



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA, PARA EL
PROCESAMIENTO DEL ORO EN TRAPICHES EN EL SECTOR
ANTAHUILA, RINCONADA – PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

EBER JOSUE HUANCA CAHUANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2023



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi alma mater, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO por convertir mis sueños en realidad. En especial quiero hacer llegar mi agradecimiento a mi querida Facultad de Ingeniería Química, a la labor dedicada de todos los catedráticos y en particular a los catedráticos quienes fueron mis docentes.

También quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería de Minas UNA-PUNO, por facilitarme sus laboratorios para realizar de manera satisfactoria los análisis del presente trabajo de investigación.

Un sincero agradecimiento a mi Director de Tesis, D.Sc. Gregorio Palomino Cuela por todo su valioso tiempo, paciencia y consejos que me sirvieron para poder concluir este proyecto.

E. Josue Huanca Cahuana



DEDICATORIA

A Dios por ponerme y guiarme en este camino, es cierto que el esfuerzo lo realizó mi persona, pero la ayuda espiritual es de él. Muchas puertas, muchos caminos cortos y largos se fueron yendo abriendo poco a poco y, sin desmayar con toda la fe se sacó adelante este trabajo de investigación.

A mis queridos padres por su apoyo incondicional y su sacrificio para llegar a este punto de mi vida, por inculcarme los valores y los principios que hasta hoy me sirvieron para mi crecimiento personal y profesional.

E. Josue Huanca Cahuana



ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	Pág.
DEDICATORIA	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. OBJETIVOS	19
1.1.1. Objetivo general	19
1.1.2. Objetivos específicos.....	19
1.2. JUSTIFICACIÓN	19
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. MINERÍA EN EL PERÚ	21
2.2. DRENAJE ÁCIDO DE MINAS (DAM)	22
2.2.1. Características del agua ácida de mina	23
2.2.2. Fuentes de generación de Drenaje Ácido de Minas	24
2.3. FORMACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS	25
2.3.1. Procesos de formación del DAM.....	25
2.3.2. Etapas de formación del DAM	27



2.3.3. Proceso de Oxidación	29
2.4. TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA	31
2.4.1. Tratamientos activos	31
2.4.2. Tratamientos pasivos	32
2.4.3. Tratamiento químico activo de Drenaje Ácido de Minas con Cal	33
2.5. GENERALIDADES DEL ORO	35
2.5.1. El Oro	35
2.5.2. Propiedades Físicas	35
2.5.3. Propiedades Químicas	36
2.5.4. Mineralogía de las menas auríferas	36
2.5.5. Ocurrencia del Oro	37
2.6. OPERACIONES UNITARIAS DE EXTRACCIÓN DEL ORO	38
2.7. PROCESO METALÚRGICO DEL ORO EN TRAPICHE.....	40
2.7.1. Trapiches	40
2.7.2. Amalgamación en Molino	41
2.7.3. Proceso de refinación del Oro	42
2.8. EL MERCURIO	43
2.9. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	44

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. AMBITO DE ESTUDIO.....	50
3.1.1. Ubicación Geográfica	51
3.1.2. Accesibilidad	52
3.1.3. Clima	52
3.2. MATERIALES	52



3.3. VARIABLES DE ESTUDIO	55
3.4. DISEÑO DE ESTUDIO	56
3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	57
3.5.1. Cadena de custodia del muestreo.....	57
3.5.2. Metodología para determinar los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua ácida de mina del sector antahuila, rinconada-puno	59
3.5.2.1. Análisis Físico-Químico de la muestra.....	60
3.5.2.2. Análisis Inorgánico de la muestra de agua sin tratar por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa (L.A.S.).....	61
3.5.3. Metodología para neutralizar las aguas ácidas de mina en el sector antahuila, rinconada-puno, con $Ca(OH)_2$	61
3.5.3.1. Preparación de $Ca(OH)_2$	61
3.5.3.2. Neutralización de aguas ácidas de mina con $Ca(OH)_2$	62
3.5.3.3. Análisis inorgánico de la muestra de agua tratada por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa.....	63
3.5.3.4. Análisis inorgánico de la muestra de agua tratada por Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES, en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano	64
3.5.4. Metodología para evaluar la eficiencia del agua tratada en la concentración del oro en trapiche en el sector antahuila, la rinconada.....	66
3.5.4.1. Pruebas en planta con agua ácida de mina sin tratar.....	66
3.5.4.2. Pruebas en planta con agua ácida de mina tratada.....	66
3.5.4.3. Desarrollo del diseño de experimental y estadística.....	67



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS E INORGÁNICOS DE AGUA ÁCIDA DE MINA DEL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA-PUNO	70
4.1.1. Resultados de parámetros Físico-Químicos de la toma de muestra in situ	70
4.1.2. Resultados de análisis físico-químico en Laboratorio.....	71
4.1.3. Resultado de análisis inorgánico (metales pesados) de la muestra en los Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa.....	72
4.2. NEUTRALIZACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA DEL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA-PUNO, CON $\text{Ca}(\text{OH})_2$.....	73
4.2.1. Resultados de la preparación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	73
4.2.1.1. Primera réplica.....	74
4.2.1.2. Segunda réplica.....	75
4.2.1.3. Tercera réplica	76
4.2.2. Resultados de la neutralización de aguas ácidas de mina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	78
4.2.2.1. Resultados de neutralización de la primera réplica (M1)	78
4.2.2.2. Resultados de Neutralización de la segunda réplica (M2).....	80
4.2.2.3. Resultados de Neutralización de la tercera réplica (M3).....	83
4.2.3. Resultados de determinación de parámetros Físico-Químicos e Inorgánicos de las aguas ácidas de mina ya realizadas el tratamiento	85
4.2.3.1. Resultados de parámetros Físico-Químicos de la muestra tratada	85
4.2.3.2. Resultados del análisis Inorgánico o metales pesados de la muestra tratada, por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa (L.A.S.)	86



Remoción de la concentración de metales pesados del agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada	88
Porcentaje de remoción de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina	88
4.2.3.3. Resultados del análisis inorgánico o metales pesados de la muestra por espectrómetro de emisión atómica por plasma microonda 4210 MP-AES	90
4.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL AGUA TRATADA EN LA CONCENTRACIÓN DEL ORO EN TRAPICHES.....	93
4.3.1. Con agua ácida de mina sin tratar.....	93
4.3.1.1. Resultados del procesamiento de mineral de baja Ley con agua ácida de mina sin tratar en Trapiche 01	94
4.3.2. Con agua ácida de mina tratada.....	95
4.3.2.1. Resultados de la preparación de Lechada de Cal y Neutralización del agua ácida de mina a nivel de Planta	97
4.3.2.2. Tratamiento estadístico del procesamiento de mineral de baja Ley con agua ácida de mina tratada en Trapiche 02.....	101
V. CONCLUSIONES.....	110
VI. RECOMENDACIONES	111
VII. REFERENCIAS.....	112
ANEXOS.....	117

Área: Tecnologías ambientales y recursos naturales

Tema: Tratamiento de aguas

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de enero de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Agentes de precipitación de metales pesados del DAM.....	32
Tabla 2.	Coordenadas del lugar de estudio	51
Tabla 3.	Accesos a la mina la Rinconada.....	52
Tabla 4.	Punto de muestreo de aguas ácidas almacenadas en tanque en la planta Trapiche “Zárate”.....	57
Tabla 5.	Puntos de muestreo de cabeza de mineral para procesar con agua tratada.....	58
Tabla 6.	Puntos de muestreo de cabeza de mineral para procesar con agua sin tratar.....	58
Tabla 7.	Límites Máximos Permisibles de parámetros físico-químicos	59
Tabla 8.	Límites Máximos Permisibles de Metales pesados	60
Tabla 9.	Identificación de las variables y sus niveles para el diseño experimental	67
Tabla 10.	Matriz desarrollada del diseño factorial $2^3 = 8$ pruebas	68
Tabla 11.	Datos de muestreo in situ.....	70
Tabla 12.	Análisis físico-químico en Laboratorio.....	71
Tabla 13.	Concentración de metales pesados de la muestra	72
Tabla 14.	Preparación de lechada de Cal de la primera réplica	74
Tabla 15.	Preparación de lechada de Cal de la segunda réplica.....	75
Tabla 16.	Preparación de lechada de Cal de la tercera réplica.....	76
Tabla 17.	Neutralización de la primera réplica (M1).....	78
Tabla 18.	Primera y segunda derivada de neutralización de la primera réplica M1	79
Tabla 19.	Neutralización de la segunda réplica (M2)	80
Tabla 20.	Primera y segunda derivada de neutralización de la segunda réplica M2	82
Tabla 21.	Neutralización de la tercera réplica (M3)	83



Tabla 22.	Primera y segunda derivada de neutralización de la tercera réplica M3.....	84
Tabla 23.	Resultados de los parámetros físico-químicos de la réplica M3 del agua ácida de mina tratada.....	85
Tabla 24.	Resultados del análisis de metales pesados de la muestra de agua tratada	87
Tabla 25.	Concentración de metales pesados removidos del agua ácida de mina de entrada y salida	88
Tabla 26.	Porcentaje removido de metales pesados.....	89
Tabla 27.	Concentración y remoción de metales pesados removidos del agua ácida de mina de entrada y salida.....	91
Tabla 28.	Porcentaje removido de metales pesados.....	91
Tabla 29.	Ley de mineral de baja Ley para el procesamiento con agua ácida de mina sin tratar	93
Tabla 30.	Cantidad de Oro amalgamado con agua ácida de mina sin tratar	95
Tabla 31.	Ley de mineral de baja Ley para el procesamiento con agua ácida de mina tratada.....	96
Tabla 32.	Control de pH en Tanque 01 de DAM.....	99
Tabla 33.	Control de pH en Tanque 02 de DAM.....	101
Tabla 34.	Identificación de las variables y sus niveles para el diseño experimental	102
Tabla 35.	Resultados de la Cantidad de Oro amalgamado con agua ácida de mina tratada	103
Tabla 36.	Resultados de la interacción de las variables en la recuperación de Oro en Planta.....	104
Tabla 37.	Efectos estimados para rendimiento de Oro	105
Tabla 38.	Resultados de Análisis de Varianza	105



Tabla 39. Coeficiente de regresión para Recuperación de Oro.....	106
Tabla 40. Valores óptimos para el porcentaje de recuperación de Oro	107



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Comparación de pH del Drenaje Ácido de Minas con otros elementos.....	24
Figura 2.	Fuentes de generación de agua ácida de mina en mina de tajo abierto	25
Figura 3.	Proceso de formación y desarrollo de DAM en mina subterránea	26
Figura 4.	Proceso de formación y desarrollo de DAM mina a cielo abierto.....	26
Figura 5.	Proceso de formación y desarrollo de DAM en mina a cielo abierto.....	27
Figura 6.	Etapas de formación de aguas ácidas de mina.....	29
Figura 7.	Precipitación general de metales pesados de acuerdo a la concentración vs pH	34
Figura 8.	Diagrama de flujo del tratamiento de aguas ácidas de minas en planta	35
Figura 9.	Procesamiento del Oro en trapiche.....	41
Figura 10.	Amalgamación de Oro en Molino de bolas.....	42
Figura 11.	Centro Poblado La Rinconada.....	50
Figura 12.	Sector Antahuila	51
Figura 13.	Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua ácida de mina y su recirculación en el procesamiento del Oro	56
Figura 14.	Pruebas de preparación de Lechada de Cal	62
Figura 15.	Proceso de neutralización de Agua ácida de mina	63
Figura 16.	Marcha analítica	64
Figura 17.	Equipo de análisis de metales pesados	65
Figura 18.	Reactivos patrón para análisis de metales pesados en espectrómetro de emisión atómica por plasma microondas 4210 MP-AES.....	65
Figura 19.	Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal – primera réplica.....	74



Figura 20.	Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal – segunda réplica	76
Figura 21.	Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal – tercera réplica	77
Figura 22.	Neutralización pH vs Volumen de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la primera réplica M1	79
Figura 23.	Neutralización pH vs Volumen de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la segunda réplica M2	81
Figura 24.	Neutralización pH vs Volumen de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la tercera réplica M3.....	83
Figura 25.	Porcentaje de metales pesados removidos de la muestra de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada.	89
Figura 26.	Porcentaje de metales pesados removidos de la muestra de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada	92
Figura 27.	Resultados de contenido de Oro en mineral de baja Ley para procesar con agua ácida de mina tratada	96
Figura 28.	Diagrama de Pareto estandarizado de interacción de factores	107
Figura 29.	Diagrama de efectos principales para recuperación de Oro	108
Figura 30.	Contornos de la superficie respuesta estimada	109



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CALCESUR:	Cal y Cemento Sur
DAM:	Drenaje Ácido de Mina
DS:	Decreto Supremo
FIM:	Facultad de Ingeniería de Minas
FIQ:	Facultad de Ingeniería Química
INACAL:	Instituto Nacional de Calidad
LAS:	Laboratorios Analíticos del Sur
LMP:	Límite Máximo Permisible
MINAM:	Ministerio del Ambiente
MINEM:	Ministerio de Energía y Minas
NTU:	Nephelometric Turbidity Unit
OD:	Oxígeno Disuelto
pH:	Potencia del Hidrógeno
TDS:	Sólidos Totales Disueltos
Tm:	Toneladas métricas
UNAP:	Universidad Nacional del Altiplano-Puno
UTM:	Universal Transverse Mercator



RESUMEN

La presente investigación se realizó en las instalaciones del Laboratorio Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA-Puno. Actualmente la recuperación de Oro en Trapiche en el Sector Antahuila Rinconada viene siendo mínima por el uso de agua ácida de mina sin tratar. Se planteó los siguientes objetivos; determinar los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua ácida de mina, neutralizar las aguas ácidas de mina con el método de Lechada de Cal y evaluar la eficiencia del agua tratada en la concentración de Oro en Trapiche. En la parte de metodología se inició tomando 01 muestra de DAM para determinar los parámetros fisicoquímicos e inorgánicos por absorción atómica, luego se realizaron pruebas de neutralización con Lechada de Cal al 1 % por precipitación alcalina en tres réplicas y posteriormente se evaluó la eficiencia del agua tratada en la concentración de Oro realizándose 8 experimentos a nivel de planta Trapiche mediante el diseño experimental factorial 2^3 controlando las variables de pH, tiempo y caudal. Se obtuvieron los siguientes resultados: se encontraron metales pesados disueltos (Al, Cd, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) los cuales sobrepasaron los LMP de acuerdo al D.S. N° 004-2017-MINAM agua de categoría III, con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 1 % y pH igual a 8,35 se logró remover Al en un 88,64 %; Cd 99,41 %; Cu 99,53 %; Co 99,98 %; Fe 99,88 %; Mn 94,99 %; Ni 99,94 %; Pb 97,80 % y Zn 99,91 %; en el Segundo análisis el Al logró removerse en un 99,83 %; Cd 36,17 %; Cu 70,77 %; Fe 99,81 %; Mn 86,88 %; Pb 99,15 % y Zn 94,46 %, finalmente a nivel de planta Trapiche utilizando agua ácida de mina tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se recuperó oro en un 53,1 % en promedio y con agua sin tratar fue del 44,2 %. Se concluyó que al remover los metales pesados del DAM y controlar variables de pH, Tiempo y Caudal, el agua tratada cumple los LMPs con lo cual, se logró recuperar un 8,9 % de Oro en comparación del agua ácida de mina sin tratar.

Palabras clave: Agua ácida, metales pesados, Oro, Lechada de Cal, Trapiche.



ABSTRACT

The present investigation was carried out in the facilities of the Quality Control Laboratory of the Faculty of Chemical Engineering of the UNA-Puno. Currently, the recovery of gold in Trapiche in the Antahuila Rinconada Sector has been minimal because the use of untreated acid mine water. The following objectives were raised to determine the physical-chemical and inorganic parameters of the acid mine water, neutralizing the acid mine water with "lechada de cal" method and evaluate the efficiency of the treated water in the concentration of Gold in Trapiche. In the methodology part it began by taking 01 sample of DAM to determine the physicochemical and inorganic parameters by atomic absorption, then neutralization tests were carried out with 1 % "lechada de cal" by alkaline precipitation in three replicates and later the efficiency of the water was evaluated and treated in the Gold concentration, carrying out 8 experiments at the Trapiche plant level using the 2^3 factorial experimental design, controlling the variables of pH, time and flow. The following results were obtained: heavy metals (Al, Cd, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) were found which exceeded the LMP according to D.S. N° 004-2017-MINAM category III water, with 1% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and pH equal to 8,35 previously 88,64 % Al were eliminated ; Cd 99,41 %; Cu 99,53 %; Co 99,98 %; Fe 99,88 %; Mn 94,99 %; Ni 99,94 %; Pb 97,80 % and Zn 99,91 %; in the second analysis Al was removed by 99,83 %; Cd 36,17 %; Cu 70,77 %; Fe 99,81 %; Mn 86,88 %; Pb 99,15 % and Zn 94,46 %, finally at the Trapiche plant level using acid mine water treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gold was recovered by 53,1 % on average and with untreated water it was 44,2 %. It was concluded that by removing the heavy metals from the DAM and controlling variables of pH, Time and Flow the treated water is according with the LMP it will recover 8,9 % of Gold compared to acid mine water without trying.

Keywords: Acid water, heavy metals, Gold, Milk of Lime, Trapiche.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el Perú de aproximadamente 180 mineras operativas de gran escala, mediana y pequeña, solo 25 a 30 declaran sus problemas de drenaje ácido de mina, pero entre minas abandonadas, mineras informales y yacimientos de sulfuros metálicos no se registran información exacta. Muy pocas mineras generan un potencial bajo de DAM porque su geología es favorable, entonces el DAM viene drenando a las cuencas hídricas eliminándose poco a poco en lagos o ríos generando impacto ambiental (MINAM, 1995).

La Rinconada es un sector minero importante de la región de Puno que está ubicada al norte de la región Puno que tiene una población aproximadamente mayor a 50000 habitantes entre lugareños y personas que van en busca del metal precioso “el Oro”. En los últimos años los trabajadores mineros se dedicaron a procesar mineral en Trapiches en el Sector Antahuila, pero este mineral es grueso de baja ley mezclado entre la ganga.

Es indispensable la electricidad y el agua para la operación de los Trapiches en el sector Antahuila de la Rinconada, el mismo se encuentra ubicado a varios kilómetros de la nevada Ananea por lo que es costoso transportar el agua por tuberías. Existe reservas de agua ácida en mina interior en pozos de gran profundidad generadas por la filtración de aguas de deshielo y precipitación pluvial en el sector Lunar de Oro pero que estas aguas al entrar en contacto con minerales sulfurados y aire se convierten en agua ácida, los mismos que son transportadas por sistema de bombeo y posteriormente son almacenadas en tanques para su uso inmediato en Trapiches.



El trapiche es un reactor que se encarga de la molienda en general de mineral ya sea la etapa primaria, secundaria y terciaria, en la Rinconada generalmente es utilizado como deslamador de mineral. La base del funcionamiento se sostiene en girar dos ruedas con gran peso de material acero sobre una pista de también de acero, por lo tanto al entrar en contacto con el mineral se efectúa la reducción de tamaño y con la presencia de un cierto caudal de ingreso de agua se realiza el deslame y concentración de Oro por gravimetría (Chambi, 2013).

Las aguas ácidas al tener alta concentración de metales tóxicos, al tener pH bastante ácido y algunas propiedades fisicoquímicas alteradas, hace que el Oro no concentre bien por gravimetría y junto con el deslame salga en forma de cápsulas con la pirita ya que gran parte del Oro no ha sido liberado del sulfuro. La presencia de los sulfosales de bismuto y arsenopirita son también uno de los responsables de la baja recuperación de Oro en el proceso de amalgamación (Sudzuki & Abella, 2011).

Es por eso que en esta investigación se estudió el uso de las aguas ácidas de mina en el procesamiento del Oro, pero en primer lugar se realizó una previa caracterización de las aguas ácidas luego se realizó el tratamiento con lechada de cal, para cumplir con el agua de categoría III (riego de vegetales y bebida de animales) de acuerdo al D.S. N° 004-2017-MINAM. En segundo lugar, se neutralizó el DAM con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y por último se empleó estas aguas ácidas en el proceso de concentración del Oro en trapiches, de esa manera se comprobó la eficiencia del DAM tratada en la recuperación de Oro.

El tiempo, el pH y el caudal fueron las variables que se tomaron en cuenta para optimizar este proceso de recuperación de Oro en la presente investigación.



1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Tratar las aguas ácidas de mina para el procesamiento del Oro en Trapiches en el Sector Antahuila, Rinconada – Puno.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua ácida de mina.
- Neutralizar las aguas ácidas de mina con el método de Lechada de Cal
- Evaluar la eficiencia del agua tratada en la concentración del Oro en Trapiche.

1.2. JUSTIFICACIÓN

- **Justificación ambiental**

Se sostiene en la reutilización de aguas ácidas de minas en el proceso metalúrgico del Oro, en donde se busca proponer el presente método de tratamiento con Lechada de Cal, que aparte de solucionar el problema de la concentración del Oro, logra remover las concentraciones elevadas de metales pesados en los efluentes de la planta Trapiche y por tanto se estará mitigando el impacto hacia el medio ambiente ya que estas aguas también podrán ser utilizadas como agua para riego de vegetales y bebida para animales.

- **Justificación social**

El uso de agua ácida en concentración de Oro en Trapiches y por consecuencia la no eficiencia en la recuperación del oro es probablemente por la carencia de recursos humanos y financieros. El tratamiento con lechada de cal es el método con menor costo a comparación de otros métodos, sin embargo, es importante el involucramiento de los dueños de plantas y



trabajadores de trapiches para usar este método de tratamiento que es efectiva en solución del problema, ya que ellos mismos podrán realizar la operación.

- **Justificación Científica y/o tecnológica**

La baja recuperación de Oro en plantas concentradoras de Oro en el Sector Antahuila, usando aguas ácidas de mina, es preocupación para los empresarios. Frente a esto como profesionales del área nos vemos en la necesidad de evaluar y dar alternativas de solución para mejorar la rentabilidad del proceso. Mediante este estudio se da a conocer el método de tratamiento, el fundamento de lo que sucede en el tratamiento y la reutilización de las aguas ácidas tratadas en el procesamiento del Oro. Además, la presente investigación servirá como base de datos y revisión bibliográfica para futuras investigaciones en el sector Antahuila, Centro Poblado La Rinconada.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MINERÍA EN EL PERÚ

El Perú es el primer productor de Plata en el Mundo, segundo de Cobre, tercero de Estaño. A nivel Latinoamérica nuestro país es el primer productor de Estaño, Zinc, Plomo, Oro, Plata. La minería en el Perú históricamente fue importante desde los tiempos precoloniales y coloniales para el desarrollo económico. Sin embargo, con el paso del tiempo la minería en los últimos años ocasionó grandes impactos negativos al medio ambiente y ha sido estudiado y difundido, pero también trajo impactos positivos para el desarrollo de la industria. Hablar de Perú es sinónimo de riqueza ya que desde el siglo XVI la minería del Perú se hizo conocida en el viejo continente, porque la conquista Española inundó todo el mercado Europeo con la venta de la plata (Osinerming, 2017).

Geográficamente contamos con un territorio excelentemente ubicado dentro del centro de América del Sur que nos facilita para tener acceso a los grandes mercados de los Estados Unidos y del Sudeste Asiático. La cordillera de los Andes es el principal fuente y reserva de recursos minerales que algunas están siendo explotadas y la mayoría se encuentra en exploración y por explotar, prácticamente el Perú es un atractivo geológico que está reconocida internacionalmente (MINEM, 2018).

En las actividades del sector de la minería industrial es donde se realiza mayor consumo de agua, el agua en la minería es uno de los elementos más importantes para comenzar todas sus operaciones, sin embargo, cierta cantidad de estas aguas son generadas durante trabajos de excavación, el agua se infiltra por gravedad de acuíferos y también se



junta por escorrentía superficial. Es importante mencionar que estas aguas tienen que ser evacuadas fuera del área de trabajo, las mineras llevan el control, evacuación, medidas de prevención de la contaminación, y la parte de tratamiento durante y después de su explotación del mineral (Aduvire, 2006).

2.2. DRENAJE ÁCIDO DE MINAS (DAM)

El drenaje ácido de minas es producto de la contaminación inorgánica de las aguas superficiales que por filtración y acumulación terminan en efluente en las zonas mineras, estas minas pueden estar en operación o abandonadas. Se puede decir que es la consecuencia a causa de la oxidación de los minerales sulfurados, principalmente la pirita, la pirrotita, marcasita, etc. Las aguas ácidas de minas de manera general se genera indispensablemente por contacto entre el mineral sulfurado, el agua y el oxígeno (Aduvire, 2006).

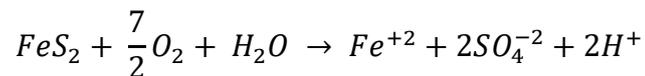
El agua ácida de mina el resultado de la acidificación de las aguas superficiales que se encuentran en la mina interior y del agua que se encuentra en superficie por entrar en contacto con minerales que contienen distintos metales. Estas aguas se caracterizan por tener bajo contenido de pH generalmente por debajo de 4, también se caracterizan por tener alta concentración de hierro y sulfatos, por tener alta conductividad eléctrica, y concentraciones elevadas de metales pesados disueltos como el Cd, Zn, Al, As, Sb, Mn, Hg, Cu, Pb, etc (Lottermoser, 2007).

El principal contribuyente de la formación de las aguas ácidas es la oxidación de la pirita y otros minerales sulfurados, todo este proceso genera la formación de iones de hidrógeno. El pH bajo es característica principal del DAM, a esto se tiene conductividad eléctrica elevada, metales pesados disueltos, etc. Es importante saber que la oxidación de minerales sulfurados, aparte de generar aguas ácidas también forman sulfatos y metales



pesados (principalmente Fe y Al), actúa como un acelerador que crea lixiviado de otros elementos presentes en la ganga. Las aguas ácidas de mina liberan metales pesados como (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Cr, Ni, Hg), metaloides como (As, Sb) y elementos como (Al, Mn, Si, Ca, Na, K, Mg, Ba, F) (Geldenhuis & Bell, 1998).

La reacción de la pirita (FeS_2) con O_2 y H_2O forma hierro, sulfatos y iones de Hidrógeno



2.2.1. Características del agua ácida de mina

Las aguas ácidas de mina se caracterizan generalmente por tener altas concentraciones de sulfatos (mayor a 1000 mg/L), altas concentraciones de hierro y aluminio (mayor a 10 mg/L) y también elevadas concentraciones de Cobre, Cromo, Niquel, Plomo y Zinc (mayor a 10 mg/L). Las concentraciones de Aluminio y Hierro disueltos son más elevadas que los otros metales pesados. Sin embargo, los elementos como el Sodio, Calcio, Magnesio y el Potasio también se encuentran con concentraciones muy elevadas. En cuanto a estos últimos metales no son los de gran importancia ambiental, pero el uso de estas aguas con alta concentración de Sodio puede impedir su empleo en riego de suelos, y con alta concentración de Calcio y Magnesio influye en la toxicidad del Zinc (Lottermoser, 2007).

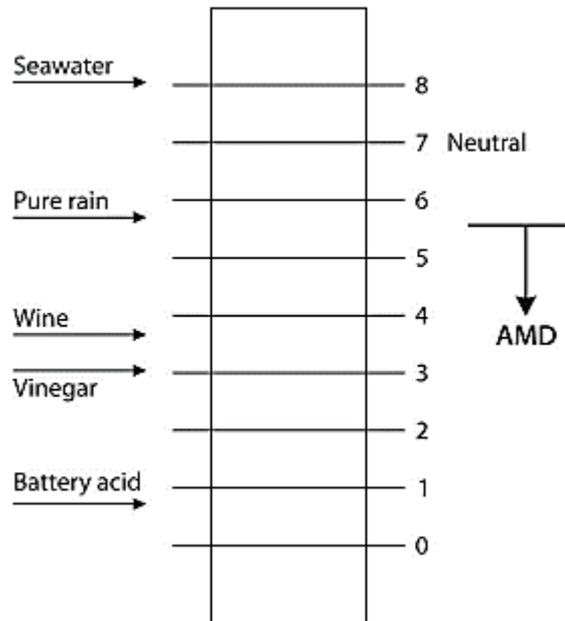


Figura 1. Comparación de pH del Drenaje Ácido de Minas con otros elementos (Lottermoser, 2007)

2.2.2. Fuentes de generación de Drenaje Ácido de Minas

La existencia de metales (Au, Cu, Pb, U, Fe, Ni, etc) en los grandes o pequeños depósitos de minerales ya sea vetas de carbón, minerales de fosfato y reservas de arena con contenido de mineral, son las que exponen estos minerales de sulfuros a oxidarse y por lo tanto generan drenaje ácido de mina. En tal sentido el agua se vuelve ácida por la reacción entre el agua meteórica o llamada también agua subterránea con los sulfuros presentes, estas fuentes generadoras de aguas ácidas son los pozos acumulados en mina interior, las paredes y pisos de los tajos, la roca virgen, todos los trabajos en mina interior, también se generan en pilas de lixiviación y en relaves acumulados (Lottermoser, 2007).

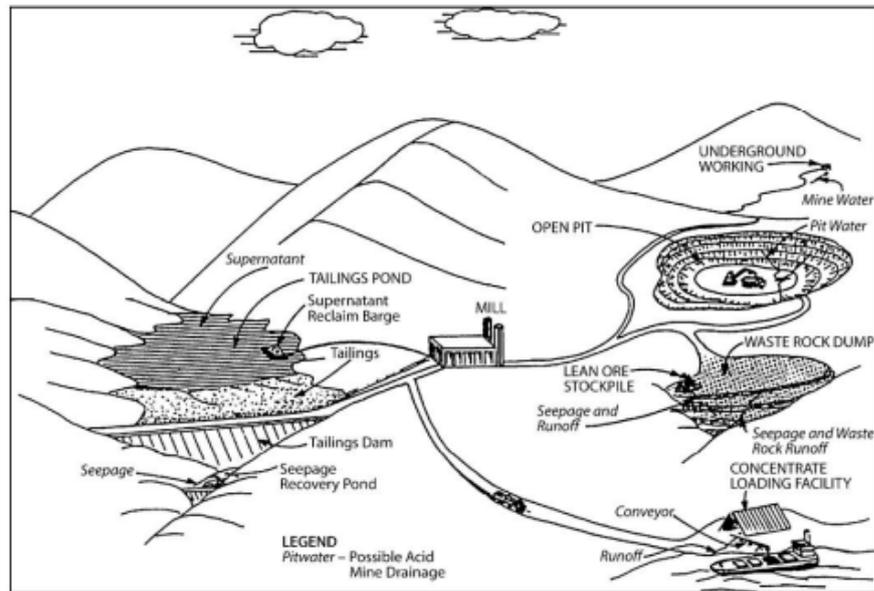


Figura 2. Fuentes de generación de agua ácida de mina en mina de tajo abierto (Ferguson & Erickson, 1988)

2.3. FORMACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS

2.3.1. Procesos de formación del DAM

El agua ácida de mina se forma por distintos procesos independientemente del clima árido o tropical y estas aguas están en sitios donde se encuentran los minerales, los procesos de formación son los siguientes:

Primero el agua natural subterránea empieza ingresando a los trabajos que se realizan en las minas interiores a nivel freático alto. Estas aguas salen a través de aberturas subterráneas o también se opta en bombear a la superficie para luego almacenar.

Segundo el agua subterránea puede ingresar a excavaciones y luego son empozadas. Luego la precipitación meteórica alcanza en contacto con las paredes del tajo. En consecuencia, también actúa la precipitación pluvial en la formación de la acidez del agua, ya que se pone en contacto con minerales sulfurados.

Tercero el relave minero en ocasiones es acumulado en ciertos pozos por lo cual el agua superficial drenada de este y son aguas de pilas de lixiviación, pilas de escombros de otros minerales como el carbón y vertederos de desmontes.

Cuarto cuando se descarga aguas gastadas de procesos de lixiviación, de pilas, de presas, estanques de manera controlada o no controlada.

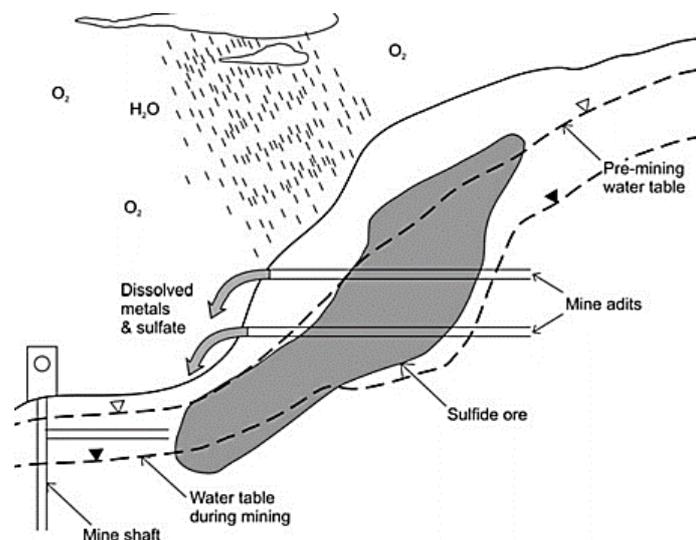


Figura 3. Proceso de formación y desarrollo de DAM en mina subterránea (Ferguston & Erickson, 1988)

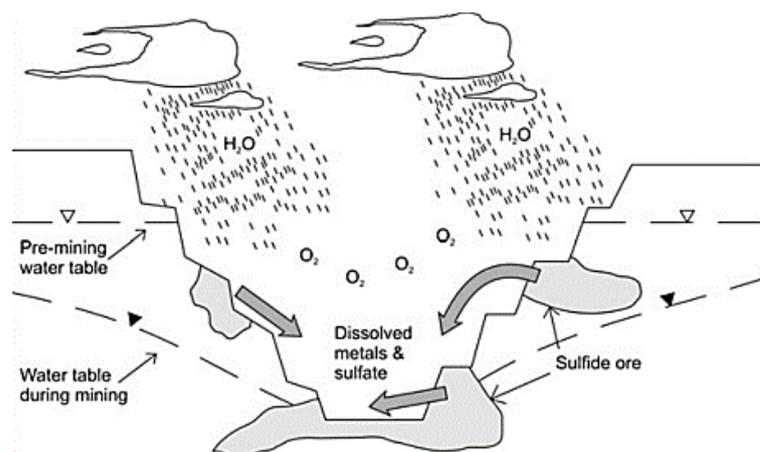


Figura 4. Proceso de formación y desarrollo de DAM en mina a cielo abierto (Ferguston & Erickson, 1988)

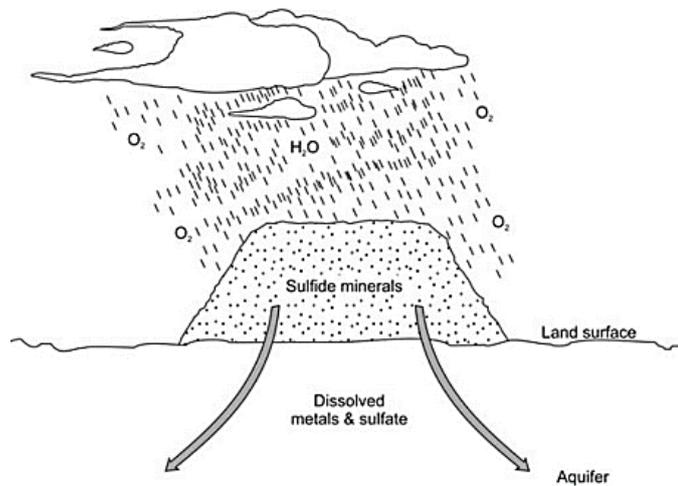


Figura 5. *Proceso de formación y desarrollo de DAM en mina a cielo abierto (Ferguston & Erickson, 1988)*

2.3.2. Etapas de formación del DAM

Aduvire (2006) explica el proceso de formación de aguas ácidas en tres etapas, lo cual lo desarrolla de la siguiente manera:

- **ETAPA I**

La reacción de oxidación de mineral sulfurado genera hierro ferroso, después en medio alcalino el hierro ferroso mediante oxidación química se transforma en hierro férrico para luego precipitar en forma de hidróxido férrico, de manera que genera acidez al medio. El proceso de reacción química es lento tanto en el mecanismo de generación ácida directa e indirecta. La formación de aguas ácidas se genera por oxidación debido a la presencia del aire y de bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*) pero la velocidad de reacción es a la par, ya que este último actúa como un catalizador. De manera que cualquier medio alcalino (carbonatos, silicato, etc) podrá neutralizar arbitrariamente la acidez producida.



- **ETAPA II**

Esta etapa es complicada porque la acidez del agua es predominante ya que la pirita se oxida de manera rápida por acción bacteriana y la capacidad de neutralización es superada por la acidez acumulada, el pH es considerablemente bajo. En este proceso se forma sulfato ferroso que mediante un proceso de oxidación pasa a ser sulfato férrico, mezclado con el agua se forma el ácido sulfúrico y el hidróxido férrico, de manera que este es característico de la coloración amarillenta del DAM. En esta segunda etapa el mecanismo por oxidación por medio del aire disminuye y por el contrario el mecanismo indirecto aumenta.

- **ETAPA III**

Cuando el pH está por debajo de 3 en medio cercano a minerales de pirita (pH de 4,5 en el agua), entonces el hierro férrico se ve afectado porque ocurre reacción de óxido-reducción, de manera que el sulfuro de hierro se lixivia a sulfato por acción bacteriana. La generación de ácido es variable en esta etapa porque al aumentar la solubilidad del hierro, se ve disminuida la precipitación del hierro en forma de hidróxido férrico. En conclusión, en esta etapa la generación de aguas ácidas es en más cantidad debido a que las bacterias *Thiobacillus ferrooxidans* oxidan al ión ferroso hasta convertir en ión férrico y que a su vez oxida a la pirita. Para esta etapa se deben de tener en cuenta los siguientes:

- Se debe utilizar el mecanismo indirecto, de manera que la producción de aguas ácidas puede reducir en un 75%.
- Se inhibe la oxidación cuando su pH del agua sube por encima de 5.
- Cuando el pH del agua se encuentra en 4,5, el sulfuro de hierro se oxida lentamente.

- Cuando el pH desciende debajo de 2,5, entonces se puede decir que se establece un equilibrio porque la acción de las bacterias *Thiobacillus ferrooxidans* se estabiliza, quiere decir que en este punto las bacterias alcanzan su punto óptimo de acción (la reacción es más rápida que el mecanismo directo).

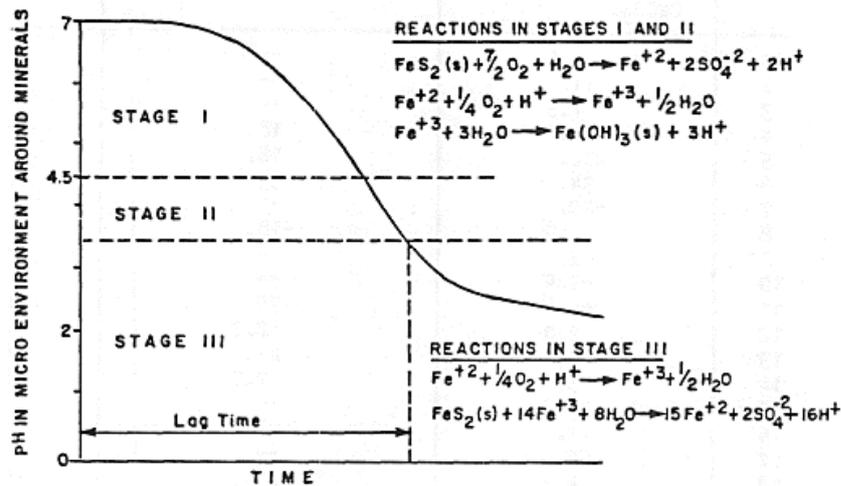


Figura 6. Etapas de formación de aguas ácidas de mina (Ferguston & Erickson, 1988)

2.3.3. Proceso de Oxidación

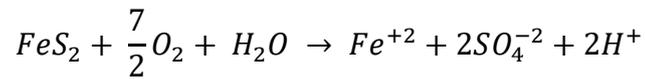
El agua ácida de mina se forma a causa de reacciones químicas complejas e interrelacionadas. En esta parte tiene que ver la velocidad de generación de agua ácida y la magnitud para saber cuáles son los factores que afectan. Se sabe que los componentes principales para la generación de las aguas ácidas de mina son los minerales sulfurados, el oxígeno y el agua (Cervantes, 2014).

Los factores que afectan la velocidad y magnitud de generación del DAM son:

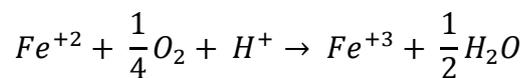
- pH
- Temperatura
- Bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*)



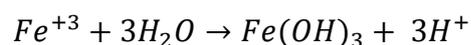
Hablar de generación de ácido en aguas de mina es hablar de oxidación de la pirita, ya que es uno de los minerales sulfurosos más comunes. En las siguientes reacciones químicas se puede mostrar la formación de ácido a partir de la pirita.



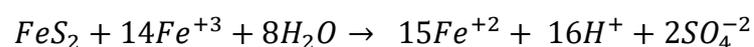
El ion ferroso se oxida con el oxígeno para luego formar el ión férrico



El hierro férrico después puede precipitar en forma de hidróxido, pero esto dependiendo del pH en el ambiente en el sitio de oxidación. También el ión férrico puede ser utilizado como un oxidante. Sin embargo, el ión férrico generalmente se precipita desde un pH 3,5 en forma de hidróxido. De manera que en el precipitado se puede observar una coloración rojiza y que también se puede observar en cualquier agua ácida de mina. En esta precipitación del hierro en forma de hidróxido, se aumenta la liberación de iones de hidrógeno.



Como se mencionó en el anterior párrafo el ión férrico sirve como oxidante para la formación de sulfuros como la pirita, ocurre a medida que se genera ácido pues se va consumiendo la alcalinidad disponible en el agua. La siguiente reacción es de oxidación de la pirita con ión férrico para formar ión ferroso:





La velocidad de oxidación química depende de la velocidad de provisión de cantidad de oxígeno ya que es el elemento que lo controla. A pH debajo de 4,5 se vuelve dominante el proceso de oxidación del hierro. El hierro férrico se produce a partir del hierro ferroso y esto se convierte en un proceso controlante del total de oxidación que ocurre en el agua. También es importante saber que en tal reacción las bacterias actúan como catalizadores lo cual aumenta la velocidad de reacción. (Cervantes, 2014).

2.4. TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA

2.4.1. Tratamientos activos

El presente sistema de tratamiento principalmente consiste en oxidación de hierro ferroso a hierro férrico. Este tratamiento en general requiere de supervisión constante del sistema como la electricidad, los insumos químicos, la remoción de otros subproductos, etc. El proceso de oxidación del hierro ocurre por aireación natural o también mecánica, se realiza con el propósito de disminuir la cantidad de insumos químicos a utilizar para este tratamiento. Luego se tiene que emplear el uso de la calcita, lechada de cal, soda cáustica, etc. De esta manera se realiza la neutralización alcanzando pH que están dentro los LMP para permitir la descarga a efluentes o para la reutilización.

A continuación, se presenta algunos agentes empleados para el tratamiento activo del DAM:

Tabla 1. Agentes de precipitación de metales pesados del DAM

AGENTE PRECIPITANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Hidróxido cálcico	Bajo coste	Impurezas, proceso lento Precipita el CaSO_4 , CaCO_3
Carbonato de sodio	Soluble y rápido	Coste superior
Hidróxido de sodio	Limpio y rápido	Coste relativamente alto
Amoniaco	Soluble y rápido	Formación de complejos, nitratos y amoniaco residual
Sulfuro de sodio	Productos muy insolubles	Desprende H_2S
Ácido sulfúrico	Rápido y bajo coste	Precipita el CaSO_4
Ácido clorhídrico	Rápido y limpio	Coste relativamente alto
Dióxido de carbono	Disponibles gases y otros combustibles	

Fuente: (Aduvire, 2006)

2.4.2. Tratamientos pasivos

Este sistema de tratamiento es el más novedoso y atractivo para las mineras, pero en especial es un sistema de tratamiento que se puede aplicar en las minas que estén en etapa de cierre o abandono porque este tratamiento no necesita supervisión constante como el sistema de tratamiento activo, necesita mínima intervención del ser humano, no necesita el uso de electricidad, tampoco uso de insumos químicos. El sistema más conocido es el tratamiento mediante humedales, canales de piedra caliza ya sean abiertos o cerrados, barreras reactivas permeables, y entre otros (Chaparro & Ardilla, 2018).

Los humedales no solo cambian el grado de humedad y las propiedades del suelo, sino también pueden remover metales pesados como el hierro, el manganeso y otros metales pesados del drenaje ácido de minas. Se puede decir que los humedales tienen la capacidad de

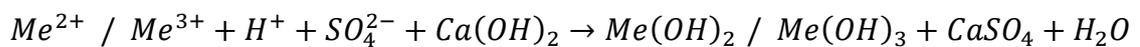


generar alcalinidad y en consecuencia inmovilizan ciertos metales pesados (Johnson & Hallberg, 2005).

2.4.3. Tratamiento químico activo de Drenaje Ácido de Minas con Cal

Este tratamiento se realiza especialmente para grandes caudales de agua ácida de mina utilizando el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 o más conocido como lechada de Cal. Es importante saber que la lechada de Cal tiene la capacidad de ser hidrófoba por lo que se consigue una buena disolución en agua, utilizando un agitador para poder realizar la mezcla homogénea y por ende la reacción química. Para la precipitación del hierro se necesita aireación, de manera que el hierro se va oxidando de ión ferroso a ión férrico, de esta manera el hierro se puede remover eficientemente. Los lodos que se generan durante el tratamiento contiene en mayor cantidad el sulfato cálcico, para su disposición se requiere un área de almacenamiento o se puede recircular porque tiene alto contenido de Cal. Se requiere un pH elevado para remover el Manganeseo (Aduvire, 2006).

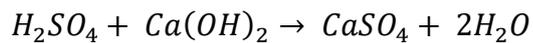
En la siguiente ecuación se observa la reacción del agua ácida de mina en medio alcalino para producir precipitado de lodos de sulfato de calcio y por consiguiente agua tratada:



- **Neutralización con Lechada de Cal**

El presente método es el tratamiento químico convencional, se realiza mediante adición de sustancia alcalina (Ca(OH)_2), es el proceso de tratamiento más conocido en las empresas mineras que generan efluentes ácidos. Se realiza en tres etapas:

1. Neutralización con una base fuerte (Ca(OH)_2)



2. Oxidación del ión ferroso a ión férrico

Este proceso se lleva a cabo por la acción del oxígeno de la atmósfera en los tanques de agua ácida de mina mediante agitación mecánica. De esta manera se consigue insolubilizar al hierro.

3. Precipitación del hierro en forma de hidróxido

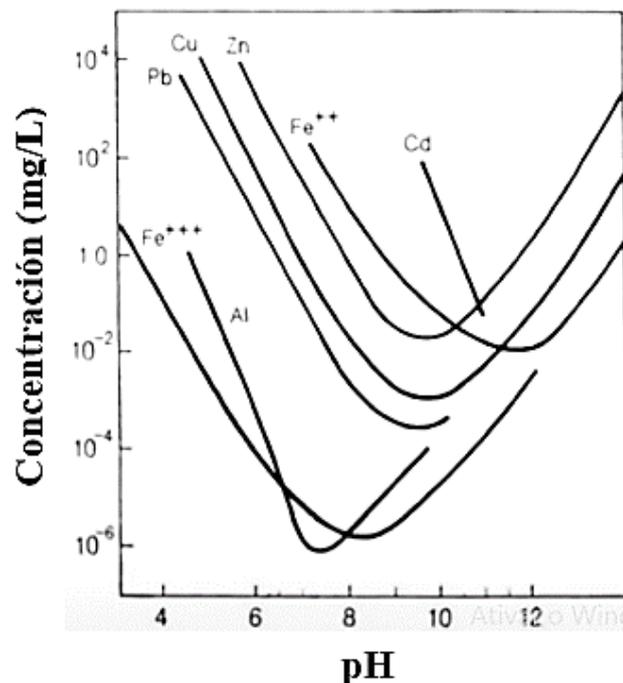
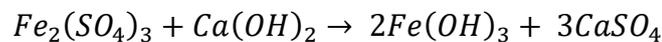


Figura 7. Precipitación general de metales pesados de acuerdo a la concentración vs pH (Aduvire, 2006)

Para precipitar metales tóxicos con lechada de cal se necesita pH variable, por ejemplo para precipitar el Pb^{2+} se necesita un pH mínimo de 6,3, para Fe^{2+} es 9,5, para el Mn^{2+} es 10,6. El Al y el Zn también precipitan a pH alcalino (Aduvire, 2006).

En la siguiente figura se puede mostrar el proceso de neutralización química convencional en planta:

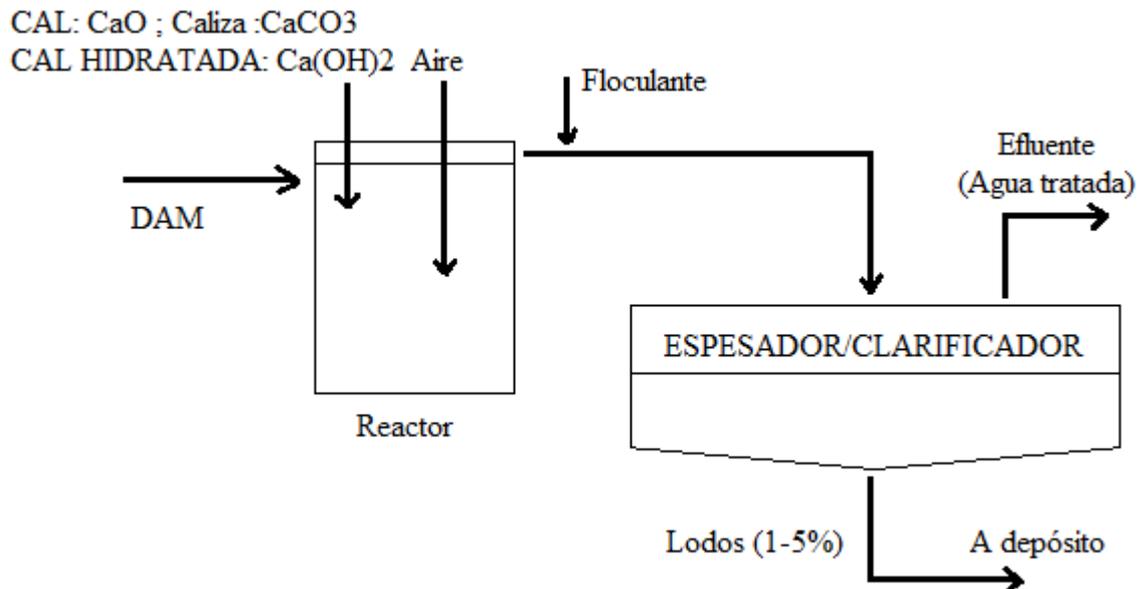


Figura 8. Diagrama de flujo del tratamiento de aguas ácidas de minas en planta (Aduvire, 2006)

2.5. GENERALIDADES DEL ORO

2.5.1. El Oro

El Oro es un metal precioso que se encuentra en la naturaleza en estado nativo y combinado con otros elementos y minerales. Este elemento se puede encontrar generalmente con hasta 39 % de concentración de plata, también se le puede encontrar junto con el cobre, el hierro, el mercurio e incluso junto el bismuto. Hablando químicamente es inerte y débilmente afectado durante el intemperismo y descomposición en el mineral en el que se encuentra, se puede presentar en vetas o en rocas sedimentarias (Parillo, 2014).

2.5.2. Propiedades Físicas

El Oro es un elemento blando con un color característico amarillento, es un material puro maleable y dúctil. Es resistente a la acción del aire, incluso a los ácidos y agua, no



reacciona fácilmente y por eso se le puede encontrar en su estado natural. Es importante conocer que este material es un buen conductor de electricidad y térmico, ocupa un 0,001 ppm en toda la corteza terrestre. Se sabe que su punto de fusión alcanza los 1073 °C, se volatiliza a 2600 °C (Muro, 2005).

2.5.3. Propiedades Químicas

- Es soluble en cianuro de sodio diluido.
- Es soluble en una concentración del 10 % de carbonato de sodio.
- Tiene la capacidad de disolverse por cloruros férricos o cúpricos.
- Se puede disolver en agua regia y produce cloro naciente.
- En presencia de sustancias orgánicas puede ser disuelto en ácido clorhídrico.

2.5.4. Mineralogía de las menas auríferas

Según Medrano (2011) en cianuración las menas de Oro se pueden agrupar de la siguiente manera:

1. La ganga, cuarzo o piedra caliza con óxidos simples, son menas que contienen oro nativo en partículas finas.
2. Al oro asociado en pequeñas cantidades con la pirita y arsenopirita se les llama menas sulfuradas.
3. Material aluvial o placer
4. Menas complejas de elementos metálicos comunes, con composición de metales valiosos que son importantes económicamente.
5. Menas complejas refractarias que contienen Oro, no son fácilmente solubles en el cianuro.



6. Menas con contenido de metales comunes pero que tienen bajo valor y son subproductos después de lixiviación.

Los tres primeros son minerales para cianuración en pilas y por lo tanto las menas deben tener ciertas características para llevar este proceso. Por ejemplo, el tamaño de partículas de oro es fino, roca encajonada es porosa, la mena no debe tener en exceso partículas de arcilla, no debe tener alta concentración de acidez porque para subir el pH se necesita alta cantidad de Cal.

2.5.5. Ocurrencia del Oro

Según Muro (2005) la ocurrencia del Oro se define en oro libre, oro en que está contenido en ganga silícea, oro con sulfuros metálicos y oro que ese encuentra presente junto con minerales carbonaceos. La ocurrencia del oro se puede presentar de la siguiente manera:

- **Oro grueso**

El oro es observable, se encuentra en tamaños de 100 a 1000 micrones, se puede controlar con facilidad. Su concentración se puede realizar por amalgamación.

- **Oro microscópico**

Es el oro que no se puede observar a simple vista, se encuentra entre 10 a 100 micrones, su procesamiento se realiza por cianuración.

- **Oro visible**

Conocido comúnmente como oro volador, se presenta en partículas por debajo de los 10 micrones, su tratamiento o recuperación se realiza dependiendo a las condiciones en que se presenta en la naturaleza, generalmente se encuentran en rocas diseminadas.



2.6. OPERACIONES UNITARIAS DE EXTRACCIÓN DEL ORO

- **Minado**

Esta etapa consiste en la extracción del mineral, después de fragmentar las rocas en el frente de trabajo ya sea en mina subterránea o en mina a cielo abierto. Se realiza una serie de trabajos para el minado, como es la perforación, preparación de explosivos, detonación, etc. Cada uno de las operaciones se realiza con los estrictos estándares en materia de seguridad.

- **Carguío y acarreo**

Consiste en el movimiento de mineral del frente de trabajo hacia las instalaciones de la planta metalúrgica, este proceso se realiza dependiendo si la extracción del Oro se lleva a cabo por lixiviación en pilas, lixiviación por cianuración en tanques, amalgamación en molinos de bolas, etc. Esta operación de carguío se realiza utilizando maquinarias como cargador frontal y el transporte se realiza en volquetes de mineral de gran tonelaje, mediano o volquetes de bajo tonelaje dependiendo de si es gran o pequeña minería y dependiendo a la cantidad de mineral.

- **Chancado**

El chancado consiste en una serie de operaciones unitarias que se realizan con el objetivo de reducir el tamaño del mineral. El chancado se puede realizar en dos o tres etapas, chancado primario, chancado secundario y chancado terciario

La chancadora es la primera etapa para reducir el tamaño de partículas de mineral, esto se trabaja en seco con diferentes tipos de chancadoras. Generalmente en la primera etapa se realiza en chancadoras tipo quijadas, realiza la fragmentación de grandes tamaños de



mineral. Este proceso no solo es mecánico sino también cinético porque actúan los efectos moleculares ordinarios y químicos (Lima, 2018).

- **Distribución granulométrica**

El objetivo de reducción de tamaño también es que los granos o partículas pasadas por las chancadoras sean de volumen igual y uniforme, ningún fragmento de mineral debe sobrepasar la dimensión definida para el proceso de molienda. Los resultados de la granulometría nos permiten saber la dimensión media geométrica, tamaño de reducción de minerales geométricos similares, coeficiente de reducción y al final la desviación estándar (Vicente, 2012).

- **Molienda**

Esta operación unitaria se realiza con la finalidad de reducir mecánicamente el tamaño de partícula del mineral después del chancado primario, secundario y terciario. Al molino de bolas, dependiendo el tamaño se suministra mineral mediante fajas transportadoras u otro medio para entrar en contacto junto con las billas para convertir el mineral triturado en un tamaño fino. La fragmentación se produce gracias al efecto de la presión, los impactos de las billas y la erosión. Se logra obtener tamaños finos gracias al suministro del agua y en un determinado tiempo (Lima, 2018).

Después de esta operación se tiene opciones para obtener el oro metálico, dependiendo a la presentación del oro. Para mineral con contenido de oro fino se puede realizar la cianuración, si se presenta oro grueso se puede optar por amalgamación.



2.7. PROCESO METALÚRGICO DEL ORO EN TRAPICHE

2.7.1. Trapiches

Antiguamente los indios de América extraían el Oro por simple lavado y para convertir en un solo molde lo fundían. En los años antiguos no se conocía las técnicas de extracción del oro, no se conocía la técnica de amalgamación tampoco sabían la existencia del mercurio. El oro no era cotizado en la industria por lo cual no avanzó la técnica de extracción del Oro (Orrego, 1890).

Los trapiches fueron utilizados para pulverizar mineral, por eso se les conocía trapiches en seco. Lo usaban usando una roca tremenda de granito en promedio de peso entre los dos o tres toneladas, esta roca se ataba al mismo trapiche en eje vertical sobre una solera en forma circular que también era de granito. A este se echaba mineral poco a poco para que se pulverice y el motor para ellos siempre fue el agua. Se utilizaba soltando un chorro que caía con gran fuerza que entraba en contacto con la rueda horizontal de paletas que estaba situada en la solera que se encontraba en la parte inferior. Este sistema de concentración fue mejorando que en 24 horas se molía medio cajón de mineral. Una vez obtenida el mineral en polvo se retiraba para poner en contacto con el azogue, pero se perdía gran cantidad de Oro ya que el mineral molido era de tamaño irregular (Orrego, 1890).

Actualmente los trapiches son reactores que se encargan de triturar, reducir tamaño del mineral o mena. También se encargan de concentrar el Oro por gravedad por efecto del agua, el mineral es trasladado de la mina hacia las plantas trapiche para luego ser reducido a un tamaño uniforme. La operación se realiza por un determinado tiempo y una cierta cantidad de mineral, quedando al final un concentrado de Oro para después llevar al molino de bolas, poner en contacto con el mercurio y al final obtener Oro metálico por fundición. El

concentrado se puede pasar por canales de alfombra y de esa manera también obtener oro metálico por amalgamación. En la siguiente figura se muestra el proceso de concentración de Oro en trapiche:

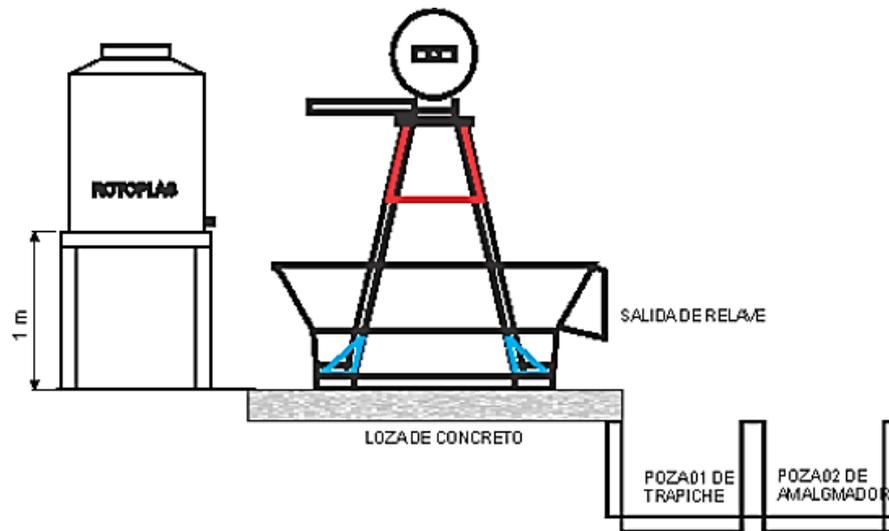


Figura 9. Procesamiento del Oro en trapiche (Chambi, 2013)

2.7.2. Amalgamación en Molino

En México el año 1557, Bartolomé de Medina fue el hombre quien inventó la amalgamación de la plata, luego en el año 1637 fue modificada el procedimiento favorablemente por el padre Barba, escribió un libro modificando todo el procedimiento y teoría química (Orrego, 1890).

Este proceso se lleva a cabo en circuito abierto, generalmente en la minería primaria el Oro en metálico tiene que ser obtenido después del proceso de trituración y molienda. El proceso de molienda en los molinos generalmente se aprovecha para llevar a cabo también la amalgamación, es decir el mercurio se vierte al reactor (molino) y en contacto con el agua y las billas se lleva a cabo la amalgamación. También se puede realizar la amalgamación directamente en circuitos abiertos en reactores como trapiches, amalgamación manual, a martillos y de pisones (Chambi, 2013).

El mercurio suele irse en las colas, sin embargo, para recuperar se instalan trampas, canaletas, planchas amalgamadoras, sin embargo, a pesar de esto existe una pérdida significativa de mercurio con Oro. La otra parte en que se pueda percibir pérdida de mercurio son en los mismos reactores (tambores, tazones, etc), en las paredes o espacios vacíos suelen acumularse juntamente con el oro.

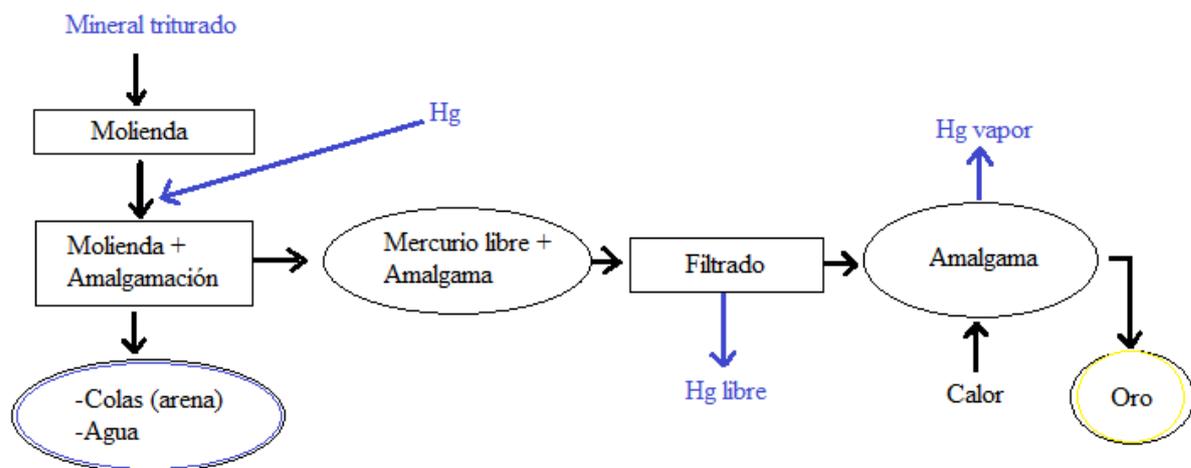


Figura 10. Amalgamación de Oro en Molino de bolas (Cuentas & Velarde, 2019)

2.7.3. Proceso de refinación del Oro

- **Horno de fundición**

Se denomina fundición de precipitados Merrill Crowe, se realiza la fundición mediante combustión por petróleo, gas o también puede ser por efecto de la electricidad. La cámara o caja donde se realiza es metálica y dentro de la caja se coloca el crisol que generalmente es de grafito. La temperatura que se tiene que alcanzar es de 1200 °C, ya que la temperatura de fusión del Oro es de 1063 °C.

- **Crisol**

Como ya se mencionó, el crisol para fundir el Oro tiene que ser de grafito, el tamaño del crisol tiene que ser de acuerdo a la cantidad de Oro que se quiere refinar. Se recomienda



que para fundir el Oro se tiene que calentar previamente el crisol durante un aproximado de 1 a 1,5 horas. Esto se lleva a cabo con el objetivo de evitar choques térmicos durante el carguío.

- **Lingoteras**

Las lingoteras soportan la temperatura de fusión del Oro, pero tienen que tener una temperatura de fusión de 1536 °C, sirve como envases para adaptar la forma de recipiente en el que se va a verter el Oro en estado líquido. Este material envase generalmente están hechas de hierro fundido.

- **Escoria**

Es prácticamente la mezcla fundida con composición de boratos y silicatos. Esta mezcla se genera por la reacción química que ocurre dentro del crisol por efecto del proceso de fusión.

2.8. EL MERCURIO

El mercurio es un elemento que puede formar amalgama con la mayoría de los elementos, pero excepto con metales como son el hierro y el platino. Especialmente el oro con el mercurio tiene la capacidad de combinar fácilmente variedad de componentes desde el AuHg_2 al Au_8Hg . Las principales amalgamas que conocemos son el AuHg_2 , Au_2Hg y Au_3Hg (Cuentas & Velarde, 2019).

El Oro contenido en minerales de cuarzo o sulfurados, no puede ser extraído por lo que se necesita reducir de tamaño y para que se lleve la amalgamación. El oro con el mercurio tiene que estar en contacto para que el mercurio se convierta como una especie de imán para captar el oro. La amalgamación no tiene buenos resultados, varios factores lo influyen como



son por ejemplo cuando el mercurio no entra en completo contacto con el oro, la presencia del oro en condiciones que no puede entrar en contacto con el mercurio, el oro fino que no puede ser captado por el mercurio ya que este método es para oro grueso, el oro presente como teluro, el oro que puede estar presente en sulfuros (pirita aurífera), cuando el oro se encuentra cubierta por láminas o superficies extrañas en que no puede entrar en contacto con el mercurio, cuando el mercurio es impuro, el mercurio con apariencia de harina, cuando el concentrado se encuentra contaminado con aceites o grasas, etc. (Cuentas & Velarde, 2019).

Es importante conocer que el mercurio es el único elemento o metal que se encuentra en estado líquido a 0 °C, se encuentra en la atmósfera minera en forma de gas y en el organismo afecta a través de la vía pulmonar. El aire favorece su evaporación y por tanto permanece en forma de partículas finas. Los trabajos en el que se necesita contacto directo o vía subcutánea trae consecuencias a la salud del ser humano como caída de dientes, temblor de párpados, temblor de dedos y labios, gingivitis, estomatitis. También se manifiesta en el ser humano con cambios de carácter, personalidad, pérdida de memoria, etc. (Aramburú, 2015).

2.9. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

- **Local**

Soloisolo (2021) propuso el diseño de un Sistema de Tratamiento del drenaje ácido generado por la Unidad Minera Arasi mediante canales de roca caliza para un caudal de 7,1 L/s. Se tomó una muestra de 120 litros de agua ácida mediante canales de roca caliza, donde se redujo la concentración del Aluminio de 6,16 mg/L a 3,87 mg/L, la concentración del Arsénico se redujo de 0,2341 mg/L a 0,1014 mg/L, también se logró reducir la concentración de Bario de 0,07354 mg/L a 0,06960 mg/L, la concentración del Berilio se redujo de



0,000885 mg/L a 0,000463 mg/L, la concentración de Boro se redujo de 1,557 mg/L hasta un 0,7759 mg/L, la concentración de Cadmio se redujo de 0,0050 mg/L a 0,00292 mg/L, el cobre se redujo de 1,535 mg/L hasta 0,7764 mg/L, el Cobalto se redujo de 0,091879 mg/L hasta 0,02554 mg/L, el Cromo se logró reducir de 0,00932 mg/L a 0,08806 mg/L de concentración, la concentración del Hierro se redujo de 13,2 mg/L hasta 5,5 mg/L, la concentración del Litio también disminuyó de 0,45277 mg/L a 0,16574 mg/L, la concentración del Mercurio se mantuvo en 0,00041 mg/L, también se redujo la concentración de Niquel de 0,08499 mg/L a 0,02827 mg/L y así mismo se redujo las concentraciones del plomo, Selenio, Zinc y, obtuvieron un pH de 8,24; conductividad eléctrica de 0,990 mS/cm; oxígeno disuelto de 7,1 mg/L cumpliendo los Límites Máximos Permisibles.

Mamani (2018) evaluó la caracterización y el tratamiento los efluentes de aguas ácidas en la Mina La Rinconada con lechada de Cal. En los resultados indica que se determinó 04 puntos de muestro en 04 etapas, de las cuales, con una adición de 0,2 g de CaO a 500 mL de agua ácida, neutralizó un pH de 3,5 a 8 en un tiempo de 60 a 90 segundos precipitando a todos los metales pesados investigados cumpliendo los límites máximos permisibles. La conductividad eléctrica se redujo de 2240 μ S/cm a 1 430 μ S/cm, el análisis de sólidos totales disueltos redujeron de 1120 mg/L a 730 mg/L, la turbidez se redujo de 102 NTU a 9,95 NTU todos estos cumpliendo los Límites Máximos Permisibles. En los análisis de metales pesados se determinaron que, para un pH de 6,5 se redujo la concentración de Hierro de 4,55 mg/L a 0,28 mg/L, para el mismo pH también se redujo la concentración de Cobre de 0,21 mg/L a 0,04 mg/L, el Aluminio se redujo en un 99,93 % a pH 8,5 y a 6,5 se redujo en un 98,75 %, el Zinc se redujo de 4,5 mg/L a 0,59 mg/L de los cuales en un pH de 8,5 se redujo un 86,88



% y a un pH de 10,1 un 96,66 %, la concentración del Niquel también se redujo de 10 mg/L a 8,97 mg/L en pH de 8,5 y a un pH de 10,1 se redujo de 8,97 a 0,07 mg/L y por último el Manganeseo redujo su concentración de 9 mg/L a 3,38 mg/L en un pH de 6,5. Todas las concentraciones tratadas cumplieron los Límites Máximos Permisibles.

Maynas (2018) propuso una gestión responsable del recurso hídrico en el procesamiento de minerales en planta concentradora en Tiquillaca, recirculando el agua recuperada de los relaves en pozas de sedimentación, en donde se encontró con temperatura de 14,1 °C; pH de 7,7; conductividad eléctrica de 44 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y STD de 0,29 mg/L. Las concentraciones de oxígeno disuelto OD fue 1,3 mg/L y de la turbiedad fue 97 NTU, sobrepasando los LMP. Las concentraciones de Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro resultaron aptos para la recirculación, a excepción del Plomo y Zinc. El tratamiento propuesto fue mediante pozas de sedimentación para reducir la presencia de sólidos en suspensión y los metales pesados.

Tejada (2017) realizó el tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves en la Unidad Operativa Minera Santiago. Concluye que utilizó una dosis de 5 % de cal como coagulante – floculante que equivale a 6 mg/L de dosis en donde logró recuperar el 50,25 % de agua esclarecida mediante sistema de sedimentación gravimétrica en vasos precipitados durante 60 min. Redujo la turbidez a un 99,976 % de 81900 NTU a 19,39 NTU durante 60 min, también redujo los TDS hasta un 99,973 % de 67400 mg/L a 18,25 mg/L durante 60 min.

Arias (2022) implementó un proyecto de Molinos continuos en la Selva Muccumayo de Puno con el objetivo de mejorar el procesamiento de minerales. En los resultados que obtuvo se encontró que, mediante una evaluación durante 15 días entre molinos tradicionales



y molinos continuos, el procesamiento en molinos continuos es el más rentable ya que procesa 330 TM durante 15 días y el Oro se recuperó en un 56 %. Mientras que en los molinos tradicionales durante 15 días solo se puede procesar 155,25 TM de mineral y el Oro se recupera en un 51 %. El costo de operación para este proceso es de 464,5 S/ por TM de mineral procesado y 2,250 kg de Hg para amalgamación. También se requiere menos personal con esta implementación, exactamente 11 trabajadores, mientras que en el procesamiento de mineral con molinos tradicionales se requiere 38 trabajadores.

- **Nacional**

Rabanal (2021) describió los procesos que se realizan en la remoción de metales pesados mediante el tratamiento de aguas ácidas de mina con lechada de Cal y dosificación de floculante Chemlok en la UM Anabi S.A.C. Trabajó con aguas ácidas provenientes de Tajo y Botadero, de los cuales concluyó que la dosis de cal para neutralizar el agua ácida de mina para Botadero es de 1,85 kg/m³ y para Tajo es de 0,74 kg/m³, la cantidad de floculante Chemlok para sedimentar fue de 3 ppm preparado a 0,1 %; el tiempo de residencia para la neutralización fue de 5 min en tanques de 23 m³. El pH de cabecera de Botadero y Tajo, sin uso de floculante y con 3 ppm de floculante obtuvo un cambio de 2,56 y 3,04 a 7, 89 y 7,82 respectivamente. De manera que se demostró que, sin floculante el agua tiene mayor valor de NTU, y con uso de floculante se logró remover las concentraciones de metales pesados considerablemente mayor a sin uso de floculante Chemlok.

Ampuero & Barboza (2019) realizó el tratamiento del Drenaje Ácido de Mina (DAM), de la mina Prosperidad, mediante el método Óxido Calizo. En sus resultados indica que se determinó un caudal óptimo de 200 mL/s con un agua ácida de pH 2,54 y al neutralizar el agua ácida la concentración de metales pesados se logró reducir el As = 93 %,



Cd = 46 %, Cu = 83 %, Fe = 93 %, Pb = 38 %, Zn = 84 % en un pH de 6,71 logrando estar dentro de los Límites Máximos Permisibles a excepción de As, Fe, Zn que estuvieron por debajo de los Límites Máximos Permisibles pero que con mayor tiempo y concentración es posible tratar estos metales con el método de Óxido Calizo.

Aguirre & Huaman (2019) determinó la eficiencia de tratamiento del drenaje ácido de mina en la bocamina Prosperidad empleando cal a nivel laboratorio, las muestras tomadas tuvo un pH inicial ácido de 3,14 con concentraciones de As = 17,045 mg/L; Cu = 41,110 mg/L; Fe = 763,110 mg/L; Pb = 0,327 mg/L y Zn = 89,520 mg/L; todos estos excediendo los Límites Máximos Permisibles. Con una dosis de 10 % de lechada de cal equivalente a 0,197 kg de cal/m³ de agua ácida y un pH de 10,5 logró neutralizar el agua ácida y también remover los metales pesados en un 95 % cumpliendo los Límites Máximos Permisibles.

Andamayo (2019) obtuvo un agua de categoría 3 de las aguas ácidas de Sociedad Minera El Brocal, el tratamiento se realizó en la planta piloto de la empresa con carbonato de calcio y carbón activado. Las muestras fueron tomadas durante 6 días de un flujo de agua ácida de 0,4108 L/s de un cilindro de capacidad 0,2019 m³; tiempo cada 0,5 h. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: el Cadmio precipitó a 0,02 y último 0,05 mg/L; el Manganeseo precipitó a 0,24 y 0,75 mg/L; el Plomo se logró precipitar entre 0,07 y 0,41 mg/L; la concentración del Zinc también se logró reducir a 0,10 y 1,4 mg/L; el Cobre disminuyó a 0,10 y 0,18 mg/L y por último la concentración del Hierro disminuyó a 0,13 y 0,38 mg/L. Todos los resultados obtenidos cumplieron los Límites Máximos Permisibles.

Chambi (2013) optimizó el proceso de recuperación del Oro por amalgamación en la Rinconada, Puno. Planteó la implementación de Trapiches (molino abierto) del cual incorporó un sistema de remolienda. El autor concluye que la amalgamación en este proceso



es para Oro libre en un tamaño de 1 a 2 mm, y que efectivamente el circuito de operación mejoró. El tiempo óptimo de amalgamación en sistema de molienda fue de 2 horas. Los costos de operación implementando este sistema se reduce en un 10,62 %.

- **Internacional**

Zamora et al.(2015) realizó una propuesta técnica y económica para tratar el DAM de Milluni con anóxico calizo. Concluye que se muestreó en la cabecera en el afluente un pH ácido de 3,2 y en ciertas partes de deshielo canalizado un pH de 5,3 por lo que lograron neutralizar con adición de cal con una dosis de 1,2 g/L a un pH de 9 considerando un caudal de 100 L/s. Determinaron que para tratar el agua ácida de mina durante 20 años y un tiempo de residencia de 15 horas, se necesita 32271,026 toneladas de cal. Por lo tanto, el método de tratamiento empleado resultó cómodo, ahorrando 12600 \$.

Cervantes (2014) caracterizó el DAM y las rocas de la mina Tizapata a fin de realizar el tratamiento in situ. En sus resultados indica que el muestreo realizado in situ determinó que en la Rampa Gemela no se presenta agua ácida, pero en la Rampa Sur si presenta acidez de las aguas, sin embargo, existe un punto en que las aguas de ambas rampas se mezclan por lo que fue necesario separarla. El pH ácido de la rampa Gemela registra entre 2,44 y 3,38 presentando concentraciones elevadas de metales disueltos como el Cd, Fe, Mn y Zn, también presentó alto contenido de sulfatos y cationes. De manera que, precipitaron los metales pesados y sulfatos en forma de hidróxidos u oxihidróxidos con tres muestras de rocas de la zona (filita, esquisto y caliza), llegando a conclusión que, la filita y la caliza son los que tienen propiedades suficientes para neutralizar las aguas ácidas de mina in situ, instalando las mencionadas rocas.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. AMBITO DE ESTUDIO

El presente proyecto se llevó a cabo en el sector Antahuila, Centro poblado de Rinconada, Distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina del departamento de Puno. Las actividades mineras y metalúrgicas se realizan en las faldas del nevado Ananea, pertenecientes a la cordillera oriental de Carabaya.



Figura 11. Centro Poblado La Rinconada

Las pruebas de neutralización de aguas ácidas de mina, muestreadas de la mina la Rinconada, sector Antahuila para el procesamiento del Oro, se realizaron en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, las pruebas de remoción de metales pesados se realizaron en la Facultad de Ingeniería de Minas y en los Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa. Y por último las pruebas de eficiencia para la concentración

de Oro con agua tratada se llevó a nivel planta en el Sector Antahuila, de la mina la Rinconada con datos reales.



Figura 12. Sector Antahuila

3.1.1. Ubicación Geográfica

El sector Antahuila se encuentra ubicado entre Centro Poblado de La Rinconada y Lunar de Oro, parte de la cordillera de los Andes y dentro de la cordillera Carabaya.

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas UTM WGS – 84L19 del sector Antahuila del Centro Poblado la Rinconada.

Tabla 2. Coordenadas del lugar de estudio

Coordenadas Geográficas UTM sistema WGS	
Este	452250
Norte	8383042
Altitud	5120 m.s.n.m.



3.1.2. Accesibilidad

El acceso al Sector Antahuila (lugar de investigación) es por vía terrestre desde la ciudad de Juliaca.

Tabla 3. Accesos a la mina la Rinconada

Punto de partida	Punto de llegada	Tiempo de viaje	Distancia	Medio
Puno	Juliaca	52 min	43 km	Terrestre
Juliaca	Putina	1h 43 min	92 km	Terrestre
Putina	Ananea	1h 9 min	59 km	Terrestre
Ananea	Rinconada	29 min	14 km	Terrestre
Rinconada	Antahuila	14 min	1,1 km	Terrestre

3.1.3. Clima

El Centro Poblado La Rinconada habitualmente tiene un clima frígido de día y de noche, llegando a temperaturas de $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la estación de invierno (Junio a Setiembre) congelando el fluído de las aguas tanto efluentes y en tuberías. Sin embargo, en primavera, verano y otoño la precipitación fluvial (nevada) se apodera con mayor intensidad.

La temperatura máxima en los días soleados llega a los $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura promedio en esta zona es de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el día.

3.2. MATERIALES

- **Materia prima**

Mineral mena de baja ley de la mina la Rinconada



- **Insumos y reactivos**

Óxido de Calcio (al 79 % de pureza)

Agua ácida de mina

Agua destilada

Mercurio

Ácido nítrico

Solución estándar de Al, Cd, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn (Para análisis de metales pesados)

- **Equipos de Protección Personal**

Casco

Chaleco

Lentes de seguridad

Zapatos de seguridad

Respirador

Guantes de nitrilo

Mandil de laboratorio

- **Materiales de Laboratorio**

Vasos de precipitado

Matraz Erlenmeyer



Magneto

Pipetas

Propipeta

Buretas

Probeta

Soporte universal

Embudo

Papel filtro Whatman N°42

Cronómetro

Bagueta

Envases de polietileno

Fiolas

Papel de Aluminio

- **Equipos e instrumentos**

Potenciómetro (Metrohm)

Multiparámetro (HANNA HI98130)

Agitador magnético (CAT)

Balanza analítica



Equipo absorción atómica

Planta trapiche 1 y 2 (marca J&J manufacturas industriales)

Molino de bolas (marca J&J manufacturas industriales)

Motor de 2HP y 10HP

3.3. VARIABLES DE ESTUDIO

- **VARIABLES INDEPENDIENTES**

pH (escala pH)

Caudal de ingreso (L/s)

Tiempo (h)

- **VARIABLE DEPENDIENTE**

% de recuperación de Oro (g)

3.4. DISEÑO DE ESTUDIO

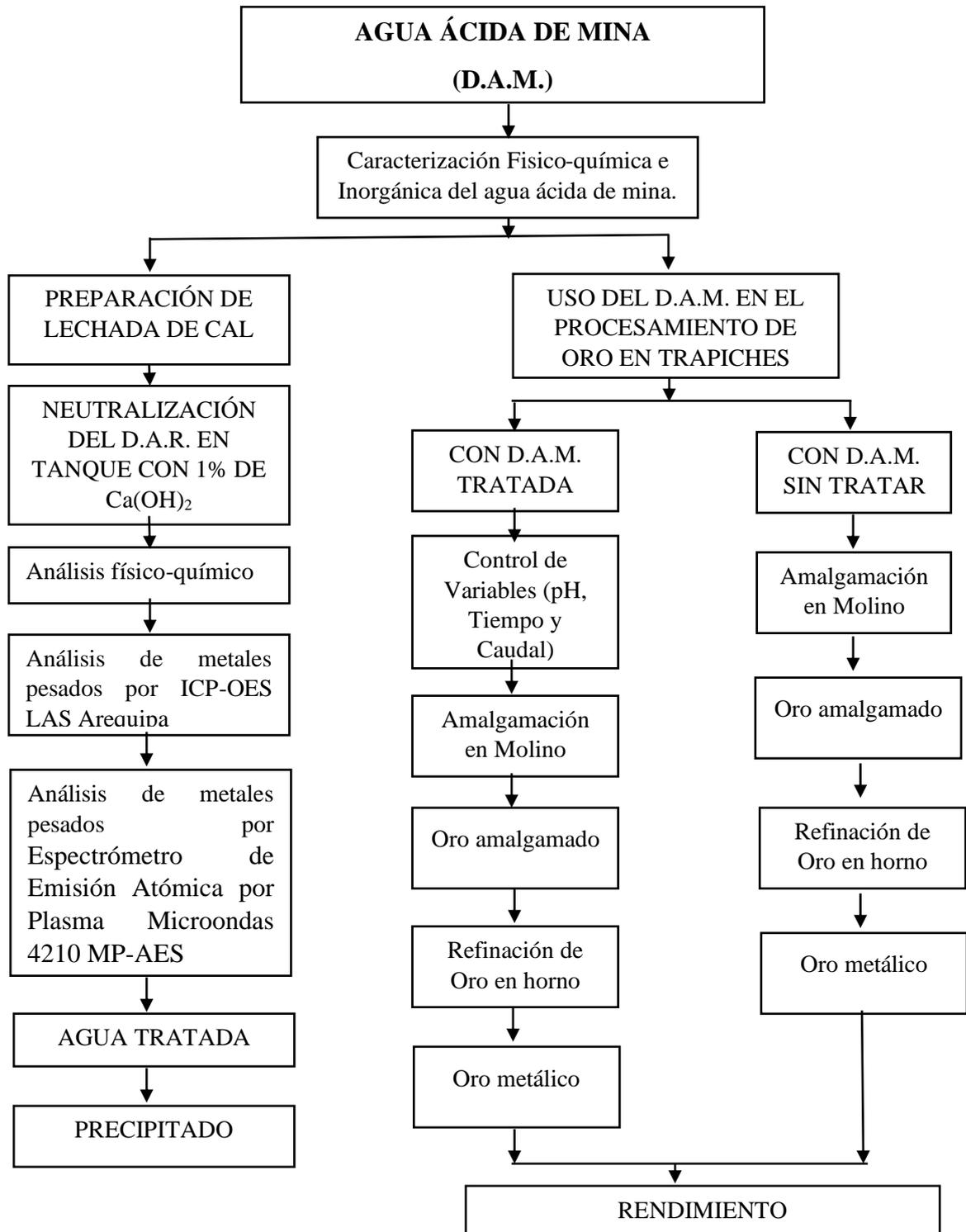


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua ácida de mina y su recirculación en el procesamiento del Oro.



3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.5.1. Cadena de custodia del muestreo

Se tomó 01 muestra de agua ácida de mina de la misma planta “Zárate” del tanque 01 la cantidad de 7 litros, se tomaron coordenadas y con un multiparámetro (HANNA HI98130) se dio lectura de los parámetros fisicoquímicos in situ, de esa manera la muestra fue rotulada y conservada con ácido nítrico en recipiente de primer uso y cumpliendo el procedimiento de muestreo fue trasladado al Laboratorio de Control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano.

Tabla 4. Punto de muestreo de aguas ácidas almacenadas en tanque en la planta Trapiche “Zárate”

Fecha	Muestra	Coordenadas UTM	Altitud
15/07/2022	T01	451155,698E:8382444,345N 19L	5044,1 m.s.n.m.

Para probar la diferencia de la concentración del Oro usando agua ácida de mina tratada y sin tratar, se tomó 16 muestras (08 muestras para procesar mineral con agua tratada y 08 muestras para procesar mineral con agua sin tratar). El procedimiento de muestreo empezó con el planeamiento de mineral en cancha, luego se hicieron calicatas de 30x30 con una lampa, en seguida se procedió a recoger muestras de mineral de una pala por calicata en una carretilla minera, se tomó las coordenadas, el mineral muestreado se pulverizó en molino de bolas, finalmente se tomó una muestra representativa de 01 kg, fue rotulada y trasladado a las instalaciones del Rh-Lab de la ciudad de Juliaca para determinar la cantidad de Oro que contiene cada muestra. Este procedimiento se repitió para las 16 muestras.



Tabla 5. Puntos de muestreo de mineral para procesar con agua tratada

Fecha	Muestra	Coordenadas UTM		Altitud
20/09/22	M-01	E 451157,753	N 8382434,86	4996 m.s.n.m.
20/09/22	M-02	E 451156,635	N 8382439,293	4993 m.s.n.m.
20/09/22	M-03	E 451154,122	N 8382435,693	4989 m.s.n.m.
20/09/22	M-04	E 451198,548	N 8382450,603	4973 m.s.n.m.
20/09/22	M-05	E 451173,64	N 8382428,344	4988 m.s.n.m.
20/09/22	M-06	E 451174,405	N 8382433,355	4985 m.s.n.m.
20/09/22	M-07	E 451150,717	N 8382442,477	4977 m.s.n.m.
20/09/22	M-08	E 451154,842	N 8382441,645	4993 m.s.n.m.

Tabla 6. Puntos de muestreo de mineral para procesar con agua sin tratar

Fecha	Muestra	Coordenadas UTM		Altitud
24/09/22	M-09	E 451160,392	N 8382412,777	4964 m.s.n.m.
24/09/22	M-10	E 451164,446	N 8382415,827	4965 m.s.n.m.
24/09/22	M-11	E 451165,698	N 8382425,496	4967 m.s.n.m.
24/09/22	M-12	E 451161,222	N 8382428,894	4963 m.s.n.m.
24/09/22	M-13	E 451163,713	N 8382432,316	4971 m.s.n.m.
24/09/22	M-14	E 451158,152	N 8382434,329	4985 m.s.n.m.
24/09/22	M-15	E 451155,709	N 8382438,981	4993 m.s.n.m.
24/09/22	M-16	E 451149,401	N 8382442,784	4981 m.s.n.m.

ANÁLISIS DE METODOLOGÍA EXPERIMENTAL POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.5.2. Metodología para determinar los parámetros físico-químicos e inorgánicos del agua ácida de mina del sector Antahuila, Rinconada-Puno

Para esta metodología se tomó en cuenta el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, que consiste en cumplir con los Límites Máximos Permisibles de Agua de tipo III; agua para riego de vegetales y para bebida de animales, de manera que las aguas ácidas de mina en el Sector Antahuila al ser tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estén aptas para enviar a efluentes o en este caso ser reutilizadas en el procesamiento del Oro en Trapiches.

Tabla 7. Límites Máximos Permisibles de parámetros físico-químicos

Parámetros	Unidad de medida	D1: RIEGO DE VEGETALES		D2: BEBIDA DE ANIMALES
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FISICO-QUÍMICOS				
pH	Unidad de pH	6,5 -8,5		6,5 -8,4
Cloruros	mg/L	500		**
Sulfatos	mg/L	1000		1000
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2500		5000
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta 3$		$\Delta 3$

Fuente: D.S. 004-2017-MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes

Tabla 8. Límites Máximos Permisibles de Metales pesados

Parámetros	Unidad de medida	D1: RIEGO PARA VEGETALES		D2: BEBIDA PARA ANIMALES
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L		5	5
Arsenico	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
Niquel	mg/L		0,2	1
Plomo	mg/L		0,05	0,05
Selenio	mg/L		0,02	0,05
Zinc	mg/L		2	24

Fuente: D.S. 004-2017-MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes

3.5.2.1. Análisis Físico-Químico de la muestra

La muestra tomada en el punto de muestreo fue analizada en in situ con un multiparámetro (HANNA HI98130).

Después de ser trasladadas las muestras al Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química, parte de esta muestra representativa fue analizada los parámetros físico-químicos (con código de registro N° 001587), utilizando materiales, equipos e instrumentos. Luego se realizó la neutralización con hidróxido de Calcio en tres



réplicas (M1, M2, M3) después de este procedimiento se realizó los análisis físico-químicos de la última réplica (M3) con código de registro N° 001588.

3.5.2.2. Análisis Inorgánico de la muestra de agua sin tratar por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa (L.A.S.)

Muestra representativa de 500 mL (agua ácida de mina sin tratar) fue llevada a la ciudad de Arequipa a los Laboratorios Analíticos del Sur para su análisis de metales pesados existentes en la muestra con código de registro 8C065730.

3.5.3. Metodología para neutralizar las aguas ácidas de mina en el sector Antahuila, Rinconada-Puno, con $\text{Ca}(\text{OH})_2$

3.5.3.1. Preparación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El CaO con el que se trabajó en esta investigación fue de la empresa CALCESUR S.A. del distrito de Caracoto de la Provincia San Román y Departamento de Puno, con una pureza mayor al 79 %.

Se realizó 3 réplicas de preparación de Lechada de Cal donde en un volumen de 100 mL de agua ácida de mina se adicionó cantidades de CaO 0,2 g; 0,4 g; 0,6 g; 0,8 g y 1 g, a velocidades de agitación de 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm y 500 rpm y un tiempo de 5 min. De esa manera se determinó la adición óptima de CaO llegando a un pH mayor a 13,50.



Figura 14. Pruebas de preparación de Lechada de Cal

3.5.3.2. Neutralización de aguas ácidas de mina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Se trabajó con 03 réplicas (M1, M2 y M3) para lo cual se utilizó una bureta graduada con Lechada de Cal al 1 %, un agitador magnético, un potenciómetro marca Metrohm, un vaso precipitado con 250 mL de agua ácida de mina y un cronómetro. El procedimiento experimental empezó agregando solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cada 2 mL a la muestra contenida de 250 mL de agua ácida de mina en un vaso precipitado de 500 mL a una velocidad de agitación de 500 rpm y un tiempo de 10 min hasta llegar a un pH estable de 8,50. Este procedimiento se repitió en 03 veces (M1, M2 y M3).



Figura 15. *Proceso de neutralización de Agua ácida de mina*

Una vez filtrada las 03 muestras, la última réplica M3 se llevó a los Laboratorios Analíticos del Sur - Arequipa (acreditado por INACAL) para análisis de metales pesados y también la misma replica M3 se llevó para su análisis de metales pesados al Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano.

3.5.3.3. Análisis inorgánico de la muestra de agua tratada por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa

Con los resultados obtenidos de los Laboratorios Analíticos de sur de la muestra sin tratar, se obtuvo que ciertos metales sobrepasan los Límites Máximos Permisibles según al D.S. 004-2017-MINAM. Por lo cual después de la Neutralización en tres réplicas (M1, M2, M3), la última réplica (M3) fue llevada a los Laboratorios Analíticos del Sur para su análisis correspondiente de metales pesados con código de registro 6565F205, de manera que con este procedimiento se supo la cantidad de metales tóxicos removidos mediante este método de neutralización por precipitación alcalina con Hidróxido de Calcio para ser usado en procesamiento de Oro en trapiches del Sector Antahuila, Rinconada.

3.5.3.4. Análisis inorgánico de la muestra de agua tratada por Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES, en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano

Una muestra representativa (M3) de 500 mL (agua ácida de mina tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$) se llevó a la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, en donde se realizó los análisis de metales pesados (Cu, Cd, Al, Fe, Mn, Pb y Zn) porque de acuerdo a los Análisis y resultados en LAS, estos metales sobrepasaron los Límites Máximos Permisibles de acuerdo al D.S. 004-2017-MINAM (agua de categoría III). Mediante esta experimentación se llegó a garantizar los resultados de esta parte de la investigación. El método de experimentación fue de la siguiente manera:

- **Cu:** Con una solución patrón para análisis de Cu con código HC90773586, se preparó la curva de calibración en 03 fioles aforadas a 100 mL a concentraciones de 2,5 ppm; 5 ppm y 10 ppm y, se llevó al equipo Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES para realizar su análisis correspondiente de la muestra en un vaso precipitado la cantidad de 100 mL.



Figura 16. Marcha analítica



Figura 17. Equipo de análisis de metales pesados

- **Cd, Al, Fe, Mn, Pb y Zn:** La curva de calibración para estos metales se realizó a las mismas concentraciones de 2,5 ppm; 5 ppm y 10 ppm con soluciones patrón de Cd, Al, Fe, Mn, Pb y Zn con códigos (HC01336077, HI93712C-0, HC02468981, HC90763289, HC14813176 y HC01344606) respectivamente. De la misma manera luego se llevó al equipo espectrómetro de emisión atómica por plasma microondas 4210 MP-AES



Figura 18. Reactivos patrón para análisis de metales pesados en espectrómetro de emisión atómica por plasma microondas 4210 MP-AES.



3.5.4. Metodología para evaluar la eficiencia del agua tratada en la concentración del oro en trapiche en el sector Antahuila, La Rinconada

3.5.4.1. Pruebas en planta con agua ácida de mina sin tratar

- En primera instancia se llevaron las 08 muestras de mineral de baja ley a laboratorio para analizar la ley del mineral a procesar.
- En seguida se empezó a procesar el mineral con agua ácida de mina sin realizar ningún tipo de tratamiento ni control de variables.
- Obtenido la pulpa o concentrado en trapiche se llevó a molinos de 2x2 para realizar la amalgamación con adición de agua ácida de mina sin tratar, detergente y mercurio.
- Luego se llevó el Oro amalgamado a fundición para obtener el Oro metálico.

3.5.4.2. Pruebas en planta con agua ácida de mina tratada

- En primer lugar, se llevaron las 08 muestras de mineral de baja ley a laboratorio para analizar la ley de mineral a procesar.
- En seguida se procedió a preparar la lechada de Cal al 1 % (según pruebas en laboratorio de la segunda réplica de preparación de lechada de cal a nivel de planta en recipiente de 20 m³ de agua ácida de mina.
- Se procedió tratar las aguas ácidas de mina con Ca(OH)₂, almacenadas en tanque de 20m³ hasta llegar a un pH de 8,35.
- El agua tratada se empezó a utilizar en el procesamiento de mineral en trapiches considerando el diseño experimental.
- Obtenido la pulpa o concentrado en trapiche se llevó a molinos de 2x2 para realizar la amalgamación con adición de agua tratada, detergente y mercurio.
- Luego se llevó el Oro amalgamado a fundición para obtener el Oro metálico.



- Después de todo este proceso se procedió a pesar el Oro metálico a fin de saber el rendimiento de recuperación de Oro.

3.5.4.3. Desarrollo del diseño de experimental y estadística

Se utilizó el diseño factorial 2^k . El presente diseño consiste en una técnica estadística de tal manera que nos permite conocer los números de pruebas a realizar, utilizando las variables independientes para conocer la variable respuesta. Se utilizó el software Statgraphics Centurión XVI con 2 niveles y 3 factores definido por la siguiente relación:

$$N = 2^K$$

Donde:

N: Número de Experimentos.

K: Número de Variables.

- **Factores y niveles del diseño experimental**

Tabla 9. Identificación de las variables y sus niveles para el diseño experimental

Variables	Unidad	Niveles	
		X Min (-)	X Max (+)
X1: pH	Escalar	7,05	8,35
X2: tiempo (t)	H	12	16
X3: Caudal (Q)	L/s	0,17	0,25

Tomando los dos niveles mínimo y máximo con tres factores (pH, tiempo y Caudal) se realizó ocho pruebas (2^3) para obtener la variable respuesta que es el porcentaje de rendimiento de recuperación de Oro.

- **Matriz codificada del diseño experimental**

Tabla 10. Matriz desarrollada del diseño factorial $2^3 = 8$ pruebas

N°	Z ₁	Z ₂	Z ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	7,05	12	0,17	-1	-1	-1	Y
2	8,35	12	0,17	1	-1	-1	Y
3	7,05	16	0,17	-1	1	-1	Y
4	8,35	16	0,17	1	1	-1	Y
5	7,05	12	0,25	-1	-1	1	Y
6	8,35	12	0,25	1	-1	1	Y
7	7,05	16	0,25	-1	1	1	Y
8	8,35	16	0,25	1	1	1	Y

- **Rendimiento en la recuperación de Oro**

El porcentaje de rendimiento de recuperación del Oro se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$\%Rendimiento = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100$$

Donde:

%R: Rendimiento de Oro

W_1 : Concentración inicial de Oro en el mineral



W_2 : Concentración final de Oro metálico obtenido después del proceso metalúrgico

- **Modelo matemático**

El modelo matemático de regresión se presentó de la siguiente manera:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3$$

Donde:

Y: Variable respuesta del rendimiento

$X_1X_2X_3$: Variables codificados de entrada (pH, tiempo y Caudal)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta parte del capítulo se desarrollaron según a los objetivos específicos planteados para la presente investigación. Los datos obtenidos se exponen por medio de análisis de tablas, figuras interpretaciones que se realizan en base a todo el fundamento teórico y los trabajos de investigación ya realizados que representan como parte de los antecedentes.

4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS E INORGÁNICOS DE AGUA ÁCIDA DE MINA DEL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA-PUNO

4.1.1. Resultados de parámetros Físico-Químicos de la toma de muestra in situ

El resultado de la medición de parámetros físico-químicos in situ de la muestra de agua ácida de mina se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Datos de muestreo in situ

Parámetros Físico-Químicos	Unidad	Valores	Fecha
pH	Escala pH	2,56	16/07/22
Conductividad Eléctrica	μS/cm	1900	16/07/22
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1000	16/07/22
Temperatura	°C	14,1	16/07/22

4.1.2. Resultados de análisis físico-químico en Laboratorio

Después de trasladar la muestra de agua ácida desde el Sector Antahuila, se analizó los parámetros físico-químicos en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano. En la siguiente tabla se muestra los resultados.

Tabla 12. Análisis físico-químico en Laboratorio

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	VALORES	UNIDADES
pH	2,06	Escala pH
Temperatura	15	°C
Conductividad Eléctrica	509,00	μS/cm
Dureza (CaCO ₃)	1411,70	mg/L
Alcalinidad (CaCO ₃)	277,56	mg/L
Cloruros	279,90	mg/L
Sulfatos	884,00	mg/L
Calcio	217,60	mg/L
Magnesio	153,70	mg/L
Sólidos totales disueltos	251,00	mg/L
Porcentaje de salinidad	0,30	mg/L
Turbidez	15,46	NTU

Como se muestra en la tabla 12, estas aguas son ácidas y no son aptas para consumo u otro uso en la mina la Rinconada. De manera que es necesario dar tratamiento para desembocar a los efluentes, utilizar como agua para riego de vegetales, bebida de animales o para la recirculación en el procesamiento metalúrgico del Oro.

4.1.3. Resultado de análisis inorgánico (metales pesados) de la muestra en los

Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa

Se llevó 01 muestra representativa de 500 mL a los Laboratorios Analíticos del Sur de Arequipa, en donde se realizó análisis de metales pesados. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Concentración de metales pesados de la muestra

Parámetros	Unidad de medida	Valores en Laboratorio (agua sin tratar)	D1: RIEGO PARA VEGETALES		D2: BEBIDA PARA ANIMALES
			Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Aluminio	mg/L	43,281		5	5
Bario	mg/L	0,05998		0,7	**
Berilio	mg/L	0,000079		0,1	0,1
Boro	mg/L	0,0053		1	5
Cadmio	mg/L	0,01880		0,01	0,05
Cobre	mg/L	0,4277		0,2	0,5
Cobalto	mg/L	0,376666		0,05	1
Cromo total	mg/L	0,02505		0,1	1
Hierro	mg/L	95,288		5	**
Litio	mg/L	0,29743		2,5	2,5
Magnesio	mg/L	57,4796		**	250
Manganeso	mg/L	10,15349		0,2	0,2
Niquel	mg/L	0,91553		0,2	1
Plomo	mg/L	0,1181		0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,002		0,02	0,05
Zinc	mg/L	3,2838		2	24



En la tabla 13 se observa los resultados de concentración de metales tóxicos o metales pesados de las aguas ácidas de mina del Sector Antahuila, Rinconada, de los cuales entre los que resalta son 7 metales que de acuerdo al D.S. 004-2017-MINAM (agua de categoría III) sobrepasan los Límites Máximos Permisibles, el Aluminio con concentración de 43,281mg/L; Cadmio con concentración de 0,01880 mg/L; el Cobre con una concentración de 0,4277 mg/L; Cobalto con concentración igual a 0,376666; Hierro con 95,288 mg/L; Manganeso con 10,15349 mg/L; Niquel con 0,91553 mg/L; Plomo con 0,1181mg/L y Zinc con 3,2838 mg/L. Estas aguas tienen concentraciones elevadas de Hierro, Aluminio y Manganeso. De manera que estas aguas son ácidas y no son aptas para ningún tipo de consumo ni se recomienda en el uso en la metalurgia por amalgamación sin realizar algún tipo de tratamiento.

4.2. NEUTRALIZACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA DEL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA-PUNO, CON $\text{Ca}(\text{OH})_2$

4.2.1. Resultados de la preparación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La Lechada de Cal se preparó en 100 mL de agua ácida de mina, ya que estas son los que se disponen en las plantas Trapiche del Sector Antahuila, Rinconada. Se realizó 3 réplicas este proceso.

4.2.1.1. Primera réplica

Tabla 14. Preparación de lechada de Cal de la primera réplica

N°	Dosis de CaO/100mL	pH a 200rpm	pH a 300rpm	pH a 400rpm	pH a 500rpm
1	0 g	2,06	2,06	2,06	2,06
2	0,2 g	4,32	4,90	5,01	5,62
3	0,4 g	7,56	7,83	7,98	8,01
4	0,6 g	11,85	12,05	12,91	13,05
5	0,8 g	12,39	12,93	13,08	13,23
6	1 g	13,30	13,58	13,80	13,88

En la tabla 14 nos muestra la primera réplica en donde se realizaron 6 pruebas de preparación de Lechada de Cal utilizando CaO de 0,2 g; 0,4 g; 0,6 g; 0,8 g y 1 g a 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm y 500 rpm durante un tiempo de 5 min cada uno.

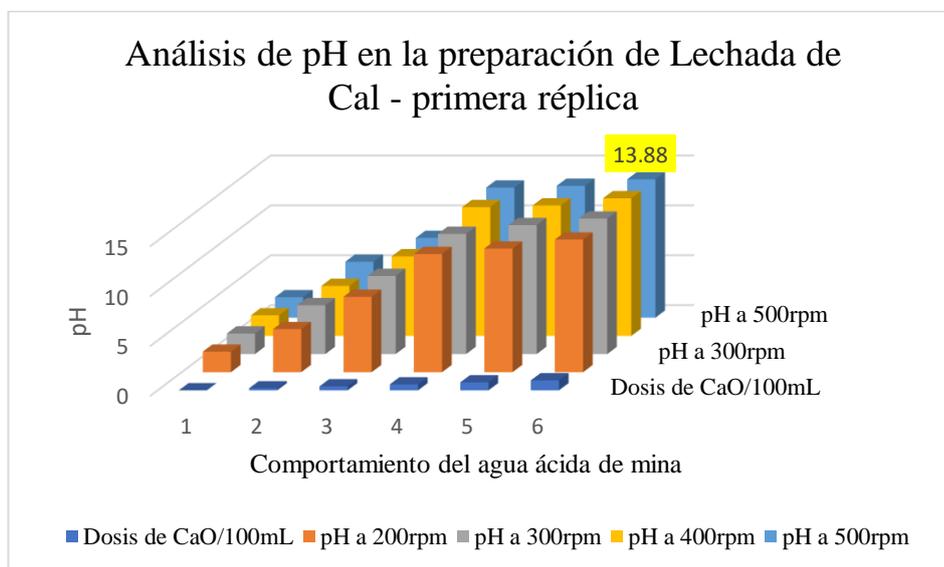


Figura 19. Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal – primera réplica



La figura 19 nos muestra que el pH de la Lechada de Cal alcanzada es de 13,88 a 500 rpm en la sexta prueba utilizando 1 g de CaO en 100 mL de agua ácida de mina. Podemos decir que este punto es óptimo en esta primera réplica ya que es el pH más próximo a 14.

4.2.1.2.Segunda réplica

Tabla 15. Preparación de lechada de Cal de la segunda réplica

N°	Dosis de CaO/100mL	pH a 200rpm	pH a 300rpm	pH a 400rpm	pH a 500rpm
1	0 g	2,06	2,06	2,06	2,06
2	0,2 g	3,85	4,98	5,49	6,03
3	0,4 g	7,05	7,46	7,80	8,48
4	0,6 g	10,60	11,04	11,76	12,02
5	0,8 g	12,20	12,50	13,02	13,30
6	1 g	13,36	13,58	13,80	13,96

En la tabla 15 de la misma manera nos muestra que se han realizado 6 pruebas de preparación de Lechada de Cal con CaO a cantidades de 0,2 g; 0,4 g; 0,6 g; 0,8 g y 1 g, a 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm y 500 rpm con agitación durante un tiempo de 5 min cada uno.

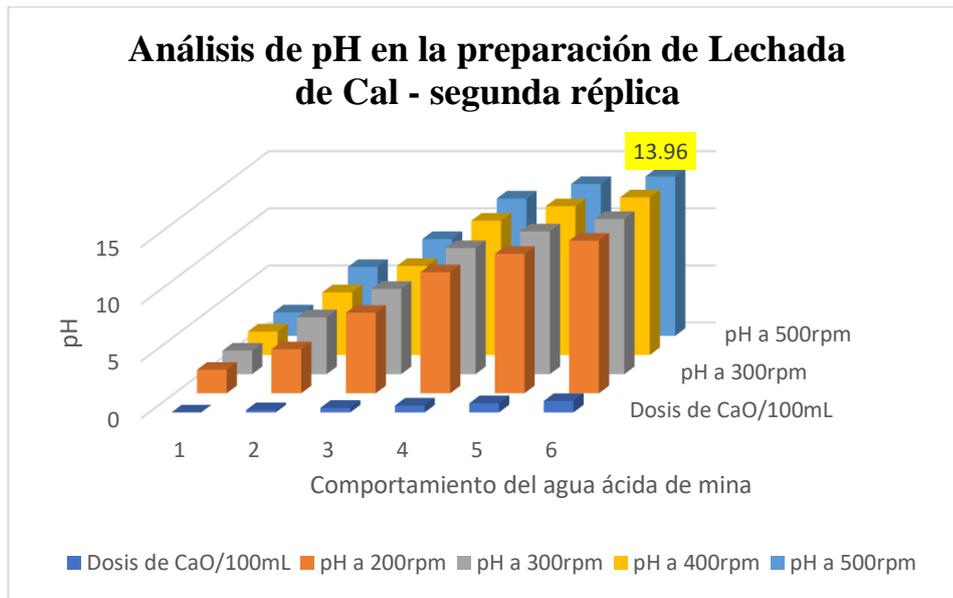


Figura 20. Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal – segunda réplica

La figura 20 nos muestra el análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal de la segunda réplica del cual observamos que el pH de la Lechada de Cal alcanzada es de 13,96 a 500 rpm en la sexta prueba utilizando 1 g de CaO en 100 mL de agua ácida de mina. Podemos deducir que este punto es el más próximo al pH máximo en escala de 1 al 14.

4.2.1.3. Tercera réplica

Tabla 16. Preparación de lechada de Cal de la tercera réplica

N°	Dosis de CaO/100mL	pH a 200rpm	pH a 300rpm	pH a 400rpm	pH a 500rpm
1	0 g	2,06	2,06	2,06	2,06
2	0,2 g	2,98	3,92	4,86	5,43
3	0,4 g	6,54	7,10	7,55	7,97
4	0,6 g	9,20	9,94	10,88	11,20
5	0,8 g	11,30	11,91	12,05	12,72
6	1 g	13,03	13,21	13,33	13,44

La tabla 16 también nos muestra que se han realizado 6 pruebas de preparación de Lechada de Cal de la tercera réplica con dosis de CaO a cantidades de 0,2 g; 0,4 g; 0,6 g; 0,8 g y 1 g, a 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm y 500 rpm con agitación durante un tiempo de 5 min cada uno.

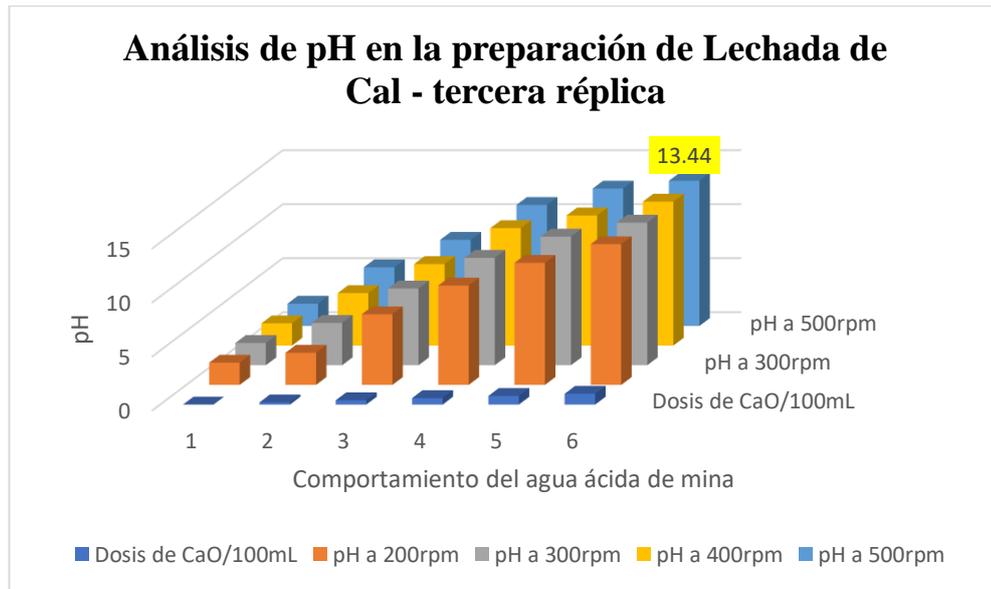


Figura 21. Análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal –Tercera réplica

La figura 21 nos muestra el análisis de pH en la preparación de Lechada de Cal de la tercera réplica del cual observamos que el pH alcanzado es de 13,44 a 500 rpm en la sexta prueba utilizando 1 g de CaO en 100 mL de agua ácida de mina.

Por lo tanto, la segunda réplica (pH igual a 13,96) es el que se tomó para utilizar en el proceso de neutralización de la muestra de agua ácida de mina a nivel de planta en el sector Antahuila, que resulta la preparación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 1 %; 1 g de CaO disuelto en 100 mL de agua ácida de mina.

4.2.2. Resultados de la neutralización de aguas ácidas de mina con Ca(OH)_2

Después de obtener los resultados de análisis físico-químico y de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina, varios parámetros están por encima de los límites máximos permisibles de los estándares de Calidad del Agua de categoría III. De manera que con la preparación de Lechada de Cal se procedió a neutralizar la muestra con el objetivo de precipitar los metales pesados que sobre pasan los Límites Máximos Permisibles, y mejorar los parámetros físico-químicos del agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada. El proceso de neutralización se realizó en 03 réplicas (M1, M2 y M3) con el objetivo de obtener resultados más exactos.

4.2.2.1. Resultados de neutralización de la primera réplica (M1)

Tabla 17. Neutralización de la primera réplica (M1)

N°	Volumen de	
	Ca(OH)_2 (mL)	pH
1	0	2,06
2	2	2,24
3	4	2,9
4	6	3,21
5	8	3,52
6	10	3,75
7	12	3,9
8	14	3,98
9	16	4,13
10	18	5,25
11	20	6,2
12	22	7,78
13	24	9,7
14	26	10,1
15	28	10,60
16	30	10,78
17	32	10,95

- **Análisis de resultado del proceso de neutralización de la primera réplica M1**

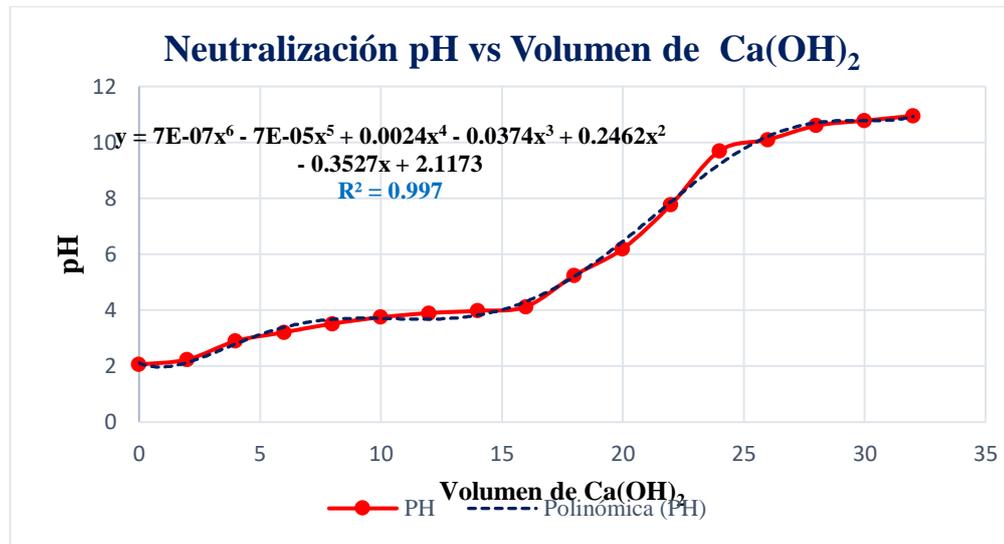


Figura 22. Neutralización pH vs Volumen de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la primera réplica M1

La figura 22 nos muestra que el pH cambia considerablemente desde una dosis de 18mL $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasta 28mL, de manera que la neutralización ocurre en esos intervalos. También podemos observar la ecuación de la curva y también la curva ajustada en donde obtenemos R-cuadrada de 0,997.

- **Primera y segunda derivada de neutralización de la primera réplica M1**

Tabla 18. Primera y segunda derivada de neutralización de la primera réplica M1

Volumen mL	pH	Primera derivada	Segunda derivada
18	5,25	0,95	0,63
20	6,2	1,58	0,34
22	7,78	1,92	-1,52
24	9,7	0,4	0,1
26	10,1	0,5	
28	10,6		

Interpolamos



El salto de pH empieza del volumen de 22 a 24 mL

22	0,34
x	0
24	-1,52

Hallando “X”:

$$\frac{x - 22}{24 - 22} = \frac{0 - 0,34}{-1,52 - 0,34} = 22,37 \text{ mL}$$

Donde “X” es el volumen de gasto del $\text{Ca(OH)}_2 = 22,37 \text{ mL}$

Por consiguiente, podemos decir que el pH para la primera réplica de neutralización es de 7,91

4.2.2.2.Resultados de Neutralización de la segunda réplica (M2)

Tabla 19. Neutralización de la segunda réplica (M2)

N°	Volumen de	
	Ca(OH) ₂ (mL)	pH
1	0	2,06
2	2	2,21
3	4	2,33
4	6	2,41
5	8	2,56
6	10	2,72
7	12	3,1
8	14	3,58
9	16	4,29
10	18	6,45
11	20	7,15
12	22	7,95
13	24	8,89
14	26	9,6
15	28	10,35
16	30	10,51
17	32	10,67

- **Análisis de resultado del proceso de neutralización de la segunda réplica M2**

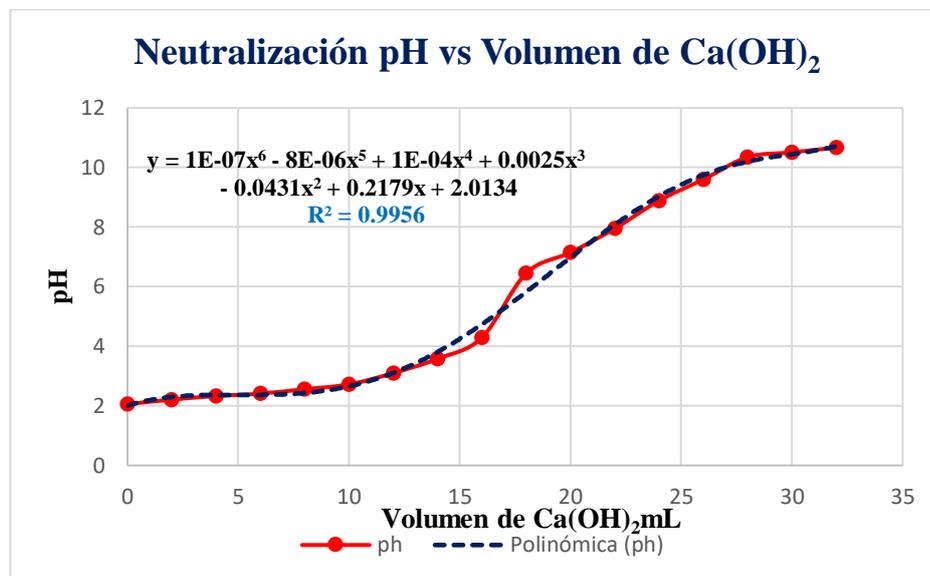


Figura 23. Neutralización pH vs Volumen de Ca(OH)₂ de la segunda réplica M2

La figura 23 nos muestra que el pH cambia considerablemente desde una dosis de 18 mL Ca(OH)₂ hasta 28mL, de manera que la neutralización ocurre en esos 6 intervalos. También podemos observar la ecuación de la curva y también la curva ajustada en donde obtenemos R-cuadrada de 0,9956.

- **Primera y segunda derivada de neutralización de la segunda réplica M2**

Este proceso también se realizó con el objetivo de alcanzar un punto exacto de neutralización.



Tabla 20. Primera y segunda derivada de neutralización de la segunda réplica M2

Volumen		Primera	Segunda
mL	pH	derivada	derivada
18	6,45	0,7	0,1
20	7,15	0,8	0,14
22	7,95	0,94	-0,23
24	8,89	0,71	0,04
26	9,6	0,75	
28	10,35		

El salto de pH empieza del volumen de 22 a 24 mL

22	0,14
<i>x</i>	0
24	-0,23

Hallando “X”:

$$\frac{x - 22}{24 - 22} = \frac{0 - 0,14}{-0,23 - 0,14} = 22,76 \text{ mL}$$

Donde “X” es el volumen de gasto del $\text{Ca(OH)}_2 = \mathbf{22,76 \text{ mL}}$

Por consiguiente, podemos decir que el pH para la segunda réplica M2 de neutralización es de 8,22.

4.2.2.3. Resultados de Neutralización de la tercera réplica (M3)

Tabla 21. Neutralización de la tercera réplica (M3)

N°	Volumen de Ca(OH) ₂	
	(mL)	pH
1	0	2,06
2	2	2,14
3	4	2,23
4	6	2,3
5	8	2,47
6	10	2,65
7	12	3,15
8	14	3,7
9	16	5,11
10	18	6,06
11	20	7,05
12	22	8,17
13	24	9,66
14	26	10,02
15	28	10,45
16	30	10,76
17	32	10,87

- Análisis de resultado del proceso de neutralización de la tercera réplica M3

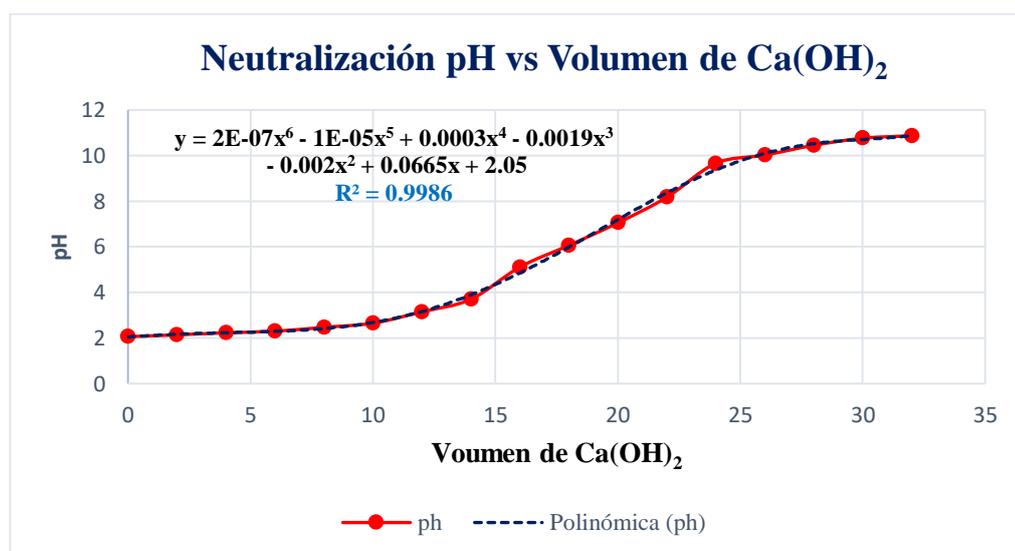


Figura 24. Neutralización pH vs Volumen de Ca(OH)₂ de la tercera réplica M3



La figura 24 nos muestra que el pH cambia considerablemente desde una dosis 18 mL Ca(OH)_2 hasta 28 mL.

- **Primera y segunda derivada de neutralización de la tercera réplica M3**

Tabla 22. Primera y segunda derivada de neutralización de la tercera réplica M3.

Volumen		Primera	Segunda
mL	pH	derivada	derivada
18	6,06	0,99	0,13
20	7,05	1,12	0,37
22	8,17	1,49	-1,13
24	9,66	0,36	0,07
26	10,02	0,43	
28	10,45		

Interpolamos

El salto de pH empieza del volumen de 22 a 24 mL

22	0,37
x	0
24	-1,13

Hallando “X”:

$$\frac{x - 22}{24 - 22} = \frac{0 - 0,37}{-1,13 - 0,37} = 22,49 \text{ mL}$$

Donde “X” es el volumen de gasto del $\text{Ca(OH)}_2 = 22,49\text{mL}$

Por consiguiente, podemos decir que el pH para la tercera réplica M3 de neutralización es de 8,35.

De acuerdo al Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, los Límites Máximos Permisibles de los Estándares de Calidad de Agua de categoría III, está entre un pH mínimo



de 6,5 y un máximo de 8,5. De manera que en esta prueba de neutralización se tomó la tercera réplica debido a que se logró llegar a un pH de 8,35 que está muy pronto al pH de 8,5; Rabanal (2021), por precipitación alcalina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ trabajó con pH igual a 7,89 pero con una dosis de Lechada de Cal al 10 %.

4.2.3. Resultados de determinación de parámetros Físico-Químicos e Inorgánicos de las aguas ácidas de mina ya realizadas el tratamiento

4.2.3.1. Resultados de parámetros Físico-Químicos de la muestra tratada

La tercera réplica M3 de la muestra neutralizada se analizó los parámetros físico-químicos en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA -Puno.

Tabla 23. Resultados de los parámetros físico-químicos de la réplica M3 del agua ácida de mina tratada.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	VALORES	UNIDADES
pH	8,35	Escala pH
Temperatura	15	°C
Conductividad Eléctrica	506,00	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Dureza (CaCO_3)	1690,80	mg/L
Alcalinidad (CaCO_3)	78,80	mg/L
Cloruros	249,42	mg/L
Sulfatos	822,00	mg/L
Calcio	495,65	mg/L
Magnesio	109,78	mg/L
Sólidos totales disueltos	250,00	mg/L
Porcentaje de salinidad	0,30	mg/L
Turbidez	7,00	NTU



En la tabla 23 podemos observar los resultados de los análisis físico-químicos de la tercera réplica M3 de la muestra tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, donde el pH aumentó de 2,06 a 8,35 y está dentro de los Límites Máximos Permisibles de los estándares de calidad de agua de categoría III. Se observa también un cambio de conductividad eléctrica de 509,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 506,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la dureza de la muestra tratada disminuyó de 1690,80 mg/L a 1411,70 mg/L y, entre los que resulta son los cambios de concentración de sulfatos, disminuyendo de 884,00 mg/L hasta 822,00 mg/L que está dentro de los Límites Máximos Permisibles de agua de categoría III, y la turbidez disminuyendo de 15,46 NTU hasta 7,00 NTU que este resultado sobrepasa en 2 NTU a los Límites Máximos Permisibles de agua tipo 3, siendo 5 NTU el LMP.

4.2.3.2. Resultados del análisis Inorgánico o metales pesados de la muestra tratada, por ICP-OES en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa (L.A.S.)

Para este análisis también se trabajó con la tercera réplica M3 de neutralización, con un pH igual a 8,35. Los resultados de determinación de metales pesados de la muestra neutralizada se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 24. Resultados del análisis de metales pesados de la muestra de agua tratada

Parámetros	Unidad de medida	Valores en Laboratorio (Agua tratada)	D1: RIEGO PARA VEGETALES		D2: BEBIDA PARA ANIMALES
			Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Aluminio	mg/L	4,914		5	5
Bario	mg/L	0,03303		0,7	**
Berilio	mg/L	0,000079		0,1	0,1
Boro	mg/L	0,0138		1	5
Cadmio	mg/L	0,00011		0,01	0,05
Cobre	mg/L	0,002		0,2	0,5
Cobalto	mg/L	0,000094		0,05	1
Cromo total	mg/L	0,00205		0,1	1
Hierro	mg/L	0,116		5	**
Litio	mg/L	0,31748		2,5	2,5
Magnesio	mg/L	45,1803		**	250
Manganeso	mg/L	0,50768		0,2	0,2
Niquel	mg/L	0,00051		0,2	1
Plomo	mg/L	0,0026		0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,002		0,02	0,05
Zinc	mg/L	0,0031		2	24

En la tabla 24 se muestra que todos los metales cumplen los Límites Máximos Permisibles de acuerdo a los Estándares de Calidad de Agua de categoría III, a excepción del Manganeso que el LMP es 0,2 mg/L pero en el resultado que se obtuvo tiene concentración 0,50768 mg/L. Podemos deducir que a pH 8,35 todos los metales pesados existentes en la muestra tratada precipita, el Manganeso precipitará a un pH mayor a 8,35.



Remoción de la concentración de metales pesados del agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada

A continuación, se muestra la tabla de remoción de metales pesados (Aluminio, Cadmio, Cobre, Cobalto, Hierro, Manganeso, Niquel, Plomo y Zinc) de acuerdo a los resultados obtenidos en Laboratorios Analíticos del Sur-Arequipa (L.A.S.) por ICP-OES.

Tabla 25. Concentración de metales pesados removidos del agua ácida de mina de entrada y salida

Metales	Concentración mg/L		
	Entrada	Salida	Removido
Al	43,281	4,914	38,370
Cd	0,01880	0,00011	0,019
Cu	0,4277	0,002	0,426
Co	0,376666	0,000094	0,376
Fe	95,288	0,116	95,172
Mn	10,15349	0,50768	9,646
Ni	0,91553	0,00051	0,915
Pb	0,1181	0,0026	0,116
Zn	3,2838	0,0031	3,281

Porcentaje de remoción de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina

Se realizó utilizando la siguiente fórmula

$$\% \text{Remoción de metales pesados} = \frac{[C]_0 - [C]_f}{[C]_0} * 100$$

Donde:

$[C]_0$ = Concentración inicial de metales pesados

$[]_f$ = Concentración final de metales pesados

Tabla 26. Porcentaje removido de metales pesados

Metales	%Remoción
Al	88,64
Cd	99,41
Cu	99,53
Co	99,98
Fe	99,88
Mn	94,99
Ni	99,94
Pb	97,80
Zn	99,91

- **Análisis de resultado del porcentaje de metales pesados removidos**

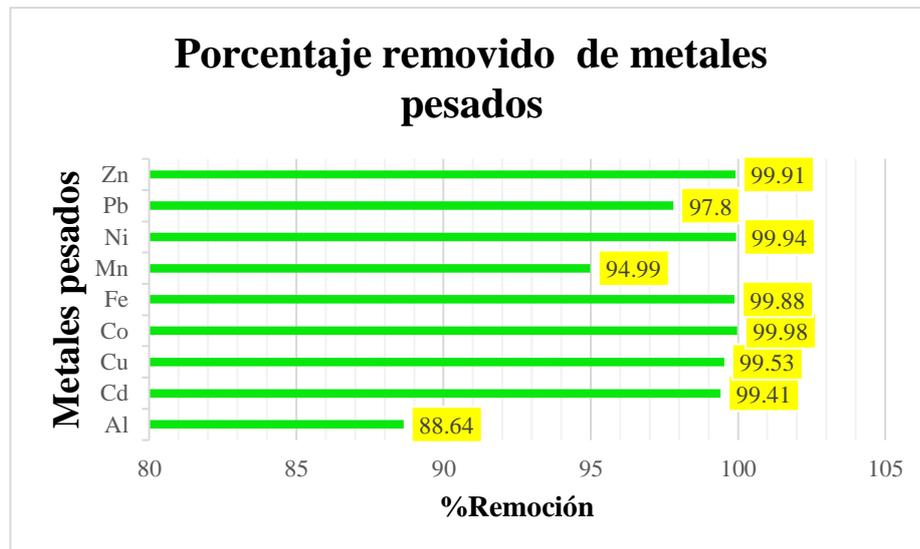


Figura 25. Porcentaje de metales pesados removidos de la muestra de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada.



En la figura 25 podemos observar la remoción de metales pesados de la muestra tratada de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada del cual se puede observar que la mayoría de metales se removieron eficientemente durante el tratamiento de neutralización con Ca(OH)_2 a pH 8,35; entre los que resalta es el Cobalto con una eficiencia del 99,98 % y el porcentaje de remoción mínimo de todos los metales pesados de la figura mostrada es el Aluminio con 88,64 %; comparando con Mamani (2018), obtuvo una eficiencia de remoción de Fe al 99,37 %; Cu en 80,95 %; Al en 99,37 %; Zn en 86,88 %; Ni en 10,3 % y Mn igual a 95,55 %. Ambas investigaciones cumplen con los Límites Máximos Permisibles de los Estándares de Calidad de Agua de categoría III. La concentración del Manganeso obtenido en esta investigación sobre pasa los LMPs que es de 0,2 mg/L; quiere decir que se necesita subir un pH superior a 8,35 para precipitar y cumplir el LMP. El hierro es el metal con un comportamiento distinto por su capacidad de redisolución, sin embargo, podemos observar que se logró reducir en un 99,88 %. De manera que esta agua está lista para reutilizar en el proceso metalúrgico de Oro y también apto para riego de vegetales y bebida para animales. En esta investigación se reutilizará en el procesamiento de Oro en Trapiches.

4.2.3.3. Resultados del análisis inorgánico o metales pesados de la muestra por espectrómetro de emisión atómica por plasma microonda 4210 MP-AES

Para este análisis por el método de espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma Microonda 4210 MP-AES, también se trabajó con la tercera réplica M3 de neutralización, con un pH igual a 8,35. Los resultados obtenidos en Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 27. Concentración y remoción de metales pesados removidos del agua ácida de mina de entrada y salida

Metales	Concentración mg/L		
	Entrada	Salida	Removido
Al	43,281	0,072	43,209
Cd	0,01880	0,012	0,0068
Cu	0,4277	0,125	0,3027
Fe	95,288	0,183	95,110
Mn	10,15349	1,332	8,822
Pb	0,1181	0,001	0,120
Zn	3,2838	0,182	3,102

Porcentaje de remoción de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina

También se realizó utilizando la siguiente fórmula

$$\% \text{Remoción de metales pesados} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} * 100$$

Tabla 28. Porcentaje removido de metales pesados

Metales	%Remoción
Al	99,83
Cd	36,17
Cu	70,77
Fe	99,81
Mn	86,88
Pb	99,15
Zn	94,46

- **Análisis de resultado del porcentaje de metales pesados removidos**

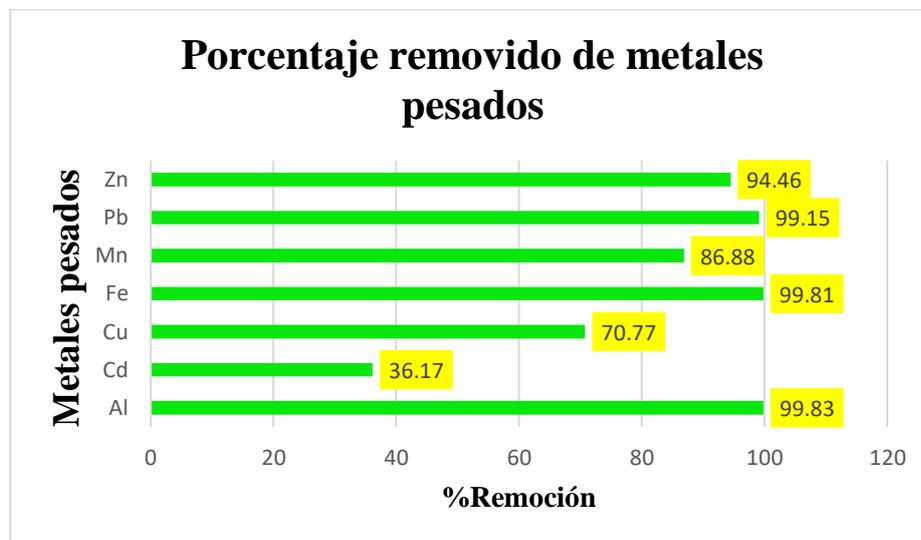


Figura 26. Porcentaje de metales pesados removidos de la muestra de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada.

En la figura 26 se muestra el porcentaje de remoción de metales pesados de la muestra tratada de agua ácida de mina del Sector Antahuila, Rinconada. La mayoría de metales se removieron eficientemente durante el tratamiento de neutralización con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a un pH de 8,35; entre los que más resalta es el Aluminio con una remoción del 99,83 % y el porcentaje de remoción mínimo de todos los metales pesados de la figura mostrada es el Cadmio con 36,17 %; comparando con Aguirre & Huaman (2019), utilizó Lechada de Cal al 10 % en un DAM de pH inicial 3,14 y con pH 10,5 alcanzado en el tratamiento logró reducir el As, Cu, Fe, Pb y Zinc en un 95 % , sin embargo las concentraciones alcanzadas en este estudio cumplen con los Límites Máximos Permisibles de los Estándares de Calidad de Agua de categoría III. El Manganeseo no logró precipitar completamente, se obtuvo un resultado de 1,332 mg/L pero su LMP es 0,2 mg/L. El hierro es el metal que puede reaccionar después del tratamiento, pero se logró reducir en un 99,81 %.

4.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL AGUA TRATADA EN LA CONCENTRACIÓN DEL ORO EN TRAPICHES

4.3.1. CON AGUA ÁCIDA DE MINA SIN TRATAR

Un total de 08 muestras de mineral de baja ley fueron llevadas al RH-Lab Juliaca para determinar la cantidad de Oro contenido en cada muestra. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 29. Ley de mineral de baja Ley para el procesamiento con agua ácida de mina sin tratar.

N°	Código	Coordenadas UTM		Ley (g/Tm)
1	M-01	E 451157,753	N 8382434,86	1,167
2	M-02	E 451156,635	N 8382439,293	17,567
3	M-03	E 451154,122	N 8382435,693	7,061
4	M-04	E 451198,548	N 8382450,603	3,950
5	M-05	E 451173,64	N 8382428,344	6,833
6	M-06	E 451174,405	N 8382433,355	8,267
7	M-07	E 451150,717	N 8382442,477	5,233
8	M-08	E 451154,842	N 8382441,645	1,913

Se puede observar que las muestras obtenidas de los distintos puntos tuvieron una Ley también distintas de los cuales entre los que más resalta es la muestra M-02 que tiene un alto contenido de Oro (17,567 g/Tm), seguidamente la muestra que tiene menor cantidad de Oro es la M-01 (1,167 g/Tm). De manera que el resto de las muestras tienen un valor



promedio regular que en el procesamiento de mayor cantidad de mineral de baja Ley se irá acumulando mayor cantidad de Oro.

4.3.1.1. Resultados del procesamiento de mineral de baja Ley con agua ácida de mina sin tratar en Trapiche 01

La cantidad de mineral de baja ley que se procesa normalmente en planta Trapiche es de 02 Tm por molida, y en la presente investigación también se trabajó con 02 Tm que equivale a 45 carretillas mineras, 675 palas y cada pala de mineral de baja ley tiene un aproximado de 3 kg.

$$45 \text{carretillas} * \frac{15 \text{ palas}}{1 \text{carretilla}} * \frac{3 \text{kg}}{1 \text{pala}} = 2025 \text{kg} = 2,025 \text{Tm}$$

Se trabajó con agua ácida de mina almacenada en un tanque de 20 m³ por el método tradicional que se trabaja día a día en Planta Trapiche. Las 08 pruebas se realizaron en la planta trapiche N° 01 durante 4 días con un caudal de agua igual a 0,17 L/s.

El tiempo de trabajo por proceso en trapiche fue de 13 horas cada uno, al final se obtuvo pulpa concentrada y se llevó a molino para el proceso de amalgamación durante 03 horas.

Luego se obtuvo Oro amalgamado, se procedió a separar el Oro del mercurio y se llevó a fundición, para luego ser pesado en Balanza.

Tabla 30. Cantidad de Oro amalgamado con agua ácida de mina sin tratar

N°	Código	Ley (g/2Tm)	Au amalgamado (g)	% Recuperación
1	M-01	2,334	1	42,8
2	M-02	35,134	15,6	44,4
3	M-03	14,122	6,4	45,3
4	M-04	7,9	3	38
5	M-05	13,666	6,1	44,6
6	M-06	16,534	7,5	45,4
7	M-07	10,366	5,3	51,1
8	M-08	3,826	1,6	41,8

Se puede observar en la tabla que en la planta Trapiche 01 se procesó 2 Tm por cada prueba, del cual podemos decir que el promedio de recuperación de Oro con agua ácida de mina fue del 44,2 %, entre los que se puede destacar es que en la prueba M-07 se obtuvo un 51,1% de recuperación de Oro que representa el punto máximo de recuperación, y el punto mínimo de recuperación fue en la prueba M-04 con 38 %, quiere decir que de una cantidad de 7,9 g de Oro contenido en el mineral se recuperó tan solamente 3 g.

4.3.2. CON AGUA ÁCIDA DE MINA TRATADA

También las muestras cada uno de 01 kg con códigos del M-09 al M-16, se llevaron a RH-Lab de Juliaca para analizar la cantidad de Oro contenido en cada muestra y los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 31. Ley de mineral de baja Ley para el procesamiento con agua ácida de mina tratada

N°	Código	Coordenadas UTM		Ley (g/Tm)
1	M-09	E 451160,392	N 8382412,777	6,233
2	M-10	E 451164,446	N 8382415,827	7,097
3	M-11	E 451165,698	N 8382425,496	8,083
4	M-12	E 451161,222	N 8382428,894	9,120
5	M-13	E 451163,713	N 8382432,316	4,077
6	M-14	E 451158,152	N 8382434,329	11,947
7	M-15	E 451155,709	N 8382438,981	10,950
8	M-16	E 451149,401	N 8382442,784	23,300

Se muestra en la tabla 31, el resultado del análisis de ley de Oro de las 16 muestras en RH-Lab de Juliaca, todos previamente tomadas con sus coordenadas UTM sistema WGS, de los cuales los resultados obtenidos se muestran en g/Tm. Estas muestras se analizaron con el objetivo de procesar este mismo material ya a nivel de planta Trapiche.

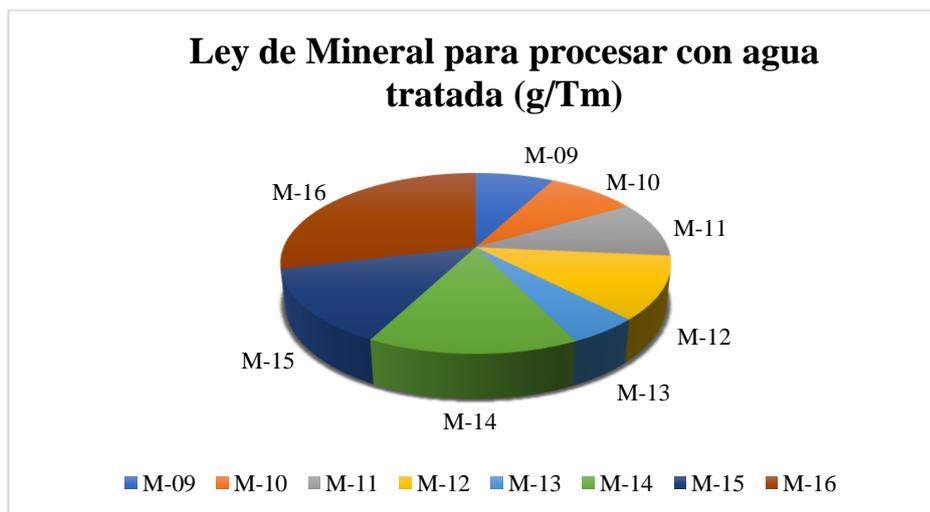


Figura 27. Resultados de contenido de Oro en mineral de baja Ley para procesar con agua ácida de mina tratada



Podemos observar que la muestra M-16 es el que más contenido de Oro tiene, por lo cual quiere decir que es conveniente procesar este mineral ya que será más rentable. El que menos destaca es la muestra M-13 que tiene un bajo contenido de Oro, exactamente de 4,077 g/Tm. De manera que este mineral no es tan rentable para este proceso, pero si se recupera en mayor proporción sería una opción para procesar.

4.3.2.1. Resultados de la preparación de Lechada de Cal y Neutralización del agua ácida de mina a nivel de Planta

En esta investigación se utilizó agua ácida de mina (DAM) para el procesamiento de mineral de baja Ley, para lo cual se realizó el tratamiento de las aguas ácidas de mina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La preparación de lechada de Cal se realizó de acuerdo a los experimentos realizados en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química, que fue al 1 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ llegando a un pH de 13,96 en 100 mL de agua ácida de mina. Los cálculos para preparar lechada de cal a nivel de planta se realizaron de la siguiente manera:

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ al } 1\% = \frac{1\text{gCaO}}{100\text{mL DAM}} = \frac{10\text{gCaO}}{1000\text{mL DAM}} = \frac{10\text{gCaO}}{1\text{L DAM}}$$

- **Para pH = 8,35**

Según las pruebas realizadas en laboratorio y según al D.S. N° 004-2017-MINAM, para neutralizar las aguas ácidas de mina se necesitó llegar a pH de 8,35 con un gasto de 22,49 mL de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en 250 mL de agua ácida de mina, para lo cual los cálculos a nivel de planta se realizaron de la siguiente manera:

$$\frac{(\text{mL})\text{Ca}(\text{OH})_2}{1\text{L DAM}} = \frac{22,49\text{mL Ca}(\text{OH})_2 * 1000\text{mL DAM}}{250\text{mL DAM}} = \frac{89,96\text{mL Ca}(\text{OH})_2}{1\text{L DAM}}$$

Quiere decir que para neutralizar 1 L de DAM se necesita 89,96 mL de $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Entonces la cantidad de CaO requerido para neutralizar se calculó de la siguiente manera:

$$CaO (g) = \frac{10gCa * 89,96mL Ca(OH)_2}{1000mL Ca(OH)_2} = \frac{0,8996gCaO}{L, DAM} = \frac{899,6gCaO}{1m^3 DAM}$$

El tanque de agua con contenido de DAM en planta tiene capacidad de 20 m³ por lo cual se multiplicó por 20 m³ y se obtuvo 17,992 kg de CaO.

$$\frac{899,6gCaO}{1m^3 DAM} * 20m^3 DAM = 17992g CaO = 17,992 kg CaO$$

La cal con el que se trabajó es de la empresa CALCESUR S.A. que tiene una pureza mayor al 79 % de CaO, en la presente investigación se trabajó con el 80 %, de manera que la cantidad de CaO para neutralizar 20 m³ de agua ácida de mina fue de 22,5 kg.

$$\frac{17,992 kgCaO}{0,8} = 22,49 kg CaO \cong 22,5 kg CaO$$

Para preparar Lechada de Cal se disolvió 22,5 kg de CaO en 2,25 m³ de agua ácida de mina, y su explicación se fundamenta mediante el siguiente cálculo:

$$Cantidad de DAM = \frac{22500g CaO * 100mL DAM}{1g CaO} = 2,25m^3 DAM$$

- En planta al momento de neutralizar las aguas ácidas de mina en tanque se midió el pH que registró igual a 2,20. En laboratorio la muestra tomada registraba un pH igual a 2,06.
- En planta al disolver 2,25 m³ de Ca(OH)₂ en tanque de 20 m³ de agua ácida de mina, se llegó a un pH de 7,6. Por lo cual se tuvo que aumentar 3 kg de CaO para llegar a un pH cercano a 8,35.



- Los 20 m³ de agua ácida de mina neutralizada alcanzó para 2 pruebas en Trapiche 01, por lo cual este proceso se repitió 2 veces para 4 experimentos

A continuación, se muestra el resumen del control de pH realizados en planta Trapiche exactamente en el Tanque 01 antes y después de la neutralización.

Tabla 32. Control de pH en Tanque 01 de DAM

Control de pH en Tanque 01		
pH inicial	pH final	Cantidad de CaO (kg)
2,20	8,35	25,5
2,25	8,35	25,5
2,15	8,35	25,5
2,31	8,35	25,5

- **Para pH = 7,05**

En la presente investigación para el diseño experimental se trabajó un nivel bajo de pH igual a 7,05 para lo cual para llegar a este pH se requirió 20 mL de Ca(OH)₂ en 250 mL de agua ácida de mina, para lo cual los cálculos a nivel de planta se realizaron de la siguiente manera:

$$\frac{(mL)Ca(OH)_2}{1L DAM} = \frac{20mL Ca(OH)_2 * 1000mL DAM}{250mL DAM} = \frac{80mL Ca(OH)_2}{1L DAM}$$

Para neutralizar 1L de DAM se necesita 80 mL de Ca(OH)₂

La cantidad de CaO requerido para neutralizar se calculó de la siguiente manera:

$$CaO (g) = \frac{10gCa * 80mL Ca(OH)_2}{1000mL Ca(OH)_2} = \frac{0,8gCaO}{L, DAM} = \frac{800gCaO}{1m^3 DAM}$$



El tanque de agua con contenido de DAM en planta tiene capacidad de 20 m^3 por lo cual se multiplicó por 20 m^3 y se obtuvo 16000 g de CaO .

$$\frac{800gCaO}{1m^3 DAM} * 20m^3 DAM = 16000g CaO = 16 kg CaO$$

La cal con el que se trabajó en la investigación es de la empresa CALCESUR S.A. que tiene una pureza mayor al 79 % de CaO (se trabajó con 80%) de manera que la cantidad de CaO para neutralizar 20 m^3 de agua ácida de mina fue de 20 kg .

$$\frac{16 kgCaO}{0,8} = 20 kg CaO$$

Para preparar Lechada de Cal se disolvió 20 kg de CaO en 2 m^3 de agua ácida de mina, y su explicación se fundamenta mediante el siguiente cálculo:

$$Cantidad de DAM = \frac{20000g CaO * 100mL DAM}{1g CaO} = 2000000mL DAM = 2m^3 DAM$$

- En planta antes de neutralizar las aguas ácidas de mina en tanque se midió el pH que registró 2,13. En laboratorio la muestra llevada registraba un pH igual a 2,06.
- Al disolver 2 m^3 de Ca(OH)_2 en tanque de 20 m^3 de DAM, se llegó a un pH igual a 6,60, de manera que se aumentó $2,5 \text{ kg}$ de CaO para llegar a un pH cercano a 7,05.
- Los 20 m^3 de agua ácida de mina neutralizada alcanzó para 2 pruebas en Trapiche 02, por lo cual este proceso se realizó 2 veces para 4 experimentos también ya que el diseño experimental para la presente investigación es factorial $2^k=2^3=8$ experimentos.

En la siguiente tabla también se detalla el control de pH realizado antes y después de realizar la neutralización en el Tanque 02 de agua ácida de mina.



Tabla 33. Control de pH en Tanque 02 de DAM

Control de pH en Tanque 01		
pH inicial	pH final	Cantidad de CaO (kg)
2,13	7,05	22,5
2,25	7,05	22,5
2,15	7,05	22,5
2,31	7,05	22,5

4.3.2.2. Tratamiento estadístico del procesamiento de mineral de baja Ley con agua ácida de mina tratada en Trapiche 02

Se realizó de acuerdo al diseño experimental factorial planteado en esta investigación que a continuación se detalla:

$$N = 2^K$$

Donde:

N: Número de Experimentos.

K: Número de Variables.

- **Identificación de variables y niveles del diseño experimental**

Para el procesamiento del mineral en Trapiche se controló variables de pH, Tiempo y Caudal. Se realizó 8 experimentos a nivel de planta.

Tabla 34. Identificación de las variables y sus niveles para el diseño experimental

Variables	Unidad	Niveles	
		X Min (-)	X Max (+)
X1: pH	Escalar	7,05	8,35
X2: tiempo (t)	h	12	16
X3: Caudal (Q)	L/s	0,17	0,25

La variable respuesta corresponde al porcentaje de rendimiento de recuperación de Oro.

- **Rendimiento de Recuperación de Oro en Planta Trapiche**

El porcentaje de rendimiento determinó la cantidad de Oro recuperado en planta, utilizando agua ácida de mina tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y el cálculo se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\%Rendimiento = \frac{W_2}{W_1} * 100$$

Donde:

%R: Rendimiento de Oro

W_1 : Concentración inicial de Oro en el mineral

W_2 : Concentración final de Oro metálico obtenido después del proceso metalúrgico

Tabla 35. Resultados de la Cantidad de Oro amalgamado con agua ácida de mina tratada

N° Prueba	Código	Ley (g/2Tm)	Au amalgamado (g)	% Recuperación
1	M-09	12,466	6,30	50,5
2	M-10	14,194	7,50	52,8
3	M-11	16,166	8,40	52,0
4	M-12	18,240	9,70	53,2
5	M-13	8,154	4,30	52,7
6	M-14	23,894	12,90	54,0
7	M-15	21,900	11,80	53,9
8	M-16	46,600	26,10	56,0

Podemos observar que se realizaron 08 experimentos en planta utilizando agua ácida de mina tratada con Lechada de Cal al 1 %, y entre los que más destaca en recuperación de Oro por amalgamación en las 8 pruebas resultó la prueba de M-16 (26,1 g de Oro por 02 Tm) quiere decir que en el proceso se recuperó 56 % de Oro. Entre los que menos destaca es la primera prueba M-09 que se recuperó 6,3 gramos de Oro de un total de Ley 12,466 g/02Tm; quiere decir que a pesar de controlar los variables como pH, tiempo y Caudal, tan solamente se recuperó un 50,5 %. El promedio de porcentaje de recuperación durante toda la experimentación controlando variables fue del 53,1 %; Arias (2022) recuperó Oro por amalgamación un promedio de 56 %. En cuanto a la recuperación de Oro sin controlar variables y sin diseño experimental, al trabajo tradicional en Planta Trapiche se obtuvo un promedio de recuperación del 44,2 %; quiere decir que al controlar variables en el proceso de recuperación de Oro en Trapiches del sector Antahuila – Rinconada, se recuperará un 8,9 % de Oro adicional, lo cual es una cifra significativa.

- **Matriz de diseño experimental desarrollado en software Statgraphics Centurion XVI**

Esta investigación la parte experimental se desarrolló en este programa Statgraphics Centurion XVI, que es uno de los programas estadísticos con la cual se tiene precisión para obtener buenos resultados y completos.

La cantidad de Oro que se recuperó en el procesamiento de mineral con agua ácida de mina tratada se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 36. Resultados de la interacción de las variables en la recuperación de Oro en Planta

N°	Z ₁	Z ₂	Z ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	7,05	12	0,17	-1	-1	-1	50,5
2	8,35	12	0,17	1	-1	-1	52,8
3	7,05	16	0,17	-1	1	-1	52,0
4	8,35	16	0,17	1	1	-1	53,2
5	7,05	12	0,25	-1	-1	1	52,7
6	8,35	12	0,25	1	-1	1	54,0
7	7,05	16	0,25	-1	1	1	53,9
8	8,35	16	0,25	1	1	1	56,0

En la tabla 36 podemos observar que de los 8 experimentos realizados, la última prueba fue el punto óptimo con variables de pH igual a 8,35; tiempo igual a 16 horas y Caudal de trabajo igual a 0,25; resultando un porcentaje de recuperación de Oro del 56 %.

- **Efectos estimados para rendimiento de Oro**

Tabla 37. Efectos estimados para rendimiento de Oro

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	53,1375	0,145237	
A:pH	1,725	0,290474	1,0
B:Tiempo	1,275	0,290474	1,0
C:Caudal	2,025	0,290474	1,0

En la tabla 37 vemos la interacción de los factores y se estima un valor para cada uno del cual también se observa el error estándar lo cual representa el error de muestreo, pero nos podemos dar cuenta que el Factor de Inflación de Varianza (V.I.F.) es igual a 1,0.

- **Análisis de Varianza para Rendimiento de Oro en Trapiche**

Tabla 38. Resultados de Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	5,95125	1	5,95125	35,27	0,0040
B:Tiempo	3,25125	1	3,25125	19,27	0,0118
C:Caudal	8,20125	1	8,20125	48,60	0,0022
Error total	0,675	4	0,16875		
Total (corr.)	18,0788	7			

R-cuadrada = 96,27 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,47 %

Error estándar del est. = 0,410792

Error absoluto medio = 0,2375



Estadístico Durbin-Watson = 2,0713 (P=0,4610)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,137963

La tabla 38 muestra la tabla ANOVA del cual podemos decir que 3 efectos tienen un Valor-P que son menores a 0,05; de manera que entonces son diferentes de cero y por lo cual los resultados tienen un nivel de confianza mayor al 95 %. El resultado estadístico del valor de R-cuadrada igual a 96,27 % nos da a conocer la variabilidad del rendimiento en recuperación de Oro en Trapiche en el Sector Antahuila-Rinconada. La R-Cuadrada ajustada tuvo un valor de 93,47 %; el Error estándar del estimado fue de 0,410792 que es la desviación estándar de residuos. En tanto el error absoluto medio fue de 0,2375; representa el valor promedio de residuos. El estadístico Durbin –Watson fue de 2,0713 lo cual también está relacionado con pruebas estadísticas de los residuos.

- **Modelo matemático**

Para el modelo matemático en el software STATGRAPHICS determina los valores de X y Y que son los factores codificados de entrada, por ende, se forma una ecuación lineal. A continuación, mostraremos la tabla de los valores coeficientes de regresión para Y (variable respuesta o rendimiento de Oro).

Tabla 39. Coeficiente de regresión para Recuperación de Oro

Coefficiente	Estimado
constante	33,1421
A:pH	1,32692
B:Tiempo	0,31875
C:Caudal	25,3125

El modelo matemático de regresión resultó de la siguiente manera:

$$Y = 33,1421 + 1,32692 * \text{pH} + 0,31875 * \text{Tiempo} + 25,3125 * \text{Caudal}$$

- **Optimización de Respuesta**

Meta: Maximizar variable respuesta

Valor óptimo: 55,65 %

Tabla 40. Valores óptimos para el porcentaje de recuperación de Oro

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	7,05	8,35	8,35
Tiempo	12,0	16,0	16,0
Caudal	0,17	0,25	0,25

En la tabla se puede ver la interacción de los niveles bajo y alto con las variables, llegando a un punto óptimo para recuperar mayor cantidad de Oro.

- **Diagrama de Pareto**

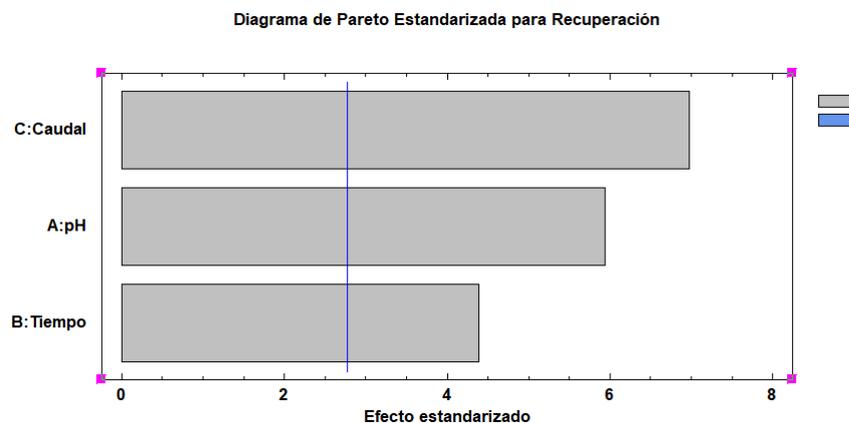


Figura 28. Diagrama de Pareto estandarizado de interacción de factores

La figura 28 muestra la interacción de las variables como son; Caudal, pH y Tiempo, de acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 38 (ANOVA), de manera que de esta gráfica podemos deducir que el factor mas importante e influyente en la recuperación de Oro (Y) es el Caudal, seguidamente el pH es un factor también bastante importante en la recuperación de Oro, y al final el Tiempo también es un de los influyentes en la recuperación de Oro.

La línea Azul que interseca con los tres factores indica el margen de varianza del sistema

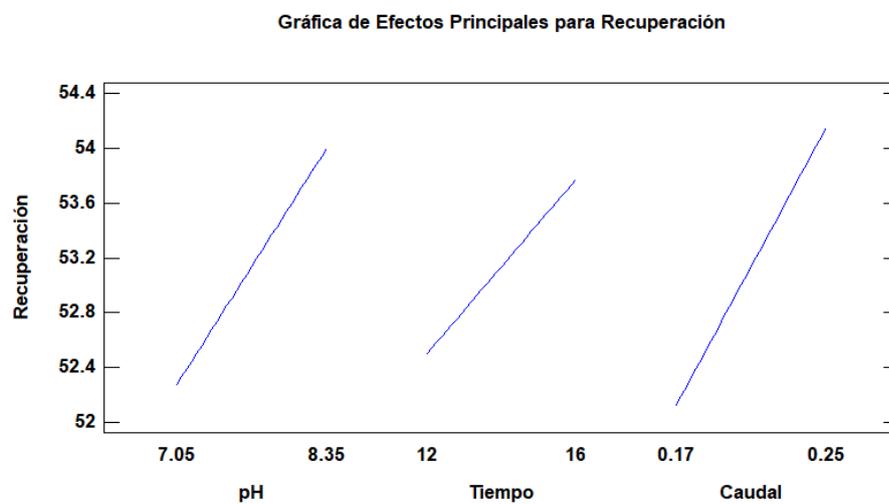


Figura 29. Diagrama de efectos principales para recuperación de Oro

En la figura 29 podemos observar que no hay interacción de las variables, quiere decir claramente que los factores son independientes. También podemos ver que los tres factores pH, Tiempo y Caudal son positivos.

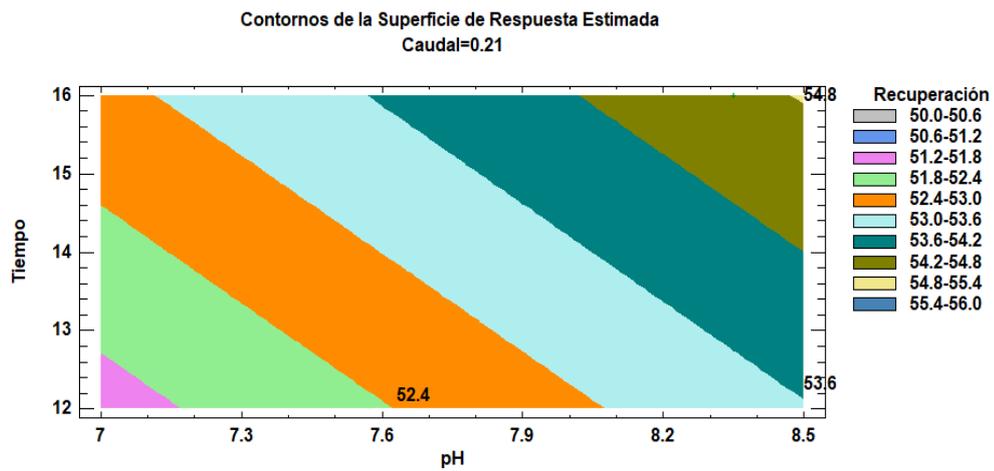


Figura 30. Contornos de la superficie respuesta estimada

En la figura 30 podemos ver claramente que el tiempo óptimo de recuperación de Oro es de 16 horas a un pH igual a 6,35 y un caudal igual a 0,25 L/s. También vemos que tiene ruta ascendente, quiere decir que se puede realizar otras pruebas a esto si es que se quiere minimizar o maximizar el rendimiento.



V. CONCLUSIONES

- Del primer objetivo, el agua ácida de mina utilizado en Trapiches y otros vertidos a efluentes mineros en el Sector Antahuila, en su análisis fisicoquímico se tuvo una alta concentración de sulfatos y metales pesados (Al, Cd, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) que sobrepasaron los LMPs establecidos en el D.S. 004-2017-MINAM (agua de categoría 3).
- Del segundo objetivo, a nivel de laboratorio el agua ácida de mina se neutralizó a pH 8,35 y los metales (Al, Cd, Cu, Co, Fe, Ni, Pb y Zn) precipitaron y están dentro de los LMPs de acuerdo al D.S. 004-2017-MINAM agua para riego de vegetales y consumo de animales, a excepción Manganeseo no precipitó completamente porque necesitó un pH mayor a 8,35.
- Del tercer objetivo, el agua tratada con Lechada de Cal resultó ser eficiente porque se logró remover metales pesados (Al, Cd, Cu, Co, Fe, Ni, Pb y Zn) con lo que se logró cumplir con los LMPs, permitiendo la optimización en la recuperación de Oro en Trapiche que significó un 8,9 % más que procesando con agua ácida de mina sin tratar.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar este método de tratamiento de Drenaje Ácido de Minas ya sea para el vertimiento a efluentes o reutilización en procesos metalúrgicos en pequeñas o grandes mineras, ya que es un método que posee muchas ventajas, tiene bajo costo de tratamiento, efectividad en precipitación de metales tóxicos y otros parámetros fisicoquímicos.
- Se sugiere realizar más investigaciones sobre tratamiento de Drenaje Ácido de Minas, ya que el agua es un recurso indispensable para todos los seres vivos. Cuando el DAM es vertido a los efluentes sin realizar ningún tratamiento, prácticamente es una amenaza para la extinción de los seres vivos acuáticos y por ende para la cadena alimenticia.
- Para mejorar la eficiencia de concentración de Oro en molinos y Trapiches por amalgamación, se recomienda realizar más investigaciones.
- También sería bueno impulsar la investigación en estudios de calidad de Aire, Suelo en mina La Rinconada.
- A los empresarios que laboran día a día en sus plantas Trapiche en la mina La Rinconada, especialmente en el Sector Antahuila, se sugiere optar por este método de procesamiento de Oro en los trapiches, tratar las aguas ácidas en sus tanques, controlar el tiempo de procesamiento y sobre todo trabajar con caudal de alimentación de agua mayor a 0,25 L/s.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento.

Aguirre, W., & Huaman, R. (2019). Eficiencia del Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina en la bocamina Prosperidad con método químico empleando Cal a nivel Laboratorio [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/15018>

Amanqui, D., & Lopez, F. (2004). Tratamiento de aguas ácidas de la mina Rinconada en el afluyente del Balcón N°03. Universidad Nacional del Altiplano.

Ampuero, R., & Barboza, A. (2019). Propuesta de Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina (DAM) de la bocamina Prosperidad con el método Óxico Calizo para cumplir con los Límites Máximos Permisibles de descarga de efluentes, Cajamarca 2019 [Universidad Nacional del Altiplano]. <https://hdl.handle.net/11537/23831>

Andamayo, A. (2019). Tratamiento de Aguas Ácidas para la obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera el Brocal S.A.A. - Tinyahuarco - Pasco - 2019 [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1672>

Aramburú, V. (2015). Proceso innovador para mejorar la recuperación de oro y reducir la contaminación ambiental en la minería artesanal [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/4605>

Arias, M. (2022). Proyecto de implementación de molinos continuos para mejorar el procesamiento de minerales en las minas de Muccumayo con datos de la mina Winchumayo-Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/18555>



- Cervantes, A. (2014). Caracterización del Drenaje Ácido y de las Rocas Asociadas a una Mina para evaluar su posible aplicación en un Sistema de Tratamiento Pasivo [Universidad Autónoma de México].
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3014%09>
- Chambi, Z. (2013). Optimización de la amalgamación del Oro en la palnta concentradora B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/17383>
- Chaparro, J., & Ardilla, N. (2018). Evaluación a escala de laboratorio del gradiente de acidez del drenaje ácido de mina, mediante el uso de columnas de caliza como sistema pasivo de neutralización [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].
<http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2539>
- Cuentas, M., & Velarde, J. (2019). Uso del Mercurio en La Rinconada - Puno. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 4to, 27–34.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000100003#:~:text=En la Rinconada el mercurio,la producci3n conduce a la
- Ferguston, K., & Erickson, P. (1988). Pre-Mine Prediction of Acid Mine Drainage.
- Geldenhuis, S., & Bell, F. (1998). Drenaje ácido de mina en una mina de carb3n en el este de Tranvaal, Sur 3frica. *Entorno Geol*, 234–242.
- Johnson, D., & Hallberg, K. (2005). Acid Mine Drainage remediation options: a review. *ScienceDirect*, 338(1–2), 3–14.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704006199>
- Lima, J. (2018). Proyecto de ampliación de 30 a 60TM/día en la planta de beneficio GEZA



- Minerales ASIS E.I.R.L. Rinconada, Puno [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9245>
- Lottermoser, B. (2007). Mine wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer, 3th ed.
- Mamani, W. (2018). Caracterización y Tratamiento de efluentes de Aguas Ácidas en la Mina Rinconada - Puno [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11993>
- Maynas, O. (2018). Determinación de los efluentes del Proceso de Flotación y Diseño del Proceso de Tratamiento en la Planta Concentradora de Tiquillaca [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7799>
- Medrano, K. (2011). Lixiviación de un mineral aurífero usando el sulfuro ácido de sodio y el ácido sulfhídrico en la Unidad Minera Arasi [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/583>
- MINAM. (1995). Guía Ambiental para el manejo de Drenaje Ácido de Minas (No. 1). 50.
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>
- MINEM. (2018). Minería en el Perú. Ministerio de Energía y Minas, 31.
https://www.minem.gob.pe/_sector.php?idSector=1
- Muro, J. (2005, July). Metalurgia del Oro: Módulo de capacitación Técnico Ambiental Minera MACDESA, 1–10.
- Orrego, A. (1890). Industria del Oro en Chile (Sociedad N).
- Osinerming. (2017). La industria de la minería en el Perú. Biblioteca Nacional Del Perú, 1er



- volume, 166. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/informes-publicaciones/483409-la-industria-de-la-mineria-en-el-peru-20-anos-de-contribucion-al-crecimiento-y-desarrollo-economico-del-pais>
- Parillo, M. (2014). Estudio metalúrgico de minerales de Oro del sector Limbani-Región Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2512>
- Rabanal, D. (2021). Operación en la Planta de Tratamiento de Aguas Ácidas en la UM Anabi S.A.C. [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12837>
- Soloisolo, H. (2021). Propuesta de Tratamiento del Drenaje Ácido generado por la Unidad Minera Arasi en la Microcuenca del Río Llallimayo Puno - 2019 [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/15441>
- Sudzuki, H., & Abella, P. (2011). Procesamiento sostenible del Oro en San Cristobal, Sur del Perú. Patrimonio Geominero, Geología y Minería Ambiental de Bolivia, 1ro, 291–304. <http://hdl.handle.net/2099.1/11150>
- Tejada, R. (2017). Tratamiento y Sedimentación de la turbidez con Cal en las Aguas Residuales de los relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Santiago-B [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4695>
- Vicente, M. (2012). Ampliación de la Planta Concentradora de Crucero de 40TMSPD a 100TMSPD, Crucero, Puno, Perú. Universidad Nacional San Agustín Arequipa.
- Zabaleta, G. (1999). El oro: comercio, obtención y aplicaciones. Real Sociedad Española de



Química, No 4, 5–12.

Zamora, G., Zamora, V., & Gorrity, M. (2015). Propuesta de Tratamiento de las Aguas Ácidas de la Mina Milluni mediante Drenes Anóxicos Calizos. *Revista Metalúrgica*, 36, 37–44. http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n36/n36_a05.pdf



ANEXOS

ANEXO A: INFORMES TÉCNICOS DE LABORATORIOS

- Figura A-1: Informe de ensayo LAS LAS01-AG-22-00033, muestra de agua ácida de mina sin tratar, con clave generada N°8C065730 para determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP-OES “Laboratorios Analíticos del Sur -Arequipa”
- Figura A-2: Informe de análisis N°001587, muestra de agua ácida de mina, con código de muestra generada B009-000349 para análisis físico químico de agua ácida de mina sin tratar “Laboratorio Control de Calidad, Facultad de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Altiplano”
- Figura A-3: Informe de análisis N°001588, muestra de agua ácida de mina tratada, con código de muestra generada B009-000349 para análisis físico químico de agua ácida de mina tratada “Laboratorio Control de Calidad, Facultad de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Altiplano”
- Figura A-4: Informe de ensayo LAS01-AG-22-00035, muestra de agua ácida de mina tratada, con clave generada N°6565F205 para determinación de metales y elementos traza en agua y aguas residuales por ICP-OES “Laboratorios Analíticos del Sur -Arequipa”
- Figura A-5: Informe de análisis de agua N°31-LA136, muestra de agua ácida de mina tratada, para análisis de metales pesados por espectrofotómetro de emisión atómica por plasma microondaS 4210 MP-AES “Facultad de Ingeniería de



Minas, Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental – Universidad Nacional del Altiplano”

Figura A-6 Informe de ensayo RH-M97-1808, 16 muestras de mineral de baja Ley para determinación analítica del contenido metálico total en la muestra por método de fundición más por espectrofotometría de Absorción Atómica “Rh-Lab S.A.C.-Juliaca”

ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Figura B-1: Toma de muestra de agua ácida de mina

Figura B-2: Preparación de Lechada de Cal en Laboratorio

Figura B-3: Neutralización de la muestra de agua ácida de mina en Laboratorio

Figura B-4: Precipitación y filtración de la muestra en Laboratorio

Figura B-5: Envío de muestra a Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa y al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas para análisis de metales pesados

Figura B-6: Marcha analítica para Análisis de metales pesados en Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM, UNA-Puno

Figura B-7: Análisis de metales pesados por Absorción Atómica en la FIM, UNA-Puno

Figura B-8: Toma de muestras de mineral en Planta

Figura B-9: Neutralización de DAM en tanque a nivel de Planta en el Sector Antahuila, La Rinconada



Figura B-10: Proceso metalúrgico de Oro en Trapiche

Figura B-11: Amalgamación del concentrado en molino

Figura B-12: Fundición de Oro en Horno

Figura B-12: Fundición de Oro en Horno



ANEXO A: INFORMES TÉCNICOS DE LABORATORIOS



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 8C065730

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-22-00033

Fecha de emisión: 23/07/2022

Página 1 de 3

Señores : EBER JOSUE HUANCA CAHUANA
Dirección : CERRITO POJRACASI - JULIACA
Atención : EBER JOSUE HUANCÁ CAHUANA
Proyecto : TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINA, PARA EL PROCEDIMIENTO DEL ORO EN TRAPICHES EN EL SECTOR ANTAHUILA RINCONADA - PUNO

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : EBER JOSUE HUANCA CAHUANA Fecha de recepción : 16/07/2022
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 154-22 Fecha de ensayo : 16/07/2022
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente Nro de muestras : 1

C. d. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG22000411	AGUA ACIDA DE MINA	Agua Residual - Agua Residual Industrial	SECTOR ANTAHUILA / RINCONADA / ANANEA / PUNO	451155.698 E 8382444.345 N 19 L	15/07/2022	14:03

Condiciones de recepción de la muestra
Al ambiente

Observación

Laboratorios Analíticos del Sur E.S.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 8C065730

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-22-00033

Fecha de emisión: 23/07/2022

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782											
		Ag	Al	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG22000411	AGUA ACIDA DE MINA	<0,0024	43,281	<0,0053	0,05998	<0,000079	191,331	0,01880	0,376668	0,02505	0,4277	95,288	7,593

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782											
		Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb	Se	SiO2	Sn
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG22000411	AGUA ACIDA DE MINA	0,28743	57,4796	10,15349	<0,00038	32,453	0,91553	0,3876	0,1181	0,00179	<0,002	48,6139	<0,00085

Codigo Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782				
		Sr	Ti	Tl	V	Zn
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG22000411	AGUA ACIDA DE MINA	1,8527	0,22612	<0,0013	0,02817	3,2838

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 18474

A-1: Certificado de Análisis de metales pesados disueltos en muestra de agua ácida de mina sin tratar del Sector Antahuila, La Rinconada



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD ACREDITADA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



Nº 001587
LQ - 2022

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de AGUAS: AGUA ACIDA

PROCEDENCIA : AGUA ACIDA, ANTAHUILA-RINCONADA, PROVINCIA DE SAN ANTONIO DE PUTINA

PROYECTO : TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINA PARA EL PROCESAMIENTO DE ORO EN TRAPICHE EN EL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA - PUNO

INTERESADO : EBER JOSÉ HUANCA CAHUANA

MOTIVO : ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA

MUESTREO : 19/07/2022, por el interesado

ANÁLISIS : 19/07/2022

COD. MUESTRA : B009-000349

CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS:

ASPECTO : Líquido
COLOR : concreto
OLOR : Inodora

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

pH : 2.06
Temperatura : 15.00 °C
Conductividad Eléctrica : 509.00 µS/cm

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Dureza Total como CaCO₃ : 1411.70 mg/L
Alcalinidad como CaCO₃ : 277.56 mg/L
Cloruros como Cl⁻ : 279.50 mg/L
Sulfatos como SO₄²⁻ : 884.00 mg/L
Calcio como Ca⁺⁺ : 217.60 mg/L
Magnesio como Mg⁺⁺ : 153.70 mg/L
Sólidos totales disueltos : 251.00 mg/L
Porcentaje de salinidad : 0.30 %
Turbidez : 15.46 NTU

Puno, C.U. 09 de agosto del 2022.

vºgº

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
PUNO - UAN - CIP - 852649



Walter E. Apurisco Aragón, Ph.D.
DECANO - FID - LINA

A-2: Certificado de análisis Físico Químico de la muestra de agua ácida de mina sin tratar



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD ACREDITADA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



Nº 001588
LQ - 2022

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de AGUAS: AGUA ACIDA
PROCEDECIA : AGUA CIDA, ANTAHUILA-RINCÓNADA, PROVINCIA DE SAN ANTONIO DE PUTINA
PROYECTO : TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINA PARA EL PROCESAMIENTO DE ORO EN TRAPICHE EN EL SECTOR ANTAHUILA, RINCÓNADA - PUNO
INTERESADO : EBER JOSE HUANCA CAHUANA
MOTIVO : ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA
MUESTREO : 19/07/2022, por el interesado
ANÁLISIS : 19/07/2022
COD. MUESTRA : B009-000349

CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS:

ASPECTO : Líquida
COLOR : Incolore
OLOR : Inodoro

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

pH : 8.35
Temperatura : 15.00 °C
Conductividad Eléctrica : 506.00 µS/cm

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Dureza Total como CaCO₃ : 1690.80 mg/L
Alcalinidad como CaCO₃ : 78.80 mg/L
Cloruros como Cl⁻ : 249.42 mg/L
Sulfatos como SO₄²⁻ : 822.00 mg/L
Calcio como Ca⁺⁺ : 495.65 mg/L
Magnesio como Mg⁺⁺ : 109.78 mg/L
Sólidos totales disueltos : 250.00 mg/L
Porcentaje de salinidad : 0.30 %
Turbidez : 7.00 NTU

Puno, C.U. 09 de agosto del 2022.

vºBº

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
 MAESTRA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
 PIQ - LINA - GP - 162263

WALTER EL APONTE
 DECANO - PUNO

A-3: Certificado de análisis Físico Químico de la muestra de agua ácida de mina tratada



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 6565F205

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-22-00035

Fecha de emisión: 10/08/2022

Página 1 de 3

Señores : EBER JOSUE HUANCA CAHUANA
Dirección : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO (FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA)
Atención : EBER JOSUE HUANCA CAHUANA
Proyecto : TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA PARA EL PROCESAMIENTO DEL ORO EN TRAPICHES EN EL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA - PUNO

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : EBER JOSUE HUANCA CAHUANA
Registro de muestreo : Cadena de custodia N°: 161-22
Plan de muestreo : Muestreado por el cliente
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente
Fecha de recepción : 1/08/2022
Fecha de ensayo : 1/08/2022
Nro de muestras : 1

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG22000430	AGUAS ACIDAS DE MINA TRATADA	Agua Residual - Agua Residual Industrial	SECTOR ANTAHUILA / RINCONADA / PUNO	451155.698 E. 0302444.345 N 19L	27/07/2022	14.04

Condiciones de recepción de la muestra

Cooler refrigerado

Observación

-


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

Clave generada : 6565F205

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-22-00035

Fecha de emisión: 10/08/2022

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782												
		Ag	Al	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	
AG22000430	AGUAS ACIDAS DE MINA TRATADA	0,0100	4,914	0,0138	0,03303	b<0,000079	>250	b<0,00011	b<0,000094	0,00205	b<0,002	0,116	9,799	

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782										
		Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb	Se	SiO2
AG22000430	AGUAS ACIDAS DE MINA TRATADA	0,31748	45,1803	0,50768	b<0,00038	29,601	b<0,00051	b<0,00054	b<0,0026	0,00603	b<0,002	1,1608

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*782					
		Sn	Sr	Ti	Tl	V	Zn
AG22000430	AGUAS ACIDAS DE MINA TRATADA	b<0,00085	2,2521	b<0,00068	b<0,0013	0,01268	b<0,0031


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Suárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

A-4: Certificado de análisis de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina tratada



INFORME DE ANÁLISIS DE AGUA

N° 31-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136
PROCEDENCIA: SECTOR ANTAHUILA RINCONADA	N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES
SOLICITANTE: EBER JOSUE HUANCA CAHUANA	FECHA DE INGRESO: 01/08/2022
	TIPO DE SERVICIO: Único

INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS AGUA

EMPAQUE PRIMARIO: botella de plástico	TEMPERATURA DEL RECIPIENTE: <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente
TIPO DE MUESTRA: AGUA	<input type="checkbox"/> Refrigeración
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Análisis de Metales Pesados	FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 01/08/2022
Coordenadas UTM DATUM WGS - 84 L19	N: 0451155.698 E: 8382444.345

Código de muestra	ANALISIS	Cu	Pb	Al	Fe	Cd	Zn	Mn	METODO DE ENSAYO	% RSD
P_01	Agua	< 0.125	<0.001	0.072	0.183	0.0121	0.182	1.332	Método de ensayo por digestión multiácida -ICP-AES	13.69

A-5: Certificado de análisis de metales pesados de la muestra de agua ácida de mina tratada



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALITICOS QUIMICO - METALURGICOS

RH-M97-1808

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE	
A SOLICITUD DE :	SR. EBER JOSUE HUANCA CAHUANA
ASUNTO :	Determinación Analítica del contenido Metálico Total en la muestra
PROCEDENCIA :	ANTAHUILA - RINCONADA - PUNO
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA	
CANTIDAD DE MUESTRAS :	16
SOLICITUD DE ENSAYO :	Análisis Químico elemento Oro (Au)
PROYECTO :	TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA, PARA EL PROCESAMIENTO DEL ORO EN TRAPICHES EN EL SECTOR ANTAHUILA, RINCONADA - PUNO
RECEPCION DE MUESTRAS :	Bolsa de plástico, debidamente conservado.
FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO :	29/08/2022 al 04/10/2022
DETALLE DEL INFORME	

RESULTADO DE ENSAYO

M*	N° RH	Codigo de Cliente	COORDENADAS UTM		Au	
					Gr/Tm	Cu/Tc
1	RH-M89145	M-01 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451157.753	N 8382434.88	1,167	0,0340
2	RH-M89146	M-02 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451356.635	N 8382438.293	17,567	0,5124
3	RH-M89147	M-03 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451154.122	N 8382435.693	7,062	0,2060
4	RH-M89148	M-04 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451198.548	N 8382450.803	3,050	0,1152
5	RH-M89149	M-05 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451173.64	N 8382428.344	6,833	0,1993
6	RH-M89150	M-06 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451374.405	N 8382433.255	8,267	0,2411
7	RH-M89151	M-07 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451150.717	N 8382442.477	5,233	0,1526
8	RH-M89152	M-08 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451154.842	N 8382441.645	3,913	0,0558
9	RH-M89153	M-09 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451160.393	N 8382432.777	6,233	0,1818
10	RH-M89154	M-10 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451364.496	N 8382415.627	7,037	0,2070
11	RH-M89155	M-11 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451165.698	N 8382426.496	8,083	0,2358
12	RH-M89156	M-12 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451161.322	N 8382428.894	9,120	0,2660
13	RH-M89157	M-13 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451165.713	N 8382432.316	4,077	0,1189
14	RH-M89158	M-14 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451358.152	N 8382434.325	11,947	0,3485
15	RH-M89159	M-15 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451155.709	N 8382438.981	10,950	0,3194
16	RH-M89160	M-16 Mineral de baja ley Antahuilla-Rinconada-Puno	E 451149.401	N 8382441.784	25,300	0,6796

Los resultados obtenidos y que se consignán en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

MÉTODOS DE REFERENCIA

* Determinación de Oro (Au) en mineral - Método fundición mas por Espectrofotometría de Absorción Atómica

RHLAB, S.A.C
[Firma]
Ing. Fidel Huaymapata Luque
GERENTE GENERAL

A-6: Certificado de determinación de contenido de Oro de muestras de mineral de baja Ley

ANEXO B

FOTOGRAFÍAS DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN



Figura B-1: Toma de muestra de agua ácida de mina



Figura B-2: Preparación de Lechada de Cal en Laboratorio



Figura B-3: Neutralización de la muestra de agua ácida de mina en Laboratorio



Figura B-4: Precipitación y filtración de la muestra en Laboratorio



Figura B-5: Envío de muestra a Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa y al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas para análisis de metales pesados



Figura B-6: Marcha analítica para Análisis de metales pesados en Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM, UNA-Puno



Figura B-7: Análisis de metales pesados por Absorción Atómica en la FIM, UNA-Puno



Figura B-8: Toma de muestras de mineral en Planta



Figura B-9: Neutralización de DAM en tanque a nivel de Planta en el Sector Antahuila,
La Rinconada



Figura B-10: Proceso metalúrgico de Oro en Trapiche



Figura B-11: Amalgamación del concentrado en molino



Figura B-12: Fundición de Oro en Horno



Figura B-13: Vista panorámica de la Planta