

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA DETOXIFICACIÓN DE EFLUENTES  
MINEROS CIANURADOS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

**AUTORES**

KATHERINE MILUSHKA, ARONI LOZADA

YESENIA SABID, MORALES ROCA

**ASESOR**

Dr. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2023

PERÚ



## **PRÓLOGO DEL JURADO**

La presente Tesis fue sustentada por MORALES ROCA YESENIA SABID y ARONI LOZADA KATHERINE MILUSHKA, Bachilleres de ingeniería química ante el Jurado de Sustentación de Tesis conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

ING° PABLO BELIZARIO DÍAZ BRAVO Presidente

ING° MACHACA GONZALES LEONARDO FELIX Secretario

Lic° SANTOS PANTALEÓN R ODRÍGUEZ CHUQUIMANGO Vocal

ING° LUIS AMERICO CARRASCO VENEGAS Asesor

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 1 Folio N° 115 y Acta N° 114 de fecha 29 de abril del 2023, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099–2021–CU del 30 de junio de 2021

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** Ingeniería Química

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** De la Facultad Ingeniería Química

**TÍTULO:** “Condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados”

### **AUTORES**

Katherine Miluskha Aroni Lozada / Código ORCID 0000-0002-8797-4339/ DNI: 75723321

Yesenia Sabid Morales Roca / Código ORCID 0000-0001-8493-0667/ DNI: 74689128)

### **ASESOR**

Dr. Luis Americo Carrasco Venegas/ Código ORCID 0000-0002-7832-3366 / DNI: 25825871

### **LUGAR DE EJECUCIÓN**

Laboratorio de la unidad minera Ares, ubicado en Orcopampa, en la provincia de Castilla, departamento Arequipa.

### **UNIDAD DE ANÁLISIS**

Efluente de la unidad minera Ares

### **TIPO/ ENFOQUE /DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

Aplicada/ Cuantitativo / Experimental

**TEMA OCDE:** 2.4.2 Ingeniería de procesos

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

### Miembros del jurado

Mg. Díaz Bravo Pablo Belizario	Presidente
Mg. Machaca Gonzales Leonardo Felix	Secretario
Mg. Rodríguez Chuquimango Santos Pantaleon	Vocal
Dr. Trujillo Pérez Salvador Apolinar	Suplente
Dr. Luis Americo Carrasco Venegas	Asesor

Libro de actas N° 1      Acta N° 114      Folio N° 115

Fecha de aprobación de la tesis: 29 de abril del 2023

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este gran esfuerzo a Dios por guiar siempre nuestros pasos, en las alegrías y grandes batallas.

A nuestra familia que ha sido el motor y la motivación constante para seguir desarrollándonos constantemente en este gran reto que es la vida.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1. Descripción de la realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema	9
1.2.1. Problema general	9
1.2.2. Problemas específicos	10
1.3. Objetivos de la investigación	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación	10
1.5. Delimitantes de la investigación	11
1.5.1. Teórico	11
1.5.2. Temporal	11
1.5.2. Espacial	11
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Antecedentes: Internacionales y nacionales	12
2.1.1. Antecedentes internacionales	12
2.1.2. Antecedentes nacionales	12
2.2 Bases teórica	14
2.3 Marco Conceptual	24
2.4 Definición de términos básicos	27
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	29
3.1. Hipótesis	29
3.1.1. Operacionalización de variable	29
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	31

4.1	Diseño metodológico	31
4.2	Método de investigación	32
4.3	Población y muestra	35
4.4	Lugar de estudio y periodo de desarrollo	35
4.5	Técnicas e instrumentos para recolección de la información	35
4.6	Análisis y procesamiento de datos	38
4.7	Aspectos éticos en investigación	38
V.	RESULTADOS	39
5.1	Resultados descriptivos	39
5.2	Resultados inferenciales	44
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	48
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	49
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	49
VII.	CONCLUSIONES	50
VIII.	RECOMENDACIONES	51
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	ANEXO	56
	Anexo 1: Matriz de consistencia	56
	Anexo 2: Prueba de jarras 1,2 y 3	58
	Anexo 2: Prueba de jarras 4,5 y 6	58
	Anexo 3: Prueba de jarras 7,8 y 9	58
	Anexo 4: Comportamiento del cianuro total, libre y cobre a diferentes pH	59
	Anexo 5: Concentración del cianuro total a pH 7	60
	Anexo 6: Concentración del cianuro total a pH 9	60
	Anexo 7: Concentración del cianuro total a pH 11	61

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variable	30
Tabla 2 Factores y niveles de experimentación	31
Tabla 3 Diseño experimental	32
Tabla 4 Características fisicoquímicas del efluente	39
Tabla 5 Datos de parámetros iniciales	39
Tabla 6 Concentraciones finales de cianuro libre, cianuro total y metales	40
Tabla 7 Porcentaje de remoción	40
Tabla 8 Concentración de cianuro libre y total vs Tiempo	42
Tabla 9 Información del factor	44
Tabla 10 Análisis de Varianza	45
Tabla 11 Resumen del modelo	45

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de la reacción A→B	23
Figura 2 Conservación del ambiente acuático	27
Figura 3 Diagrama de proceso	33
Figura 4 Prueba de test de jarras de la prueba 7, 8 y 9	34
Figura 5 Control de pH	34
Figura 6 Muestras finales a las diferentes dosificaciones	35
Figura 7 Test de jarras	36
Figura 8 Analizador de CN FS 3700	36
Figura 9 Analizador de CN FS 3100	37
Figura 10 Porcentaje de remoción a 100 ppm de peróxido de hidrógeno	41
Figura 11 Porcentaje de remoción a 150 ppm de peróxido de hidrógeno	41
Figura 12 Porcentaje de remoción a 250 ppm de peróxido de hidrógeno	42
Figura 13 Degradación de cianuro total y cianuro libre	43
Figura 14 Cinética de reacción de segundo orden	44
Figura 15 Diagrama de Pareto	46
Figura 16 Gráfica de resultados factoriales para remoción de cianuro libre	47

# ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**ANA:** Autoridad Nacional del Agua

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**CAG:** Carbón activado granulado

**CN:** Cianuro

**CNT:** Cianuro total

**DOE:** Diseño de experimentos

**DS:** Decreto supremo

**ECA:** Estándares de Calidad Ambiental

**ICP:** Espectrómetro de Plasma Inducido

**INCO:** The International Nickel Company's

**MEM:** Ministerio de Energía y Minas

**MINAM:** Ministerio del Ambiente

**RPM:** Revoluciones por minuto

**TSS:** Sólidos totales suspendidos

**TULSMA:** Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

**GL:** Grados de libertad

**SC:** Suma cuadrados

**MC:** Cuadrados medios

**F:** Factor de Fisher

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados, provenientes del proceso de lixiviación de oro y así evitar los impactos negativos en la salud y al ambiente.

Se utilizó los métodos por oxidación química con peróxido de hidrógeno y proceso INCO (metabisulfito de sodio) para la detoxificación de los efluentes mineros cianurados evaluando el efecto de remoción de cianuro libre. Inicialmente se realizó una caracterización fisicoquímica al efluente (pH, temperatura, TSS, cianuro libre, cianuro total, Cu, Fe, Zn, Pb y As), para la etapa de oxidación con peróxido de hidrógeno se usó dosificaciones entre 100-250 ppm y para el metabisulfito de sodio entre 100-200 ppm. Todas las pruebas se realizaron a pH > 9, con revoluciones de 200 rpm a tiempo de reacción de 2h. Los resultados de las condiciones óptimas fueron de 150 ppm de peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio, con reacción de segundo orden y una constante de velocidad igual a  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  obteniendo un porcentaje de reducción de cianuro libre de 99.84% y valor final de cianuro libre de 0.020 ppm cumpliendo los estándares de la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM. Se evaluaron los resultados utilizando el método factorial observando que la interacción de peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio tiene influencia en la reducción de cianuro.

**Palabras claves:** Cianuro, peróxido de hidrógeno, metabisulfito de sodio y proceso de detoxificación.

## ABSTRACT

The objective of this research work was to determine the optimal conditions for the detoxification of cyanide mining effluents from the gold leaching process and thus avoid negative impacts on health and the environment.

The methods for chemical oxidation with hydrogen peroxide and the INCO process (sodium metabisulfite) were used for the detoxification of cyanide mining effluents, evaluating the effect of free cyanide removal. Initially, a physicochemical characterization of the effluent was carried out (pH, temperature, TSS, free cyanide, total cyanide, Cu, Fe, Zn, Pb and As), for the oxidation stage with hydrogen peroxide dosages between 100-250 ppm and for sodium metabisulfite between 100-200 ppm. All the tests were carried out at pH > 9, with revolutions of 200 rpm at a reaction time of 2h. The results of the optimal conditions were 150 ppm of hydrogen peroxide and 150 ppm of sodium metabisulfite, with a second order reaction and a rate constant equal to  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , obtaining a percentage of cyanide reduction. free of 99.84% and final value of free cyanide of 0.020 ppm, complying with the standards of the ECA 4 regulations of DS 002-2008 MINAM. The results were evaluated using the factorial method, noting that the interaction of hydrogen peroxide and sodium metabisulfite has an influence on cyanide reduction.

**Keywords:** Cyanide, hydrogen peroxide, sodium metabisulfite detoxification process.

## INTRODUCCIÓN

La minería del oro, a través de los siglos, ha formado parte de la historia y del desarrollo económico de muchos países a nivel mundial. De todos los procesos de obtención y purificación que se pusieron en marcha, el método de lixiviación cianurada es el que ha resultado ser más eficaz [1].

La lixiviación cianurada implica la utilización de compuestos cianurados y la generación de subproductos que tiene un impacto negativo tanto para el medioambiente como para el ser humano, el alto porcentaje de extracción de metales preciosos hace que sea es el principal proceso químico usado para extraer oro, plata, cobre y zinc de minerales que los contienen en baja concentración, siendo actualmente el procedimiento más utilizado para el beneficio de oro a nivel mundial por su bajo costo y alto rendimiento [2].

En el Perú se han registrado diversos casos de contaminación con cianuro, en Puno donde se reportó el colapso de varias pozas de cianuración como producto de las intensas lluvias, que llegaron hasta las piscigranjas produciendo la muerte de truchas. A pesar de los problemas ambientales que presenta el uso del cianuro y de la gran cantidad de investigaciones sobre otros procesos de disolución menos contaminantes, actualmente, se sigue utilizando ampliamente debido a su bajo costo y a su simplicidad [3].

Es importante para la población, flora y fauna aledañas a la explotación minera desarrollar procesos para remover el cianuro de sus relaves. Con este objetivo se han utilizado muchos métodos, la mayoría de ellos involucran la oxidación química, cloración alcalina, la oxidación con peróxido de hidrógeno catalizada con cobre, la ozonización, la adsorción sobre carbón activado impregnado con metales y la degradación biológica [4].

La combinación de estos métodos de detoxificación trabajada bajo los parámetros adecuados reduciría la presencia de cianuro; por ello el objetivo de esta investigación es determinar las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados, la cual fue realizada en el laboratorio de la minera Ares.

# I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

El cianuro es un producto químico ampliamente utilizado por la industria minera para la disolución o lixiviación de metales preciosos, específicamente el oro. Su alto grado de toxicidad lo convierte en un compuesto de gran peligrosidad si no es manipulado de manera adecuada, pudiendo originar considerables problemas ambientales. La toxicidad depende de que el cianuro se encuentre en forma libre (gas o líquido) o compleja (acuosa o sólida). Este compuesto puede ser inhalado (gas), ingerido (líquido o sólido) o absorbido por contacto dérmico. La intoxicación aguda en el ser humano resulta en convulsiones, vómitos, coma y la muerte [1].

Asimismo, el cianuro es esencial para el mundo minero moderno y en especial para nuestro país, por ser eficaz en la utilización de los procesos de obtención de oro y plata, menos costoso y seguro desde el punto de vista de la salud humana y ambiental, además que a la fecha no existe otra tecnología que sustituya su uso. La clave para su uso eficiente es la implementación de sólidas prácticas de manejo y la adecuada aplicación del marco normativo que regula el control, manipulación, transporte y utilización del cianuro en la actividad minera [6].

La Compañía Minera Ares usaba este método para la extracción de oro cuando la planta estaba en operación. En este trabajo buscamos un método para tratar las aguas cianuradas en la presa que se ha producido durante todos los años que se extrajo oro utilizando métodos combinados de detoxificación bajo los parámetros adecuados reducirían la presencia de cianuro

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

¿Cuáles son las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿Cuál es la dosificación óptima de reactivos en el tratamiento de efluentes mineros cianurados?

¿Cuál es el orden de reacción y el valor de la constante de velocidad de la degradación de cianuro para la dosificación óptima?

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

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Determinar la dosificación óptima de reactivos en el tratamiento de efluentes mineros cianurados.

Determinar el orden de reacción y el valor de la constante de velocidad de la degradación de cianuro para la dosificación óptima.

### **1.4. Justificación**

El plan de cierre de la unidad minera Ares contiene las medidas correctivas y las de mitigación para evitar y/o reducir los impactos negativos potenciales a la salud y al ambiente dentro del área de influencia de las actividades mineras a fin de rehabilitar las áreas utilizadas o perturbadas por la actividad minera, para que éstas alcancen características de ecosistema compatible con un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida y la conservación del paisaje.

La aplicación de este proceso combinado de detoxificación tiene como fin el obtener los menores residuales nocivos para el medio ambiente y de esta manera cumplir con lo establecido en el plan de cierre de la unidad. El tratamiento de los efluentes cianurados acumulados en la presa de relave de la Unidad Minera Ares busca descargar a los cuerpos receptores cumpliendo los estándares de la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM.

## **1.5. Delimitantes de la investigación (teórico, temporal y espacial)**

### **1.5.1. Teórico**

La presente investigación se enmarcó dentro de la teoría de tratamiento de agua residuales, específicamente efluentes mineros cianurados mediante procesos químicos para que cumpla con las exigencias de los ECA 4 del DS 002-2008 MINAM.

Para la toma de la muestra se utilizó el protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos Naturales de Agua Superficial” N° 010-2016-ANA

### **1.5.2. Temporal**

El proyecto de investigación se inició en noviembre del 2022 y concluyó en marzo del 2023, sin embargo, la combinación de procesos de detoxificación resultante de esta investigación puede ser aplicada en cualquier época del año donde las características del efluente minero coincidan a las consideradas en esta investigación.

### **1.5.3. Espacial**

El efluente minero corresponde a la represa de la planta de la Unidad Minera Ares, ubicada en Orcopampa, en la provincia de Castilla, departamento Arequipa (Coordenadas UTM N 8335758; E 803954). La investigación fue realizada en las instalaciones de la unidad minera.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes: Internacional y nacional

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación “Reducción de cianuro de agua residual proveniente de una empresa metalúrgica por tratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno” evaluaron el tratamiento oxidativo utilizando el peróxido de hidrógeno al 50%. A nivel de laboratorio, obtuvieron la relación oxidante/cianuro 6:1, alcanzando una concentración final en cianuro total por debajo de 1mg/l, valor máximo que la normativa ambiental ecuatoriana vigente TULSMA 2015 [5].

En el trabajo de investigación denominado “Diseño de una planta industrial para el tratamiento de efluentes cianurados mediante la combinación de ozono con peróxido de hidrógeno” los autores evaluaron el tratamiento de la combinación de ozono con peróxido de hidrógeno mediante etapas de acondicionamiento de pH, tratamiento químico y un sistema post tratamiento teniendo como resultado un porcentaje de remoción de cianuro total del 99,99 %, en un tiempo estimado de 21,83 h [6].

En el trabajo de investigación denominado “Estudio de la detoxificación de efluentes cianurados por oxidación con dióxido de azufre, aire y catalizadores de cobre” estudiaron la influencia del pH, la dosificación de (fuente de S) y las concentraciones de los diferentes catalizadores. Los efluentes industriales fueron detoxificados utilizando 5 g/L CAG impregnado con Cobre. Llegaron a la conclusión que estos efluentes, con concentraciones iniciales de 432.50 mg/L y 112.50 mg/L de cianuro total alcanzaron 0.06 mg/L cianuro total en 90 min y 0.05 mg/L cianuro total en 40 min, respectivamente [7].

En el trabajo de investigación “Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina” los estudios realizados estuvieron enfocados hacia la búsqueda de un método alternativo para la eliminación del complejo cianurado de cobre presente en el agua de mina. Evalúan la

eliminación de cianuro de cobre presente en las aguas de mina mediante la oxidación con permanganato potásico resultando ser un método económico y eficaz, ya que permite alcanzar niveles muy elevados de eliminación de dicho contaminante. Han encontrado que a partir de relaciones de detoxificación en peso de permanganato a cianuro de 5 a 1, se alcanzan reducciones del 95%, lo que permite obtener un agua apta bien para recircular a planta o bien para envío a cauce público tras una dilución que permita el descenso del pH. Demostraron que el proceso debe realizarse a valores de pH fuertemente básicos, del orden de 12, consiguiendo esta alcalinidad mediante el empleo de lechada de cal, que favorecerá, además, la coagulación del precipitado formado [1].

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En el trabajo de investigación denominado “Implementación del método de destrucción de cianuro con oxidación avanzada en el tratamiento de efluentes de la planta minera Irlsa – unidad Corihuarmi” oxidaron al cianuro libre y cianuro wad usando peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre penta hidratado como catalizador. Las muestras fueron sometidas a 3 tratamientos variando la cantidad añadida de peróxido de hidrógeno y manteniendo la dosificación de sulfato de cobre penta hidratado y también el pH obteniendo una máxima remoción de 92% a un pH 11.6, 10 ml de peróxido de hidrógeno y 4 ml sulfato de cobre pentahidratado cumpliendo los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas [8].

En el trabajo de investigación “Determinación del tiempo de agitación y volumen óptimo del peróxido de hidrógeno en la degradación del efluente cianurado de la planta de tratamiento de aguas de la empresa consorcio minero horizonte” el autor determinó el tiempo de agitación y el volumen óptimo de solución de peróxido de oxígeno al 50 % que se requiere para la eficiente degradación de sus efluentes cianurados. Los resultados obtenidos demostraron que el mejor tiempo de agitación es 225 minutos, y mediante un análisis estadístico determinaron el volumen óptimo de peróxido de oxígeno al 50 % siendo este de 2.0 mL, pues se obtiene una degradación del efluente cianurado en 85.94 %;

asimismo, gracias a estos datos, Consorcio Minero Horizonte obtuvo el 9.78% menos en costos de detoxificación por  $m^3$  [9].

En el trabajo de investigación “Efecto del pH y dosis de hipoclorito de calcio, en la degradación oxidativa de efluentes líquidos cianurados y su aplicación en la remoción de metales pesados” obtuvieron como resultados de las pruebas realizadas para detoxificar una cantidad de 43.5 ppm de cianuro total que la relaciones óptimas del porcentaje en exceso estequiométrico de hipoclorito de calcio fue de 280% o su equivalente de 649 ppm en base húmeda como agente oxidante, la concentración de cloruro férrico se estableció en 50 ppm en base seca, sulfhidrato de sodio en 30ppm base húmeda y un pH >11, logrando un buen rendimiento en la degradación oxidativa del cianuro muy cercana al 100%. Se logró llegar a una concentración de 0,011 ppm de cianuro total, en cianuro wad se logró una concentración de < 0,001ppm y en metales pesados como el Cu de 0,125ppm, Hg de 0,7ppb, Fe de 0,521ppm, Pb de 0,008ppm, Zn de 0,007ppm, Mn de 0,0011ppm y As de 0,011ppm cumpliendo con los límites máximos permisibles [10].

En el trabajo de investigación “Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el método INCO en efluentes mineros” propusieron como alternativa el método INCO que utiliza al dióxido de azufre ( $SO_2$ ) en presencia de aire como oxidante requiriéndose un medio básico para reducir significativamente el cianuro libre y cianuro wad, el cual es complementado con una etapa de separación de los precipitados. El uso de este método garantizó la destrucción del cianuro libre y cianuro wad a valores por debajo de los límites máximos permisibles de acuerdo a la legislación peruana, además que este método tiene una velocidad de reacción mayor por lo cual se puede aumentar el flujo de solución a tratar, disminuyendo así los costos de detoxificación por volumen de solución tratada [3].

## **2.2 Bases teórica**

### **2.2.1. Cianuro**

El cianuro es un anión que se caracteriza por ser un grupo químico formada por el enlace triple de carbono-nitrógeno ( $-C\equiv N$ ) se combina con una gran mayoría

de compuestos orgánicos e inorgánicos. Es venenoso, que actúa rápidamente sobre el sistema respiratorio. Básicamente, el cianuro se presenta como cianuro de hidrógeno (HCN), que es un gas, o en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN) [11].

El cianuro se presenta generalmente como cianuro libre y complejos de cianuro o metalocianuros.

**Ión cianuro.** Se refiere solo al anión libre  $CN^-$  en solución

**HCN molecular.** Es una molécula neutra que se denomina ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno.

**Compuestos simples de cianuro.** Compuestos iónicos que se disocian en el agua liberando un catión y un ion cianuro. Son sales que surgen de reacciones ácidobase.

**Compuestos complejos de cianuro.** Compuestos que se disocian en el agua liberando un catión y un anión que contiene ion cianuro. El anión, denominado complejo, puede seguir disociándose.

**Organocianuros.** Compuestos orgánicos que contiene el grupo  $C\equiv N$  se lo denomina nitrilos o cianuros. Las cianhidrinas y glucósidos cianógenos son nitrilos que pueden liberar iones cianuro en condiciones apropiadas es por esto que presentan un comportamiento similar a compuestos de cianuros simples.

**Cianuro libre.** Se denomina cianuro libre al HCN molecular o al ión cianuro.

**Cianuro total (CNT).** Se denomina a los compuestos de cianuros que se encuentran en una solución acuosa.

**Cianuro disociable con ácido débil (CN WAD).** Término analítico que se usa para designar a los compuestos de cianuro que se disocian bajo reflujo, con un ácido débil [12].

Generalmente, el cianuro se caracteriza por un olor a “almendras amargas”, pero no todas las personas pueden detectarlo ya que no siempre emana un olor. El

cianuro es uno de los principales compuestos utilizados por la industria química debido a su composición de carbono y nitrógeno, ambos elementos comunes, y a la facilidad con la cual reacciona con otras sustancias. Dentro de sus múltiples usos es usada en la recuperación del oro del resto de material removido son usadas las sales de cianuro [10].

**El cianuro en la extracción de oro.** El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente con ciertos metales como el oro y la plata contenidos en el mineral. La solución lixivante debe contener tres componentes químicos esenciales, estos son: El ion cianuro ( $CN^-$ ). El oxígeno disuelto en la solución ( $O_2$ ) El ión Hidroxilo ( $OH^-$ ) Los dos primeros son los reactantes químicos que disuelven a los metales preciosos y el último es un componente esencial que le da un carácter alcalino a la solución, permitiendo el accionar químico del ión cianuro en forma más eficiente, menos riesgosa y una operación económica [12].

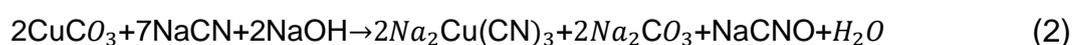
El cianuro de sodio ( $NaCN$ ) por su mayor contenido de  $CN^-$  activo por unidad de peso: 53% es usado industrialmente.

La reacción que tiene lugar en la lixiviación es la siguiente:

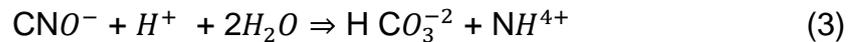


Compuestos relacionados con el cianuro. Como resultado del proceso de cianuración que surgen como subproductos asociados son:

**Cianato ( $OCN^-$ ).** Son productos creados durante el procesamiento de minerales, gracias a la asociación entre iones de cianuro e iones metálicos independientes, por ejemplo, ión cúprico, o durante el procesamiento de desechos que contienen cianuro a través de agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno o los iones de hipoclorito [1]. La formación del cianato a partir de un mineral que contiene carbonato cúprico puede ser descrita en la siguiente reacción:



El cianato puede hidrolizarse para producir ion amonio:



**El tiocianato (SCN<sup>-</sup>).** La presencia del tiocianato en las soluciones de cianuración se debe a la reacción del cianuro con átomos de azufre inestable durante la aireación previa o durante la lixiviación. El tiocianato es química y biológicamente degradable, siendo los subproductos el ión amonio, el carbonato, el cianuro y el sulfato. En ciertos casos, el tiocianato es más fácilmente oxidable que el cianuro, por lo que la eliminación del cianuro en efluentes con tiocianato supone un mayor consumo y costo del tratamiento. El tiocianato como tal no es muy tóxico para la vida acuática y, actualmente, no está restringido por las normas ambientales, pero puede llegar a biodegradarse en medios alcalinos y generar cianuro. Por otro lado, si la solución se va a tratar con cloro para la eliminación del cianuro, existe la probabilidad de formación de cloruro de cianógeno (CNCl), el cual es un gas extremadamente tóxico y de muy baja solubilidad en agua [13].

**El amoníaco (NH<sub>3</sub>).** La presencia de amoníaco en efluentes mineros se debe, principalmente, a la hidrólisis del cianato. Durante el proceso de cianuración se genera cianato, aunque la mayor parte viene de la oxidación del cianuro. El cianato se hidroliza, generalmente en cierto grado, en las presas de solución residual, sin embargo, persiste a menudo en concentraciones suficientes para causar mortalidad en los peces. El amoníaco libre forma complejos solubles con muchos metales pesados (cobre, níquel, plata, zinc), por consiguiente, su presencia en los efluentes puede inhibir la precipitación de estos metales a valores básicos de pH por encima de 9, que es el intervalo de precipitación de los iones metálicos [13].

### 2.2.2. Procesos de detoxificación

La detoxificación de las soluciones cianuradas, es un tratamiento que se realiza a los efluentes que provienen del proceso de lixiviación es decir, la solución que percola de las celdas de lixiviación una vez que es procesada para la extracción del oro; estas soluciones son reusadas pero en algunos momentos surge la

necesidad de descargar la solución a las fuentes hídricas, realizando tratamientos previos para eliminar las especies cianuradas, tales como el cianuro libre ( $CN^-$ ) y los complejos cianurados metálicos del cobre y zinc, los cuales conforman el cianuro disociable en ácido débil (CNWAD), los cuales son tóxicos para los animales, plantas y también para el hombre [14].

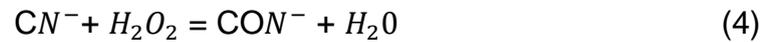
**Tratamientos de efluentes mineros.** El incremento de la actividad minera, combinado con una mayor preocupación por sus efectos ambientales, ha generado un nuevo interés por el desarrollo de nuevos procesos para el tratamiento de efluentes mineros. Actualmente existe una gran variedad de procesos de tratamientos químicos, físicos y biológicos para la eliminación o recuperación de metales, cianuros y otros subproductos de los procesos. El desarrollo de un proceso viable para el tratamiento de un efluente metalúrgico exige el conocimiento pleno de los procesos metalúrgicos, de la geoquímica de los minerales, de la hidrología del lugar y de las posibles fuentes de agua residual y sus características. Cada tratamiento depende de cómo la explotación minera influye sobre la cantidad y calidad de efluentes producida y sobre la selección de las alternativas de tratamiento.

**Métodos químicos para la oxidación del cianuro.** Existen varios tratamientos, entre ellos:

***Tratamiento con  $H_2O_2$  (Peróxido de hidrógeno).*** El peróxido de hidrógeno es un potente oxidante no contaminante, cuyo uso se ha extendido a lo largo de los años, siendo utilizado en numerosas instalaciones metalúrgicas de todo el mundo (sobre todo para tratamientos de efluentes cianurados residuales). Las reacciones de oxidación tienen lugar al pH natural del efluente (que generalmente es de 10), y no requiere control de dicho parámetro, puesto que el  $H_2O_2$  sólo presenta un suave carácter ácido [13].

Se han desarrollado dos procesos los cuales utilizan el peróxido de hidrógeno para la destrucción oxidante del cianuro libre y los complejos de cianuro. El primer proceso conocido como proceso kastone fue originalmente propuesto por la Dupont, 1974 y por Mathre y Devries, 1981. Este proceso utiliza una solución de peróxido de hidrógeno al 41% con unos pocos mg/l de formaldehído y cobre.

El segundo proceso fue desarrollado por Degussa Corporation, empleando una solución de peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre en varias concentraciones, aunque es común no emplear las sales de cobre, debido a la presencia de este metal dentro de los minerales tratados, la reacción fundamental es:



Si bien los ferrocianuros no son oxidados, estos se precipitan en modo de sales de metal insoluble, al mismo tiempo que los precipitados de hidróxido, logrando la formación del cianato el cual se hidroliza espontáneamente formando ión carbonato e ión amonio, y por último toda la cantidad residual de oxidante se descompone generando oxígeno.

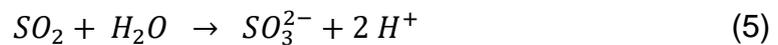
Ventajas asociadas a la aplicación de este método:

- El costo del capital requerido es considerablemente menor a los utilizados en otros procedimientos químicos.
- La metodología es un tanto sencilla de diseño y funcionamiento.
- A través de este método es posible la reducción de una cantidad significativa de todas las formas de cianuro a cantidades ambientalmente aceptables.
- A través de la precipitación se pueden reducir notablemente los metales.
- La flexibilidad del proceso permite adaptarlo a procedimientos tanto continuos, como discontinuos.
- Se ha demostrado su aplicación eficiente tanto en laboratorios como a escala industrial [13].

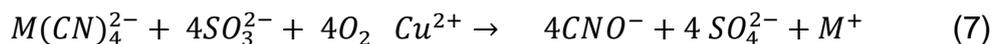
**Oxidación por clorinación alcalina.** La clorinación alcalina es un proceso químico que consiste en la oxidación y destrucción del cianuro libre y los complejos de cianuro débiles bajo condiciones alcalinas (pH = 10.5-11.5). El cloro se suministra en forma líquida o gaseosa o bien, como hipoclorito de sodio en forma sólida. Las formas sólidas se preparan en soluciones concentradas previamente a usarse en el proceso de oxidación. El cloro o el hipoclorito pueden también generarse in situ electrolíticamente [13].

**El proceso INCO.** Oxida rápidamente el cianuro WAD a cianato y precipita los metales liberados (Cd, Cu, Zn, Ni y Ag) en forma de hidróxidos, a excepción de los complejos cianurados de Fe que precipitan como sales metálicas de ferrocianuro de Cu, Ni o Zn. Las principales variables de este proceso son el pH, las dosificaciones de  $SO_2$  y Cu, la velocidad de alimentación de aire y el tiempo de retención [6].

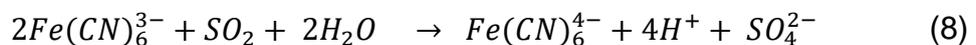
Las dosis de  $SO_2$  y Cu empleados en el proceso dependen de la concentración de cianuro WAD en la solución. El  $SO_2$  disuelto en la solución forma el ión sulfito  $SO_3^{2-}$  a pH alcalino de acuerdo con la Ecuación 5



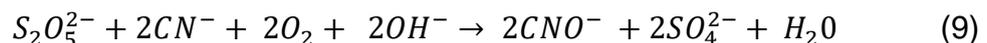
El  $SO_3^{2-}$  es el reactante del proceso del proceso INCO. La conversión de cianuro WAD a cianato se da de acuerdo con las a reacciones presentadas en las ecuaciones 6 y 7, donde M puede ser  $Zn^{2+}$ ;  $Cu^{2+}$ ;  $Ni^{2+}$ ;  $Cd^{2+}$ ; y  $Ag^{2+}$ .



La remoción de cianuro de hierro inicia con la reducción del Fe de estado férrico a estado ferroso, como se muestra en la Ecuación 8.



Con el metabisulfito de sodio ( $Na_2S_2O_5$ ) el proceso de oxidación podría describirse como:



**Oxidación con ácido peroximonosulfúrico.** El peróxido de ácido sulfúrico  $H_2SO_5$  es conocido como Ácido de Caro pues lleva el nombre de su inventor Heinrich Caro (1834 – 1910) quien fue el primero que lo preparó en 1898. El

Ácido de Caro es un conocido agente degradador de cianuro muy utilizado para el tratamiento de efluentes provenientes de los procesos de cianuración en la minería del oro y de la plata. Este es fabricado como producto de la reacción exotérmica entre el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y el  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; de la cual, resulta una solución clara e incolora de una sola consistencia. Debido a su inestabilidad, el Ácido de Caro es generado en el mismo punto de uso bajo la siguiente reacción:



**Tratamiento con ozono  $\text{O}_3$ .** El ozono constituye una nueva alternativa para el tratamiento de los compuestos de cianuro. Sus mayores ventajas radican en que es un proceso muy rápido que consigue la completa descomposición de cianuros, cianatos y tiocianatos. Se une a lo anterior el hecho de requerir un bajo mantenimiento y la ausencia de transporte, almacenamiento o manejo de reactivos químicos, así como de producción de residuos químicos tóxicos. El  $\text{O}_3$  es un agente oxidante fuerte generado por aire seco o por oxígeno. En este caso el reactivo a emplear es una mezcla de ozono y oxígeno (3 % en volumen) que es capaz de provocar fuertes condiciones oxidantes cuando es inyectado en forma de burbujas en una solución acuosa. El coste, en un tiempo muy elevado, ha ido decreciendo de una manera constante gracias al aumento de su uso. De todos modos, la ausencia de información sobre la cinética y los mecanismos de la reacción de oxidación ha limitado su aplicación [13].

**Biodegradación.** Se han creado tanto sistemas activos como pasivos de tratamiento capaces de remover cianuro empleando microorganismos aeróbicos o anaeróbicos. Las condiciones anaeróbicas son más útiles para la degradación de cianuro que las condiciones anaeróbicas.

**Degradación natural.** La degradación natural se lleva a cabo en estanques de almacenamiento de relaves durante periodos prolongados. La degradación de cianuros se da a partir de una combinación de procesos de origen natural, químicos y biológicos incluyendo la volatilización, foto descomposición, oxidación química y microbiana, precipitación química e hidrólisis [15].

### 2.2.3. Analizador Químico Automatizado de solución FS – 3700/FS - 3100

El principio es cianuro total por digestión ultravioleta en línea y detección amperométrica ASTM D7511-09e2 y ASTM D 7237-10.

Este método se utiliza para determinar el cianuro total en aguas potables y superficiales, así como también en agua residuales domésticas e industriales. La digestión ultravioleta (UV) libera cianuro de los complejos de cianuro y la adición de ácido convierte el ión cianuro en gas de cianuro de hidrógeno (HCN), que pasa por debajo de una membrana de difusión de gas. El gas de cianuro de hidrógeno se difunde a través de la membrana en una solución receptora alcalina, donde se convierte nuevamente en cianuro. Un electrodo de trabajo de plata, un electrodo de referencia de cloruro de plata/plata y un contraelectrodo de platino/acero inoxidable con un potencial aplicado de cero voltios controlan amperométricamente el ion cianuro. La corriente generada es proporcional a la concentración de cianuro presente en la muestra original.

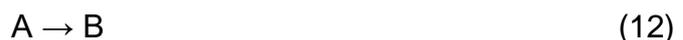
### 2.2.4. Cinética química

Es el área de la química que estudia la rapidez con que ocurre una reacción química. La rapidez de reacción es el cambio de concentraciones de un producto o reactivo con respecto al tiempo en donde los reactivos se van consumiendo mientras que se van formando los productos [16].

Una ecuación química se puede representar como la siguiente ecuación:



Es más conveniente expresar la rapidez de reacción en términos de concentraciones en cuanto al tiempo.



La rapidez o velocidad media se expresa como:

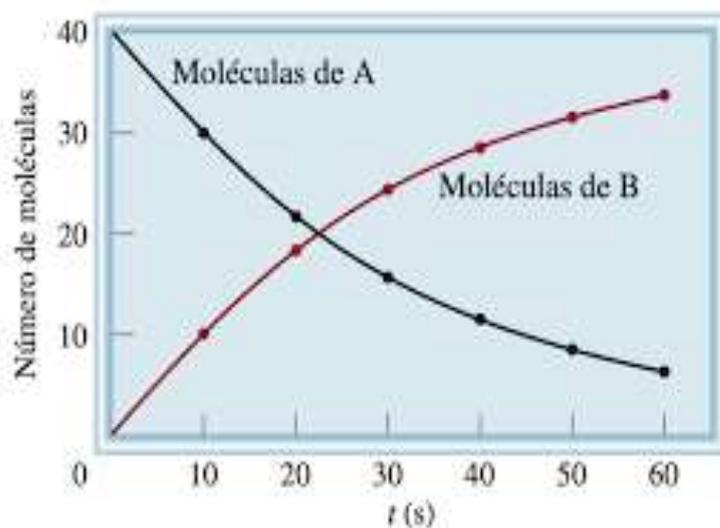
$$\text{rapidez} = - \frac{\Delta[A]}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\text{rapidez} = -\frac{\Delta[B]}{\Delta t} \quad (14)$$

Donde  $\Delta[A]$  y  $\Delta[B]$  son los cambios de concentración en determinado periodo  $\Delta t$ . Debido a que la concentración de A disminuye durante el intervalo,  $\Delta[A]$  es una cantidad negativa. La rapidez de reacción es una cantidad positiva, de modo que es necesario un signo menos en la expresión de la rapidez sea positiva. Por otra parte, la concentración de B aumenta durante el intervalo por lo que  $\Delta[B]$  es una cantidad positiva [18]. En la figura 1 observa la disminución de las moléculas de A con el tiempo y como el incremento de las moléculas de B con el tiempo.

**Figura 1**

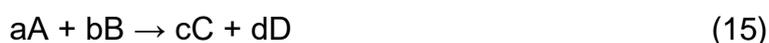
*Representación de la reacción  $A \rightarrow B$*



Fuente: Raymond CHANG

### 2.2.5. La ley de rapidez

La ley de la rapidez expresa la relación de la rapidez de una reacción con la constante de rapidez y la concentración de los reactivos elevado a alguna potencia.



La ley de la rapidez seria como la siguiente ecuación:

$$rapidez = k[A]^X[B]^Y \quad (16)$$

Donde X y Y son números que se determinan experimentalmente y k es la constante de la velocidad de reacción.

$$n = X + Y$$

n: Orden global de la reacción

### **2.2.6. Cálculo de concentraciones en el tiempo**

Conocer el orden de la reacción permitirá calcular la concentración de un reactivo en función a la ley de velocidad [17].

## **2.3 Marco Conceptual**

### **2.3.1. Uso del agua en el sector minero**

Durante la actividad extractiva se obtiene el agua proveniente de acuíferos que se encuentran en las minas ya sean de socavón o de tajo abierto. Estudios realizados por el Ministerio de Energía y Minas (MEM) indican que, en el Perú, del 50% de las concesiones mineras actuales tienen pasivos ambientales y de estos, más del 80% son prioritarios. El consumo del agua en la actividad minera es aproximadamente del 2% del total de volumen utilizado.

### **2.3.2. Agua residual en el sector minero**

Las aguas residuales de la actividad minera que provienen de la lixiviación de oro y plata tienen valores que causan preocupación por sus efectos negativos al medio ambiente que generan la necesidad de su tratamiento antes de su descarga.

### **2.3.3. Cianuro en la lixiviación**

El cianuro es un anión que se combina con la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos. Es venenoso y actúa rápidamente sobre el sistema respiratorio siendo peligrosa su presencia en dosis mayores a 0.02 ppm. El

cianuro es uno de los principales compuestos utilizados por la industria química en la lixiviación del oro y plata.

#### **2.3.4. Procesos de detoxificación**

La carga de compuestos cianurados de los efluentes de lixiviación es alta requiriendo de su eliminación antes de su descarga a las fuentes hídricas. Se han hecho uso de varios procesos con este fin entre ellos la oxidación con peróxido de hidrógeno, oxidación por cloración alcalina, el proceso INCO que consiste en una oxidación con metabisulfito de sodio, oxidación con ácido peroximonosulfúrico y tratamiento con ozono O<sub>3</sub>.

En este trabajo de investigación se evaluó la detoxificación de efluentes mineros cianurados utilizando la oxidación con peróxido de hidrógeno y el proceso INCO que consiste en una oxidación con metabisulfito de sodio, por separado y el efecto que provocó la detoxificación de todos ellos combinado.

#### **2.3.5. Métodos para la degradación del cianuro.**

Estos métodos buscan disminuir la concentración de cianuro libre a niveles aceptables para las personas y el medio ambiente. Entre ellos encontramos a:

- Degradación natural
- Degradación por recuperación del cianuro
- Degradación por precipitación.
- Degradación por conversión a formas menos tóxicas.
- Degradación por oxidación

#### **2.3.6. Degradación por oxidación.**

Los métodos más comunes para la oxidación de cianuro son:

- **Oxidación con Peróxido de Hidrógeno** - Es un proceso químico que utiliza peróxido de hidrógeno para la destrucción oxidante del cianuro libre y los complejos de cianuro
- **Oxidación por Cloración Alcalina**- Este método trabaja a condiciones alcalinas (pH = 10.5-11.5) para la oxidación del cianuro donde el cloro puede

estar en forma líquida o gaseosa o bien, como hipoclorito de sodio en forma sólida.

- **Oxidación por proceso INCO-** Degradación mediante oxidación con dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), aire y catalizadores de Cu convirtiendo de cianuro a cianato.

### **2.3.7. Estándares de calidad ambiental (ECA).**

Son valores máximos permitidos de contaminantes establecido por el MINAM para medir el estado de la calidad ambiental.

### **2.3.8. Estándares de calidad ambiental para agua.**

Con el fin de establecer niveles de concentración que no representen un riesgo a salud de la población, la flora y la fauna.

Los estándares de calidad ambiental para agua se dividen en cuatro categorías:

- **Categoría 1:** Poblacional y recreacional
- **Categoría 2:** Actividades marino costeros
- **Categoría 3:** Riego de vegetales y Bebida de animales
- **Categoría 4:** Conservación del Ambiente Acuático.

## **2.4 Definición de términos básicos**

**Cianuro:** El cianuro es un grupo químico que consiste en un átomo de carbono conectado a un átomo de nitrógeno por tres enlaces, pueden ocurrir en forma natural o ser manufacturados; la mayoría son venenos potentes y de acción rápida.

**Cianuro total:** Se denomina así a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. Este es un término que se emplea en los procedimientos analíticos. El cianuro total incluye el cianuro libre, los cianuros simples y todos los cianuros complejos, que incluyen los cianuros fácilmente dissociables en ácido débil (cianuros WAD, en sus siglas en inglés).

**Figura 2**

*Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático*

PARÁMETROS	UNIDADES	LAGUNAS Y LAGOS	RÍOS		ECOSISTEMAS MARINO COSTEROS	
			COSTA Y SIERRA	SELVA	ESTUARIOS	MARINOS
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>						
Aceites y grasas	mg/L	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	1	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	<5	<10	<10	15	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	<0,02	0,02	0,05	0,05	0,08
Temperatura	Celsius					delta 3 °C
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥5	≥5	≥5	≥4	≥4
pH	unidad	6,5-8,5	6,5-8,5		6,8-8,5	6,8 - 8,5
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	500	500	500	500	
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤25	≤25 - 100	≤25 - 400	≤25-100	30,00
<b>INORGÁNICOS</b>						
Arsénico	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	----
Cadmio	mg/L	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005
Cianuro Libre	mg/L	0,022	0,022	0,022	0,022	----
Clorofila A	mg/L	10	----	----	----	----
Cobre	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Fenoles	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	
Fosfatos Total	mg/L	0,4	0,5	0,5	0,5	0,031 - 0,093
Hidrocarburos de Petróleo Aromáticos Totales	Ausente				Ausente	Ausente
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,0001
Nitratos (N-NO3)	mg/L	5	10	10	10	0,07 - 0,28
<b>INORGÁNICOS</b>						
Nitrógeno Total	mg/L	1,6	1,6		----	----
Níquel	mg/L	0,025	0,025	0,025	0,002	0,0082
Plomo	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,0081	0,0081
Silicatos	mg/L	----	----	----	----	0,14-0,7
Sulfuro de Hidrógeno ( H2S indisoluble)	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,06
Zinc	mg/L	0,03	0,03	0,3	0,03	0,081
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>						
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100mL)	1 000	2 000		1 000	≤30
Coliformes Totales	(NMP/100mL)	2 000	3 000		2 000	

Fuente: Decreto supremo N°002-2008-MINAM

**Cianuro Libre:** Es el término utilizado para describir tanto al ion cianuro (CN)<sup>-</sup> que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Por ejemplo, las briquetas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion sodio y el anión cianuro; este último se combina luego con el ion hidrógeno para formar el HCN donde la concentración del ion hidrógeno en el agua del proceso dependerá del pH existente en la solución. Las soluciones ácidas favorecen la presencia de HCN y a valores de pH menores a 7 casi todo el cianuro libre está presente como HCN. A un pH de 9.24, las concentraciones de HCN y CN<sup>-</sup> son iguales.

**Proceso de detoxificación:** Es un procedimiento que busca la eliminación en este caso el cianuro por oxidación de los efluentes para su vertimiento al medio ambiente, que comprende de diversas fases que precipitan metales, considerando un pH adecuado.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis

##### Hipótesis general

Las condiciones óptimas de operación son un método combinado de procesos detoxificación de efluentes mineros cianurados.

##### Hipótesis específica

La dosificación óptima de reactivos en el proceso de detoxificación es: peróxido de hidrógeno 100-250 ppm y metabisulfito de sodio 100-200 ppm.

La reacción es de segundo orden y el valor de la constante de velocidad de la oxidación de cianuro para la dosificación óptima es  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .

##### 3.1.1. Operacionalización de variable

###### Variables independientes

**X** = Condiciones óptimas

Es una variable cuantitativa continua.

###### Variables dependientes

**Y** = Efluentes mineros cianurados detoxificado

**Tabla 1**

*Operacionalización de variable*

<b>VARIABLES</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
<p><b>Variable dependiente</b></p> <p>Y= Efluentes mineros cianurados detoxificados</p>	<p>Solución residual de un proceso de lixiviación que ha sido tratada para eliminar las especies cianuradas (10).</p>	<p>Efluente minero cianurado con contenido de cianuros reducido mediante proceso de detoxificación.</p>	<p>Eficiencia de reducción</p>	<p>% reducción de cianuro</p> <p>Constante de velocidad de reacción</p>	<p>-Cálculo</p>
<p><b>Variable independiente</b></p> <p>X= Condiciones óptimas</p>	<p>Condiciones más favorables para eliminar la mayor cantidad de cianuro en las aguas residuales. Fuente (12)</p>	<p>Dosificación más favorable de reactivos.</p>	<p>Dosificación de peróxido de hidrógeno</p> <p>Dosificación metabisulfito de sodio</p>	<p>100 ppm</p> <p>150 ppm</p> <p>250 ppm</p> <p>100 ppm</p> <p>150 ppm</p> <p>200 ppm</p>	<p>-Medición directa</p>

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1 Diseño metodológico

La presente investigación se tipifica por su naturaleza como aplicada ya que cubre una necesidad a través del conocimiento científico [18]. Por el enfoque y en función al propósito es cuantitativa, debido a que se realizó registros y análisis de las variables implicadas y éstas son medibles [19]. Según el grado de manipulación de las variables, es de tipo experimental para la determinación de las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados y el análisis estadístico, por su nivel es explicativa porque explica causa y efecto de un tratamiento [20].

**Tabla 2**

*Factores y niveles de experimentación*

Factor	Unidades	Notación	Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
Dosis de peróxido de hidrógeno	ppm	X <sub>1</sub>	100	150	250
Dosis de metabisulfito de sodio	ppm	X <sub>2</sub>	100	150	200

El diseño experimental se presenta en la tabla 3. El experimento básico es de 9 corridas, 2 factores cada uno con 3 niveles por duplicado.

**Tabla 3***Diseño experimental*

---

N° prueba	Dosis de peróxido de hidrógeno (ppm)	Dosis de metabisulfito de sodio (ppm)	Concentración de cianuro libre (ppm)
1	100	100	Y1
2	100	150	Y2
3	100	200	Y3
4	150	100	Y4
5	150	150	Y5
6	150	200	Y6
7	250	100	Y7
8	250	150	Y8
9	250	200	Y9

---

## 4.2 Método de investigación

El desarrollo de la investigación se realizó de acuerdo a las siguientes etapas:

### 4.2.1. Caracterización del agua residual

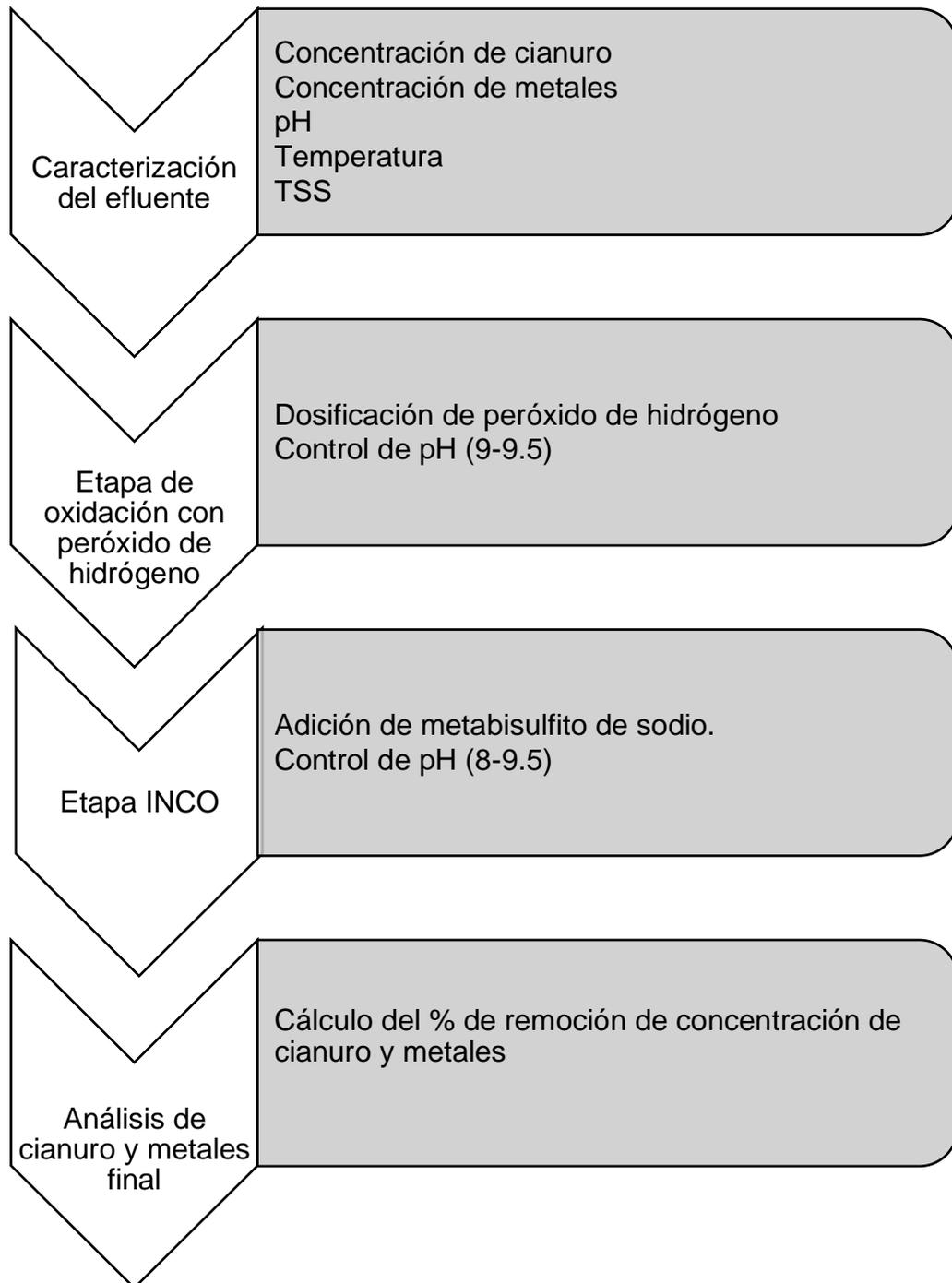
Se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual de la presa de relave de la minera Ares, a la cual se analizó por cianuro libre, cianuro total, metales totales Cu, Fe, Zn, As y Pb y midió pH, temperatura y TSS.

### 4.2.2 Selección del método

De acuerdo con la bibliografía se optó por desarrollar pruebas con los métodos Oxidación con peróxido de hidrógeno y proceso INCO descrito en la Figura 3. Analizando el comportamiento del cianuro y metales.

**Figura 3**

*Diagrama de proceso*

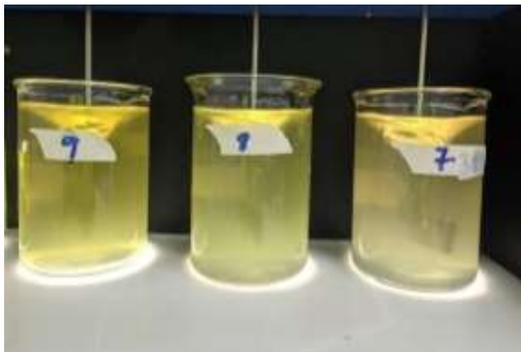


#### 4.2.3 Procedimiento experimental

Las pruebas se realizarán de acuerdo con lo indicado en el diseño experimental, para cada prueba se analizará la concentración de cianuro para evaluar el porcentaje de remoción de cianuro. Para ello se utilizó la prueba de test de jarras con agitador magnético manteniendo las revoluciones constantes de 200 rpm y tiempo de 2 horas a un pH en el proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno de 9-9.5 y con metabisulfito de sodio de 8-9.5. Para la determinación del cianuro el equipo analizador de CN: FS 3700 y FS 3100. De acuerdo a la Tabla 3 se realizan las pruebas que se muestran en la figura 4.

#### Figura 4

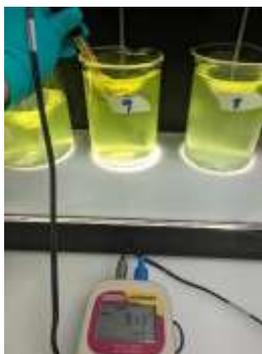
*Prueba de test de jarras de la prueba 7, 8 y 9*



La figura 5 muestra el pH al que se trabaja, el cual está dentro del rango de 9-9.5.

#### Figura 5

*Control de pH*



Después de 120 minutos de reacción se terminan las pruebas obteniendo de acuerdo con la figura 6.

### **Figura 6**

*Muestras finales a las diferentes dosificaciones*



### **4.3 Población y muestra**

La muestra está compuesta por 1 L de los relaves mineros que se han producido durante todos los años que se extraía oro por cianuración en la compañía minera Ares.

### **4.4 Lugar de estudio y periodo de desarrollo**

El lugar de estudio es la compañía minera Ares que se encuentra ubicada en la región de Arequipa. El periodo de la investigación se realizó desde noviembre del 2022 hasta marzo del 2023.

### **4.5 Técnicas e instrumentos para recolección de la información**

#### **4.5.1. Técnicas**

- Para la recolección de muestras se utilizó técnicas de muestreo de aguas residuales de relaves siguiendo los métodos de muestreo establecidos en el “Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos Naturales de Agua Superficial” N° 010-2016-ANA
- En la caracterización del agua residual y el agua tratada se utilizaron técnicas de ASTM método D 7511-09e2 y de absorción atómica por ICP.

## 4.5.2 Instrumentos

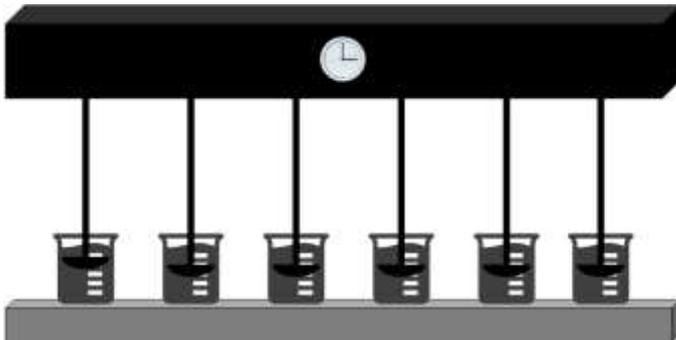
### a. Equipos

- Balanza analítica
- Test de jarras
- Agitador magnético
- Analizador de CN: FS 3700 y FS 3100
- Equipo de Absorción atómica

Continuación se muestran los equipos utilizados como el test de jarras en la figura 7 en la etapa de pruebas y en la figura 8 y 9 los equipos para el análisis cianuro libre y total.

**Figura 7**

*Test de jarras*



**Figura 8**

*Analizador de CN FS 3700*



## Figura 9

*Analizador de CN FS 3100*



### **b. Materiales**

- Probeta
- Vasos de precipitados
- Pipetas
- Propipeta
- Jeringas
- Baldes

### **c. Reactivos**

- Peróxido de hidrógeno al 60%
- Metabisulfito de sodio

### **d. Equipos de protección personal**

- Guantes de látex
- Lentes de seguridad
- Mascarilla para vapores orgánicos
- Guardapolvo de laboratorio

#### **4.6 Análisis y procesamiento de datos**

Se realizó mediante Excel 2019, Origin Pro 2023 y Minitab 19 para el manejo y procesamiento de toda la data en cada etapa de la investigación.

#### **4.7 Aspectos éticos en investigación**

Las autoras de la investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe final de investigación. Al mismo tiempo la investigación presente es inédita en el sentido de haber obtenidos los datos experimentales en las instalaciones de la unidad minera.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

En la tabla 4 se muestran las siguientes características fisicoquímicas del efluente con una concentración inicial de cianuro libre de 12.35 ppm y cianuro total de 35.04 ppm.

**Tabla 4**

*Características fisicoquímicas del efluente*

Parámetro	Unidad	Valor inicial
pH	-	9.36
Temperatura	(°C)	14.60
Sólidos totales en suspensión	mg/L	14.00
Cianuro libre	mg/L	12.35
Cianuro total	mg/L	35.04
Cobre	mg/L	41.00
Hierro	mg/L	1.10
Zinc	mg/L	0.35
Plomo	mg/L	0.25
Arsénico	mg/L	4.06

En la tabla 5 se muestra las características fisicoquímicas del efluente en 6 días consecutivos.

**Tabla 5**

*Datos de parámetros iniciales*

Día	CNT (mg/L)	CNL (mg/L)	PH (AD)	TSS (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	As (mg/L)
1	37.42	11.71	9.38	14	42.00	0.961	0.270	0.212	4.138
2	35.55	10.52	9.38	19	40.40	1.259	0.379	0.185	3.935
3	35.55	10.52	9.38	19	40.40	1.259	0.379	0.185	3.935
4	35.69	11.45	9.39	18	40.40	1.070	0.330	0.229	4.154
5	35.69	11.45	9.39	18	40.40	1.070	0.330	0.229	4.154
6	34.34	10.92	9.41	18	39.60	1.056	0.312	0.193	4.009

En la tabla 6 se muestran las concentraciones finales de cianuro libre, cianuro total y metales obtenidas del proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio.

**Tabla 6**

*Concentraciones finales de cianuro libre, cianuro total y metales*

N°	X1 ppm	X2 ppm	Cianuro libre ppm	Cianuro total ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Pb ppm	As ppm
1	100	100	0.104	1.295	17.30	0.060	0.011	0.120	3.005
2	100	150	0.065	0.911	15.75	0.069	0.015	0.117	2.776
3	100	200	0.047	0.805	15.50	0.058	0.011	0.107	2.761
4	150	100	0.028	0.605	14.60	0.060	0.012	0.116	3.548
5	150	150	0.020	0.504	14.00	0.070	0.016	0.106	2.716
6	150	200	0.017	0.498	13.05	0.064	0.013	0.108	2.942
7	250	100	0.014	0.438	7.30	0.058	0.012	0.124	3.552
8	250	150	0.010	0.383	7.00	0.063	0.014	0.100	3.345
9	250	200	0.004	0.353	6.90	0.067	0.015	0.114	2.717

Nota: X1: peróxido de hidrógeno y X2: metabisulfito de sodio

En la tabla 7 se muestra los porcentajes de remoción de cianuro libre, cianuro total y de metales Cu, Fe, Zn y As; de acuerdo con la tabla 6.

**Tabla 7**

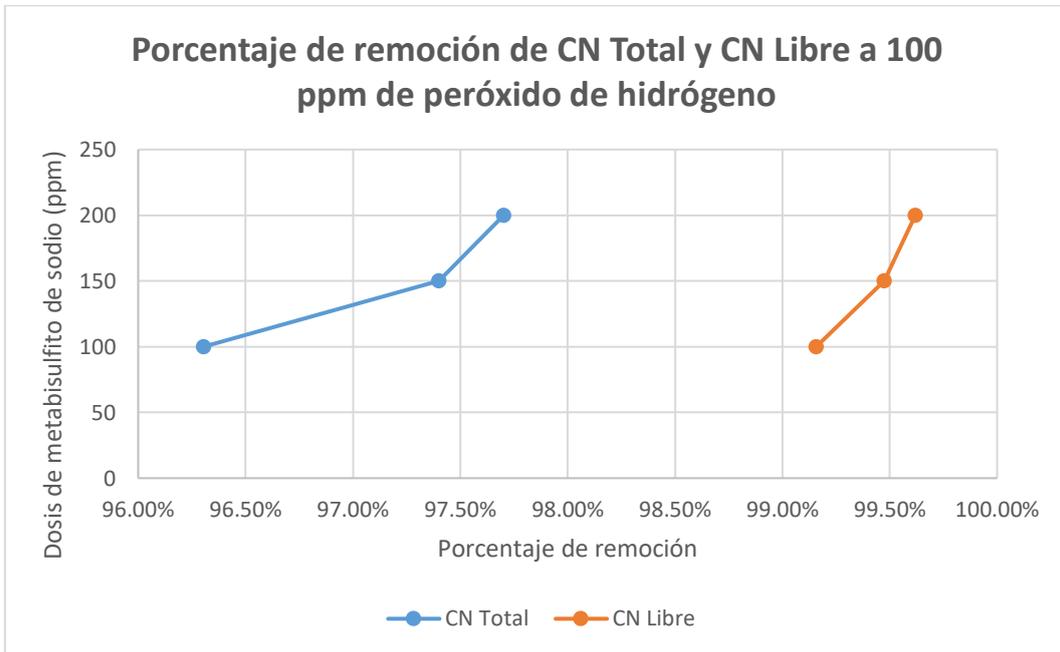
*Porcentaje de remoción*

N° prueba	X1 (ppm)	X2 (ppm)	% Remoción de conc. de cianuro libre	% Remoción de conc. de cianuro total	% Remoción metales			
					Cu	Fe	Zn	As
1	100	100	99.16%	96.30%	57.80%	94.55%	96.82%	26.02%
2	100	150	99.47%	97.40%	61.59%	93.73%	95.66%	31.66%
3	100	200	99.62%	97.70%	62.20%	94.73%	96.82%	32.03%
4	150	100	99.77%	98.27%	64.39%	94.55%	96.53%	12.65%
5	150	150	99.84%	98.56%	65.85%	93.64%	95.38%	33.14%
6	150	200	99.86%	98.58%	68.17%	94.18%	96.24%	27.57%
7	250	100	99.89%	98.75%	82.20%	94.73%	96.53%	12.56%
8	250	150	99.92%	98.91%	82.93%	94.27%	95.95%	17.65%
9	250	200	99.97%	98.99%	83.17%	93.91%	95.66%	26.02%

Nota: X1: peróxido de hidrógeno y X2: metabisulfito de sodio

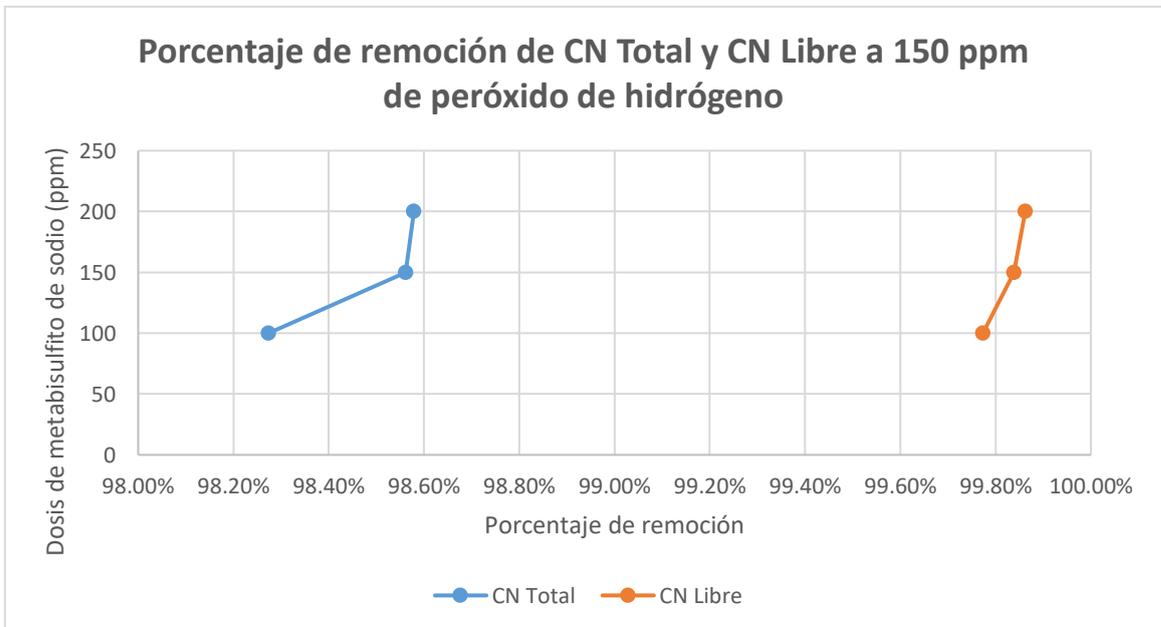
**Figura 10**

*Porcentaje de remoción a 100 ppm de peróxido de hidrógeno*



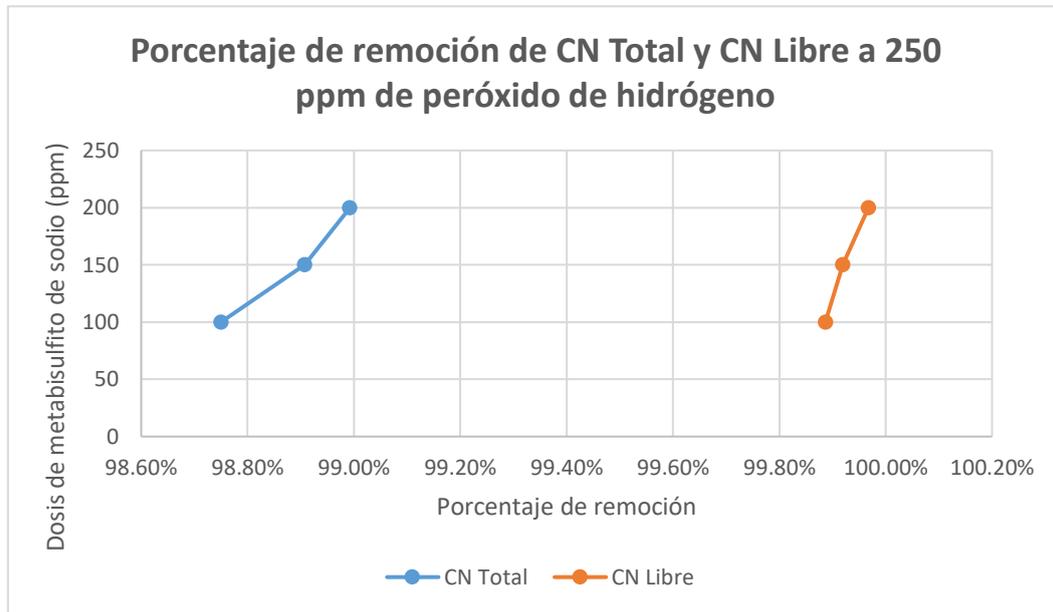
**Figura 11**

*Porcentaje de remoción a 150 ppm de peróxido de hidrógeno*



**Figura 12**

*Porcentaje de remoción a 250 ppm de peróxido de hidrógeno*



Para el análisis de la cinética utilizamos la prueba 5 de la tabla 6 ya que fue la que mejores resultados mostró. La Tabla 8 muestra los resultados de la concentración de cianuro libre y cianuro total en función del tiempo a las concentraciones de 150 ppm de peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio en 120 minutos de tratamiento a 200 rpm y acondicionado a un pH de 9- 9.5.

**Tabla 8**

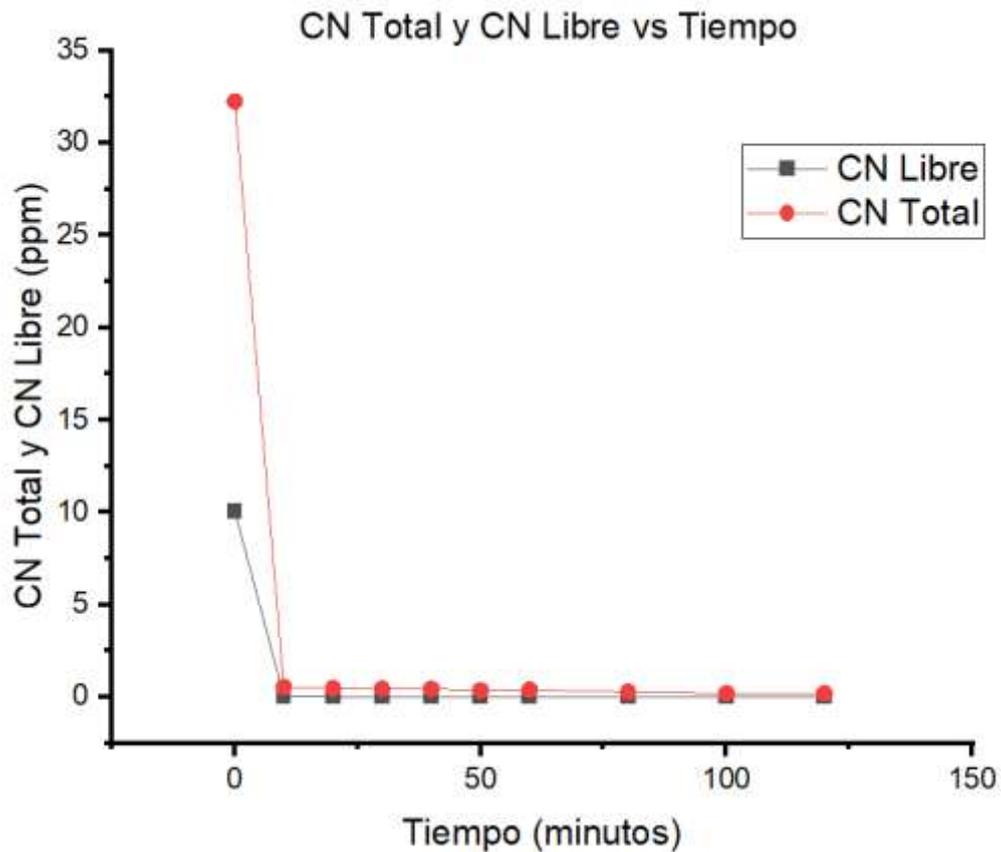
*Concentración de cianuro libre y total vs Tiempo*

Tiempo (min)	CN Libre (ppm)	CN Total (ppm)
0	10.061	32.248
10	0.038	0.541
20	0.031	0.483
30	0.029	0.465
40	0.027	0.451
50	0.026	0.376
60	0.022	0.396
80	0.017	0.277
100	0.010	0.211
120	0.004	0.205

La figura 13 representa el comportamiento de degradación del cianuro total y cianuro libre en el transcurso de 120 minutos de acuerdo con la tabla 8.

**Figura 13**

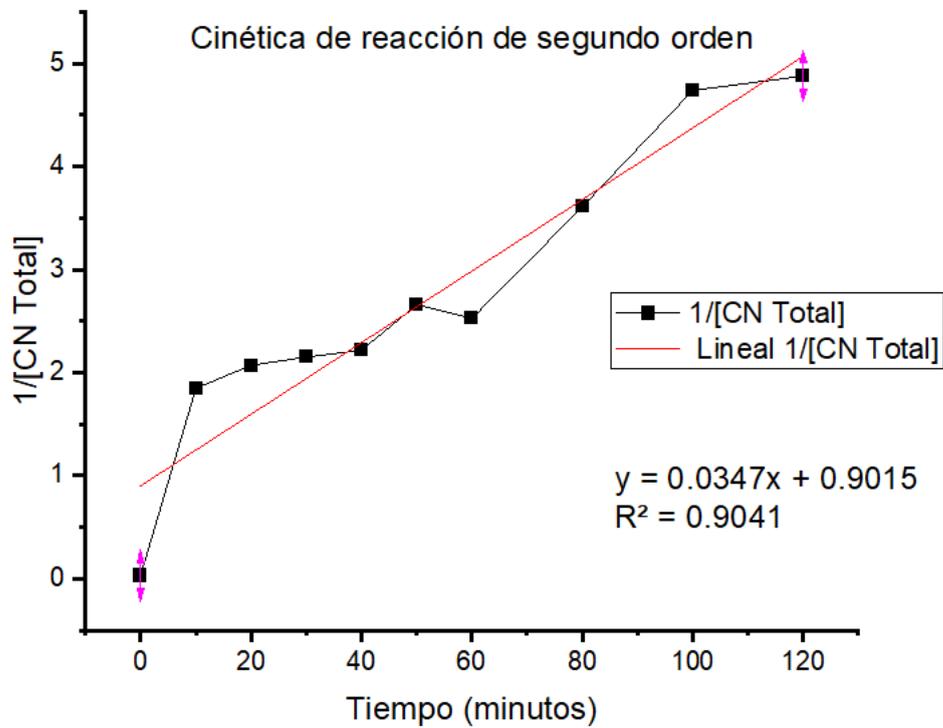
*Degradación de cianuro total y cianuro libre*



En la figura 14 se muestra la cinética de reacción. Para la verificación del modelo cinético se tomó como referencia los resultados de cianuro total vs el tiempo a fin de verificar el orden de la reacción, dando como resultado que la reacción a la cual estamos evaluando pertenece al segundo orden ( $R^2 = 0,9041$ ) con una constante de velocidad de  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

**Figura 14**

*Cinética de reacción de segundo orden*



## 5.2 Resultados inferenciales

Los valores de cada muestra y sus repeticiones fueron evaluados mediante el software Minitab 19 mediante el método factorial, para la comparación de medias de los diferentes grupos de datos.

**Tabla 9**

*Información del factor*

Factor	Niveles	Valores
Peróxido de hidrógeno (ppm)	3	100; 150; 250
Metabisulfito de sodio (ppm)	3	100; 150; 200

**Tabla 10***Análisis de Varianza*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>Contribución (%)</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	8	0.0182	99.16	0.0023	132.77	0
Lineal	4	0.0161	87.76	0.0040	235.03	0
Peróxido ppm	2	0.0137	74.72	0.0068	400.20	0
Metabisulfito ppm	2	0.0024	13.04	0.0012	69.85	0
Interacciones de 2 términos	4	0.0021	11.40	0.0005	30.52	0
Peróxido ppm*Metabisulfito ppm	4	0.0021	11.40	0.0005	30.52	0
Error	9	0.0002	0.84	0.0000		
Total	17	0.0183	111.40			

**Tabla 11***Resumen del modelo*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
0.0041367	99.16%	98.41%	96.64%

Ho: No existe diferencias entre los grupos o medias.

H1: Existe diferencias entre los grupos y medias.

Al analizar los resultados se infiere que las diferentes muestras tienen un efecto significativo en la remoción de cianuro libre, ya que el valor de p es menor que 0.05, lo que sugiere que hay diferencias significativas entre los grupos. Además, el factor "Muestra" explica el 98,41% de la varianza en la variable "cianuro libre", lo que indica que la mayoría de las diferencias observadas en la remoción de

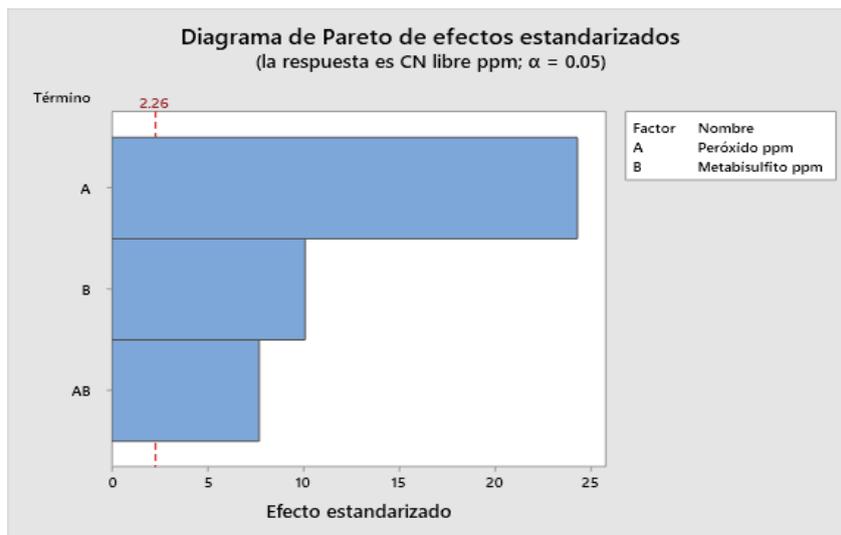
cianuro libre se pueden atribuir a las diferencias en las concentraciones de dosificaciones de peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio.

Asimismo, el factor "Repetición" no tiene un efecto significativo en la variable "cianuro libre", lo que sugiere que las repeticiones del experimento no difieren significativamente entre sí en términos de remoción de cianuro libre.

De acuerdo con el diagrama de Pareto de efectos estandarizados se evidencia que el factor peróxido de hidrógeno tiene un alto grado de influencia en la reducción de cianuro al igual que el factor metabisulfito de sodio en la reducción de cianuro. La interacción de ambos factores también tiene influencia en la reducción de cianuro (se aprecia notoriamente en la Figura N°15).

### Figura 15

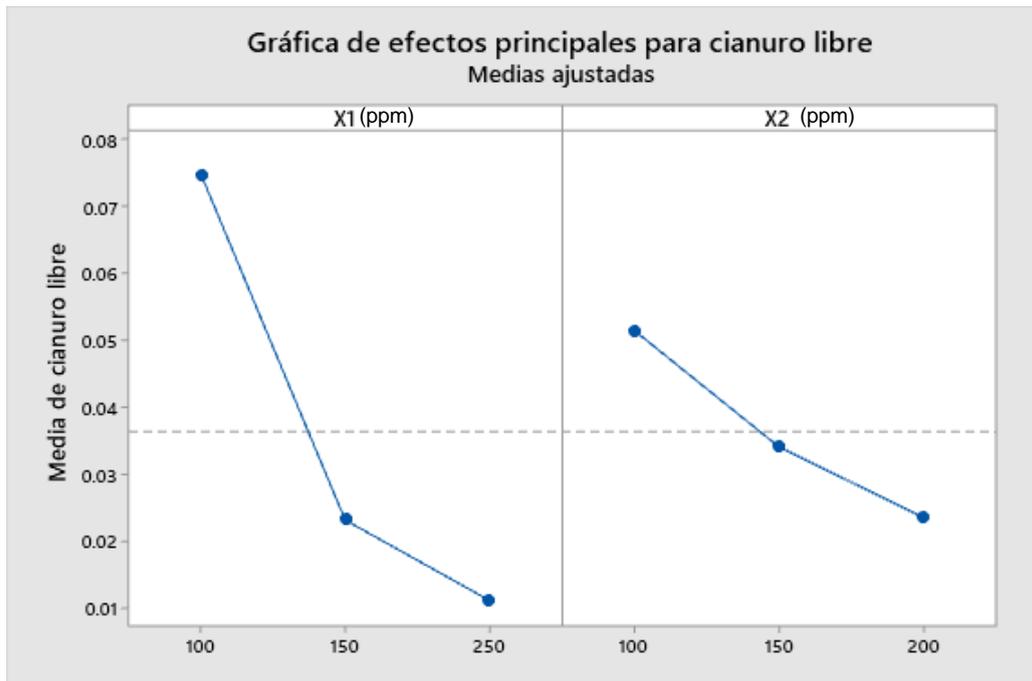
#### Diagrama de Pareto



En la figura N°16 se visualiza la gráfica de efectos principales de las diferentes dosificaciones de peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio y se infiere que, a mayor concentración de peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio, la concentración final de cianuro libre disminuye cumpliendo los estándares de la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM.

**Figura 16**

*Gráfica de resultados factoriales para remoción de cianuro libre*



Nota: X1: peróxido de hidrógeno y X2: metabisulfito de sodio

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### Hipótesis general.

De acuerdo a los resultados se observa en la figura 15 la interacción del peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio tiene influencia en la reducción de cianuro por lo que se ha demostrado que las condiciones óptimas de operación son un método combinado de procesos detoxificación de efluentes mineros cianurado con resultados de la remoción de cianuro libre dentro de los estándares de la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM.

#### Hipótesis específicas

Hipótesis alterna H1: La dosificación óptima de reactivos en el proceso de detoxificación es peróxido de hidrógeno entre 100-250 ppm y metabisulfito entre 100-200 ppm.

Se obtiene como resultados que las pruebas 5, 6,7,8 y 9, cumple con lo establecido por la normativa del ECA 4 del DS 002-2008, consideramos que la muestra prueba 5 la cual tiene dosificaciones de 150 ppm de peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio con un porcentaje de reducción de cianuro libre de 99.84% dando un valor final de cianuro libre de 0.020 ppm. Estas pruebas se realizaron a revoluciones constantes de 200 rpm y tiempo de 2h a un pH en el proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno de 9-9.5 y con metabisulfito de sodio de 8-9.5.

En la figura 14 se muestra la cinética de reacción de la oxidación de cianuro para la dosificación óptima; tomándose como resultados cianuro total vs el tiempo a fin de verificar el orden de la reacción, dando como resultado que la reacción a la cual estamos evaluando pertenece al segundo orden con una constante de velocidad de  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  con un  $R^2 = 0,9041$ .

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas descritas en la tabla 5 obteniéndose como concentración de cianuro total por debajo de 1 ppm, a partir de la prueba 2 con una relación de oxidante cianuro 7:1 valor cercano a lo indicado por [5] el cual es 6:1.

Respecto a el porcentaje de remoción obtenido de 99.84% comparamos con [6] al utilizar un método combinado de ozono con peróxido de hidrógeno tratamiento teniendo como resultado un porcentaje de remoción de cianuro total del 99,99 %, en un tiempo estimado de 21,83 h. En [9] obtiene una degradación del efluente cianurado en 85.94 %; utilizando como oxidante únicamente al peróxido de hidrógeno con un tiempo de agitación de 225 minutos, en nuestro caso las pruebas se realizaron en 120 minutos teniendo resultados favorables.

## **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

El autor de la investigación se responsabiliza por la información emitida en el presente informe final de investigación, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de investigación de la UNAC, Resolución del Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

## VII. CONCLUSIONES

Se determinó las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados utilizando un proceso combinado de oxidación con peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio.

Se determinó la dosificación óptima de reactivos en el tratamiento de efluentes mineros cianurados, fueron dosificaciones de 150 ppm peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio con un porcentaje de reducción de cianuro libre de 99.84%.

Se determinó la ecuación de velocidad de reacción que corresponde a segundo orden con una constante de velocidad  $k = 0.0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  con un  $R^2 = 0,9041$  considerando la dosificación óptima.

## VIII. RECOMENDACIONES

Realizar un tratamiento complementario que se enfoque en la disminución de arsénico debido a que el porcentaje de remoción obtenido para este metal fue mínimo con los procesos de detoxificación utilizados.

Para estudios de detoxificación de cianuro es suficiente un tiempo de reacción de 60 minutos, pero para estudios de cinética de reacción se requiere tiempos mayores alrededor de 120 minutos para una mejor evaluación del comportamiento de degradación de cianuro.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FERNÁNDEZ PÉREZ, Begoña, et al. *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina*. 2007
- [2] SALINAS E., RIVERA S., CARRILLO R., PATIÑO F., HARNÁNDEZ J y HERNÁNDEZ L. *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono*. [En línea] 2004.
- [3] DÍAZ I., CONDORI C. y ISMAEL R. *Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el método Inco en efluentes mineros*. [En línea] 2009. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1020>
- [4] DÍAZ R. y OBLITAS J. *Remoción de cianuro WAD en un proceso de oxidación de fluentes mineros usando ozono y control de pH [ En línea]*. Perú: Cajamarca, 2020.
- [5] AUQUILLA L. y DAMIÁN I. *Reducción de cianuro de agua residual proveniente de una empresa metalúrgica por tratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno*. [En línea]. Ecuador: Cuenca, 2019. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33590/1/Trabajo%20de%20titulaci%c3%b3n.pdf>
- [6] CASTRO S. “*Diseño de una planta industrial para el tratamiento de efluentes cianurados mediante la combinación de ozono con peróxido de hidrógeno*” [En línea]. Ecuador: Quito, 2018. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19762/1/CD-9169.pdf>
- [7] CAMPOS C., y DE LA TORRE, E. “*Estudio de la detoxificación de efluentes cianurados por oxidación con dióxido de azufre, aire y catalizadores de Cobre*” Ecuador: Revista politécnica Vol. 34, No. 2, 2015
- [8] GUTIÉRREZ C. “*Implementación del método de destrucción de cianuro Con oxidación avanzada en el tratamiento de efluentes de La planta minera Irlsa – unidad Corihuarmi*” [En línea]. Perú: Huancayo, 2021.

- [9] LOPEZ C. *“Determinación del tiempo de agitación y volumen óptimo del peróxido de hidrógeno en la degradación del efluente cianurado de la planta de tratamiento de aguas de la empresa “consorcio minero horizonte”* [En línea]. Perú: Trujillo, 2018. [https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12410/LopezOtiniano\\_C.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12410/LopezOtiniano_C.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- [10] BERNABEL H., y QUISPE M. *“Efecto del pH y dosis de hipoclorito de calcio, en la degradación oxidativa de efluentes líquidos cianurados y su aplicación en la remoción de metales pesados”* Perú: Lima, 2013.
- [11] GUERRERO J. *Cianuro: toxicidad y destrucción Biológica*. [En línea] 2013.
- [12] CAZAR A. *“Recuperación de compuestos de cianuro de aguas residuales proveniente de la extracción del oro utilizadas como aguas de riego en la zona minera Zaruma - Portovelo”*. [En línea] Ecuador: Quito, 2015.
- [13] CHAVEZ P. *“Determinación de la dosificación óptima de cianuro para lograr la mayor recuperación de oro y plata en el proceso de lixiviación intensiva de concentrado”*. [En línea] PERÚ: Arequipa, 2014
- [14] NAVA F., ELORZA E., PÉREZ R., y URIBE, A. *Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos*. *Revista de metalurgia*, 43(1), 20-28, 2007. [En línea]. Madrid, 2007  
<https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/48/48>
- [15] ACUÑA D., y RAMOS K. *“Análisis de métodos de detoxificación de efluentes cianurados”* [En línea]. Ecuador: Guayaquil, 2017  
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/39486/1/D-CD70220.pdf>
- [16] Raymond CHANG. *“Química”*, 10ª Edición, pág. 556.
- [17] CORREA H. y NEYRA P. *“Cinética de oxidación del cianuro libre en agua por aplicación de ozono”* [En línea]. Perú: Cajamarca, 2019.

<http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/967/CIN%C3%89TICA%20DE%20OXIDACION%20DEL%20CIANURO%20LIBRE%20EN%20AGUA%20POR%20APLICACION%20DE%20OZONO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [18] EL PERUANO. LEY N° 30806. *LEY QUE MODIFICA DIVERSOS ARTÍCULOS DE LA LEY 28303, LEY MARCO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA; Y DE LA LEY 28613, LEY DEL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (CONCYTEC)*. junio de 2022, págs.
- [19] MONJE ALVAREZ, CARLOS A. *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa - Guía didáctica*.
- [20] HERNÁNDEZ SAMPIERI, ROBERTO, FERNÁNDEZ COLLADO, CARLOS Y BAPTISTA LUCIO, PILAR. *“Metodología de la Investigación”*. México: INTERAMERICANA EDITORES. 6ta Ed., 2014, pág. 634.
- [21] MINAM. *“Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua: Decreto supremo N°002-2008-MINAM”*. Perú, 2008.

## ANEXO 1

### MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<b>General</b>	<b>General</b>	<b>General</b>	<b>Variables dependientes</b>		
¿Cuáles son las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados?	Determinar las condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados	Las condiciones óptimas de operación son un método combinado de procesos detoxificación de efluentes mineros cianurados.	Y1= Efluentes mineros	% reducción de cianuro	
			Dimensiones:	Constante de velocidad de reacción	
			Eficiencia de reducción.		Nivel: Correlacional Causa – efecto Tipo: Cuantitativa Aplicada Diseño: Experimental
<b>Específico</b>	<b>Específico</b>	<b>Específico</b>	<b>Variables independientes</b>		
¿Cuál es la dosificación de reactivos óptimos en el tratamiento de efluentes mineros?	Determinar la dosificación de reactivos óptimos en el tratamiento de efluentes mineros.  ¿Cuál es el orden de reacción y el valor de la constante de velocidad de la degradación de cianuro para la dosificación óptima?	La dosificación óptima de reactivos en el proceso de detoxificación es: peróxido de hidrógeno 100-250 ppm y metabisulfito 100-200 ppm.  Determinar el orden de reacción y el valor de la constante de velocidad de la degradación de cianuro para la dosificación óptima.	X1 = Condiciones óptimas Dimensiones: -Dosificación de reactivos	Dosis de peróxido de hidrógeno (ppm)  Dosis metabisulfito de sodio(ppm)	

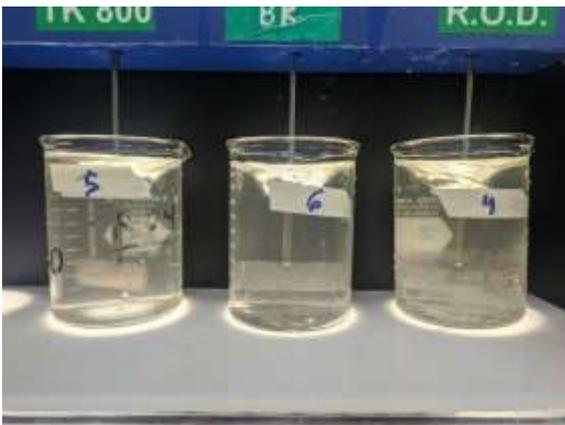
## ANEXO 2

Prueba de test de jarras de la prueba 1, 2 y 3



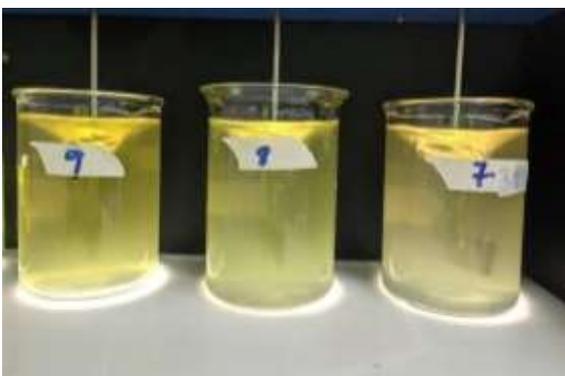
## ANEXO 3

Prueba de test de jarras de la prueba 4, 5 y 6



## ANEXO 4

Prueba de test de jarras de la prueba 7, 8 y 9



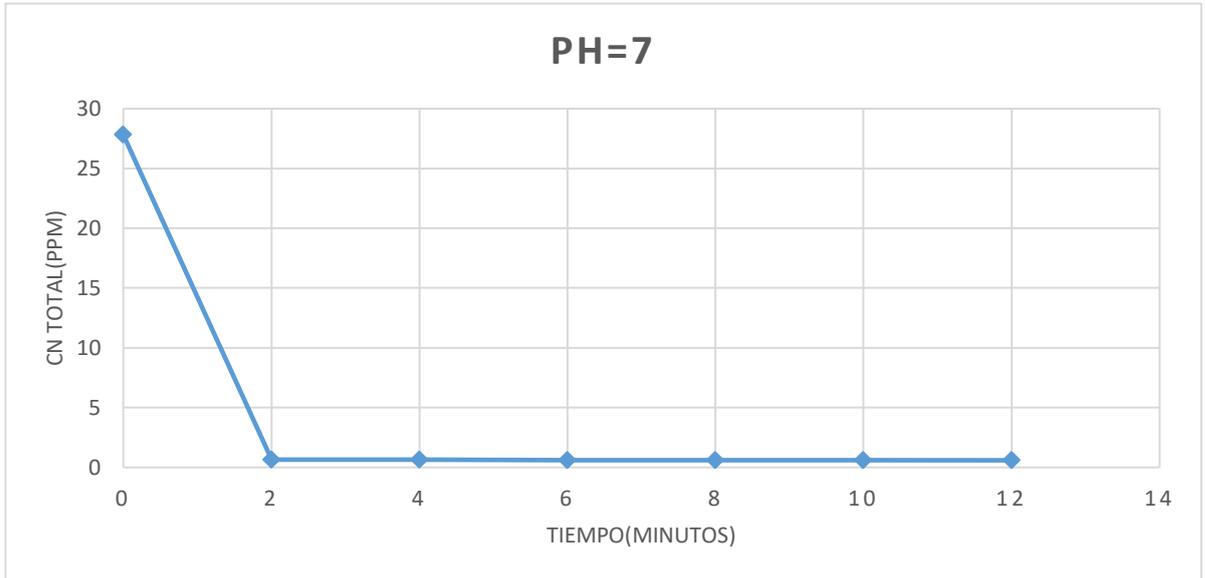
## ANEXO 5

### Comportamiento de cianuro total, libre y cobre a diferentes pH

Prueba	pH	Minutos	CNT	CNL	Cu
1	7	0	27.816	9.545	32.8
2		2	0.649	0.056	25.3
3		4	0.627	0.051	24.9
4		6	0.626	0.048	24.5
5		8	0.624	0.047	24.35
6		10	0.602	0.045	23.7
7		12	0.593	0.042	23.55
8	9	0	27.651	9.956	29.034
9		2	0.579	0.053	14.6
10		4	0.571	0.051	14.5
11		6	0.56	0.042	14.4
12		8	0.544	0.041	14.3
13		10	0.539	0.038	14.1
14		12	0.537	0.036	14.05
15	11	0	27.599	9.582	31.8
16		2	0.622	0.055	3.77
17		4	0.615	0.051	3.72
18		6	0.595	0.048	3.69
19		8	0.583	0.043	3.65
20		10	0.581	0.041	3.58
21		12	0.579	0.039	3.52

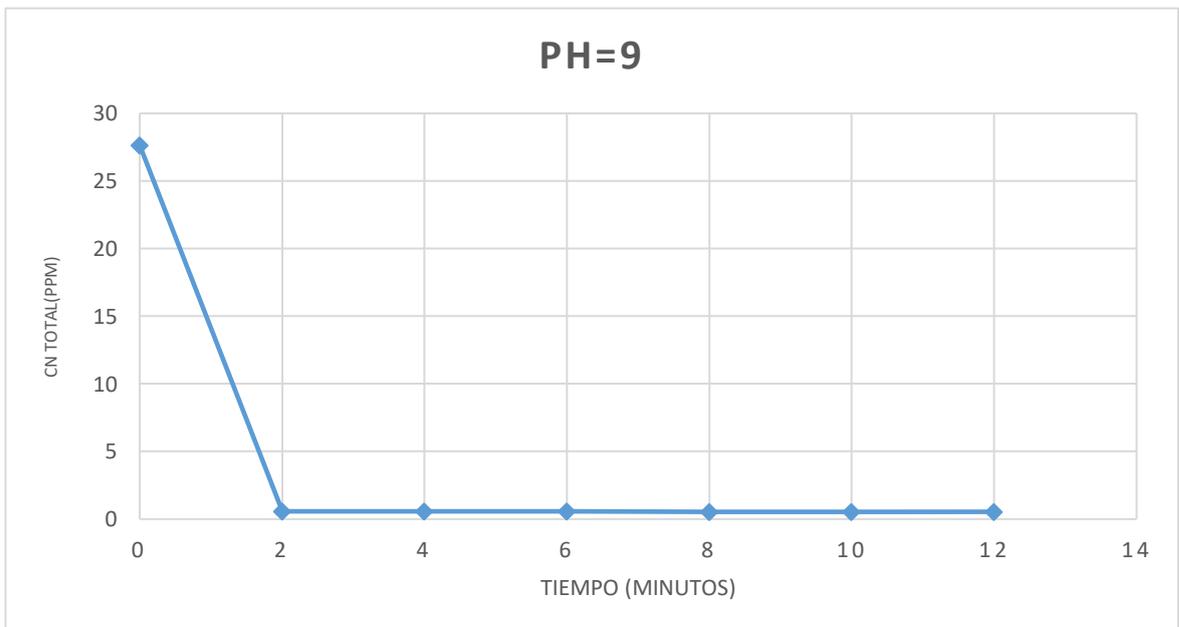
## ANEXO 6

### Concentración de cianuro total en el tiempo a pH 7



## ANEXO 7

### Concentración de cianuro total en el tiempo a pH 9



## ANEXO 8

### Concentración de cianuro total en el tiempo a pH 11

