácido de mina (DAM)	21
2.4. Cinética química	24
2.5. Coagulación	28
2.6. Floculación	29
2.7. Tipos de cal	30
2.8. Tratamiento de aguas ácidas	34
2.9. Principios de tratamiento	38
2.10. Normativa ambiental	40
2.11. Definición de términos	42
<b>III. VARIABLES E HIPOTESIS</b>	
3.1. Variables de la investigación	43

3.2. Operacionalización de variables	44
3.3. Hipótesis General	45
3.4. Hipótesis Específicas	45
<b>IV. METODOLOGÍA</b>	
4.1. Tipo de investigación	46
4.2. Diseño de la investigación	46
4.3. Población y muestra	51
4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	52
4.5. Procedimientos de recolección de datos	53
<b>V. RESULTADOS</b>	
5.1. Determinación de dosis adecuada de cal	62
5.2. Determinación de dosis adecuada de coagulante	63
5.3. Determinación de dosis adecuada de floculante	65
5.4. Determinación del tiempo de reacción necesario para la reducción de sulfatos en el agua de relaves	67
<b>VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	
6.1. Contratación de hipótesis con los resultados	70
6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares	72
<b>VII. CONCLUSIONES</b>	76
<b>VIII. RECOMENDACIONES</b>	78
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	79
<b>ANEXOS</b>	
• ANEXO I: Matriz de consistencia	82

- ANEXO II: Estándar de Calidad Ambiental - DS. N° 015-2015  
MINAM 83
- ANEXO III: ASTM - Standard Test Method for Sulfate Ion in  
Water D 516 – 02 91
- ANEXO IV: Determinación de dosis inicial de cal 96
- ANEXO V: Análisis de sulfatos por espectrofotometría 97
- ANEXO VI: Determinación de % de sólidos en la determinación  
de dosis adecuada de coagulante 102
- ANEXO VII: Determinación de la constante cinética, orden de  
reacción y conversión en la reducción de sulfatos con diferentes  
concentraciones de lechada de cal. 104
- ANEXO VIII: Cálculo del volumen del reactor para la reducción  
de sulfatos. 109

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1:</b> Drenaje ácido de mina férrico	21
<b>FIGURA 2.2:</b> Representación esquemática del fenómeno de Neutralización	29
<b>FIGURA 2.3:</b> Cal viva	30
<b>FIGURA 2.4:</b> Cal apagada	33
<b>FIGURA 2.5:</b> Proceso HDS	36
<b>FIGURA 4.1:</b> Proceso para la determinación del tiempo de reacción y concentración de cal adecuada.	54
<b>FIGURA 4.2:</b> Pesado de la cal	55
<b>FIGURA 4.3:</b> Pesado de $\text{FeCl}_3$	56
<b>FIGURA 4.4:</b> Pesado de superfloc	56
<b>FIGURA 4.5:</b> Tratamiento de aguas residuales	57
<b>FIGURA 4.6:</b> Adición de lechada de cal al agua de relaves	58
<b>FIGURA 4.7:</b> Prueba de coagulación	59
<b>FIGURA 4.8:</b> Prueba de floculación	60
<b>FIGURA 4.9:</b> Equipo de filtración al vacío	60
<b>FIGURA 4.10:</b> Filtración de la muestra obtenida	61



<b>FIGURA 4.11:</b> Espectrofotómetro VARIAN	61
<b>FIGURA 5.1:</b> Muestra de agua de relaves con lechada de cal	62
<b>FIGURA 5.2:</b> Muestra final tratada con 60 ml de coagulante	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1:</b> Límite de sulfatos para vertimiento según ECA 2015	41
<b>TABLA 4.1:</b> Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de cal	48
<b>TABLA 4.2:</b> Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de coagulante	49
<b>TABLA 4.3:</b> Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de floculante	50
<b>TABLA 4.4:</b> Diseño experimental para la determinación del tiempo de reacción necesario para la remoción de sulfatos	50
<b>TABLA 5.1:</b> Concentración de sulfatos para diferentes concentraciones de lechada de cal	63
<b>TABLA 5.2:</b> Porcentaje de sólidos formados respecto a diferentes adiciones de coagulante	64
<b>TABLA 5.3:</b> Tiempo de sedimentación respecto a diferentes adiciones de floculante	66
<b>TABLA 5.4:</b> Concentración de sulfatos obtenido en diferentes tiempos luego de reaccionar con diferentes concentraciones de cal	68

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 5.1:</b> Concentración de sulfatos residual con respecto a la concentración de lechada de cal	63
<b>GRÁFICO 5.2:</b> Porcentaje de sólidos formados con adiciones de coagulante	65
<b>GRÁFICO 5.3:</b> Tiempo de sedimentación necesario para diferentes adiciones de floculante	67
<b>GRÁFICO 5.4:</b> Concentración de sulfatos determinados a diferentes tiempos de reacción y reaccionados con diferentes concentraciones de cal	69

## RESUMEN

El alcance del presente trabajo de investigación fue la determinación de las condiciones de operación para el tratamiento de aguas de relaves de una minera en Cajamarca mediante la reducción de sulfatos con lechada de cal. En este trabajo se empleó el método de precipitación química utilizando lechada de cal para la precipitación de los sulfatos como sulfato de calcio, que según el estándar de calidad ambiental para aguas (ECA) aprobado recientemente en diciembre del 2015 mediante DS N°015 - 2015 – MINAM, no debe ser superior 1000 ppm. Se encontró que las condiciones de operación para el tratamiento de estas aguas fue necesario usar lechada de cal con una concentración de 20 g/L, para lo cual se hizo reaccionar 150 ml de esta solución con 300 ml de agua de relaves, coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ) al 0.5% y floculante al 0.5% (superfloc N300) siendo necesario 50 ml y 5 ml respectivamente para el tratamiento de 450 ml de muestra total.

También se determinó el volumen adecuado del reactor a flujos de ingreso de aguas de relave con concentraciones altas en sulfatos, mediante la evaluación de la cinética química en la reacción de la lechada de cal con la muestra de agua a tratar. Se determinó el tiempo de reacción hasta alcanzar el equilibrio, en alrededor de los 16 minutos y mediante cálculos se obtuvo un volumen de reactor necesario de  $134.4 \text{ m}^3$ .

Finalmente con esta investigación, se determinó el tratamiento adecuado para la remoción de sulfatos mediante el uso de lechada de cal, dando

como resultado agua tratada con una concentración de sulfatos menores a 1000 ppm, cumpliendo así con las normativas ambientales y actuando en favor del desarrollo de las comunidades y poder darles agua de mayor calidad como un recurso natural mejorando así la calidad de vida de las comunidades.

## ABSTRACT

The scope of the present investigation is the determination of the operating conditions for the treatment of tailings waters of a mining company in Cajamarca by the reduction of sulfates with lime slurry. In this work the chemical precipitation method was used using lime slurry for the precipitation of sulfates as calcium sulphate, which according to the environmental quality standard for water (ECA) recently approved in December 2015 by means of DS N ° 015 - 2015 - MINAM, should not exceed 1000 ppm. It was found that the operating conditions for the treatment of these waters was necessary to use lime slurry with a concentration of 20 g / L which 150 ml of this solution was reacted with 300 ml of tailings water, coagulant ( $\text{FeCl}_3$ ) at 0.5% and flocculant at 0.5% (superfloc N300) being necessary 50 ml and 5 ml respectively for the treatment of 450 ml of total sample.

The adequate volume of the reactor was also determined at the inlet flows of tailings with high concentrations of sulphates by the evaluation of the chemical kinetics in the reaction of the lime slurry with the sample of water to be treated, determining the reaction time up to Reaching equilibrium around 16 minutes of equilibrium reached, by calculations we obtain a necessary reactor volume of 134.4 m<sup>3</sup>.

Finally, with this research, the appropriate treatment for the removal of sulfates through the use of lime slurry was determined, resulting in treated

water with a sulfate concentration lower than 1000 ppm, thus complying with environmental regulations and acting in favor of development Of the communities and to be able to give them water of better quality as a natural resource thus improving the quality of life of the communities.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Identificación del problema**

La minería en el Perú para todas sus operaciones utiliza agua, las cuales pueden ser obtenidas mediante la recolección de diferentes puntos, la minera ubicada en Cajamarca que es objeto de nuestra investigación utiliza agua subterránea (pozos), agua de lluvias que en contacto con el mineral sulfurado presente en el tajo producen drenajes ácidos, agua recuperada del proceso de flotación que es enviado como relave a la presa, aguas tratadas producidas por las 3 plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en mina y agua de rechazo de la planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa.

Todos estos puntos son recolectados en la presa de relaves construido especialmente para acumular el agua proveniente de todos los puntos ya antes mencionados, el agua es utilizado para las operaciones propias de la mina pero también por temas de balances hídricos muchas veces es necesario enviar agua al ambiente dependiendo de la capacidad de la presa.

Mediante Decreto Supremo del Ministerio del Ambiente N° 015 – 2015 – MINAM del 19 de diciembre de 2015, se modificaron los Estándares Nacionales de Calidad de Agua (ECA) que habían sido aprobados con el decreto D.S. 002 – 2008 – MINAM, y se decretaron nuevos límites.



En el caso de la minera ubicada a 2 horas de la ciudad de Cajamarca, actualmente el agua de la presa de relaves cumple con la mayoría de los nuevos parámetros establecidos por el nuevo ECA, con la excepción de sulfatos, que es el parámetro principal que requiere tratamiento.

Actualmente la empresa tiene un convenio con las comunidades, por el cual se libera agua al río, y que es utilizado como agua de riego de sus cultivos y bebida para sus animales. Se tiene instalada una planta de neutralización de agua de la presa de relaves con inyección de CO<sub>2</sub> para regularizar su pH. Sin embargo, se tiene el inconveniente que estas aguas que de por sí no cumplían con los estándares anteriores de calidad ambiental, tampoco cumplen con el actualmente emitido, a pesar de que este último tiene incluso niveles menos exigentes de parámetros para el caso de los sulfatos.

Para este caso, debido al empleo que se le da al agua liberada (Categoría 3 – Riego de Vegetales y Bebida de Animales) requerimos hacer tratamientos adicionales al agua con la finalidad de estar dentro de los parámetros indicados en el ECA. Como parte de los planes de operación se requiere controlar la descarga de agua proveniente del depósito de relaves y evitar cualquier descarga en los ríos que pudiera exceder la normativa legal establecida por las autoridades competentes.

Se necesita la instalación de una planta de tratamiento de agua que pueda tratar directamente el agua de relaves o sus afluentes (los cuales presentan altas cargas de sulfatos) de tal manera que pueda cumplir con los parámetros establecidos en la categoría 3 de este último Estándar de Calidad Ambiental antes de ser enviado a las comunidades.

Para este tratamiento se realizó la investigación de reducción de sulfatos por precipitación química mediante el uso de lechada de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y para la separación de sólidos formados el uso de coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ) y floculante, todo esto como solución de tratamiento de agua para cumplir con los niveles exigidos en el ECA.

## **1.2 Formulación del problema**

### **a. Problema General**

- ¿Cuáles son las condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas acidas de relaves?

### **b. Problemas específicos**

- ¿Cuál es la dosificación de cal, coagulante y floculante para el tratamiento?
- ¿Cuál es el tiempo de reacción necesario para la reducción de sulfatos en las aguas de relaves?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **a. Objetivo General**

- Determinar las condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas ácidas de relaves.

#### **b. Objetivos Específicos**

- Determinar la dosificación de cal, coagulante y floculante para el tratamiento.
- Determinar el tiempo de reacción necesario para la reducción de sulfatos en las aguas de relaves.

### **1.4 Justificación**

Los resultados de la investigación tendrán importantes aportes en los siguientes contextos:

**Legal:** Permitirá cumplir con los estándares de calidad de ambiental aprobado recientemente para efluentes utilizados en riego de cultivos y bebida para animales.

**Teórica:** Se ampliará los conocimientos en tratamiento de drenajes ácidos de mina para la reducción de metales, sulfatos, etc.

**Tecnológica:** Permitirá desarrollar más las tecnologías de tratamientos de aguas en el sector minero.

Económica: Nos permitirá dar una alternativa de tratamiento de drenajes ácidos a más bajo costo comparado con las diferentes alternativas presentes en el mercado.

Social: De implementarse esta propuesta de tratamiento, permitirá que más comunidades sean beneficiadas con el uso de esta agua libre de contaminantes para sus cultivos y animales.

### **1.5 Importancia**

Esta investigación radica su importancia en su viabilidad, simpleza frente a los métodos convencionales y efectividad en sus resultados, sin mencionar que se ajusta adecuadamente a lo establecido al último Estándar de Calidad Ambiental condicionando las aguas de relaves para el libre riego de vegetales y bebida para los animales en las comunidades adyacentes al campamento minero.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio

Apoyado en las investigaciones de K. Banerjee, Joan Sanz, en su publicación ***“Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración”*** (2014) a fin de presentar el proceso patentado de reducción de sulfatos MULTIFLO en aguas de mina y generar un efluente para reutilización o vertido. El proceso consta de dos etapas, el uso de membranas de nanofiltración formando un permeado de calidad, seguido de la adición de iones de calcio hasta la sobresaturación, dando la precipitación del sulfato de calcio, logrando agua tratada de alta calidad con concentración de sulfatos inferior a 50 ppm.

Con el objetivo de demostrar el potencial uso del CKD (cement kiln dust) en el tratamiento de aguas ácidas residuales frente a otros productos comerciales, Mackie, A. (2010) en su publicación ***“Physicochemical characterization of cement kiln dust for potencial reuse in acidic wastement treatment”***, se enfoca en el uso del polvo de horno de cemento, considerado un residuo en la obtención del cemento que es de carácter alcalino precipitando los sulfatos en forma de sulfato de calcio. Tomando como parámetros de

comparación la superficie específica, tamaño de partícula, morfología, conductividad, pH, entre otros, como indicadores de la reactividad del CDK con respecto al producto comercial, Mackie obtiene 34-37% de contenido de cal libre comparado con los otros productos (87% de cal libre) se considera efectivo para la neutralización de aguas ácidas residuales.

Luciana Cadorín, (2004) en su publicación ***“Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas”*** tiene como objetivo el reducir la concentración de sulfatos mediante la precipitación con aluminato de sodio, de las aguas ácidas oriundas de una mina extinta de carbón al sur de Brasil. Basados en la metodología de A.M. Cody y H. Lee, trataron aguas ácidas con soda cáustica acuosa de 20-25% de concentración a una temperatura cercana a la ebullición, con lo cual se formó el aluminato de sodio, que posteriormente forma conjuntamente con los iones sulfato el complejo ettringita, obteniendo una remoción de iones sulfato de 77-87%.

Daniela Castrillón Bedoya y Maria de los Ángeles Giraldo (2012) en su trabajo ***“Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento***

**de villa santana”** realizaron ensayos de tratabilidad con el coagulante sulfato de aluminio granulado TIPO B en la planta de tratamiento de agua de Villa Santana en Colombia, con el fin de determinar las dosis óptimas requeridas para la remoción de turbiedad y color en diferentes muestras de agua recogidas durante un periodo de tiempo específico. El método por el cual determinaron dichas dosis óptimas fue mediante el test de jarras demostrando la efectividad del sulfato de aluminio como coagulante.

## **2.2. La industria minera y los procesos de producción**

Cuando se extraen los recursos minerales estos no se renuevan, por esta razón la minería es una actividad que se maneja con responsabilidad y tecnología para lograr el mayor aprovechamiento de estos recursos escasos. Para lograr este mayor aprovechamiento las empresas mineras tienen como objetivo conseguir la óptima extracción de las reservas minerales con el mayor beneficio económico y con la máxima seguridad de las operaciones.

El desarrollo de una actividad minera tiene dos etapas importantes previas a la explotación, la primera es la búsqueda del recurso mineral que depende de factores técnicos, económicos y de la naturaleza, por esa razón las evaluaciones preliminares muchas veces conducen a evaluar zonas no importantes como para desarrollar un proyecto minero.

Además, el negocio minero no solamente consiste en ubicar un depósito mineral sino llegar a determinar en una segunda etapa que éste sea económicamente explotable, esta evaluación es función de factores endógenos: calidad del mineral, cantidad del mineral, capital disponible, tecnología a emplear, etc., así como de factores exógenos: precios de los metales, política tributaria, marco legal, etc.

El proceso minero tiene diversas etapas de desarrollo que tendrán un periodo de maduración variable y que depende del capital con el que se cuenta, la magnitud del proyecto, el tipo de mineral, etc. Generalmente la actividad minera es de mediana a larga maduración.

Los yacimientos en general son un depósito mineral formado a lo largo del encuentro entre dos rocas de distinto origen, usualmente una de ellas es caliza.

En el caso del Perú, los principales tipos de yacimientos son, con referencia a sus características geológicas:

- Epitermales de oro
- Sulfuros masivos
- Pórfidos de cobre (molibdeno, oro, plata)
- Skarn o metasomático de contacto
- Cordilleranos (complejos)
- Placeres fluviales y glaciares

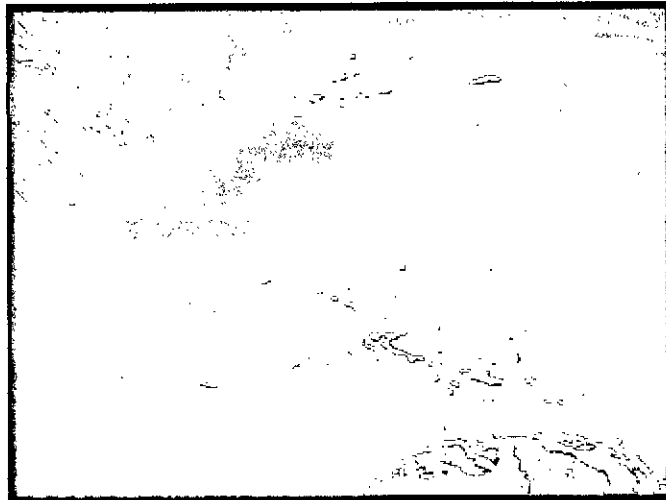


Los sulfuros masivos están presentes en estratos volcánicos y sedimentarios con áreas en las cuales están presentes sulfuros de cobre, zinc, plomo, hierro y barita. (*Estudios mineros del Perú S.A.C. 2015*)

### 2.3. Drenajes ácidos de mina (DAM)

Los drenajes ácidos de mina son aguas que se producen como resultado de la oxidación química y biológica de sulfuros metálicos, especialmente pirita o pirrotita, que se pueden encontrar presentes o formando parte de botaderos, relaves, basuras municipales, etc. (Figura 2.1).

FIGURA 2.1: Drenaje ácido de mina férrico



Fuente: Tratamiento de aguas ácidas de mina. O. Aduvire, 2006

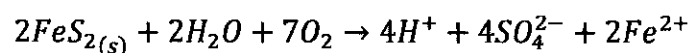
Dentro de los causales principales de contaminación de fuentes de agua a nivel mundial, los DAM son uno de los más representativos

por los bajos valores de pH que generan y por la movilización de metales, transportados en las escorrentías, asociadas a los ambientes ácidos generados, por esta razón los vertimientos pueden ser altamente tóxicos.

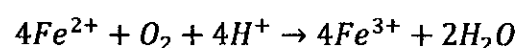
Este fenómeno puede permanecer por mucho tiempo si no se toman medidas adecuadas como el tratamiento pasivo y activo, cuyo fundamento son los procesos físico, químico y biológico que tiene lugar en los fangos naturales, en las que la reducción bacteriana de los sulfatos y la oxidación e hidrólisis catalizada por bacterias son las actividades más importantes.

Cuando se encuentran bajo condiciones reductoras, los sulfuros permanecen insolubles, sin embargo, cuando se exponen a la acción atmosférica, especialmente al agua y al oxígeno, se produce su oxidación, liberando iones metálicos (Fe, As, Cd, Co, Cu, Pb, Zn, etc.), sulfatos e hidrogeniones", los cuales generan problemas de contaminación en las fuentes de agua.

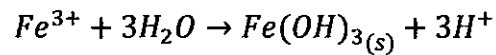
La reacción general que controla la oxidación de la pirita se describe a continuación:



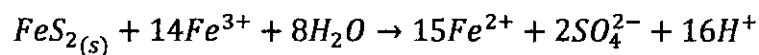
El siguiente paso es la oxidación del hierro (II) a hierro (III),



Es un proceso muy lento a valores bajos de pH, el ión de hierro férrico que se produce se hidroliza como hidróxido férrico y se precipita, en esta reacción se liberan tres moles de protones.



Hasta este punto, se ha producido una acidificación mediante la liberación de protones y el mecanismo principal es la hidrólisis del hierro férrico, esto ocurre especialmente en los medios donde no hay presencia de compuestos que puedan neutralizar esta reacción. Cuando el pH alcanza un valor inferior a cinco unidades, se presenta la oxidación del ión ferroso a férrico, una de las posibilidades es que esta reacción sea catalizada por bacterias quimiolitótrofas, como las *Acidithiobacillus ferrooxidans*, con una subsiguiente disminución del pH hasta valores cercanos a dos unidades, debido a que el hierro férrico se encarga de oxidar los sulfuros presentes, inclusive en condiciones anóxicas, liberando 16 protones, como se puede observar en la siguiente reacción:



Los lixiviados generados en este proceso pueden reaccionar con otros materiales presentes en el medio, produciendo la hidrólisis de otros minerales y haciendo que se disuelvan otros elementos como Al, Ca, Mg, Mn, Na, Si, etc. (*Ing. Pedro Camero Hermoza, 2010*)

## 2.4. Cinética Química

La cinética química, también llamada cinética de las reacciones, es un área de la fisicoquímica que se encarga del estudio de la rapidez de reacción, cómo cambia bajo condiciones variables y qué eventos moleculares se efectúan mediante la reacción general (Difusión, ciencia de superficies, catálisis), estudia las velocidades y mecanismos de las reacciones químicas y sus aplicaciones son numerosas. En la síntesis industrial de sustancias, las velocidades de reacción son tan importantes como las constantes de equilibrio.

“El objeto de la cinética química es medir la rapidez de las reacciones químicas y encontrar ecuaciones que relacionen la rapidez de una reacción con variables experimentales.” (Atkins, P. 1999)

Experimentalmente la velocidad de una reacción puede ser descrita a partir de la(s) concentración(es) de las especies involucradas en la reacción y una constante  $k$ , sin embargo, esta puede depender de numerosos factores (el solvente utilizado, el uso de catalizadores, fenómenos de transporte, material del reactor, etc.), haciendo muy complejo el proceso de determinación de velocidades de reacción.

Se puede clasificar a las reacciones en simples o complejas dependiendo del número de pasos o de estados de transición que deben producirse para describir la reacción química, si solo un paso es necesario (un estado de transición) se dice que la velocidad de

reacción es simple y el orden de la reacción corresponde a la suma de coeficientes estequiométricos de la ecuación, si no es así se debe proponer una serie de pasos (cada uno con un estado de transición) denominado mecanismo de la reacción que corresponda a la velocidad de reacción encontrada.

Las reacciones también se pueden clasificar cinéticamente en homogéneas y heterogéneas. La primera ocurre en una fase y la segunda en más de una fase. La reacción heterogénea depende del área de una superficie ya sea la de las paredes del vaso o de un catalizador sólido. En este capítulo se discuten reacciones homogéneas.

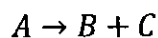
#### **2.4.1. Velocidad de reacción**

La rapidez de reacción está conformada por la rapidez de formación y la rapidez de descomposición. Esta rapidez no es constante y depende de varios factores, como la concentración de los reactivos, la presencia de un catalizador, la temperatura de reacción y el estado físico de los reactivos.

Uno de los factores más importantes es la concentración de los reactivos. Cuanto más partículas existan en un volumen, más colisiones hay entre las partículas por unidad de tiempo. Al principio, cuando la concentración de reactivos es mayor, también es mayor la probabilidad de que se den colisiones

entre las moléculas, y la rapidez es mayor. A medida que la reacción avanza, al ir disminuyendo la concentración de los reactivos, disminuye la probabilidad de colisión y con ella la rapidez de la reacción. La medida de la rapidez de reacción implica la medida de la concentración de uno de los reactivos o productos a lo largo del tiempo, esto es, para medir la rapidez de una reacción necesitamos medir, bien la cantidad de reactivo que desaparece por unidad de tiempo, o bien la cantidad de producto que aparece por unidad de tiempo. La rapidez de reacción se mide en unidades de concentración/tiempo, esto es, en (mol/l)/s, es decir, moles/(l·s).

Para una reacción de la siguiente forma:



La velocidad de reacción para el reactante A se expresa de la siguiente forma:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt}$$

Siendo  $C_A$  la concentración del reactante A una variable que depende del tiempo t.

### 2.4.2. Orden de reacción y constante cinética

El orden de reacción está definido como la suma de los exponentes de las concentraciones en la ley de la rapidez de la reacción. Este es también llamado orden total de reacción, pues el orden depende del reactivo que se analice. El orden de las reacciones se determina experimentalmente.

Para muchas reacciones se han encontrado experimentalmente que la forma de  $r$  a un tiempo  $t$  mediante una expresión del tipo:

$$r = k[A]^\alpha[B]^\beta \dots$$

Donde los exponentes  $\alpha$ ,  $\beta$ , etc son en general enteros o fracciones.

La constante de proporcionalidad  $k$ , llamada también constante cinética o coeficiente de velocidad la cual depende de la temperatura y de la presión de trabajo aunque con esta última la dependencia es pequeña y generalmente no se toma en cuenta

La ecuación cinética para el modelo de estudio dependerá finalmente una vez determinado el orden de la reacción que puede ser de orden 0, orden 1, orden 2 o de orden 3. (*Peter W. Atkins, 1999*)

## **2.5. Coagulación**

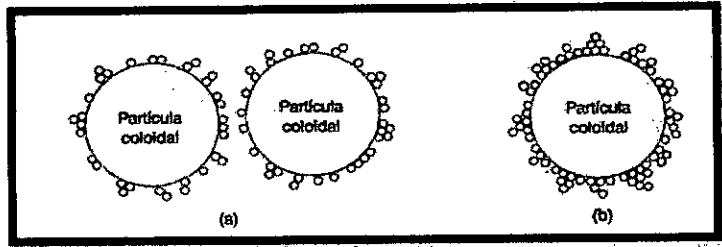
Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan [15].

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua.

La coagulación y la floculación tienen lugar en sucesivas etapas, de forma que una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los microflóculos, apenas visibles a simple vista, hasta formar mayores flóculos. Al observar el agua que rodea a los microflóculos, ésta debería estar clara; si esto no ocurre, lo más probable es que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, en este caso será necesario añadir más coagulante. (Figura 2.2).



FIGURA 2.2: Representación esquemática del fenómeno de neutralización (a) y reestabilización e inversión de carga (b)



Fuente: Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales: coagulación-floculación. Aguilar, Saez. 2002

## 2.6. Floculación

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica.

La floculación puede ser ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido, o pericinética que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas en él, debido a la agitación y por la gravedad y el peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento Browniano.

El coagulante aplicado da lugar a la formación del floculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Para favorecer el engrosamiento del floculo será necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula floculo [16].

## 2.7. Tipos de cal

Se distinguen varios tipos de cal, entre las cuales tenemos:

### a. Cal viva

La cal (del latín calx), también llamada cal viva, es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio. Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomitas (Figura 2.3).

FIGURA 2.3: Cal viva



Fuente: <http://www.capacero.cl/calviva.htm>

La cal es una sustancia alcalina constituida por óxido de calcio (CaO), de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del

agua se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma la argamasa o mortero. También los alquimistas llamaban cal a cualquier óxido metálico o escoria. Otro compuesto llamado cal, es el óxido de calcio y magnesio o dolomita calcinada ( $\text{CaMgO}_2$ ).

b. Cal aérea

La cal aérea es el principal material conglomerante de los morteros tradicionales, tanto de unión como de revestimiento. Bajo el término de cal aérea denominamos a un conglomerante de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), también denominada cal apagada o hidratada, que con el tiempo acaba por transformarse en calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) por carbonatación. La carbonatación de los hidratos en contacto con el dióxido de carbono del aire, de allí su nombre, forma carbonato de calcio que desarrolla cierta resistencia y contribuye a la durabilidad de los morteros que contienen la cal de construcción. La cal se ha obtenido históricamente a partir de las rocas calizas naturales, que son muy abundantes en la superficie de la corteza continental terrestre.

La cal aérea es aquella que necesita la presencia de aire para carbonatar y endurecerse. Es una cal que se combina y endurece con el dióxido de carbono presente en el aire. Las cales cálcicas son una subfamilia de las cales aéreas

constituidas principalmente por óxido de calcio y/o hidróxido de calcio sin ninguna adición hidráulica. Mientras que las cales dolomíticas son una subfamilia de las cales aéreas constituidas principalmente por óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio sin ninguna adición hidráulica.

c. Cal hidráulica

La cal hidráulica es aquella que puede fraguar y endurecer con o sin presencia de aire, incluso bajo el agua. Se produce por calcinación de piedras calizas en cuya composición entra alrededor del 20 % de arcilla, y que, pulverizada y mezclada con agua, fragua como el cemento. La cal hidráulica es un cemento natural y contiene, además del carbonato cálcico, alrededor de un 20-25 % de aluminatos, arcillas, silicatos, etc. Debido a estas "impurezas", sólo una temperatura mayor que la de la calcinación podría convertir en cal esa piedra.

La cal con propiedades hidráulicas, cuando se amasa y se mezcla adecuadamente con áridos y agua, forma un hormigón que conserva su trabajabilidad durante un tiempo suficiente y, después de períodos determinados, alcanza una resistencia específica y una estabilidad de volumen a largo plazo. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer cuando se mezcla con agua y por reacción con el dióxido carbono del aire (carbonatación). Las cales hidráulicas naturales son una cal con propiedades

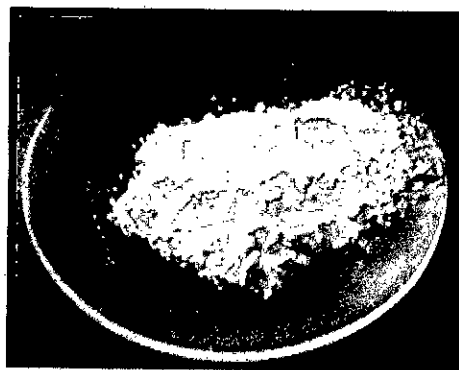
hidráulicas producidas por la calcinación de calizas más o menos arcillosos o silíceas (incluyendo la creta) con reducción a polvo con apagado con o sin molienda y sus propiedades hidráulicas son el resultado exclusivo de la composición química especial de la materia prima natural.

La cal formulada es una cal con propiedades hidráulicas constituida principalmente por cal aérea y/o cal hidráulica natural con material hidráulico. La cal hidráulica es un conglomerante constituido por cal y otros materiales tales como el cemento, escorias de alto horno, cenizas volantes, filler calizo y otros materiales adecuados. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer con el agua. El aire contribuye al endurecimiento.

d. Cal apagada

La cal apagada es un polvo blanco o una pasta, compuesto principalmente por hidróxido de calcio, que se obtiene añadiéndoles agua a la cal viva. (Figura 2.4).

FIGURA 2.4: Cal apagada



Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido\\_de\\_calcio](https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_calcio)

Al añadir agua a la cal viva y a la dolomita calcinada se obtienen productos hidratados denominados comúnmente cal apagada ó hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y dolomita hidratada ( $\text{CaMg}(\text{OH})_4$ ) (Ing. Yrma Capuñay, 2010).

## **2.8. Tratamientos de aguas ácidas**

Existen dos tipos de tratamientos de aguas ácidas, estos son:

### **2.8.1. Tratamiento activo**

Actualmente la gran mayoría de sistemas de tratamiento activo para drenajes ácidos de mina (DAM) están basados en la precipitación de hidróxidos. Esta precipitación se realiza en un proceso de tres pasos:

- Oxidación (para convertir  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$ )

La oxidación se realiza tradicionalmente por una cascada de aireación, aireación con difusores, etc. Sin embargo en circunstancias apropiadas, el proceso de oxidación puede mejorarse por la aplicación de enfoques mecánicos o por el uso de reactivos químicos como lo podría ser el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

- Dosis con álcalis (especialmente  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pero también puede ser con  $\text{Na}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y otras sustancias)

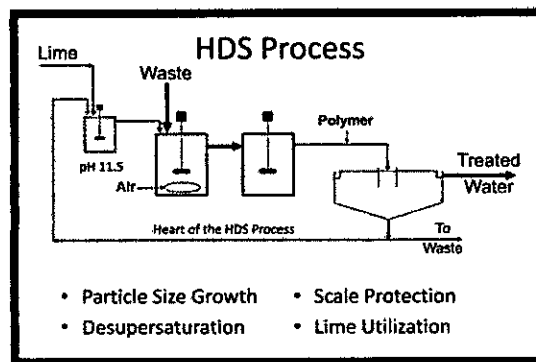
En cuanto al proceso de dosis con álcalis, cada reactivo tiene sus propias ventajas e inconvenientes. Generalmente el reactivo más económico es la cal viva ( $\text{CaO}$ ) que en reacción con el agua se forma la cal apagada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Sin embargo, donde se necesita precipitar altas concentraciones de Mn, Zn y/o Cd, la soda cáustica suele resultar más barata aún.

- Sedimentación.

El paso de la sedimentación frecuentemente ofrece las oportunidades más importantes para la mejora del proceso de tratamiento en su totalidad. Eso es porque el proceso de sedimentación gobierna la densidad del lodo de hidróxidos producido, que a su vez controla el volumen de residuos que se precisa recoger. La sedimentación en un estanque sencillo suele dar lodos con un contenido en sólidos de 5% en peso o menos. Con otros enfoques, se puede aumentar este contenido en sólidos hasta un 40%. Un enfoque sencillo pero muy exitoso es el proceso High Density Sludge (HDS). En este proceso se bombea un porcentaje (~ 80%) del lodo final del estanque de sedimentación hasta el punto de arranque de la planta. Las partículas de lodo presentan núcleos de reactivos sin

reaccionar aun para la precipitación de nuevos hidróxidos, y obtenemos una precipitación final de lodo con un 20% de sólidos en peso (Figura 2.5). La densidad puede aumentarse más por aplicación de filtros, prensas etc. (E. López Pamo, 2002).

FIGURA 2.5: Proceso HDS



Fuente: <https://www.gardguide.com>

### 2.8.2. Tratamiento pasivo

Este tipo de tratamiento implica tratamiento en sistemas estáticos (sin bombeo etc.) que contienen materias naturales (abono, piedra caliza etc.). Los sistemas pasivos provocan la mejora de la calidad del agua por reacciones biogeoquímicas, sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa. El tratamiento pasivo fue desarrollado en los EE-UU con motivo de tener estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas de mina a largo plazo, reconociendo



que el drenaje contaminado de minas es un fenómeno que suele durar siglos y hasta milenios. Aparte de realizar un tratamiento de aguas contaminadas, un sistema pasivo generalmente tiene valores añadidos en términos de ecología, etc.

El tratamiento pasivo para aguas de mina ha evolucionado desde hace 15 años, inicialmente en los Estados Unidos. Los métodos aplicables para aguas alcalinas de mina (es decir aguas contaminadas solamente por Fe y Mn) son ya bien desarrollados, y consisten en el uso de humedales aeróbicos. Existen muchos ejemplos de la mala aplicación de humedales aeróbicos para aguas ácidas de minas. Humedales aeróbicos son inapropiados para el tratamiento de aguas aún ácidas, porque los procesos estimulados en humedales aeróbicos resultan en la hidrólisis del hierro, un proceso que libera ácido protónico. Sin embargo, una vez que se ha corregido la acidez de un agua de mina por otro tipo de sistema pasivo, se puede usar un humedal aeróbico como paso final, para remover los últimos mg/l de hierro.

También, tecnologías pasivas para otras variedades de aguas de mina están ya experimentando avances rápidos

## 2.11. Definición de términos

- **Cinética química:** área de la fisicoquímica, que se encarga de la rapidez de reacción y como cambia la rapidez de reacción.
- **Velocidad de reacción:** cantidad de sustancia que se transforma en una determinada reacción por unidad de volumen y tiempo.
- **Orden de reacción:** suma de los exponentes de las concentraciones en la ley de la rapidez de reacción.
- **Constante de velocidad:** representa la proporcionalidad entre la velocidad de reacción y las variables que la afectan, fundamentalmente la concentración.
- **Cal viva:** sustancia alcalina blanca, ligera y cáustica, que en contacto con el agua se hidrata y desprende calor.
- **Cal hidráulica:** cal que endurece en contacto con el agua.
- **Cal apagada:** polvo blanco cristalino que se obtiene añadiendo agua a cal viva.
- **Floculante:** sustancia química comúnmente orgánica que aglutina sólidos en suspensión una vez efectuada su coagulación.
- **Relave:** conjunto de desechos tóxicos de procesos mineros de la concentración de mineros.

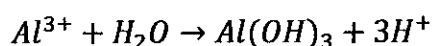
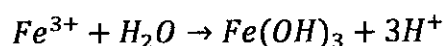
en el contexto del proyecto de investigación "PIRAMID", que comprende avances en las tecnologías que se discuten en los párrafos siguientes, pero también para el tratamiento pasivo de aguas contaminadas por arsénico, cianuros y radionucleidos. (Ing. Pedro Camero Hermoza, 2010)

## 2.9. Principios de tratamiento

Aunque los reactivos utilizados en sistemas pasivos son distintos de los que se usan en sistemas activos, los principios de tratamiento en ambos son bastante parecidos. Se conocen varios enfoques distintos para la precipitación de metales en hidróxidos y sulfatos:

### 2.9.1. Precipitación de Hidróxidos

Casi todos los metales eco tóxicos son susceptibles de formar hidróxidos sólidos [ $Fe(OH)_3$ ,  $Al(OH)_3$ ,  $Zn(OH)_2$ , etc.]. Las reacciones típicas de precipitación de hidróxidos son las siguientes:



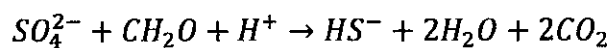
Se nota que en ambas reacciones se produce acidez, debido a la liberación de tres protones ( $H^+$ ) por cada mol de metal hidrolizado. Esta acidez precisa neutralización en el proceso

de tratamiento completo, y generalmente la demanda de agentes neutralizantes es mucho más grande que la demanda ejercida por el pH ambiente del agua subterránea.

Aunque la precipitación de hidróxidos se practica para remover los metales en solución, los hidróxidos mismos tienen propiedades muy favorables debido a que van regulando el pH por encima de 10 permitiendo su precipitación.

#### 2.9.2. Precipitación de Sulfatos

Las aguas ácidas de mina contienen concentraciones muy altas de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ). Existen varios géneros de bacterias que catalizan la reducción de sulfatos a sulfuros. Se puede escribir la reacción así:



donde  $CH_2O$  representa una fuente de carbono.

Una vez que existen iones de  $HS^-$  en solución, los metales divalentes podrían reaccionar y precipitarse como minerales sulfurosos, según:  $HS^- + M^{2+} \rightarrow MS + H^+$

donde " $M^{2+}$ " representa  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , etc. Por el consumo de un protón en la reacción y su liberación en la siguiente reacción se puede inferir que el proceso de reducción bacteriana de sulfatos no alterará el pH del agua. Sin

embargo, siempre se ve un aumento considerable de pH por medio de estas reacciones, dado que la cantidad de  $\text{SO}_4^{2-}$  que se reduce es siempre mayor que la cantidad de MS que precipita. Además, el  $\text{CO}_2$  liberado en la primera reacción se convierte en  $\text{HCO}_3^-$  (fuente importante de alcalinidad) una vez que el pH sobrepasa 4.5. Es importante tener en cuenta que los minerales sulfurosos formados por estas reacciones son estables solamente en condiciones reducidas, y por eso es más aconsejable usar reducción bacteriana cuando se sabe que se mantendrán estas condiciones indefinidamente. Actualmente se estudia el proceso de reducción de sulfatos con lechada de cal debido a que las condiciones en mina son muy cambiantes y se busca condiciones de alcalinidad para su precipitación.

## **2.10. Normatividad ambiental**

Para que la minera pueda eliminar agua al medio ambiente, esta agua necesita cumplir parámetros bajo una normativa ambiental dispuesto por el Ministerio del Ambiente. Debido al uso que le darán las comunidades cercanas a los efluentes tratados por la mina, la cual será uso para regar vegetal y bebidas para animales, los parámetros a comparar serían de la categoría 3 dentro del estándar

de calidad ambiental para aguas aprobado en diciembre del 2015 mediante D.S. N°015-2015 MINAM.

Para la implementación del Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y de la presente norma (Tabla 2.1), se tiene en consideración las siguientes precisiones de la categoría 3 del ECA para aguas:

**Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales**

**Subcategoría D1:** Riego de vegetales de tallo bajo y alto.

**Sub Categoría D2:** Bebida para animales.

TABLA 2.1: Límite de sulfatos para vertimiento según ECA 2015

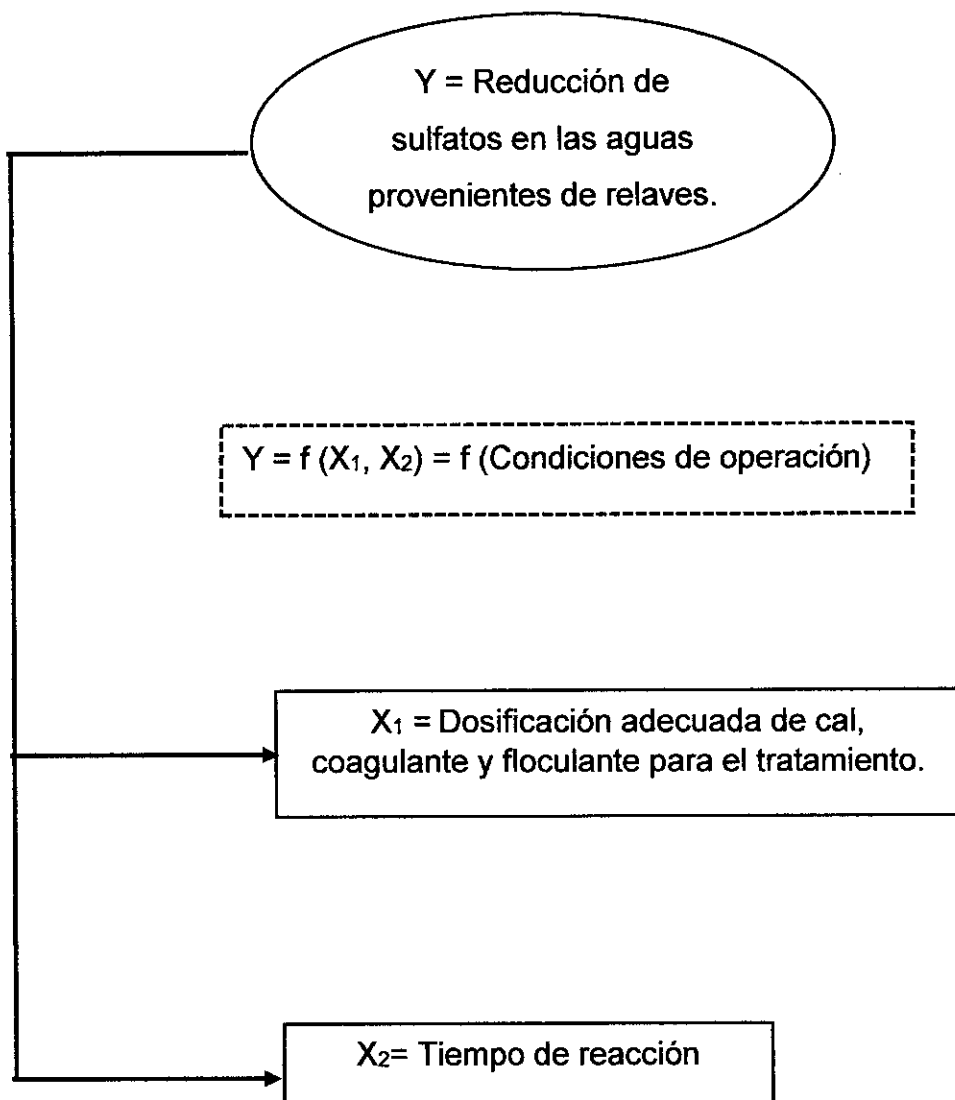
CATEGORÍA 3		ECA AGUA: CATEGORÍA 3	
Parámetro	Unidad	Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebidas de animales
		D1: riego de cultivos de tallo alto y bajo	D2: bebida de animales
<b>FÍSICOS-QUÍMICOS</b>			
Sulfatos	mg/L	1000	1000

Fuente: D.S. N°015-2015 MINAM.

### III. VARIABLES E HIPOTESIS

#### 3.1. Variables de la investigación

Las variables dependientes  $X_1$  y  $X_2$ , se midieron de forma cuantitativa obteniendo resultados que nos ayudaron con la variable independiente Y.



### 3.2. Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y= Condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas provenientes de relaves.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros fisicoquímicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de cal (mg/L)</li> <li>• Concentración de coagulante y floculante(mg/L)</li> </ul>	Realizar ensayos teniendo identificado X <sub>1</sub> y X <sub>2</sub> .
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X <sub>1</sub> = Dosificación de cal y coagulante para el tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Químicas</li> <li>• Fisicoquímicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de cal (mg/L)</li> <li>• Concentración de coagulante y floculante(mg/L)</li> </ul>	Realizar experimentos a diferentes concentraciones de lechada de cal y coagulante.
X <sub>2</sub> = Tiempo de reacción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Física</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo (s ó min)</li> </ul>	Realizar cálculo mediante datos de experimentos.



### **3.3. Hipótesis General**

- Mediante el uso de lechada de cal para el tratamiento de las aguas ácidas de mina se consigue la reducción de sulfatos por debajo de 1000 ppm establecidos por la normativa ambiental.

### **3.4. Hipótesis Específicas**

- a) Las dosis de cal, coagulante y floculante son las adecuadas para el tratamiento de las aguas de relaves.
- b) El tiempo de reacción para el tratamiento es el adecuado para alcanzar una reducción de sulfatos menor a los límites del estándar de calidad ambiental para aguas.

## **IV. METODOLOGIA**

### **4.1. Tipo de investigación**

Este trabajo de tesis, es una investigación de tipo experimental y cuantitativo ya que utilizó técnicas de ciencias aplicadas, tecnológicas y de importante aporte para su elaboración.

Es de tipo experimental, ya que la finalidad fue determinar los parámetros adecuados para un tratamiento en la reducción de sulfatos con lechada de cal, el cual presenta un problema actualmente a las empresas mineras dado que el estándar de calidad del agua .

Se ha podido determinar la dosis adecuada de cal, coagulante y floculante así como el volumen necesario del tanque de tratamiento (reactor) para la reducción de sulfatos.

### **4.2. Diseño de la investigación**

Para la el diseño de nuestra investigación se tomaron las siguientes consideraciones:

#### **a. Definición del escenario de la investigación**

El trabajo de investigación tiene como área de desarrollo el laboratorio de investigación, desarrollo e innovación ubicado en la

facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

**b. Elección del método o modelo de diseño**

Dado que los fundamentos de diseño de reactores nos proporciona el modelo de diseño del reactor batch tanque agitado de mezcla perfecta nos enfocaremos en la determinación del volumen del reactor mediante la reacción entre la lechada de cal y el agua de relaves.

**c. Determinación de las variables de diseño**

Se ha utilizado información científica importante y específica para cuantificar los indicadores de las principales variables anteriormente señaladas, con el propósito de determinar el tiempo de residencia o de equilibrio, la concentración adecuada de lechada de cal, coagulante, floculante y el volumen del reactor para el tratamiento en la reducción de sulfatos presentes en el agua de relaves.

**d. Recolección de información necesaria para el objeto de estudio**

Debido a la dificultad de obtener información para todos los indicadores de las variables contempladas, lo cual es necesario

para alcanzar todos los propósitos de estudio, se ha recolectado información de fuentes secundarias que fueron productos de investigaciones previas, ejecutadas por instituciones académicas y otras entidades dedicadas a la investigación.

Se han ensayado diferentes valores para determinar los valores adecuados para cada indicador.

Para determinar la dosis adecuada de lechada de cal se trabajó a diferentes concentraciones de cal, en la cual se hizo reaccionar un volumen determinado de muestra de agua de relaves con otro volumen de lechada de cal durante un tiempo en minutos como se indica en la tabla 4.1.

TABLA 4.1: Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de cal.

Volumen de muestra	Lechada de cal (V <sub>2</sub> )			
	5 g/l	10 g/L	15 g/L	20 g/L
V <sub>1</sub>	Medición de sulfato residual luego de reaccionar la muestra de agua con lechada de cal por un tiempo en minutos con diferentes concentraciones de cal.			

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de dosis de coagulante se agregó un mismo volumen cada cierto tiempo de coagulante al 0.5% de concentración y se midió el volumen de sólidos formados para

luego calcular el porcentaje de sólidos. Alcanzado un valor constante se identificará la dosis adecuada de coagulante, tal como se indica en la tabla 4.2.

TABLA 4.2: Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de coagulante.

Adición de coagulante al 0.5%	% Sólidos
$V_1$	$\%S_1$
$V_2$	$\%S_2$
$V_3$	$\%S_3$
$V_4$	$\%S_4$
$V_{n-1}$	$\%S_{n-1}$
$V_n$	$\%S_n$
Si en el experimento $\%S_n = \%S_{n-1}$ entonces $V_n$ será la dosis adecuada de coagulante.	

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la dosis adecuada de floculante se buscó identificar el tiempo requerido para la precipitación, de manera tal que se logre alcanzar el porcentaje de sólidos especificado en la tabla 4.2 para cada adición de volumen de floculante.

La dosis de floculante adecuada será quien presente menor tiempo de sedimentación.

El diseño experimental de esta etapa se presenta en la tabla 4.3.

**TABLA 4.3: Diseño experimental para la determinación de dosis adecuada de floculante.**

Adición de floculante al 0.5%	Tiempo (min)
V <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>
V <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>
V <sub>3</sub>	t <sub>3</sub>
V <sub>4</sub>	t <sub>4</sub>
V <sub>5</sub>	t <sub>5</sub>
Si en el experimento t <sub>5</sub> es menor y constante entonces V <sub>5</sub> será la dosis adecuada de floculante.	

Fuente: Elaboración propia

En la determinación del tiempo necesario para la reacción, se hizo el análisis de sulfatos cada dos minutos en un período de tiempo de 20 minutos para cada concentración diferente de lechada de cal, tal como se presenta en la tabla 4.4.

**TABLA 4.4: Diseño experimental para la determinación del tiempo de reacción necesario para la remoción de sulfatos.**

Tiempo (min)	Concentración de cal			
	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l
Concentración de sulfatos (ppm)				
t <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>
t <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>
t <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>
t <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>
t <sub>5</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>5</sub>
t <sub>6</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>6</sub>

Fuente: Elaboración propia

Para ello, también fue necesario recolectar información acerca de análisis para la determinación de sulfatos, data histórica de muestreos del agua de relaves para saber la calidad del agua a tratar.

**e. Diseño del tanque reactor para la reducción de sulfatos del agua de relaves.**

Para determinar el volumen del reactor para el tratamiento en la reducción de sulfatos del agua de relaves se aplicará los fundamentos y procedimientos de diseño de reactores para procesos batch.

**4.3. Población y muestra**

**4.3.1. Población**

La población está representada por las aguas de la presa de relaves de una minera ubicada en Hualgayoc – Cajamarca

**4.3.2. Muestra**

Se utilizó un total 20 litros de muestra de agua de relaves y 50 gramos de cal para obtener 40 muestras en total. La muestra es de la misma dimensión que la población y es representativa considerando que la muestra de agua se encuentran

preservada en un frasco hermético y sellado evitando que sus propiedades físicas y químicas cambien.

#### **4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas del procedimiento de recolección de datos que se utilizaron en el diseño de la investigación fueron:

- Método de cuantificación de sulfatos en el agua tratada y filtrada tomada a distintos tiempos reacción y con distintas concentraciones de lechada de cal por espectrofotometría.
- Método y procedimiento para la determinación de volumen de reactor batch.

##### **4.4.1. Materiales y equipos**

- Papel de filtro whatman N° 42.
- Probetas de 100 y 500 ml.
- Fiolas de 50 y 1000 ml.
- Pipetas de 5 y 10 ml.
- Vasos de precipitado de 1 litro.
- Balanza analítica Mettler con precisión de 0.1 mg.
- Medidor de pH marca HANNA.
- Agitador magnético marca AREC VELD SCIENTIFICA



- Espectrofotómetro VARIAN CARRY

#### **4.4.2. Reactivos**

- Cal al 80% de pureza (Bambamarca, Cajamarca)
- Superfloc N300 (floculante, poliacrilamida) – H&F Laboratorios SAC
- Cloruro férrico (coagulante) – H&F Laboratorios SAC
- Solución de cloruro de Bario al 5% - H&F Laboratorios SAC
- Ácido Clorhídrico concentrado – H&F Laboratorios SAC
- Glicerina al 99% de pureza – H&F Laboratorios SAC
- Cloruro de Sodio QP – H&F Laboratorios SAC
- Etanol industrial – H&F Laboratorios SAC
- Agua destilada – H&F Laboratorios SAC

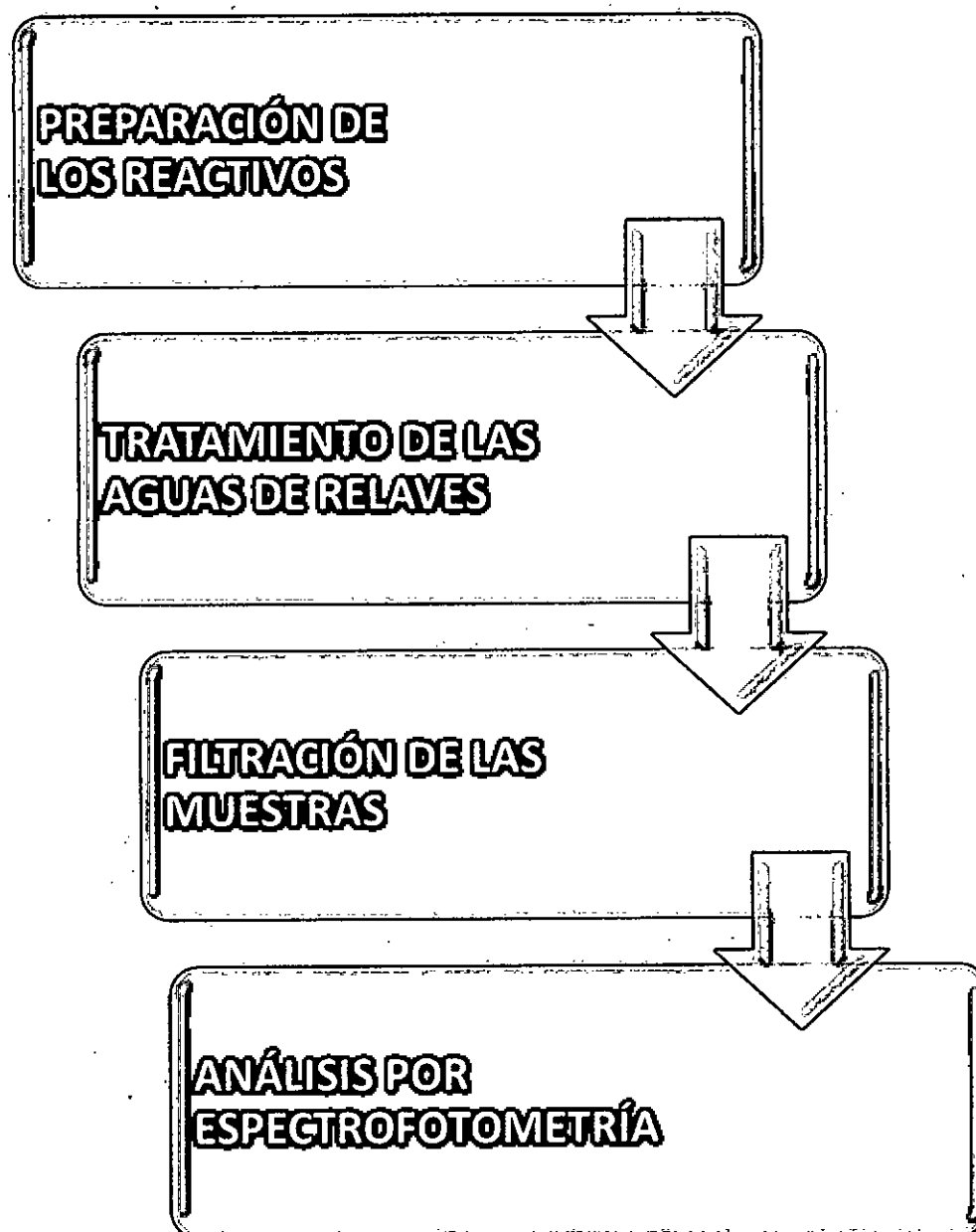
#### **4.5. Procedimiento de recolección de datos**

El procedimiento utilizado para la recolección de datos ha constado de cuatro fases, tal como se muestra en la figura 4.1.

La primera fase consistió en la preparación de los reactivos requeridos para las pruebas experimentales. La segunda fase consistió en los tratamientos aplicados a las aguas de relaves, variando las cantidades de lechada de cal, coagulante y floculante. La tercera fase fue la filtración de las aguas tratadas, y finalmente en la cuarta fase

se aplicaron los análisis espectrofotométricos para poder determinar el contenido de sulfatos en las aguas tratadas.

FIGURA 4.1: Proceso para la determinación del tiempo de reacción y dosis adecuada de cal.



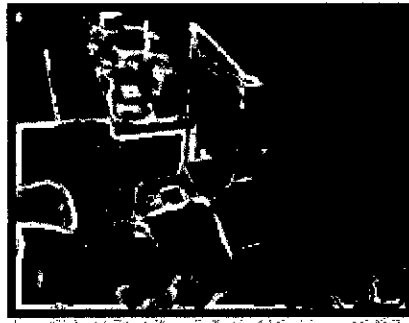
Fuente: Elaboración propia

## a. Preparación de los reactivos

### a.1 Preparación de lechada de cal

- Se trabajó con cal al 80% de pureza de la zona calera de Bambamarca provincia de Cajamarca, previa homogenización del sólido en agua durante 10 minutos.
- Se procedió al pesado de 5, 10, 15 y 20 g de cal para la preparación de las soluciones.

FIGURA 4.2: Pesado de la cal



Fuente: Elaboración propia

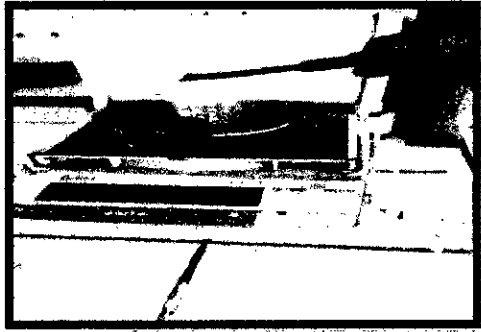
- Posteriormente se preparó 1 litro de lechada de cal de concentraciones de 5, 10, 15 y 20 g/L, de acuerdo a la siguiente reacción:  $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$

### a2 Preparación de cloruro férrico

- Se trabajó con cloruro férrico ( $FeCl_3$ ) como coagulante al 98% de pureza lo cual solo necesito previa homogenización del sólido en agua.

- Se pesó 0.51 g de cloruro férrico y se disolvió con agua destilada en una fiola de 100 ml, obteniendo coagulante con una concentración de 0.5% p/v.

FIGURA 4.3: Pesado de  $\text{FeCl}_3$  (coagulante)

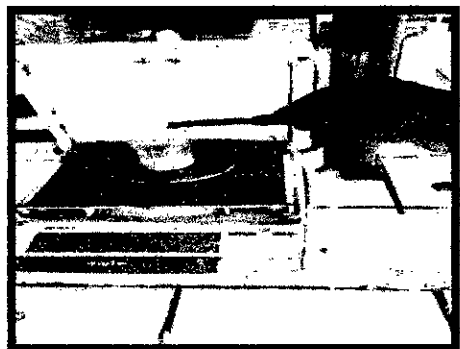


Fuente: Elaboración propia.

### a.3 Preparación de floculante Superfloc N300

- Se usó superfloc N300 como floculante lo cual necesito luego de la homogenización reposo de una hora para que pueda disolverse totalmente.
- Se pesó 0.5 g de superfloc y se disolvió con agua destilada en una fiola de 100 ml, obteniendo floculante con una concentración de 0.5% p/v.

FIGURA 4.4: Pesado de superfloc (floculante)



Fuente: Elaboración propia

**b. Tratamiento de las aguas residuales**

El tratamiento de las aguas residuales consistió en realizar pruebas adicionando la lechada de cal y pruebas de coagulación y floculación (Figura 4.5).

FIGURA 4.5: Tratamiento de aguas residuales

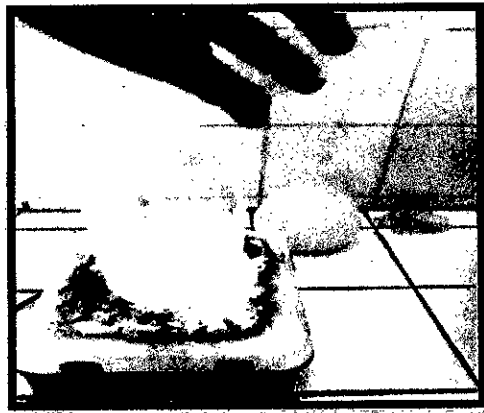


Fuente: Elaboración propia

### b.1 Tratamiento con lechada de cal

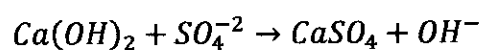
- Se tomó un volumen determinado de muestra (agua de relaves) y se agregó otro volumen de lechada de cal a una concentración de 5 g/l agitándose a revolución constante por un tiempo de 2 minutos. Se trabajó a temperatura y presión ambiente.

FIGURA 4.6: Adición de lechada de cal al agua de relaves



Fuente: Elaboración propia

- Se repite esta operación para períodos de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 minutos.
- Repetimos las operaciones anteriores para soluciones de cal de 10, 15 y 20 g/l.
- Al hacer reaccionar la muestra de agua de relaves con un contenido aproximado de 1600 ppm de sulfatos, ocurre la siguiente reacción:

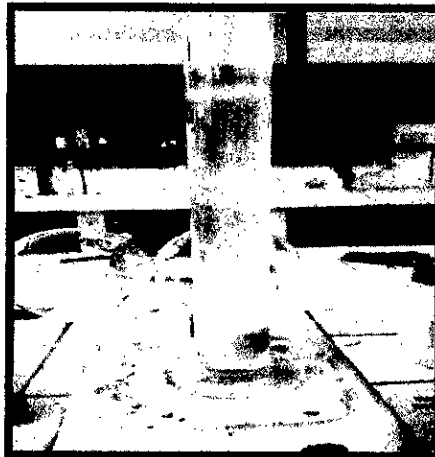


Precipitando el sulfato en forma de sulfato de calcio.

## **b.2 Pruebas de coagulación**

- Para las pruebas de coagulación, la adición fue de 10 ml progresivamente en las cuales se midió el volumen de sólidos formados en la probeta de 500 ml para luego determinar el porcentaje de sólidos (%Sólidos) en cada adición de coagulante.

FIGURA 4.7: Prueba de coagulación



Fuente: Elaboración propia

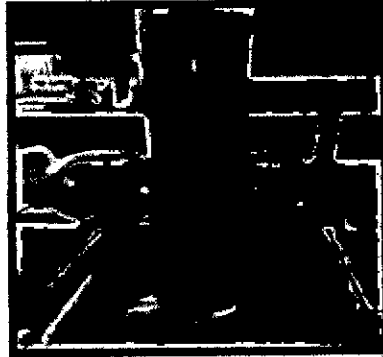
Para la determinación de la dosis adecuada de coagulante se finalizó la prueba cuando el porcentaje de sólidos se mantuvo constante hasta una cierta adición de volumen de coagulante.

## **b.3 Pruebas de floculación**

- Para las pruebas de floculación, la adición fue de 1 ml progresivamente en las cuales se midió el tiempo que tomaba

en formarse el volumen de sólidos para alcanzar el porcentaje de sólidos obtenido en las pruebas de coagulación.

FIGURA 4.8: Prueba de floculación



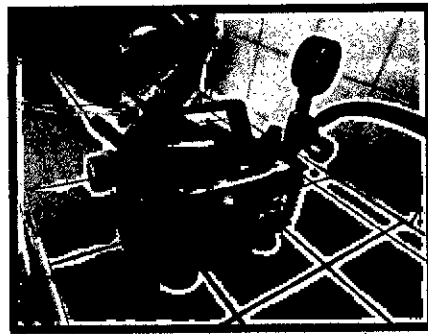
Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la dosis adecuada de floculante, la prueba finalizó cuando el tiempo de sedimentación para alcanzar el %Sólidos deseado se mantuvo constante hasta una cierta adición de volumen de floculante.

**c. Filtración de las muestras**

- La muestra obtenida por la reacción, se filtró mediante equipo de filtración al vacío.

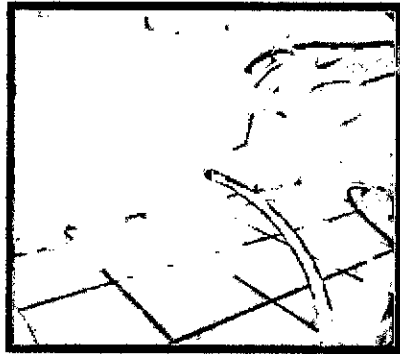
FIGURA 4.9: Equipo de filtración al vacío



Fuente: Elaboración propia.



FIGURA 4.10: Filtración de la muestra obtenida

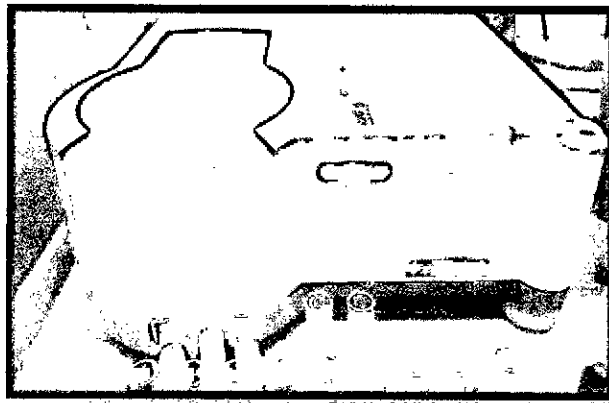


Fuente: Elaboración propia

**d. Análisis por espectrofotometría**

Una vez obtenida las 40 muestras se almacenó en frasco de plástico de 500 ml y se procedió con el análisis en el espectrofotómetro, relacionando su absorbancia con una curva de calibración.

FIGURA 4.11: Espectrofotómetro VARIAN



Fuente: Elaboración propia

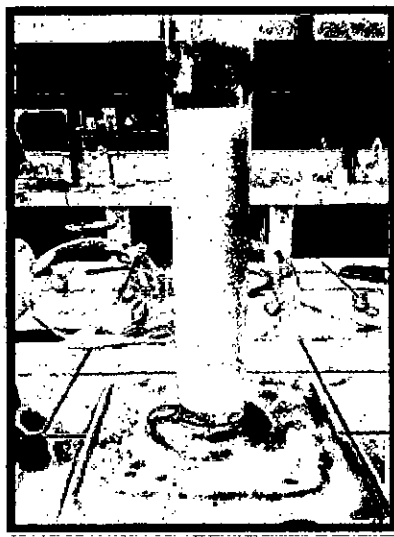
El análisis de laboratorio se hizo de acuerdo a las normas "ASTM. Standard test methods for sulfate ion in water, 1995" y "APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012".

## V: RESULTADOS

### 5.1. Determinación de dosis adecuada de cal

Los resultados obtenidos del análisis de sulfatos luego de reaccionar durante 20 minutos, 300 ml de agua de relaves con 150 ml de lechada de cal a concentraciones de 5, 10, 15, 20 g/l se presentan en la tabla 5.1.

FIGURA 5.1: Muestra de agua de relaves con lechada de cal



Fuente: Elaboración propia

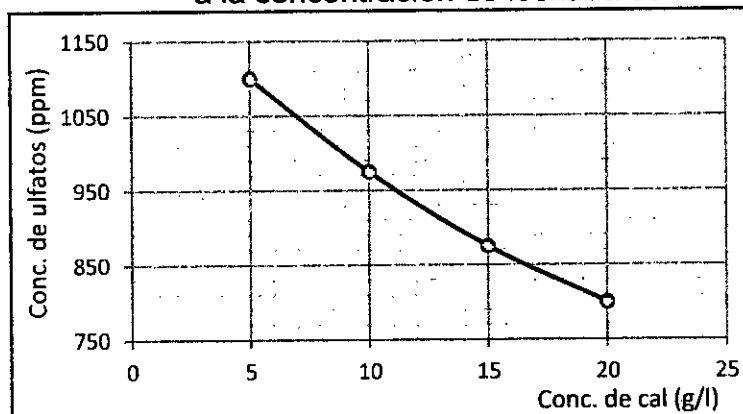
TABLA 5.1: Concentración de sulfatos para diferentes concentraciones de lechada de cal

Tiempo (minutos)	Lechada de cal (150 ml)			
	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l
	Concentración de sulfatos (ppm)			
20	1100	975	875	800

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 5.1, elaboramos el gráfico 5.1.

**GRÁFICO 5.1: Concentración de sulfatos residual con respecto a la concentración de lechada de cal**



Fuente: Elaboración propia

En este gráfico observamos la relación que hay entre la remoción de sulfatos con respecto a la concentración de cal reaccionante.

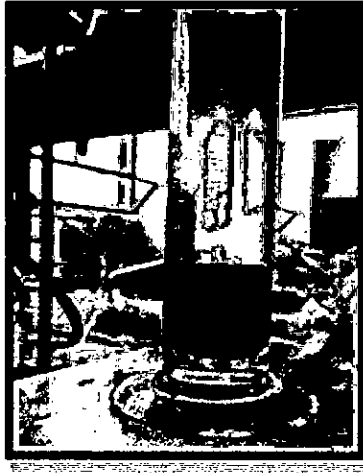
## 5.2. Determinación de dosis adecuada de coagulante

Se preparó 100 ml de coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ) a una concentración de 0.5% p/v.

Una vez que se obtuvo que la concentración de lechada de cal adecuada para el tratamiento de agua de relaves fuera de 20 g/l, haciendo reaccionar 300 ml de muestra con 150 ml de lechada de cal.

Se agregó esta cantidad de 450 ml de volumen total a una probeta de 500 ml para simular la precipitación de sólidos con la ayuda del coagulante. Se realizó mediciones de porcentaje de sólidos formados en la probeta con adiciones de 10 ml de coagulante

FIGURA 5.2: Muestra final tratada con 60 ml de coagulante



Fuente: Elaboración propia

Para cada adición se agitó durante 10 minutos con 30 minutos de reposo para la sedimentación, elaborándose la tabla 5.2.

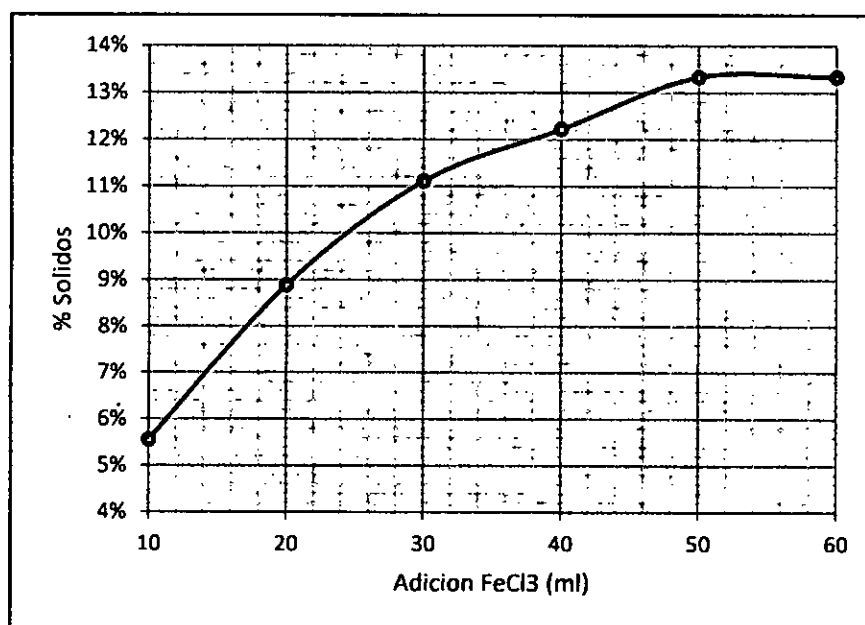
TABLA 5.2: Porcentaje de sólidos formados respecto a diferentes adiciones de coagulante

<b>Adición de FeCl<sub>3</sub> (ml)</b>	<b>% Sólidos</b>
10	6
20	9
30	11
40	12
50	13
60	13

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 5.2 elaboramos el gráfico 5.2, donde observamos la relación que hay entre el % de sólidos formados luego de 30 minutos con respecto a la adición progresiva de coagulante y que a partir de la adición de 50 ml el % de sólidos formados se mantiene constante, dando a conocer que la dosis adecuada de coagulante para nuestra muestra es de 50 ml.

GRÁFICO 5.2: Porcentaje de sólidos formados con adiciones de coagulante



Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Determinación de dosis adecuada de floculante

Se preparó 100 ml de floculante (superfloc) a una concentración de 0.5% p/v.

Una vez que se obtuvo que la dosis adecuada de coagulante fuera de 50 ml a una concentración de 0.5% para un volumen total de muestra de 450 ml. Para determinar la dosis adecuada de floculante, se

determinó el tiempo que demoraba para la formación de sólidos alrededor de 13% (valor constante que se muestra en el gráfico 5.2) Para esto se fue agregando 1 ml progresivamente, se agitó por 10 minutos y luego se tomaba el tiempo hasta llegar a un porcentaje de 13% se sólidos, elaborándose la tabla 5.3.

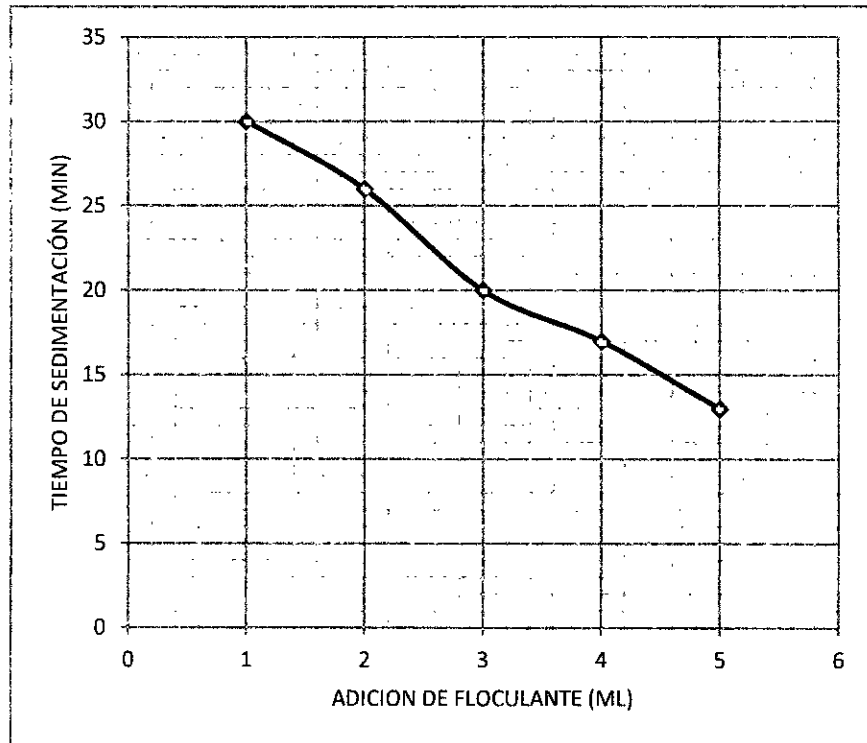
**TABLA 5.3: Tiempo de sedimentación respecto a diferentes adiciones de floculante**

<b>Adición de floculante (ml)</b>	<b>Tiempo de sedimentación (min)</b>
1	30
2	26
3	20
4	17
5	13

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 5.3 elaboramos el gráfico 5.3, donde observamos la relación que hay entre el tiempo de sedimentación hasta alcanzar el porcentaje de sólidos constante obtenido en el gráfico 5.2 con respecto a la adición progresiva de floculante, obteniendo una dosis adecuada de 5 ml de floculante ya que luego de eso el tiempo se mantuvo constante.

**GRÁFICO 5.3: Tiempo de sedimentación necesario para diferentes adiciones de floculante**



Fuente: Elaboración propia

#### **5.4. Determinación del tiempo de reacción necesario para la reducción de sulfatos en el agua de relaves**

Se analizó el sulfato residual cada 2 minutos de reacción con diferentes concentraciones de cal, obteniendo en total 40 muestras cuyos datos se expresa en la tabla 5.4.

**TABLA 5.4: Concentración de sulfatos obtenido en diferentes tiempos luego de reaccionar con diferentes concentraciones de cal**

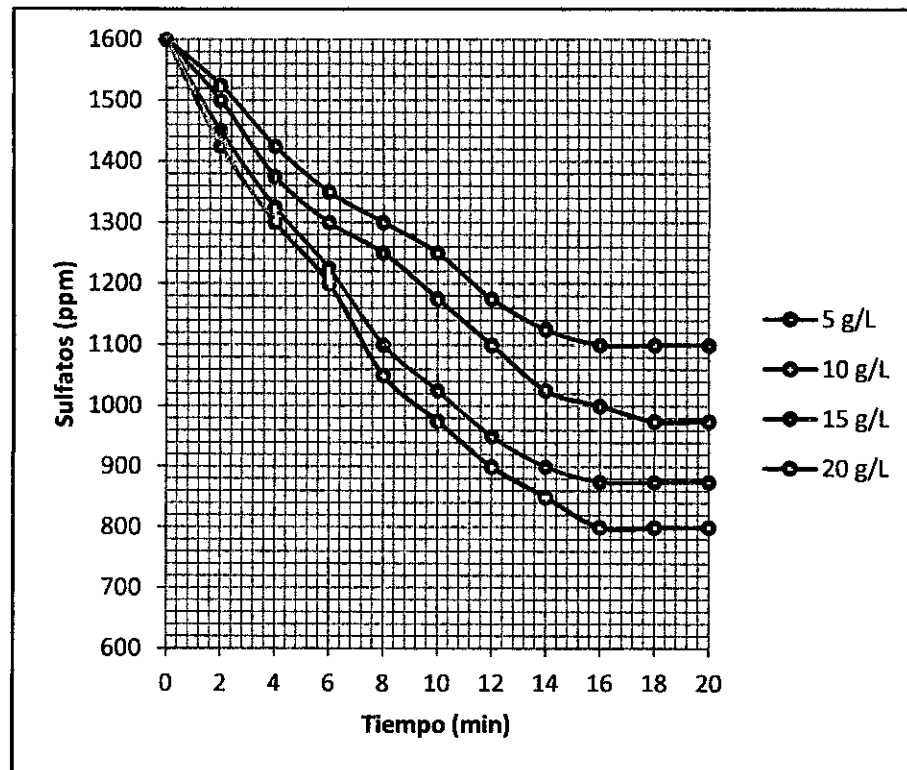
Tiempo (minutos)	Concentración de Cal (g/l)			
	5	10	15	20
Concentración de sulfatos (ppm)				
0	1600	1600	1600	1600
2	1525	1500	1450	1425
4	1425	1375	1325	1300
6	1350	1300	1225	1200
8	1300	1250	1100	1050
10	1250	1175	1025	975
12	1175	1100	950	900
14	1125	1025	900	850
16	1100	1000	875	800
18	1100	975	875	800
20	1100	975	875	800

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la tabla 5.4 realizamos el gráfico 5.4 donde relacionamos la reducción de sulfatos con respecto al tiempo y con diferentes concentraciones de cal.



GRÁFICO 5.4: Concentración de sulfatos determinados a diferentes tiempos de reacción y reaccionados con diferentes concentraciones de cal



Fuente: Elaboración propia

## **VI. DISCUSION DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1. Para la dosis de lechada de cal**

Se escogió como tamaño de muestra 300 ml de agua de relaves, a partir de esto se hicieron los cálculos explicados en el anexo IV, donde se determina la cantidad de cal teórica necesaria para el tratamiento. Utilizando una suspensión de 5 g/l se determinó que el volumen adecuado de lechada de cal para el tratamiento era de 150 ml.

La concentración inicial de 5 g/l de lechada de cal no fue suficiente para la reducción de sulfatos hasta los valores deseados, se siguió trabajando con el mismo volumen de lechada de cal para las pruebas pero con concentraciones mayores siendo de 10, 15 y 20 g/l.

Los resultados de la tabla 5.1 nos demuestran que la concentración de 20 g/l de lechada de cal es la adecuada para la reducción de sulfatos alcanzándose una concentración de sulfatos mínima de 800 ppm cumpliendo así con lo impuesto en el ECA y que representa una remoción del 50% de los sulfatos contenidos en el agua de relaves (Anexo VII). Además en la tabla 5.4 se observa que alcanza la mayor conversión con

respecto a las demás concentraciones, siendo la conversión de 0.5.

#### **6.1.2. Para la dosis de coagulante**

Las pruebas experimentales para determinar la dosis adecuada de floculante se realizó adicionando volúmenes de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ml de una solución al 0.5% p/v. Se demostró que la cantidad adecuada fue de 50 ml por cada 300 ml de agua de relaves, ya que al adicionar un mayor volumen de coagulante no hubo mayor formación de sólidos.

#### **6.1.3. Para la dosis de floculante**

Las pruebas experimentales para determinar la dosis adecuada de floculante se realizó adicionando volúmenes de 1, 2, 3, 4 y 5 ml de una solución al 0.5% p/v. Se demostró que la cantidad adecuada fue de 5 ml por cada 300 ml de agua de relaves, ya que al adicionar un mayor volumen de floculante el tiempo de sedimentación se mantuvo constante.

#### **6.1.4. Para el tiempo de reacción necesario para el tratamiento**

En los ensayos realizados, el tiempo de reacción adecuado para la reducción de sulfatos es de 16 min, que es el periodo al que se llega al equilibrio y a la remoción requerida siendo menor a 1000 ppm, cumpliendo con la segunda hipótesis específica.

Con el tiempo de reacción obtenido en la tabla 5.4, calculamos el volumen del reactor para el tratamiento siendo de 134.4 m<sup>3</sup>, valor al cual aplicando un factor de seguridad de 20% para sobredimensionar el reactor siendo el volumen final de 161.3 m<sup>3</sup> indicado en el anexo VIII. Esto permite un tratamiento de 140 l/s de agua de relave.

#### **6.2. Contratación de resultados con otros estudios similares**

- En el estudio realizado por K. Banerjee y Joan Sanz, en su publicación “Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración”, en el cual para reducir sulfatos hasta concentraciones menores a 50 ppm lo hacen precipitando una sal combinada de calcio y aluminio con el sulfato llamado etringita, para nuestro caso no es necesario ya que solo se quiere reducir sulfatos hasta valores menores de 1000 ppm, lo que se logra solo con

lechada de cal, siendo una buena alternativa para el uso que le darán en la mina ubicada en Cajamarca.

A diferencia del estudio de K. Banerjee y Joan Sanz, no se reutiliza el sulfato de calcio precipitado en nuestro caso ya que es una sal en la cual el calcio no reaccionará con los sulfatos presentes en el agua de relaves, mientras que en su estudio si se podría reutilizar el sólido formado porque el aluminio sirve a su vez como coagulante.

- En la publicación de Mackie, A. con título "Physicochemical characterization of cement kiln dust for potencial reuse in acidic wastement treatment", utilizan un subproducto que se obtiene en la industria del cemento, que en su composición presenta mayor porcentaje de cal (CaO) lo cual es utilizado para aportar calcio y formar el sulfato de calcio con los sulfatos presentes en drenaje ácido de mina de carbón alcanzando un porcentaje de remoción de sulfatos de 80%. Similarmente ocurre para nuestro estudio, debido a que se está utilizando cal en forma de lechada de cal o cal apagada alcanzando un porcentaje de remoción de sulfatos menor que a la de ellos pero cumpliendo con el límite puesto en el ECA.
- Luciana Cadorín, en su publicación "Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas", su objeto de estudio es un agua ácida de mina de carbón la cual presenta sulfatos con concentraciones menores a 1000 ppm, es por eso que solo utiliza cal para elevar el pH y facilitar la precipitación de etringita alcanzando valores de sulfatos

hasta de 100 ppm. Mientras que en nuestra investigación utilizamos cal para elevar el pH y aportar calcio para la precipitación de sulfato de calcio, como nuestra muestra tiene sulfatos iniciales de 1600, la lechada de cal si logra reducirlo hasta valores menores de 1000 ppm.

- Utilizamos cloruro férrico como coagulante, siendo una buena opción para la precipitación de sólidos en nuestra muestra, mientras que Daniela Castrillón Bedoya y Maria de los Ángeles Giraldo en su trabajo “Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa santana” realizaron ensayos de tratamiento con sulfato de aluminio granulado como coagulante, dándoles buenos resultados reflejados en la disminución de la turbidez. Mientras que en nuestra investigación el cloruro férrico dio buenos resultados reflejados en el porcentaje de sólidos formados dando un agua más clara luego del tratamiento.
- Utilizamos superfloc N300 que es un floculante de poliacrilamida para la aceleración en la precipitación de los sólidos formados luego de la adición del coagulante, obteniendo buenos resultados con respecto al tiempo de sedimentación, mientras que en los estudios anteriores ya mencionados no utilizan floculante debido a la doble acción de coagulante y floculante que presenta la sal de calcio y aluminio llamado etringita.

- Se determinó un tiempo de reacción necesario para el tratamiento del agua de relaves, siendo nuestro caso un proceso batch. En el trabajo de Luciana Cadorín se habla de un proceso continuo para el tratamiento de sus aguas, por lo que no mencionan un tiempo de reacción.

## VII. CONCLUSIONES

- La cal utilizada para la investigación tiene una pureza de 80%, lo cual es posible utilizar para el tratamiento en la reducción de sulfatos, a pesar de presentar un alto porcentaje de sílice e insolubles que podrían afectar al rendimiento del tratamiento.
- Se determinó que la dosis adecuada de lechada de cal fue de 20 g/l para reducir los sulfatos a valores menores de 1000 ppm establecido por el ECA, requiriéndose para el tratamiento una relación de 2 a 1 en volumen de agua de relaves y lechada de cal respectivamente para la reducción de sulfatos.
- El tiempo adecuado para el tratamiento es alrededor de 16 minutos, siendo este tiempo necesario para la reducción de sulfatos y alcanzar un valor de 800 ppm cumpliendo así con la normativa ambiental.
- Se trabajó con cloruro férrico como coagulante con una concentración de 0.5% p/v, siendo la dosis de coagulante con respecto a la muestra a tratar es de 1 a 9 en volumen de coagulante y muestra respectivamente para una buena coagulación y precipitación de sólidos.
- El superfloc N300 como floculante demostró un buen resultado en la aceleración de la precipitación de los sólidos formados luego de la adición del coagulante, determinando que la dosis adecuada de



floculante con respecto a la muestra a tratar es de 1 a 90 en volumen respectivamente.

## VIII. RECOMENDACIONES

- La pureza de la cal a utilizar es muy importante para un correcto tratamiento de las aguas de relaves, la cal a utilizar no debe tener demasiado sílice e insolubles ya que interfiere en la reacción provocando una menor eficiencia en la reducción de sulfatos.
- La preparación de la solución de lechada de cal debe ser como mínimo de 10 minutos de homogenización, esto es para que la cal viva se apague totalmente y se pueda dar la formación del hidróxido de calcio o cal apagada.
- La precipitación de sulfato de calcio está relacionado directamente con la presencia de metales como hierro y manganeso en la muestra de agua a tratar para que puedan precipitar como hidróxidos. Sin la presencia de estos metales, no habría precipitación de sulfato de calcio.
- En la preparación del floculante se debe dejar reposar por lo menos 1 hora, esto es para que el floculante tome consistencia y se disuelva totalmente, si no dejara reposar como mínimo este tiempo no habría un buen desempeño del floculante para la precipitación de sólidos.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADUVIRE, OSVALDO. **Tratamiento de aguas ácidas de mina.** España. Instituto Geológico y Minero de España. 2006.
2. AGUILAR, M.; SAEZ, J. **Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación.** España. Ediciones de la Universidad de Murcia. 2002.
3. ATKINS, P.W. **Fisicoquímica.** Barcelona. Editorial Omega. 1999
4. BANERJEE, K.; MUDASSANI, S.; BLUMENSCHHEIN, C. D.; BUISSON, H. Y ZICK, R. **An innovative process for sulfate treatment of membrane concentrates from mining operations.** Australia. Proc. IWA 9th Leading Edge Technology Conference. 2012.
5. CAMERO HERMOZA, PEDRO. **Seminario – Tratamiento de aguas ácidas de mina.** Cusco, Perú. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. 2010.
6. CAPUÑAY, YRMA. **Tecnología de los materiales.** Universidad San Martín de Porres. Lima. 2010.
7. CAPUÑAY, YRMA. **Cal.** Lima, Perú. Universidad de San Martín de Porres. 2010.
8. CASTRILLÓN, DANIELA; GIRALDO, MARÍA DE LOS ÁNGELES. **Determinación de las dosis óptimas del coagulante de sulfato**

**de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en una planta de tratamiento de Villa Santana. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. 2012.**

9. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. **Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Perú. 2002**
10. COMPAÑÍA SIDERÚRGICA HUACIPATO. **Cal viva**. Disponible en: <http://www.capacero.cl/calviva.htm>. Página web. Consultada el 19 de febrero del 2017.
11. CRAVOTTA III, C. **Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage**. Applied Geochemistry. Vol.14: 581 a 606 (1999).
12. DIARIO EL PERUANO. Normas Legales. **D.S. N°015-2015 MINAM**. Lima, Perú. 19 de Diciembre del 2015.
13. DIARIO EL PERUANO. Normas Legales. **Modifican los estándares nacionales de calidad ambiental para agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación**. Lima. 19 de Diciembre del 2015.
14. DOLD BERNHARD. **Formación, predicción, control y prevención de aguas ácidas**. Minería. Vol.309: 29 a 37 (2003).
15. ESTUDIOS MINEROS DEL PERÚ S.A.C. **Manual de Minería**. Perú. 2009

16. GARY D. CHRISTIAN. **Química Analítica**. USA. Editorial McGraw - Hill. 2009.
17. IES VICENT CASTELL I DOMENECH. **Determinación de sulfatos por espectrofotometría**. España. 2014.
18. INAP: THE INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION. **Drainage treatment**. Disponible en: <https://www.gardguide.com>. Página web. Consultada el 19 de febrero del 2017.
19. NAP & LORAX. **Environmental Treatment of Sulphate in Mine Effluents**. Disponible en: [http://www.inap.com.au/public\\_downloads/Research\\_Projects/Treatment\\_of\\_Sulphate\\_in\\_Mine\\_Effluents\\_-\\_Lorax\\_Report.pdf](http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Treatment_of_Sulphate_in_Mine_Effluents_-_Lorax_Report.pdf). Artículo web. Consultada el 20 de noviembre del 2016.
20. KUEHL O. ROBERT. **Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación**. Usa. Editorial Thomson Learning. 2000
21. LEVENSPIEL OCTAVE. **Ingeniería de las Reacciones Químicas**. Mexico. Editorial Limusa. 2004.
22. LEVINE N. IRA. **Fisicoquímica**. New York. Editorial McGraw - Hill. 2002
23. LORENZO ACOSTA, YANIRIS. **Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación**. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 2006.

24. MACKIE, A. **Physicochemical characterization of cement kiln dust for potencial reuse in acidic wastement treatment.** *Journal of hazardous materials.* Canadá. Dalhousie University. 2010.
25. MARTÍNEZ LONDOÑO, EDGAR. **Remoción de Sulfatos de Drenajes Ácidos de Minería de Carbón.** Tesis de maestría. Colombia. Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia. 2010.
26. MONTGOMERY. **Diseño y Análisis de Experimentos.** USA. Editorial Limusa. 2004
27. PATIÑO TORRES, J. **Formulación Química y Ajuste de Ecuaciones.** España. Editorial Everest S.A. 1995
28. RODIES J. **Análisis de Aguas.** España. Editorial Omega. 1981
29. RODRÍGUEZ, CARLOS. **Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Agua.** Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995.
30. SANZ, JOAN. **Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración.** España. Veolia Water Technologies. 2014.
31. SHI FAN. **Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology.** USA. Editorial Elsevier. 2014
32. STANLEY E. MANAHAN. **Introducción a la Química Ambiental.** España. Editorial Reverté S.A. 2007

33. UNDERWOOD A. L. **Química Analítica Cuantitativa**. USA.

Editorial Prentice - Hall. 1989

34. VOGEL ARTHUR I. **Química Analítica Cuantitativa: Teoría y Práctica**. Inglaterra. Editorial Longmans. 1951.

35. WIKIPEDIA. **Hidróxido de calcio**. Disponible en:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido de calcio](https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_calcio). Página

web. Consultada el 19 de febrero del 2017.

**Matriz de consistencia completa: "DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RELAVES DE UNA EMPRESA MINERA EN CAJAMARCA MEDIANTE REDUCCION DE SULFATOS CON LECHADA DE CAL"**

<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLE DEP.</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
¿Cuáles son las condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas de relaves?	Determinar las condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas de relaves.	Las condiciones de operación obtenidas son las adecuadas para el tratamiento en la reducción de sulfatos del agua de relaves.	X= Condiciones de operación para la reducción de sulfatos en las aguas provenientes de relaves.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros fisicoquímicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de cal (mg/L)</li> <li>• Concentración de coagulante (mg/L)</li> <li>• Volumen del reactor (L o m<sup>3</sup>)</li> <li>• Flujo de aire necesario para la dosificación (m<sup>3</sup>/h)</li> </ul>	Realizar ensayos teniendo identificado Y, T, W y Z.
<b>PROB. ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJ. ESPECÍFICOS</b>	<b>HIP. ESPECÍFICAS</b>	<b>VARIABLES IND.</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
a) ¿Cuál es la dosificación óptima de cal y floculante para el tratamiento?	a) Determinar la dosificación óptima de cal y floculante para el tratamiento.	a) Las dosis de cal y floculante son las adecuadas para el tratamiento de las aguas de relaves.	Y= Dosificación óptima de cal y coagulante para el tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Químicas</li> <li>• Fisicoquímicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de cal (mg/L)</li> <li>• Concentración de coagulante (mg/L)</li> </ul>	Realizar experimentos a diferentes concentraciones de lechada de cal, coagulante y floculante.
b) ¿Cuál es el tiempo de reacción adecuado para el tratamiento?	b) Determinar el tiempo de reacción adecuado para el tratamiento.	b) El tiempo de reacción obtenido es el adecuado para el tanque de tratamiento.	T = Tiempo de reacción.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Física</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo (s ó min)</li> </ul>	Realizar el cálculo mediante datos experimentales.



**ANEXO II**

**ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL - DS. N° 015-2015 MINAM**

**PODER EJECUTIVO****AMBIENTE****Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación****DECRETO SUPREMO  
N° 015-2015-MINAM****EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA****CONSIDERANDO:**

Que, el numeral 22 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida;

Que, según el artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como a sus componentes asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país;

Que, el artículo 3° de la Ley N° 28611, referido al rol de Estado en materia ambiental, dispone que éste a través de sus entidades y órganos correspondientes diseña y aplica, entre otros, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en dicha Ley;

Que, el artículo 31° de la Ley N° 28611, define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente;

Que, el numeral 33.4 del artículo 33 de la citada ley, dispone que en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, de conformidad con el literal d) del artículo 7° del Decreto Legislativo N° 1013, que aprueba la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente, este Ministerio tiene como función específica elaborar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), debiendo ser aprobados o modificados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM se aprobaron los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y, mediante Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, se aprobaron las disposiciones para la implementación de dichos estándares;

Que, las referencias nacionales e internacionales de toxicidad consideradas en la aprobación los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua han sido modificadas, tal como lo acreditan los estudios de investigación y guías internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica, de la Comunidad Europea, entre otros;

Que, asimismo, el Ministerio del Ambiente ha recibido diversas propuestas de instituciones públicas y privadas, con la finalidad de que se revisen las subcategorías, valores y parámetros de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua vigentes, por lo que, resulta necesario modificar los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, aprobados por Decreto Supremo N°

002-2008-MINAM y precisar determinadas disposiciones contenidas en el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM;

Que, en el marco de lo dispuesto en el Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la Información Pública Ambiental y Participación y Consulta Ciudadana en Asuntos Ambientales, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM, la presente propuesta ha sido sometida a consulta y participación ciudadana, en virtud de la cual se recibieron aportes y comentarios;

De conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, el Decreto Legislativo N° 1013, que aprueba la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente y el artículo 118° de la Constitución Política del Perú.

**DECRETA:**

**Artículo 1.- Modificación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, aprobados por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM.**

Modifíquese los parámetros y valores de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobados por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, detallados en el Anexo de la presente norma.

**Artículo 2.- ECA para Agua y políticas públicas**  
Los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua son de cumplimiento obligatorio en la determinación de los usos de los cuerpos de agua, atendiendo a sus condiciones naturales o niveles de fondo, y en el diseño de normas legales y políticas públicas, de conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.

**Artículo 3.- ECA para Agua e instrumentos de gestión ambiental.**

3.1. Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua son referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental

3.2. Los titulares de la actividad extractiva, productiva y de servicios deben prevenir y/o controlar los impactos que sus operaciones pueden generar en los parámetros y concentraciones aplicables a los cuerpos de agua dentro del área de influencia de sus operaciones, advirtiendo entre otras variables, las condiciones particulares de sus operaciones y los insumos empleados en el tratamiento de sus efluentes; dichas consideraciones deben ser incluidas como parte de los compromisos asumidos en su instrumento de gestión ambiental, siendo materia de fiscalización por parte de la autoridad competente

**Artículo 4.- Excepción de aplicación de los ECA para Agua.**

4.1. Las excepciones para la aplicación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua previstas en el Artículo 7° de las disposiciones para su implementación aprobadas por Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM se aplican de forma independiente.

4.2. El supuesto previsto en el literal b) del citado Artículo 7° constituye una excepción de carácter temporal que es aplicable para efectos del monitoreo de calidad ambiental y en el seguimiento de las obligaciones asumidas por el titular de la actividad.

**Artículo 5.- Revisión de los ECA para Agua.**

5.1. Conjuntamente con los límites máximos permisibles aplicables a una actividad, las entidades de fiscalización ambiental verifican la eficiencia del tratamiento de efluentes y las características ambientales particulares advertidas en los estudios de línea de base, o los niveles de fondo que caracterizan los cuerpos de agua dentro del área de influencia de la actividad sujeta a control.

5.2. Dicha información se sistematiza y remite al Ministerio del Ambiente, de conformidad con el artículo 9 de las disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, aprobadas por Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, para efectos de la revisión periódica del ECA para Agua.

**Artículo 6.- Actualización del Plan de Manejo Ambiental de las Actividades en Curso**

Para la actualización del Plan de Manejo Ambiental de las Actividades en Curso se observa los siguientes procedimientos:

6.1. El Titular de la actividad extractiva, productiva y de servicios en curso evalúa si las obligaciones ambientales contenidas en su instrumento de gestión ambiental vigente requieren ser modificadas en virtud a los ECA para Agua establecidos en la presente norma, de modo que su actividad no afecte los cuerpos de agua existentes en el área de influencia de sus operaciones.

6.2. El Titular tiene un plazo de seis (6) meses, contado a partir de la entrada en vigencia de la presente norma, para comunicar a la autoridad ambiental competente si los valores de los ECA para Agua ameritan la modificación de su instrumento de gestión ambiental vigente.

A partir de la fecha de la comunicación formulada a la Autoridad Ambiental Competente, el Titular tiene un plazo de doce (12) meses adicionales para presentar la modificación del mencionado instrumento de gestión ambiental.

6.3. La Autoridad Ambiental Competente tiene un plazo máximo de noventa (90) días calendario para evaluar y aprobar el Plan de Manejo Ambiental presentado. En el marco del plazo descrito, la Autoridad Ambiental Competente tiene un plazo máximo de cuarenta y cinco (45) días calendario para revisar y remitir las observaciones al Titular respecto al Plan de Manejo Ambiental presentado, en caso corresponda. El Titular tiene un plazo máximo de treinta (30) días calendario para la presentación del levantamiento de las observaciones que haya efectuado la Autoridad Ambiental Competente al Plan de Manejo Ambiental presentado.

6.4. El plazo máximo para la implementación de las medidas de adecuación, contenidas en la modificación del instrumento de gestión ambiental, es de tres (03) años, contado a partir de la aprobación por parte de la Autoridad Ambiental Competente.

6.5. Si el titular no formula comunicación ni presenta la modificación de su instrumento de gestión ambiental dentro de los plazos descritos en el presente artículo, son de referencia automática los ECA para Agua aprobados en el artículo 1 del presente decreto supremo.

La solicitud de modificación no suspende la ejecución de las obligaciones ambientales establecidas en instrumentos de gestión ambiental previamente aprobados por la Autoridad Ambiental Competente, ni el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, según corresponda.

#### Artículo 7.- Refrendo

El presente Decreto Supremo es refrendado por el Ministro de Agricultura y Riego, la Ministra de Energía y Minas, el Ministro de Salud y el Ministro del Ambiente.

#### DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES

**Primera.-** Para efectuar los monitoreos en aplicación de la presente norma, la autoridad ambiental competente debe considerar los parámetros asociados prioritariamente a la actividad extractiva, productiva o de servicios y a aquellos que permitan caracterizar las condiciones naturales de la zona de estudio o el efecto de otras descargas en la zona.

**Segunda.-** La entidad de fiscalización ambiental supervisa, una vez concluido el plazo para la implementación del instrumento de gestión ambiental correspondiente, que las actividades extractivas, productivas y de servicios realicen sus operaciones considerando los valores y parámetros establecidos en la presente norma.

**Tercera.-** El Titular de la actividad minera que se encuentre implementando su instrumento de gestión ambiental de acuerdo al Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM o el Plan Integral, aprobado por el Ministerio de Energía y Minas, en concordancia con lo establecido en el Decreto Supremo N° 010-2011-MINAM, tiene un plazo de sesenta (60) días calendario para evaluar e informar a dicha autoridad si el plan aprobado requiere ser modificado, a fin de guardar relación con los ECA para Agua aprobados en el artículo 1 de la presente norma.

A partir de la fecha de la comunicación a la Autoridad Ambiental Competente, el Titular tiene un plazo de doce (12) meses adicionales para presentar la modificación de su Plan Integral o el instrumento de gestión ambiental que corresponda.

El proceso de evaluación y aprobación del Plan Integral presentado por parte de la Autoridad Ambiental Competente, se rige por lo dispuesto en el artículo 6° de la presente norma.

El plazo máximo para el cumplimiento del proceso de adecuación es de tres (03) años, contado a partir de la aprobación de la modificación del Plan Integral por parte de la Autoridad Ambiental Competente.

La solicitud de modificación no suspende la obligación de cumplir, como mínima exigencia, con los valores de Límites Máximos Permisibles (LMP) anteriormente aprobados contenidos en su instrumento de gestión ambiental vigente, hasta la conclusión del proceso de adecuación.

En caso el Titular minero no cumpla con informar a la Autoridad Ambiental Competente la necesidad de su Plan Integral o el instrumento de gestión ambiental correspondiente en los plazos establecidos en la presente disposición, se le aplican los compromisos asumidos y el cronograma de ejecución consignado en el Plan Integral aprobado.

**Cuarta.-** El Titular de la actividad minera que haya cumplido con presentar un Plan Integral, en concordancia con lo establecido en el Decreto Supremo N° 010-2011-MINAM; pero que a la fecha de la publicación de la presente norma no cuente con la aprobación por parte del Ministerio de Energía y Minas, tiene un plazo de sesenta (60) días calendario para evaluar e informar a dicha Autoridad Ambiental si el Plan Integral presentado requiere una actualización a los valores de los ECA para Agua aprobados en el artículo 1 de la presente norma.

Efectuada dicha comunicación, la Autoridad Ambiental Competente devuelve el expediente respectivo al Titular minero en el plazo máximo de diez (10) días calendario. A partir de la fecha de la referida devolución el Titular minero tiene un plazo de doce (12) meses para presentar una actualización del Plan Integral inicialmente presentado.

El proceso de evaluación y aprobación de la actualización del Plan Integral por parte de la Autoridad Ambiental Competente, se rige por lo dispuesto en el artículo 6° de la presente norma.

El plazo máximo para el cumplimiento del proceso de adecuación es de tres (03) años, contado a partir de la aprobación del Plan Integral por parte de la Autoridad Ambiental Competente.

Si el Titular minero no comunica al Ministerio de Energía y Minas la necesidad de actualizar el Plan Integral que fuera presentado, se entiende que no requiere modificar dicho proyecto de instrumento de gestión ambiental, reanudándose su evaluación.

En caso que el Titular minero, habiendo notificado a la DGAAM del Ministerio de Energía y Minas su disposición a actualizar el Plan Integral presentado no presente dicha actualización en los plazos señalados, puede ser pasible de las sanciones que correspondan por la afectación de la eficacia de la fiscalización ambiental.

**Quinta.-** En un plazo no mayor a seis (6) meses mediante Resolución Ministerial el Ministerio del Ambiente establece las condiciones sobre los métodos de ensayo aplicables a la medición de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua aprobados por la presente norma.

#### DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA MODIFICATORIA

**Única.-** Modificación del artículo 2 de las Disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua

Modifíquese el artículo 2 de las disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobadas por Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, de acuerdo a lo siguiente:

**"Artículo 2.-** Precisiones de las Categorías de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua.

Para la implementación del Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y de la presente norma, se tiene en consideración las siguientes precisiones de las Categorías de los ECA para Agua:

**Categoría 1: Poblacional y Recreacional**

**Sub Categoría A. Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable**

**A1. Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección.**

Entiéndase como aquellas aguas, que por sus características de calidad reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente.

(...)

**Sub Categoría B. Aguas superficiales destinadas para recreación**

Son las aguas superficiales destinadas al uso recreativo, que en la zona costera marina comprende la franja del mar entre el límite de la tierra hasta los 500 m de la línea paralela de baja marea y que en las aguas continentales su amplitud es definida por la autoridad competente

(...)

**Categoría 2: Actividades de Extracción y Cultivo Marino Costeras y Continentales**

**Sub Categoría C1. Extracción y cultivo de moluscos bivalvos en aguas marino costeras**

(...)

**Sub Categoría C2: Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras**

(...)

**Sub Categoría C3. Otras Actividades en aguas marino costeras**

Entiéndase a las aguas destinadas para actividades diferentes a las precisadas en las subcategorías C1 y C2, tales como infraestructura marina portuaria, de actividades industriales y de servicios de saneamiento.

**Sub Categoría C4: Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas**

Entiéndase a los cuerpos de agua destinadas a la extracción o cultivo de especies hidrobiológicas para consumo humano.

**Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales**

**Subcategoría D1: Vegetales de Tallo Bajo y Alto.**

Entiéndase como aguas utilizadas para el riego de plantas, frecuentemente de porte herbáceo y de poca longitud de tallo (tallo bajo), tales como plantas de ajo, fechuga, fresa, col, repollo, apio, arvejas y similares) y de plantas de porte arbustivo o arbóreo (tallo alto), tales como árboles forestales, frutales, entre otros.

**Sub Categoría D2: Bebida de Animales.**

(...)

**Categoría 4: Conservación del ambiente acuático**

Están referidos a aquellos cuerpos de agua superficiales que forman parte de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y/o zonas de amortiguamiento y que cuyas características requieren ser protegidas.

(...)

**Sub Categoría E1: Lagunas y Lagos**

Comprenden todas las aguas que no presentan corriente continua, de origen y estado natural y léntico incluyendo humedales.

**Sub Categoría E2: Ríos**

(...)

**Sub Categoría E3: Ecosistemas Marino Costeros**

(...)

**Marino.-** Entiéndase como zona del mar comprendida desde la línea paralela de baja marea hasta el límite marítimo nacional.

(...)

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los diecinueve días del mes de diciembre del año dos mil quince.

**OLLANTA HUMALA TASSO**  
Presidente de la República

**JUAN MANUEL BENITES RAMOS**  
Ministro de Agricultura y Riego

**MANUEL PULGAR-VIDAL OTALORA**  
Ministro del Ambiente

**ROSA MARÍA ORTIZ RÍOS**  
Ministra de Energía y Minas

**ANÍBAL VELÁSQUEZ VALDIVIA**  
Ministro de Salud

TABLA N° 01.- PARÁMETROS Y VALORES CONSOLIDADOS.

CATEGORÍA 1 - A

PARÁMETRO	UNID	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable		
		A1	A2	A3
		Aguas que Pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser Potabilizadas con Tratamiento Avanzado

FÍSICOS - QUÍMICOS

Aceites y grasas	mg/L	0,5	1,7	1,7
Cianuro Total	mg/L	0,07	0,2	0,2
Cloruros	mg/L	250	250	250
Color (°)	Unidad de Color verdadero escala Pt/Co	15	100 (s)	**
Conductividad	(µS/cm)	1 500	1 600	**
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	3	5	10
Dureza	mg/L	500	**	**
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30
Fenoles	mg/L	0,003	**	**
Fluoruros	mg/L	1,5	**	**
Fósforo Total	mg/L	0,1	0,15	0,15
Materiales Flotantes de origen antropogénico.		Ausencia de material flotante de origen antropico	Ausencia de Material Flotante de origen antropico	Ausencia de Material Flotante de origen antropico
Nitros (NO <sub>2</sub> )	mg/L	50	50	50
Nitros (NO <sub>3</sub> )	mg/L	3	3	**
Amoníaco- N	mg/L	1,5	1,5	**
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	≥ 6	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 - 8,5	5,5 - 9,0	5,5 - 9,0

PARÁMETRO	UND	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable		
		A1	A2	A3
		Aguas que Pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser Potabilizadas con Tratamiento Avanzado
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500
Sulfatos	mg/L	250	500	**
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	**
Turbiedad	UNT	5	100	**
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	0,9	5	5
Antimonio	mg/L	0,02	0,02	**
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,15
Bario	mg/L	0,7	1	**
Berilio	mg/L	0,012	0,04	0,1
Boro	mg/L	2,4	2,4	2,4
Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,01
Cobre	mg/L	2	2	2
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Hierro	mg/L	0,3	1	5
Manganeso	mg/L	0,4	0,4	0,5
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002
Molibdeno	mg/L	0,07	**	**
Níquel	mg/L	0,07	**	**
Plomo	mg/L	0,01	0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,04	0,04	0,05
Uranio	mg/L	0,02	0,02	0,02
Zinc	mg/L	3	5	5
<b>ORGÁNICOS</b>				
<b>I. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES</b>				
Hydrocarburos de petróleo emulsionado o disuelto (C10 - C28 y mayores a C28)	mg/L	0,01	0,2	1,0
Trihalometanos	(c)	1,0	1,0	1,0
Bromoformo	mg/L	0,1	**	**
Cloroformo	mg/L	0,3	**	**
Dibromoclorometano	mg/L	0,1	**	**
Bromodichlorometano	mg/L	0,06	**	**
<b>Compuestos Orgánicos Volátiles</b>				
1,1,1-Tricloroetano	mg/L	0,2	0,2	**
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,03	**	**
1,2 Dicloroetano	mg/L	0,03	0,03	**
1,2 Diclorobenceno	mg/L	1	**	**
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	**
Tetracloroetano	mg/L	0,04	**	**
Tetracloruro de carbono	mg/L	0,004	0,004	**

PARÁMETRO	UND	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable		
		A1	A2	A3
		Aguas que Pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser Potabilizadas con Tratamiento Avanzado
Tricloroetano	mg/L	0,07	0,07	**
<b>BTEX</b>				
Benceno	mg/L	0,01	0,01	**
Etilbenceno	mg/L	0,3	0,3	**
Tolueno	mg/L	0,7	0,7	**
Xileno	mg/L	0,5	0,5	**
<b>Hydrocarburos Aromáticos</b>				
Benz(a)pireno	mg/L	0,0007	0,0007	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,009	0,009	**
<b>Organoesforados:</b>				
Melafón	mg/L	0,19	0,0001	**
<b>Organoclorados</b>				
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	0,00003	**
Clordano	mg/L	0,0002	0,0002	**
DDT	mg/L	0,001	0,001	**
Endrin	mg/L	0,0006	0,0006	**
Heptacloro + Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00003	0,00003	Retirado
Lindano	mg/L	0,002	0,002	**
<b>Carbamatos:</b>				
Aldicarb	mg/L	0,01	0,01	**
<b>Policloros Bifenilos Totales</b>				
PCB's	mg/L	0,0005	0,0005	**
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS</b>				
Coliformes Totales (35-37°C)	NMP/100 ml	50	5 000	50 000
Coliformes Termotolerantes (44,5°C)	NMP/100 ml	20	2 000	20 000
Formas parasitarias	N° Organismo/L	0	**	**
Escherichia coli	NMP/100 ml	0	**	**
Microcistina-LR	mg/L	0,001	0,001	**
Vibrio cholerae	Presencia/100ml	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Organismos de vida libre (algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nematodos, en todos sus estados evolutivos) (d)	N° Organismo/L	0	<5x10 <sup>6</sup>	<5x10 <sup>6</sup>

- (a) 100 (Para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural)
- (b) Después de la filtración simple
- (c) Para el cálculo de los Trihalometanos, se obtiene a partir de la suma de los cocientes de la concentración de cada uno de los parámetros (Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano y Bromodichlorometano), con respecto a sus estándares de calidad ambiental; que no deberán exceder el valor de 1 de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{C_{\text{Cloroformo}}}{ECA_{\text{Cloroformo}}} + \frac{C_{\text{Dibromoclorometano}}}{ECA_{\text{Dibromoclorometano}}} + \frac{C_{\text{Bromoclorometano}}}{ECA_{\text{Bromoclorometano}}} + \frac{C_{\text{Bromoformo}}}{ECA_{\text{Bromoformo}}} \leq 1$$

Dónde:  
 C = Concentración en mg/L y  
 ECA: Estándar de Calidad Ambiental en mg/L (Se mantiene las concentraciones del Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano y Bromoclorometano)

- (d) Aquellos organismos microscópicos que se presentan en forma unicelular, en colonias, en filamentos o pluricelulares.  
 - \*\*: No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría.  
 - Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales salvo que se indique lo contrario.  
 - Δ 3: variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada

**CATEGORÍA 1 - B**

PARÁMETRO	UND	Aguas superficiales destinadas para recreación	
		B1	B2
		Contacto primario	Contacto secundario
<b>FÍSICOS - QUÍMICOS</b>			
Aceites y grasas	mg/L	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,09	**
Color	Color verdadero escala Pt/Co	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	5	10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	30	50
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	Ausencia de espuma persistente
Materiales Flotantes de origen antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/L	10	**
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	mg/L	1	**
Olor	Factor de dilución a 25° C	Aceptable	**
Oxígeno Disuelto (Valor Mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,0 a 9,0	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**
Turbiedad	UNT	100	**
<b>INORGÁNICOS</b>			
Aluminio	mg/L	0,2	**
Antimonio	mg/L	0,006	**
Arsénico	mg/L	0,01	**
Bario	mg/L	0,7	**
Berilio	mg/L	0,04	**
Boro	mg/L	0,5	**
Cadmio	mg/L	0,01	**
Cobre	mg/L	2	**
Cromo Total	mg/L	0,05	**
Cromo VI	mg/L	0,05	**
Hierro	mg/L	0,3	**
Manganeso	mg/L	0,1	**
Mercurio	mg/L	0,001	**
Níquel	mg/L	0,02	**

PARÁMETRO	UND	Aguas superficiales destinadas para recreación	
		B1	B2
		Contacto primario	Contacto secundario
Plata	mg/L	0,01	0,05
Plomo	mg/L	0,01	**
Selenio	mg/L	0,01	**
Uranio	mg/L	0,02	0,02
Vanadio	mg/L	0,1	0,1
Zinc	mg/L	3	**
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO</b>			
Coliformes Totales (35-37°C)	NMP/100 ml	1000	4 000
Coliformes Termotolerantes (44,5°C)	NMP/100 ml	200	1 000
Escherichia coli	E.coli /100 ml	Ausencia	Ausencia
Formas parasitarias	N° Organismos/L	0	**
Giardia duodenalis	N° Organismos/L	Ausencia	Ausencia
Enterococos intestinales	NMP/100 ml	200	**
Salmonella sp	Presencia/100 ml	0	0
Vibrio cholerae	Presencia/100 ml	Ausencia	Ausencia

- UNT : Unidad Nefelométrica de Turbiedad
- NMP/100 ml : Número más probable en 100 ml
- \*\*: No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría.

**CATEGORIA 2**

PARÁMETRO	UNIDAD	CATEGORIA 2			
		AGUA DE MAR			AGUA CONTINENTAL
		Sub Categoría 1 (C1)	Sub Categoría 2 (C2)	Sub Categoría 3 (C3)	Sub Categoría 4 (C4)
		Extracción y Cultivo de Moluscos	Extracción y cultivo De otras Especies Hidrobiológicas	Otras Actividades	Extracción y cultivo De otras Especies Hidrobiológicas
<b>FÍSICOS - QUÍMICOS</b>					
Aceites y grasas	mg/L	1,0	1,0	2,0	1,0
Cianuro Wad	mg/L	0,004	0,004	**	0,0052
Color (después de filtración simple) (t)	Unidad de Color verdadero escala Pt/Co	100 (e)	100 (e)	**	100 (e)
Materiales Flotantes de origen antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de Material Flotante	Ausencia de Material Flotante	Ausencia de Material Flotante
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	**	10	10	10
Fósforo Total	mg/L	0,062	0,062	**	0,025
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/L	16	16	**	13
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥4	≥3	≥2,5	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7 - 8,5	6,8 - 8,5	6,8 - 8,5	6,0-8,0
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	60	60	70	**

PARÁMETRO	UNIDAD	CATEGORÍA 2			
		AGUA DE MAR		AGUA CONTINENTAL	
		Sub Categoría 1 (C1)	Sub Categoría 2 (C2)	Sub Categoría 3 (C3)	Sub Categoría 4 (C4)
		Extracción y Cultivo de Moluscos	Extracción y cultivo De otras Especies Hidrobiológicas	Otras Actividades	Extracción y cultivo De otras Especies Hidrobiológicas
Sulfuro	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>					
Amoníaco	mg/L	**	**	**	(1)
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,06	0,1
Boro	mg/L	5	5	**	0,75
Cadmio	mg/L	0,01	0,01	**	0,01
Cobre	mg/L	0,0031	0,05	0,05	0,2
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,10
Mercurio	mg/L	0,00094	0,001	0,0015	0,00077
Níquel	mg/L	0,0052	0,1	0,074	0,052
Plomo	mg/L	0,0081	0,0081	0,03	0,0025
Selenio	mg/L	0,071	0,071	**	0,005
Talio	mg/L	**	**	**	0,0008
Zinc	mg/L	0,081	0,081	0,12	1,0
<b>ORGÁNICO</b>					
Hidrocarburos de Petróleo Totales (fracción aromática)	mg/L	0,007	0,007	0,01	**
<b>ORGANOLECTIVO</b>					
Hidrocarburos de petróleo	mg/L	No visible	No visible	No visible	**
<b>POLICLORUROS BIFENILOS TOTALES</b>					
(PCB's)	mg/L	0,00003	0,00003	0,00003	0,000014
<b>MICROBIOLÓGICO</b>					
Cultivos Termotolerantes (44,5°C)	NMP/100 ml	≤ 14 (área Acrobata)(c)		≤ 30	1.000
	NMP/100 ml	≤ 88 (área restringida)(c)			

(a) 100 (Para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b) Después de la filtración simple.

(c) Área Aprobada: Áreas de donde se extraen o cultivan moluscos bivalvos seguros para el comercio directo y consumo, libres de contaminación fecal humana o animal, de organismos patógenos o cualquier sustancia deletérea o venenosa y potencialmente peligrosa.

Área Restringida: Áreas acuáticas impactadas por un grado de contaminación donde se extraen moluscos bivalvos seguros para consumo humano, luego de ser depurados.

- \*\*: No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría.

- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales salvo que se indique lo contrario.

- Δ 3: variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

(1) Nitrógeno Amoniacal para Aguas Dulce :

Estándar de calidad de concentración del nitrógeno amoniacal en diferente pH y temperatura para la protección de la vida acuática (mg/L de NH3)

Temp (°C)	pH							
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	10.0
0	231	73.0	23.1	7.32	2.33	0.749	0.25	0.042
5	153	48.3	15.3	4.84	1.54	0.502	0.172	0.034
10	102	32.4	10.3	3.26	1.04	0.343	0.121	0.029
15	69.7	22.0	6.98	2.22	0.715	0.239	0.089	0.026
20	48.0	15.2	4.82	1.54	0.499	0.171	0.067	0.024
25	33.5	10.6	3.37	1.08	0.354	0.125	0.053	0.022
30	23.7	7.50	2.39	0.767	0.256	0.094	0.043	0.021

Nota: Las mediciones de amoníaco total en el medio ambiente acuático a menudo se expresan en mg / L de amoníaco total -N. Los actuales valores de referencia (mg / L de NH3) se pueden convertir a mg/L de amoníaco total -N multiplicando el valor de referencia correspondiente por 0.8224. No recomendado pauta para las aguas marinas

CATEGORÍA 3

PARÁMETRO	UNIDAD	ECA AGUA: CATEGORÍA 3	
		PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES	PARÁMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES
		D1: RIEGO DE CULTIVOS DE TALLO ALTO Y BAJO	D2: BEBIDA DE ANIMALES
<b>FÍSICOS - QUÍMICOS</b>			
Aceites y grasas	mg/L	5	10
Bicarbonatos	mg/L	518	**
Cloruro Wad	mg/L	0,1	0,1
Cloruro	mg/L	500	**
Color (p)	Color verdadero escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)
Conductividad	(uS/cm)	2 500	5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	15	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	40	40
Detergentes (SAAM)	mg/l	0,2	0,5
Fenoles	mg/l	0,002	0,01
Fluoruro	mg/l	1	**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitratos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/l	100	100
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N)	mg/l	10	10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	4	5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4
Sulfuro	mg/L	1000	1000
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>			
Aluminio	mg/L	5	5
Arsénico	mg/L	0,1	0,2
Bario	mg/L	0,7	**
Berilio	mg/L	0,1	0,1
Boro	mg/L	1	5
Cadmio	mg/L	0,01	0,05
Cobre	mg/l	0,2	0,5
Cobalto	mg/l	0,05	1
Cromo Total	mg/l	0,1	1
Hierro	mg/l	5	**
Litio	mg/l	2,5	2,5
Magnesio	mg/l	**	250
Manganeso	mg/l	0,2	0,2
Mercurio	mg/l	0,001	0,01
Níquel	mg/l	0,2	1
Plomo	mg/l	0,05	0,05
Selenio	mg/l	0,02	0,05

CATEGORIAS		ECA AGUA: CATEGORIA 3	
PARÁMETRO	UNIDAD	PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES	PARÁMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES
		D1: RIEGO DE CULTIVOS DE TALLO ALTO Y BAJO	D2: BEBIDA DE ANIMALES
Zinc	mg/l	2	24
<b>PLAGUICIDAS</b>			
Parathión	ug/l	35	35
Organoclorados			
Aldrin	ug/l	0,004	0,7
Dieldrin	ug/l	0,006	7
DDT	ug/l	0,001	30
Endrin	ug/l	0,5	0,5
Endosulfan	ug/l	0,01	0,01
Endrin	ug/l	0,004	0,2
Heptacloro y heptacloro epóxido	ug/l	0,01	0,03
Lindano	ug/l	4	4
<b>CARBAMATO:</b>			
Aldicarb	ug/l	1	11
<b>POLICLORUROS BIFENILOS TOTALES</b>			
Policloruros Bifenilos Totales (PCB's)	ug/l	0,04	0,045
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS</b>			
Coliformes Totales (35-37°C)	NMPY100 ml	1 000	5 000
Coliformes Termotolerantes (44,5°C)	NMPY100 ml	1 000	1 000
Enterococos Intestinales	NMPY100 ml	20	20
Escherichia coli	NMPY100 ml	100	100
Huevos y larvas de helmintos	Huevo/L	<1	<1

(a) para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural)  
 (b) Después de Filtración Simple.

- \*\*: No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría.  
 - Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales salvo que se indique lo contrario.  
 - Δ 3: variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

CATEGORIA 4

PARÁMETRO	UNIDAD	CATEGORIA 4				
		E1: LAGUNAS Y LAGOS	E2: RÍOS COSTA Y SIERRA SELVA		E3: ECOSISTEMAS MARINO COSTERAS ESTUARIOS MARINOS	
<b>FÍSICOS - QUÍMICOS</b>						
Aceites y grasas (VEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Total	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero escala PtCo	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(uS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	5	10	10	15	10
Fósforo	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo Total	mg/L	0,035	0,25	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO <sub>3</sub> -)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoníaco	mg/L	1,9	1,9	1,9	0,4	0,56
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥5	≥5	≥5	≥4	≥4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	5,5-9,0	6,5-9,0	6,5-9,0	6,8-8,5	6,8-8,5
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤25	≤100	≤400	≤100	30

PARÁMETRO	UNIDAD	CATEGORIA 4				
		E1: LAGUNAS Y LAGOS	E2: RÍOS COSTA Y SIERRA SELVA		E3: ECOSISTEMAS MARINO COSTERAS ESTUARIOS MARINOS	
Sulfuro	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
<b>INORGÁNICOS</b>						
Artenolol	mg/L	0,81	1,6	0,61	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,008	0,008
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,002	0,002
Plomo	mg/L	0,025	0,025	0,025	0,001	0,001
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,008	0,008	**	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081
<b>ORGÁNICOS</b>						
<b>I. Compuestos Orgánicos Volátiles</b>						
<b>Hidrocarburos totales de petróleo</b>						
HTIP	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
<b>BTEX</b>						
Benceno	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Hidrocarburos Aromáticos</b>						
Benzo(a)pireno	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Antraceno	mg/L	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Fluoranteno	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>PLAGUICIDAS</b>						
<b>Organofosforados:</b>						
Malatión	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Parathión	mg/L	0,000013	0,000013	0,000013	**	**
<b>ORGANOCORADOS</b>						
Aldrin	mg/L	0,00004	0,00004	0,00004	**	**
Dieldrin	mg/L	0,000043	0,000043	0,000043	0,00004	0,00004
DDT (Suma de ΔΔ DDD y ΔΔDDE)	mg/L	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
Dieldrin	mg/L	0,000056	0,000056	0,000056	0,000019	0,000019
Endosulfan	mg/L	0,000056	0,000056	0,000056	0,000007	0,000007
Endrin	mg/L	0,000036	0,000036	0,000036	0,000023	0,000023
Heptacloro	mg/L	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036
Heptacloro epóxido	mg/L	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036
Lindano	mg/L	0,00005	0,00005	0,00005	**	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>CARBAMATO:</b>						
Aldicarb	mg/L	0,001	0,001	0,00015	0,00015	0,00015
<b>POLICLORUROS BIFENILOS TOTALES</b>						
(PCB's)	mg/L	0,000014	0,000014	0,000014	0,00003	0,00003
<b>MICROBIOLÓGICO</b>						
Coliformes Termotolerantes (44,5°C)	NMPY100 mL	1 000	2 000	2 000	1 000	2 000

(a) 100 (Para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural)  
 (b) Después de la filtración simple

- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales salvo que se indique lo contrario.  
 - \*\*: No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría.

NOTA GENERAL:

- Todos los parámetros que se norman para las diferentes categorías se encuentran en concentraciones totales, salvo se indique lo contrario  
 - Para el parámetro de Temperatura el símbolo Δ significa variación y se determinará considerando la media histórica de la información disponible en los últimos 05 años como máximo y de 01 año como mínimo, considerando la estacionalidad.  
 - Los reportes de laboratorio deberán contemplar como parte de sus informes de Ensayo los Límites de Cuantificación y el Límite de Detección.



**ANEXO III**

**ASTM - STANDARD TEST METHOD FOR SULFATE ION IN WATER D 516 – 02**



## Standard Test Method for Sulfate Ion in Water<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 516; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This turbidimetric test method covers the determination of sulfate in water in the range from 1 to 40 mg/L of sulfate ion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

1.2 This test method was used successfully with drinking, ground, and surface waters. It is the user's responsibility to ensure the validity of this test method for waters of untested matrices.

1.3 Former gravimetric and volumetric test methods have been discontinued. Refer to Appendix XI for historical information.

1.4 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 1066 Practice for Sampling Steam<sup>2</sup>

D 1129 Terminology Relating to Water<sup>2</sup>

D 1192 Specification for Equipment for Sampling Water and Steam in Closed Conduits<sup>2</sup>

D 1193 Specification for Reagent Water<sup>2</sup>

D 2777 Practice for Determination of Precision and Bias of Applicable Methods of Committee D-19 on Water<sup>2</sup>

D 3370 Practices for Sampling Water from Closed Conduits<sup>2</sup>

D 5847 Practice for Writing Quality Control Specifications for Standard Test Methods of Water Analysis<sup>3</sup>

E 60 Practice for Photometric and Spectrophotometric Methods for the Chemical Analysis of Metals<sup>4</sup>

E 275 Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet, Visible, and Near Infrared Spectrophotometers<sup>5</sup>

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D19 on Water and is the direct responsibility of Subcommittee D19.05 on Inorganic Constituents in Water.

Current edition approved Jan. 10, 2002. Published April 2002. Originally published as D 516 – 38 T. Last previous edition D 516 – 90 (95)<sup>1</sup>.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.02.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.05.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.06.

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology D 1129.

### 4. Summary of Test Method

4.1 Sulfate ion is converted to a barium sulfate suspension under controlled conditions. A solution containing glycerin and sodium chloride is added to stabilize the suspension and minimize interferences. The resulting turbidity is determined by a nephelometer, spectrophotometer, or photoelectric colorimeter and compared to a curve prepared from standard sulfate solutions.

### 5. Significance and Use

5.1 The determination of sulfate is important because it has been reported that when this ion is present in excess of about 250 mg/L in drinking water, it causes a cathartic action (especially in children) in the presence of sodium and magnesium, and gives a bad taste to the water.

### 6. Interferences

6.1 Insoluble suspended matter in the sample must be removed. Dark colors that can not be compensated for in the procedure interfere with the measurement of suspended barium sulfate ( $\text{BaSO}_4$ ).

6.2 Polyphosphates as low as 1 mg/L will inhibit barium sulfate precipitation causing a negative interference. Phosphonates present in low concentrations, depending on the type of phosphonate, will also cause a negative interference. Silica in excess of 500 mg/L may precipitate along with the barium sulfate causing a positive interference. Chloride in excess of 5000 mg/L will cause a negative interference. Aluminum, polymers, and large quantities of organic material present in the test sample may cause the barium sulfate to precipitate nonuniformly. In the presence of organic matter certain bacteria may reduce sulfate to sulfide. To minimize the action of sulfate reducing bacteria, samples should be refrigerated at 4°C when the presence of such bacteria is suspected.

6.3 Although other ions normally found in water do not appear to interfere, the formation of the barium sulfate suspension is very critical. Determinations that are in doubt may be checked by a gravimetric method in some cases, or by the procedure suggested in Note 2.

## 7. Apparatus

7.1 *Photometer*—One of the following which are given in order of preference.

7.1.1 Nephelometer or turbidimeter;

7.1.2 Spectrophotometer for use at 420 nm with light path of 4 to 5 cm;

7.1.3 Filter photometer with a violet filter having a maximum near 420 nm and a light path of 4 to 5 cm.

7.2 *Stopwatch*, if the magnetic stirrer is not equipped with an accurate timer.

7.3 *Measuring Spoon*, capacity 0.2 to 0.3 mL.

7.4 Filter photometers and photometric practices prescribed in this test method shall conform to Practice E 60; spectrophotometer practices shall conform to Practice E 275.

## 8. Reagents

8.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents shall conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society.<sup>6</sup> Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

8.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, reference to water shall be understood to mean reagent water conforming to Specification D 1193, Type I. Other reagent water types may be used provided it is first ascertained that the water is of sufficiently high purity to permit its use without adversely affecting the precision and bias of the test method. Type II water was specified at the time of round robin testing of this test method.

8.3 *Barium Chloride*—Crystals of barium chloride ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) screened to 20 to 30 mesh. To prepare in the laboratory, spread crystals over a large watch glass, desiccate for 24 h, screen to remove any crystals that are not 20 to 30 mesh, and store in a clean, dry jar.

8.4 *Conditioning Reagent*—Place 30 mL of concentrated hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19), 300 mL reagent water, 100 mL 95 % ethanol or isopropanol and 75 g sodium chloride (NaCl) in a container. Add 50 mL glycerol and mix.

8.5 *Sulfate Solution, Standard* (1 mL = 0.100 mg  $\text{SO}_4^{2-}$ )—Dissolve 0.1479 g of anhydrous sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) in water, and dilute with water to 1 L in a volumetric flask.

## 9. Sampling

9.1 Collect the sample in accordance with Practice D 1066, Specification D 1192, and Practices D 3370, as applicable.

## 10. Calibration

10.1 Follow the procedure given in Section 11, using appropriate amounts of the standard sulfate solution prepared in accordance with 8.5 and prepare a calibration curve showing

sulfate ion content in milligrams per litre plotted against the corresponding photometer readings (Note 1). Prepare standards by diluting with water 0.0, 2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, and 40.0 mL of standard sulfate solution to 100-mL volumes in volumetric flasks. These solutions will have sulfate ion concentrations of 0.0, 2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, and 40.0 mg/L (ppm), respectively.

Note 1—A separate calibration curve must be prepared for each photometer and a new curve must be prepared if it is necessary to change the cell, lamp, or filter, or if any other alterations of instrument or reagents are made. Check the curve with each series of tests by running two or more solutions of known sulfate concentrations.

## 11. Procedure

11.1 Filter the sample if it is turbid, and adjust the temperature to between 15 and 30°C.

11.2 Pipet into a 250-mL beaker 100 mL or less of the clear sample containing between 0.5 and 4 mg of sulfate ion (Note 2). Dilute to 100 mL with water if required, and add 5.0 mL of conditioning reagent (Note 1).

Note 2—The solubility of  $\text{BaSO}_4$  is such that difficulty may be experienced in the determination of sulfate concentrations below about 5 mg/L (ppm). This can be overcome by concentrating the sample or by adding 5 mL of standard sulfate solution (1 mL = 0.100 mg  $\text{SO}_4^{2-}$ ) to the sample before diluting to 100 mL. This will add 0.5 mg  $\text{SO}_4^{2-}$  to the sample, which must be subtracted from the final result.

11.3 Mix in the stirring apparatus.

11.4 While the solution is being stirred, add a measured spoonful of  $\text{BaCl}_2$  crystals (0.3 g) and begin timing immediately.

11.5 Stir exactly 1.0 min at constant speed.

Note 3—The stirring should be at a constant rate in all determinations. The use of a magnetic stirrer has been found satisfactory for this purpose.

11.6 Immediately after the stirring period has ended, pour solution into the cell and measure the turbidity at 30-s intervals for 4 min. Record the maximum reading obtained in the 4-min period.

11.7 If the sample contains color or turbidity, run a sample blank using the procedure 11.2 through 11.6 without the addition of the barium chloride.

11.8 If interferences are suspected, dilute the sample with an equal volume of water, and determine the sulfate concentration again. If the value so determined is one half that in the undiluted sample, interferences may be assumed to be absent.

## 12. Calculation

12.1 Convert the photometer readings obtained with the sample to milligrams per litre sulfate ion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) by use of the calibration curve described in Section 10.

## 13. Precision and Bias<sup>7</sup>

13.1 The precision and bias data presented in this test method meet the requirements of Practice D 2777 – 86.

13.2 The overall and single-operator precision of the test method, within its designated range, varies with the quantity

<sup>6</sup> *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Analar Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmaceutical Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

<sup>7</sup> Supporting data are available from ASTM. Request RR:D-19-1145.

being tested according to Table 1 for reagent water and Table 2 for drinking, ground, and surface waters.

13.2.1 Seven laboratories participated in the round robin at three levels in triplicate, making a total of 21 observations at each level for reagent water and for matrix water (drinking, ground, and surface water).

13.3 Recoveries of known amounts of sulfate from reagent water and drinking, ground, and surface waters are as shown in Table 3.

13.3.1 A table for estimating the bias of the test method through its applicable concentration range can be found in Table 4.

13.3.2 These collaborative test data were obtained on reagent grade water and natural waters. For other matrices, these data may not apply.

13.4 Precision and bias for this test method conforms to Practice D 2777-86, which was in place at the time of collaborative testing. Under the allowances made in 1.4 of D 2777-98, these precision and bias data do meet existing requirements for interlaboratory studies of Committee D19 test methods.

**14. Quality Control (QC)**

14.1 The following quality control information is recommended for the determination of sulfate ion in water.

14.1.1 The instrument should be calibrated using a minimum of four calibration standards and a calibration blank. The calibration correlation coefficient shall be equal to or greater than 0.990. In addition to the initial calibration blank, a calibration blank should be analyzed at the end of the batch run to ensure contamination was not a problem during the batch analysis.

14.1.2 An instrument check standard should be analyzed at a minimum frequency of 10 % throughout the batch analysis. The value of the instrument check standard should fall between 80 and 120 % of the true value.

14.1.3 Two method blanks should be prepared ensuring that an adequate method blank volume is present for a minimum of seven repetitive analysis. The standard deviation of the method

**TABLE 1 Overall ( $S_T$ ) and Single-Operator ( $S_O$ ) Standard Deviations Against Mean Concentration for Interlaboratory Recovery of Sulfate from Reagent Water<sup>A</sup>**

Mean Concentration ( $\bar{x}$ ), mg/L	Standard Deviation, mg/L	
	$S_T$	$S_O$
6.6	0.5	0.1
20.4	1.0	0.4
63.7	2.5	1.3

<sup>A</sup> The test method is linear to 40 mg/L. Testing at the 63.9 level was accomplished through dilution as described in 11.2.

**TABLE 2 Overall ( $S_T$ ) and Single-Operator ( $S_O$ ) Standard Deviations Against Mean Concentration for Interlaboratory Recovery of Sulfate from Drinking, Ground, and Surface Water<sup>A</sup>**

Mean Concentration ( $\bar{x}$ ), mg/L	Standard Deviation, mg/L	
	$S_T$	$S_O$
6.9	0.7	0.5
20.2	2.2	1.8
63.3	4.5	1.6

<sup>A</sup> The test method is linear to 40 mg/L. Testing at the 63.9 level was accomplished through dilution as described in 11.2.

**TABLE 3 Determination of Bias<sup>A</sup>**

	Amount Added, mg/L	Amount Found, mg/L	$\pm$ Bias	$\pm\%$ Bias	Statistically Significant
					at 5 % Level (at $\pm 0.05$ )
Reagent water	20.8	20.4	-0.4	-1.9 %	no
	63.9 <sup>A</sup>	63.7 <sup>A</sup>	-0.2	-0.2 %	no
	7.0	6.6	-0.4	-5.3 %	no
Drinking, ground and surface water	20.8	20.2	-0.6	-2.7 %	no
	63.9 <sup>A</sup>	63.3 <sup>A</sup>	-0.6	-0.9 %	no
	7.0	6.9	-0.1	-1.8 %	no

<sup>A</sup> The test method is linear to 40 mg/L. Testing at the 63.9 level was accomplished through dilution as described in 11.2.

**TABLE 4 Mean Sulfate Recovery Against Concentration Added with Overall Standard Deviation Shown for Interlaboratory Experimental Recovery of Sulfate from Reagent Water and Drinking, Ground, and Surface Water<sup>A</sup>**

Sulfate Added, mg/L	Mean Sulfate Recovery ( $\bar{x}$ ), mg/L	
	Reagent Water ( $S_T$ )	Matrix Water ( $S_O$ )
7.0	6.6 (0.5)	6.9 (0.7)
20.8	20.4 (1.0)	20.2 (2.2)
63.9	63.7 (2.5)	63.3 (4.5)

<sup>A</sup>The test method is linear to 40 mg/L. Testing at the 63.9 level was accomplished through dilution as described in 11.2.

blank is used to determine the minimum detectable concentration of each sample and control in the batch.

14.1.4 A Laboratory Control Sample should be analyzed with each batch of samples at a minimum frequency of 10 %.

14.1.5 If the QC for the sample batch is not within the established control limits, reanalyze the samples or qualify the results with the appropriate flags, or both. (See Practice D 5847.)

14.1.6 Blind control samples should be submitted by an outside agency in order to determine the laboratory performance capabilities.

**15. Keywords**

15.1 drinking water; ground water; sulfate; surface water; turbidimetric

## APPENDIX

(Nonmandatory Information)

## X1. RATIONALE FOR DISCONTINUATION OF METHODS

X1.1 *Gravimetric:*

X1.1.1 This test method was discontinued in 1988. The test method may be found in the *1988 Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01. The test method was originally issued in 1938.

X1.1.2 This test method covers the determination of sulfate in water and wastewater. Samples containing from 20 to 100 mg/L of sulfate may be analyzed.

X1.1.3 Sulfate is precipitated and weighted as barium sulfate after removal of silica and other insoluble matter.

X1.1.4 This test method was discontinued because there were insufficient laboratories interested in participating in another collaborative study to obtain the necessary precision and bias as required by Practice D 2777.

X1.2 *Volumetric:*

X1.2.1 This test method was discontinued in 1988. The test method may be found in the *1988 Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01. The test method was originally issued in 1959 as a non-referee method, and made the primary method in the 1980 issue of Test Method D 516.

X1.2.2 This test method covers the determination of sulfate in industrial water. Samples containing from 5 to 1000 mg/L of sulfate may be analyzed.

X1.2.3 Sulfate is titrated in an alcoholic solution under controlled acid conditions with a standard barium chloride solution using thorin as the indicator.

X1.2.4 This test method was discontinued because there were insufficient laboratories interested in participating in another collaborative study to obtain the necessary precision and bias as required by Practice D 2777.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*

## ANEXO IV

### DETERMINACIÓN DE DOSIS INICIAL DE CAL

Se trabajó con cantidades de 300 ml de muestra de agua de relaves debido a que solo se contaba con 20 litros de muestra en total, calculamos la cantidad inicial de cal necesaria para la reducción de sulfatos para 300 ml de muestra con una concentración inicial de sulfatos de 1600 ppm y concentración de lechada de cal de 5 g/l.

$$m_{CaO} = 1.6 \frac{gSO_4^{-2}}{L} \times \frac{74 g Ca(OH)_2}{96 gSO_4^{-2}} \times \frac{56 gCaO}{74 g Ca(OH)_2} \times \frac{100}{80} \times 0.3L$$
$$= 0.35 gCaO$$

Como no se conoce la eficiencia del tratamiento con lechada de cal, agregamos en exceso cal siendo 0.70 g, calculamos el volumen de lechada de cal a una concentración de 5 g/l.

$$V_{Lechada de cal} = \frac{0.70 g}{5 g/l} = 140 ml$$

Se trabajó con 150 ml de lechada de cal con una concentración de 5 g/l inicialmente, pero en la tabla 5.1 se observa que no se reduce los sulfatos hasta los valores deseados, es por eso que se siguió trabajando con el mismo volumen pero con concentraciones más altas.

## ANEXO V

### ANÁLISIS DE SULFATOS POR ESPECTROFOTOMETRIA

1. Preparamos estándares de calibración para construir nuestra curva patrón en la cual relacionaremos las absorbancias con la concentración de sulfatos, esto nos servirá para determinar el contenido de sulfatos en nuestras muestras.
2. Preparamos en una fiola de un litro, una solución de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) de 2000 ppm. El peso de sulfato de sodio necesario lo calculamos mediante el método de coeficientes estequiométricos.

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 2000 \frac{\text{mgSO}_4^{-2}}{\text{L}} \times 1\text{L} \times \frac{1\text{gSO}_4^{-2}}{1000\text{mgSO}_4^{-2}} \times \frac{142.04 \text{gNa}_2\text{SO}_4}{96 \text{gSO}_4^{-2}}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 2.96 \text{gNa}_2\text{SO}_4$$

Pesamos 2.96 gramos de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y lo diluimos con agua destilada en una fiola de 1 L.

3. Preparamos 50 ml de estándares de 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600 y 1800 a partir del estándar de 2000 ppm, mediante la siguiente ecuación de dilución:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

$C_1$ : Concentración de la solución a diluir.

$V_1$ : Volumen que se tomará de la solución a diluir.

$C_2$ : Concentración que se quiere obtener.

$V_2$ : Volumen de la concentración que se quiere obtener.

Calculamos el volumen a tomar del estándar de 2000 ppm para preparar 50 ml del estándar de 600 ppm.

$$2000 \times V_1 = 600 \times 50$$

$$V_1 = 15 \text{ ml}$$

Calculamos para los demás estándares, obteniendo la siguiente tabla:

Estándar (ppm)	V <sub>1</sub> (ml)
600	15
700	17.5
800	20
900	22.5
1000	25
1200	30
1400	35
1600	40
1800	45
2000	---

Entonces tomamos los volúmenes V<sub>1</sub> y los diluimos en fioas de 50 ml.

- Preparamos 1 litro de cloruro de bario (BaCl<sub>2</sub>) al 5% p/v, comercialmente lo que venden es cloruro de bario dihidratado (BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O), entonces calculamos el peso de cloruro de bario necesario a partir del cloruro de bario dihidratado y lo calculamos mediante el método de coeficientes estequiométricos.

$$m_{\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = \frac{5 \text{ gBaCl}_2}{100 \text{ ml}} \times 1\text{L} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \times \frac{244.23 \text{ gBaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}{208.23 \text{ gBaCl}_2}$$

$$m_{\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = 58.64 \text{ gBaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

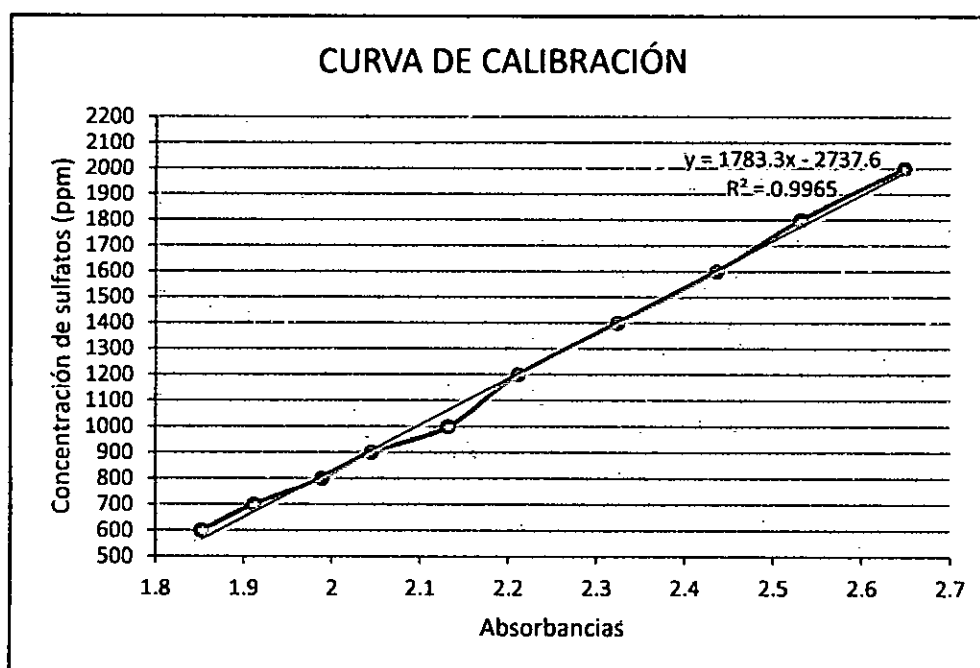
Pesamos 58.64 g de cloruro de bario dihidratado y lo diluimos con agua destilada en una fiola de 1 L.



5. Preparamos la solución acondicionadora que nos ayudará para que el precipitado de sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) formado al agregar cloruro de bario a los estándares de sulfatos de sodio y a las muestras antes de leerlo en el espectrofotómetro no precipiten y se mantengan en suspensión, lo cual consiste en mezclar lo siguiente y en ese orden:
- 300 ml de agua destilada.
  - 30 ml de ácido clorhídrico.
  - 100 ml de etanol.
  - 75 g de cloruro de sodio.
  - 50 ml de glicerina.
6. Ajustamos el espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm (rango de luz visible), preparamos los estándares en un tubo de ensayo tomando 10 ml de muestra más 1 ml de solución acondicionadora y más 5 ml de  $\text{BaCl}_2$ . Se llena la celda del espectrofotómetro con un blanco (agua destilada más 1 ml de solución acondicionadora y más 5 ml de  $\text{BaCl}_2$ ) para ponerlo en cero y luego procedemos a la lectura de nuestros estándares obteniendo los siguientes datos:

Absorbancia	Patrón (ppm)
1.852	600
1.912	700
1.989	800
2.045	900
2.132	1000
2.211	1200
2.324	1400
2.436	1600
2.531	1800
2.648	2000

Obteniendo la siguiente curva de calibración:



7. Procedemos a leer las absorbancias de nuestras 40 muestras obteniendo los datos en la siguiente tabla:

Tiempo (min)	Concentración de Cal (g/l)			
	5	10	15	20
	Absorbancias			
0	2.432	2.432	2.432	2.432
2	2.390	2.376	2.348	2.334
4	2.334	2.306	2.278	2.264
6	2.292	2.264	2.222	2.208
8	2.264	2.236	2.152	2.124
10	2.236	2.194	2.110	2.082
12	2.194	2.152	2.068	2.040
14	2.166	2.110	2.040	2.012
16	2.152	2.096	2.026	1.984
18	2.152	2.082	2.026	1.984
20	2.152	2.082	2.026	1.984

8. Finalmente con las absorbancias obtenidas, podemos relacionarlos con la curva de calibración para obtener la concentración de sulfatos en nuestras muestras, los datos lo encontramos en la tabla 5.4.

## ANEXO VI

### DETERMINACIÓN DE % DE SÓLIDOS EN LA DETERMINACIÓN DE DOSIS ADECUADA DE COAGULANTE

1. Como se hizo en el punto 5.b., relacionamos el % de sólidos formados según cada adición (10 ml) de coagulante. Para esto luego de los 30 minutos de reposo, se procedió a medir el volumen que ocupaba los sólidos en el probeta y se comparó con el volumen total de 450 ml para poder determinar el porcentaje de sólidos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{\text{Volumen de sólidos}}{\text{Volumen total}} \times 100$$

2. Calculamos el % de sólidos para cada adición de coagulante, midiendo el volumen de sólidos formados en la probeta.

Anotamos los volúmenes en la siguiente tabla:

ADICIÓN DE FeCl <sub>3</sub> (ml)	VOLUMEN DE SÓLIDOS (ml)
10	25
20	40
30	50
40	55
50	60
60	60

Para la adición de 10 ml de coagulante, sería:

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{25}{450} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos} = 6\%$$

Calculamos para todos los volúmenes de sólidos, obteniendo la tabla 5.3.

## ANEXO VII

### DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE CINÉTICA, ORDEN DE REACCIÓN Y CONVERSIÓN EN LA REDUCCIÓN DE SULFATOS CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LECHADA DE CAL

#### 1. Determinación del orden de reacción y constante cinética

Para la determinación de estos parámetros utilizamos las siguientes ecuaciones de velocidad de reacción desarrollados para orden 0, 1 y 2 respectivamente:

$$C_A = -kt + C_{A0}$$

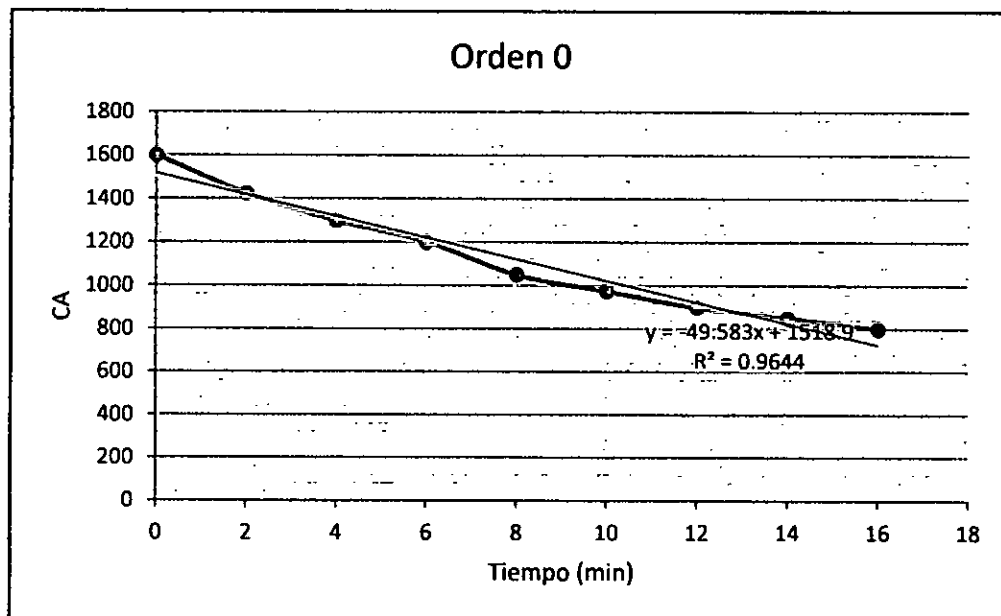
$$\ln(C_A) = -kt + \ln(C_{A0})$$

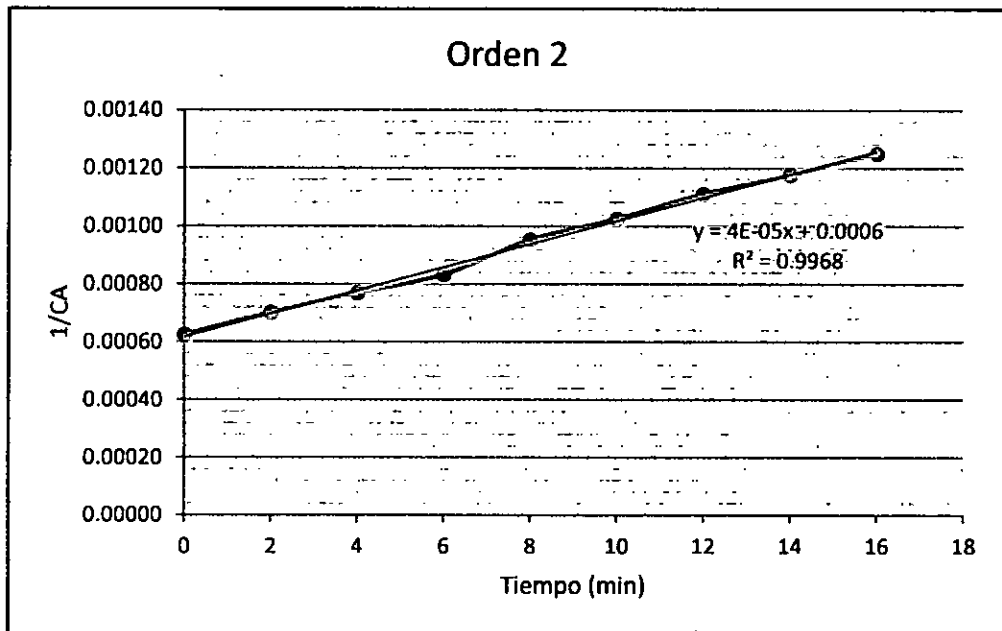
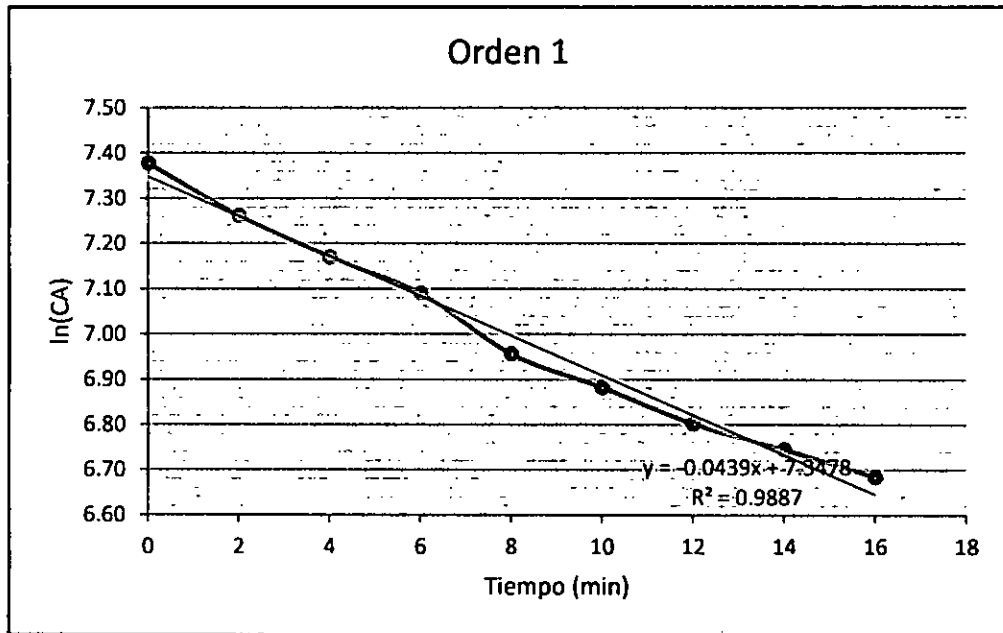
$$\frac{1}{C_A} = kt + \frac{1}{C_{A0}}$$

Siendo  $C_A$  y  $C_{A0}$  la concentración de sulfato final y la concentración de sulfato inicial respectivamente. Elaboramos la siguiente tabla con respecto a los datos de la tabla 5.4 con concentración de lechada de cal de 20 g/l debido a que en la tabla 5.1 muestra mayor reducción de sulfatos:

Tiempo (min)	C <sub>A</sub>	ln(C <sub>A</sub> )	1/C <sub>A</sub>
0	1600	7.38	0.00063
2	1425	7.26	0.00070
4	1300	7.17	0.00077
6	1200	7.09	0.00083
8	1050	6.96	0.00095
10	975	6.88	0.00103
12	900	6.80	0.00111
14	850	6.75	0.00118
16	800	6.68	0.00125

Elaboramos graficas relacionando el tiempo con C<sub>A</sub>, ln(C<sub>A</sub>), 1/ C<sub>A</sub>.





Se concluye el que el orden de la reacción es 2 debido a que presenta mayor índice de correlación



## 2. Cálculo de la conversión

Para calcular la conversión ( $X_A$ ) en la reducción de sulfatos en distintos tiempos y luego de reaccionar con diferentes concentraciones de lechada de cal, utilizamos la siguiente ecuación:

$$X_A = \frac{C_{\text{sulfato inicial}} - C_{\text{sulfato final}}}{C_{\text{sulfato inicial}}}$$

De la tabla 5.4, para la muestra que ha reaccionado por 2 minutos con lechada de cal con una concentración de 5 g/l, calculamos el porcentaje de reducción de sulfatos.

$$X_A = \frac{1600 - 1525}{1600}$$

$$X_A = 0.047$$

Para la muestra que ha reaccionado por 4 minutos con lechada de cal con una concentración de 5 g/l, calculamos el porcentaje de reducción de sulfatos.

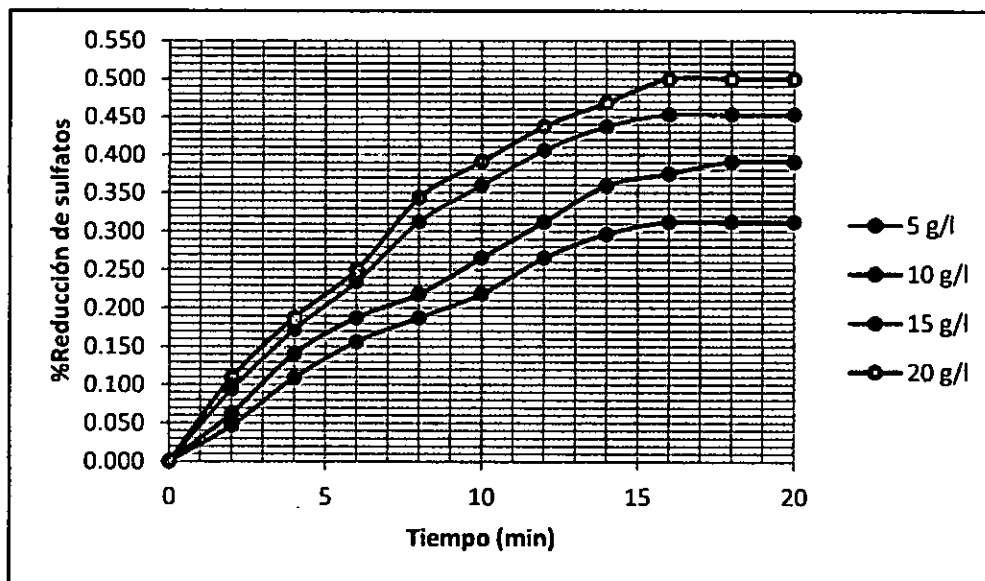
$$X_A = \frac{1600 - 1425}{1600}$$

$$X_A = 0.109$$

Hacemos el mismo cálculo para todos los datos de la tabla 5.4 y obtenemos la siguiente tabla.

Tiempo (minutos)	Concentración de lechada de cal (g/l)			
	5	10	15	20
	%Reducción de Sulfatos			
0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.047	0.063	0.094	0.109
4	0.109	0.141	0.172	0.188
6	0.156	0.188	0.234	0.250
8	0.188	0.219	0.313	0.344
10	0.219	0.266	0.359	0.391
12	0.266	0.313	0.406	0.438
14	0.297	0.359	0.438	0.469
16	0.313	0.375	0.453	0.500
18	0.313	0.391	0.453	0.500
20	0.313	0.391	0.453	0.500

Con los datos de la tabla realizamos la siguiente gráfica:



## ANEXO VIII

### CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL REACTOR PARA LA REDUCCIÓN DE SULFATOS

De la tabla 5.4 podemos observar que el equilibrio se alcanza alrededor de 16 minutos, además se pretende tratar 140 l/s (8.4 m<sup>3</sup>/min) de agua de relaves, para determinar el volumen del reactor utilizamos la ecuación correspondiente al diseño para reactor batch. Entonces el volumen del reactor lo calculamos con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{v}{v_0}$$

$$v = \tau \times v_0$$

$$v = 16 \times 8.4 = 134.4 \text{ m}^3$$

Para fines prácticos sobredimensionamos el volumen teórico del reactor en un 20%, quedando el volumen finalmente el volumen 161.3 m<sup>3</sup>.