

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN
NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES
PESADOS (Fe, Cu, Pb, Zn) DEL DRENAJE ACIDO
DE MINA CON LODOS DE BAJA DENSIDAD A
NIVEL PLANTA PILOTO DE CÍA MINERA
HUANCAPETI - 2016”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR:

Bach. ROGER SORIANO FIGUEROA

ASESOR:

MSc. MARIO VLADIMIR LEYVA COLLAS

Huaraz, Ancash, Perú

Julio, 2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN
NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES
PESADOS (Fe, Cu, Pb, Zn) DEL DRENAJE ACIDO
DE MINA CON LODOS DE BAJA DENSIDAD A
NIVEL PLANTA PILOTO DE CÍA MINERA
HUANCAPETI - 2016”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR:

Bach. ROGER SORIANO FIGUEROA

ASESOR:

MSc. MARIO VLADIMIR LEYVA COLLAS

Huaraz, Ancash, Perú

Julio, 2018



FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM

Conforme al Reglamento Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI
Resolución de Consejo Directivo de SUNEDU N° 033-2016-SUNEDU/CD

1. Datos del Autor:

Apellidos y Nombres: SORIANO FIGUEROA ROGER

Código de alumno: 061.0506.462

Teléfono: 957161647

Correo electrónico:
soriano_roger462@hotmail.com

DNI o Extranjería: 43682717

2. Datos del Autor:

Trabajo de investigación

Trabajo académico

Trabajo de suficiencia profesional

Tesis

3. Título profesional o grado académico:

Bachiller

Título

Segunda especialidad

Licenciado

Magister

Doctor

4. Título del trabajo de investigación:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Fe, Cu, Pb, Zn) DEL DRENAJE ACIDO DE MINA CON LODOS DE BAJA DENSIDAD A NIVEL PLANTA PILOTO DE CÍA MINERA HUANCAPETI - 2016

5. Facultad de: CIENCIAS DEL AMBIENTE

6. Escuela, Carrera o Programa: INGENIERÍA AMBIENTAL

7. Asesor:

Apellidos y Nombres: LEYVA COLLAS MARIO VLADIMIR

Teléfono: 955918241

Correo electrónico: mariolc0205@hotmail.com

DNI o Extranjería: 06269590

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito respecto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: 

D.N.I.: 43682717

FECHA: Huaraz, 06 de diciembre de 2018



ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditorium de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el Acto Académico de Sustentación y Defensa de la Tesis **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Fe, Cu, Pb, Zn) DEL DRENAJE ACIDO DE MINA CON LODOS DE BAJA DENSIDAD A NIVEL PLANTA PILOTO DE CIA MINERA HUANCAPETI - 2016**, que presenta **ROGER SORIANO FIGUEROA** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

APROBADO

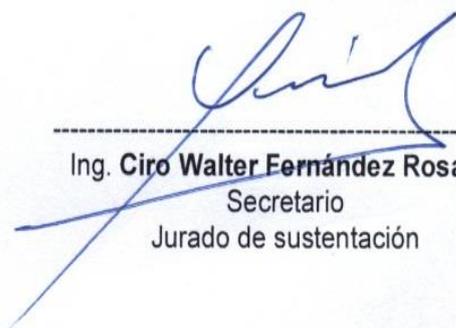
Con el calificativo de: CATORCE (14)

En consecuencia, **ROGER SORIANO FIGUEROA** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 761-2017-UNASAM) y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 19 de Julio de 2018



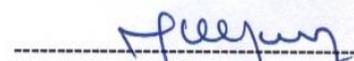
Dr. **Jerónimo Víctor Manrique**
Presidente
Jurado de sustentación



Ing. **Ciro Walter Fernández Rosales**
Secretario
Jurado de sustentación



Ing. **Martín Miguel Huamán Carranza**
Vocal
Jurado de sustentación



MSc. **Mario Vladimir Leyva Collas**
Asesor de tesista

DEDICATORIA

A mis padres Sr. Julio Constantino Soriano Penadillo y
Sra. Teresa Yolanda Figueroa Cabana, por su apoyo
constante en mi formación profesional, con su
esfuerzo diario en mi logro profesional.

Roger Soriano Figueroa

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por iluminarme en cada momento de mi vida cotidiana y formación profesional.

A mis queridos hermanos por su constante apoyo: Oscar, Eladio, Héctor, Rosa, Marco, Alfredo, Edgar.

Al Ing. Alejandro Egoavil Meza, Jefe de Planta de Agua de Mina de la Cía. Minera Huancapetí, a quien es un amigo.

Al Ing. Mateo Caushi Urbano, Jefe de Medio Ambiente y Recursos Naturales DIRESA-Huaraz.

A la Cía. Minera Huancapetí, por el financiamiento de la tesis, y brindar en mi formación profesional.

A mis docentes, quienes me compartieron sus conocimientos teóricos, prácticos, vivencias, anécdotas, y me brindaron su amistad.

A mis amigos, con quienes compartimos tantas cosas en la universidad y fuera de ella.

RESUMEN

La Cía. Minera Huancapetí (Aija, Áncash) realiza labores de extracción de minerales polimetalicos en tres bocaminas denominadas Hércules, Coturcan y Caridad. Los drenajes ácidos de mina generados son conducidos y tratados antes de ser vertidos al río Hércules. A fin de optimizar el proceso de tratamiento alcalino la empresa minera ha implementado una Planta Piloto para lograr mayores eficiencias en la remoción de metales. En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia de neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina mediante la tecnología de lodos de baja densidad a nivel de Planta Piloto.

Inicialmente, se caracterizó el drenaje ácido de mina antes de su ingreso a la Planta Piloto en cuanto a su pH y concentración de cobre, hierro, plomo y zinc. Posteriormente, se realizó la neutralización de tres volúmenes de 10 L de drenaje ácido de mina mediante la adición de volúmenes de Ca(OH)_2 al 2.5%, 5% y 10% (p/v) con medición constante del pH hasta obtener valores entre 8.8 y 9. Seguidamente, se añadió el floculante AR-3775 (0.03%) para mejorar la sedimentación de hidróxidos metálicos. Finalmente, después de un tiempo de reacción de 15 minutos, se extrajeron muestras del agua tratada para los análisis de laboratorio en cuanto a su contenido de los metales indicados.

Los resultados evidencian que el sistema de lodos de baja densidad permitió neutralizar el drenaje ácido de mina de un pH inicial de 3.54 a valores de 8.96, 8.8 y 9 empleando concentraciones de Ca(OH)_2 de 2.5%, 5% y 10% respectivamente. Asimismo, permitió remover el cobre, plomo, zinc y el hierro en cantidades de 4.187 mg/L, 6.542 mg/L, 632.355 mg/L y 362.008 mg/L respectivamente, concentraciones que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM para efluentes mineros. Finalmente, se obtuvieron eficiencias de remoción del 98.91%, 98.49%, 99.95% y 99.97% para el cobre, plomo, zinc y hierro respectivamente. Para el plomo y hierro se requirió una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%, mientras que para el zinc y cobre del 5%. Por tanto, el tratamiento del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad resulta eficiente para la remoción de metales antes de su vertimiento a un cuerpo receptor.

Palabras clave: Lodos de baja densidad, neutralización, remoción, eficiencia, metales, drenaje ácido de mina.

ABSTRACT

Huancapetí Mining Cía (Aija, Áncash) makes extraction of polymetallic minerals in three portals mining called Hércules, Coturcan, and Caridad. The acid mine drainages generated are conducted and treated before being discharged to the Hercules river. In order to optimize the alkaline treatment process, this mining company has implemented a Pilot Plant to achieve greater efficiencies in the removal of metals. In this context, the aim of this research was to evaluate the efficiency of neutralization and removal of heavy metals (Fe, Cu, Pb, Zn) from acid mine drainage using low-density sludge (LDS) technology at the Pilot Plant level.

Initially, acid mine drainage was characterized before entering the Pilot Plant in terms of its pH and copper, iron, lead, and zinc concentration. Subsequently, the neutralization of three volumes of 10 L of acid mine drainage was performed by the addition of 2.5%, 5% and 10% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ volumes (w/v) with constant pH measurement to obtain values between 8.8 to 9. Subsequent, the flocculant AR-3775 (0.03%) was added to improve metal hydroxides sedimentation. To end, after a reaction time for 15 minutes, samples were taken from the treated water for laboratory analyzes of specified metals.

The results show the LDS system allowed to neutralize the acid mine drainage from an initial pH of 3.54 to values of 8.96, 8.8 and 9 using of 2.5%, 5%, and 10% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentrations respectively. It also allowed the removal of copper, lead, zinc, and iron in amounts of 4.187 mg/L, 6.542 mg/L, 632.355 mg/L and 362,008 mg/L respectively, concentrations that are below the maximum permissible limits established to Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM for mining effluents. Finally, removal efficiencies of 98.91%, 98.49%, 99.95% and 99.97% were obtained for copper, lead, zinc, and iron, respectively. For lead and iron, a 2.5% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration was required, while for zinc and copper of 5%. Therefore, the treatment of mine acid drainage with low-density muds is efficient for the removal of metals before they are discharged to rivers.

Keywords: Low-density sludge (LDS), neutralization, removal, efficiency, metals, acid mine drainage.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
RELACIÓN DE TABLAS	x
RELACIÓN DE FIGURAS	x
ABREVIATURAS	xi
SIGLAS	xi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Fundamentación	3
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Base teórica	6
2.2.1. Drenaje ácido de mina	6
2.2.2. Mecanismos de formación de drenajes ácidos	6
2.2.3. Formación de drenajes ácidos	7
2.2.4. Características del drenaje ácido de mina	8
2.2.5. Problemática de los drenajes ácidos de mina	9
2.2.6. Metales pesados	10
2.2.7. Plomo	10
2.2.8. Hierro	11
	vii

2.2.9. Cobre	12
2.2.10. Zinc	12
2.2.11. Efectos en la salud	13
2.2.12. Tratamiento tipo de aguas ácidas en una planta convencional de LDS	14
2.2.13. Fases del tratamiento químico de drenajes ácidos de mina	16
2.2.14. Química del proceso	18
a) Neutralización	18
b) Oxidación química	18
c) pH	19
d) Precipitación de metales pesados	20
e) Remoción	20
f) Floculación	20
g) Sedimentación	21
h) Precipitación de metales	21
2.2.15. Consideraciones para neutralización y remoción de metales pesados	22
2.2.16. Ventajas y desventajas de neutralización de drenaje ácido de mina por metodología de lodos de baja densidad (LDS)	23
2.2.17. Descripción de los reactivos	23
2.2.18. Alternativas de reuso del agua tratada	25
2.2.19. Ventajas del reuso	25
2.3. Definición de términos	25
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA	27
3.1. Ubicación del área de estudio	27
3.2. Método de investigación	29
3.2.1. Tipo de investigación	29
3.2.2. Diseño de investigación	29
3.2.3. Nivel de investigación	29
3.3. Población y muestra	29
3.3.1. Población	29
3.3.2. Muestra	29
3.4. Caracterización del drenaje ácido de mina	28
3.5. Tratamiento del drenaje ácido de mina mediante la tecnología de lodos de baja densidad (LDS)	30
3.5.1. Determinación del volumen a tratar	30
3.5.2. Preparación de la solución de Hidróxido de Calcio	29

3.5.3. Neutralización del drenaje ácido de mina	29
3.5.4. Remoción de metales	31
3.5.5. Balance de masa	31
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS	35
4.1. Caracterización física – química del drenaje ácido de mina	35
4.2. Neutralización del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí	35
4.3. Remoción de hierro, cobre, plomo y zinc del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto	36
4.4. Eficiencia de remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina	38
CAPÍTULO V	
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
5.1. Caracterización física – química del drenaje ácido de mina	39
5.2. Neutralización del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí	39
5.3. Remoción de hierro, cobre, plomo y zinc del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto	40
5.4. Eficiencia de remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina	41
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
6.1. Conclusiones	43
6.2. Recomendaciones	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXOS	47
ANEXO 1: Mapa de ubicación del lugar de estudio	48
ANEXO 2: Resultados de los análisis de laboratorio	49
ANEXO 3: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas	52
ANEXO 4: Panel fotográfico	53
ANEXO 5: Esquema de la Planta Piloto LDS	54
ANEXO 6: Comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey para la eficiencia de remoción de metales	55

RELACIÓN DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla Nº 1: Ventajas y desventajas del tratamiento de DAM con la metodología de Lodos de Baja Densidad (LDS)	23
Tabla Nº 2: Características física químicas del hidróxido de calcio	23
Tabla Nº 3: Características físicas químicas del floculante AR-3775	24
Tabla Nº 4: Ubicación de componentes de la Planta Piloto	28
Tabla Nº 5: Parámetros hidrológicos y de diseño	35
Tabla Nº 6: Concentración de metales disueltos y totales, pH y turbiedad del drenaje ácido de mina	36
Tabla Nº 7: Concentración promedia de metales a la entrada, salida y removida por el sistema LDS	38
Tabla Nº 8: Eficiencia de remoción de metales pesados por el sistema LDS	40

RELACIÓN DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura Nº 01: Mecanismos de formación de drenajes ácidos de mina	7
Figura Nº 02: Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas	14
Figura Nº 03: Imagen satelital área de estudio	28
Figura Nº 04: Balance de masa del cobre	31
Figura Nº 05: Balance de masa del plomo	32
Figura Nº 06: Balance de masa del zinc	33
Figura Nº 07: Balance de masa del hierro	34
Figura Nº 08: Efecto de la concentración y volumen de Ca(OH)_2 en el pH de las muestras tratadas	37
Figura Nº 09: Concentración de metales antes y después de los tratamientos con Ca(OH)_2 . (A) Cobre, (B) Plomo (C) Zinc (D) Hierro	39
Figura Nº 10: Efecto de la concentración de Ca(OH)_2 sobre la eficiencia de remoción de cobre, plomo, zinc y hierro	40

ABREVIATURAS

G	Gramo
Hz	Hertz
L	Litros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mg/L	Miligramos por litro
Min	Minuto
pH	Potencial de hidrógeno
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad

SIGLAS

DAM	Drenaje Ácido de Mina
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
EPA	Environment Protection Agency - EEUU Agencia del Gobierno de los EE.UU para la Protección Ambiental
HDS	Highly Density Slow Lodos de Alta Densidad
LDS	Lowdy Density Slow Lodos de Baja Densidad
MEM	Ministerio de Energía y Minas

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las alternativas de tratamiento para aguas, como de drenaje ácido de mina están dirigidas a tecnologías más económicas y sostenibles en el tiempo, lo cual conlleva a una viabilidad para su implementación, sin dejar de mencionar los beneficios ambientales y económicos de estas tecnologías.

La restauración de los sitios mineros abandonados y el tratamiento de las aguas ácidas de mina, son las “prioridades ambientales nacionales” que permitirán disminuir y/o eliminar la elevada contaminación por cargas de metales pesados tóxicos de los cuerpos receptores acuáticos.

El presente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de determinar la eficiencia de neutralización y remoción de metales pesados a nivel planta piloto LDS de la Cía. Minera Huancapetí a través de la neutralización con lechada de cal, debido a los riesgos que implica el uso directo de estas aguas (con metales pesados), para la salud, para la agricultura, ganadería y para el ambiente.

El experimento se realizó con 3 dosis diferentes de lechada de cal, teniendo en cuenta que en la actualidad las aguas del efluente minero reciben un tratamiento activo.

El contenido de la tesis se divide en ocho capítulos. El primero está referido a la introducción, el segundo al marco teórico, el tercero a la metodología empleada, el cuarto a los recursos requeridos, el quinto a los resultados de la planta piloto, el sexto a la discusión de los resultados, donde se evalúa la eficiencia de neutralización y remoción de metales pesados, comparan los resultados con y sin tratamiento, el

séptimo contiene las conclusiones acorde a los objetivos, el octavo a las recomendaciones para quienes deseen desarrollar trabajos similares en el futuro.

1.1. Planteamiento del problema

La calidad del agua, en la provincia de Aija, conforme transcurre el tiempo, se viene alterando de manera negativa, debido a factores naturales y antropogénicos, estos últimos tienen especial importancia en la microcuenca de los ríos Santiago y Hércules, ya que la minería generalmente es generadora de drenaje ácido de mina con alto contenido de metales pesados, el agua que se utiliza para las actividades mineras, proviene de las diferentes cordilleras ubicadas en las partes altas de las Microcuencas, estas cordilleras están asentadas sobre rocas mineralizadas, las cuales están quedando expuestas debido a la exposición a fenómeno de disolución de metales pesados y al oxidarse vienen impactando muchos ecosistemas por los que discurren.

La Región Ancash no es ajena a este problema ya viene evidenciando la alteración de la calidad del agua, con la presencia de metales pesados tales como hierro, cadmio, aluminio, etc. (Loaiza, 2014).

1.2. Formulación del problema

El efluente del drenaje ácido de mina de la Cía. Minera Huancapetí es utilizado por la población de Aija y la Merced, que genera problemas en su agricultura y ganadería habiendo quejas en la producción de sus sembríos y crianza de animales, previo tratamiento vierte su efluente la Cía. Minera Huancapetí, debido a estos problemas identificados nos planteamos la siguiente interrogante:

¿Cuál es la eficiencia de Neutralización y Remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina empleando lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí?

1.3. Hipótesis

La eficiencia de neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina, empleando lodos de baja densidad a nivel planta piloto de Cía. Minera Huancapetí es alto.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de Cía. Minera Huancapetí

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la Neutralización del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí.
- Determinar la Remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí.
- Calcular la eficiencia de remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina.

1.5. Fundamentación

Los usuarios de las aguas del río Santiago, vienen siendo afectados por la contaminación provocada por el efluente de las operaciones de mina descargada directamente en el tributario del río Hércules. Desde hace varios años vienen afrontando problemas de disponibilidad de agua de calidad para el desarrollo de sus actividades como agricultura y ganadería. Esto debido a las características del agua de su principal fuente, el río Santiago, donde el tributario principal es el río Hércules donde la Cía. Minera Huancapetí vierte su efluente tratado.

En épocas de estiaje, el problema se vuelve más crítico, pues estos usuarios, al no disponer de otra fuente, se ven obligados a utilizar estas aguas, principalmente, en sus actividades agrícola-ganaderas, exponiéndose en efecto, a contraer enfermedades provocadas por los metales pesados disueltos.

Ante esta situación, se realizó la investigación para mejorar la calidad de las aguas del mencionado efluente minero a nivel piloto y mejorar su calidad hasta niveles aceptables para determinadas actividades, con lo cual contribuiremos a mejorar la calidad de vida de la mencionada comunidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La Mina, La Guitarra en el Estado de México, como parte de un trabajo de investigación para una tesis de maestría “diseño de una planta de tratamiento”, se emplearon técnicas como proceso de neutralización convencional el cual consiste en 5 etapas: homogenización, neutralización, aireación, sedimentación y disposición de lodos y la metodología de lodos de baja densidad (LDS), el mencionado diseño consistió remover los iones metálicos con una concentración de lechada de cal al 10% en peso (Rodríguez, 1997: 10).

En el programa de investigación planta de tratamiento Kumurana-LA LAVA en el estado de Bolivia. El método de tratamiento que se ajusta a las características del efluente de la mina Kumurana, es decir, elevada acidez ($\text{pH} < 3$) y contenidos de metales pesados (Fe, Zn, Cu, Pb y Cd) muy por encima de los límites permisibles, es el sistema convencional de tratamiento activo con cal, en la fuente; que comprende una primera etapa de neutralización de la acidez mediante adición de lechada de cal; continúa el proceso con la oxidación de los iones ferrosos a férricos mediante oxigenación por aireación natural en cascadas (procesos químicos); pasa a la fase de precipitación de los metales pesados en forma de compuestos estables en tanques de almacenamiento temporal (proceso físico), de donde son descargados en forma periódica a tanques de deshidratación y preparación de lodos semisecos para traslado hasta los sitios de disposición final. (Danilo Bocángel, Florian Erzinger, 2004: 9).

También en la Unidad Minera San Simón se realizó la neutralización de agua de mina por el método activo, a través de pozas de neutralización donde se

realiza la dosificación de cal en forma de lechada para conseguir la neutralización de las aguas y conseguir un pH en el rango de 6 a 9 y así mismo el de reducir la concentración de los metales como Hierro, Cobre y otros elementos metálicos.- Este sistema se realiza utilizando cilindros de mezcla, en donde se adiciona 30 Kg. de cal aproximadamente por cada ciclo de dosificación. Durante el día se tiene 3 ciclos de dosificación aproximadamente, ello también dependerá de la calidad de las aguas que lleguen a esta primera poza (Cica, 2012:12).

Este mecanismo de neutralización con metodología de lodos de baja densidad se diseñó para el proyecto Aurífero La Zanja, a nivel de ingeniería básica el estudio de ingeniería realizado comprende el tratamiento potencial de generación de drenajes ácidos provenientes del Tajo San Pedro Sur con un caudal de 2.0 L/s (7.20 m³/h) y del botadero de desmonte de mina con un caudal de 2.0 L/s (7.20 m³/h), haciendo un total de 4 L/s (14.4 m³/h). Estos drenajes contienen aproximadamente 250 ppm de Fe, 20 ppm de Cu y 0.02 ppm de As a un pH de 3.5.- El diseño contempla la colección de las aguas ácidas en 2 pozas, ubicadas una al pie del tajo San Pedro Sur y la otra al pie del botadero de desmontes, cada uno de estos puntos tienen su propia planta de tratamiento, además se ha considerado que los drenajes lleguen a un tanque reactor de neutralización, donde se alimenta cal en forma sólida, Luego del tanque de neutralización pasará al siguiente tanque reactor de oxidación donde se inyectará aire para favorecer la oxidación de los metales como es el caso del Fe⁺² a Fe⁺³ (Cica, 2012: 8).

Los métodos activos de tratamiento se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal viva, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoniaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados, esta metodología fue aplicada en la minera La Zanja, Cajamarca, para el tratamiento de DAM (drenaje ácido de mina). Las aguas ácidas provenientes de distintos puntos de la actividad confluyen en esta planta de tratamiento, que las neutraliza, para luego dar paso a distintas etapas fisicoquímicas de abatimiento de polimetales, lo que conlleva a la generación de lodos, y aguas de descarte acordes a los LMP, y posterior ECAs. (Cica, 2012: 7).

Las aguas del efluente minero de la Cía. Minera Huancapetí actualmente se tratan con metodología convencional de lodos de baja densidad (LDS), quienes monitorean el afluente y efluente respectivamente durante las 24 horas del día y

se demostró que las características del drenaje ácido de mina no son buenas, ni aptas para el riego, consumo de ganado y mucho menos para consumo de las personas y no cumple la norma sobre efluentes mineros de actividades minero metalúrgicos.

Estos resultados se corroboraron con los análisis realizados por el Laboratorio químico de la Cía. Minera Huancapetí, en el que se demostró la presencia en niveles altos de metales pesados, principalmente (plomo, cobre, hierro, zinc).

2.2. Base teórica

2.2.1. Drenaje ácido de mina

Son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación, contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles, que generalmente proceden de labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y escombreras de mina. Existen reportes de la muerte de miles de peces y crustáceos de ríos, afecciones ha ganado y destrucción de cultivos y riveras, así como la introducción de una coloración y turbiedad en aguas de ríos y lagos, también los drenajes ácidos de mina además de un bajo pH contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión con un alto contenido en sulfato y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni), del orden de varios cientos de miligramos por litro. Estos elementos en altas concentraciones son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cursos de aguas y pueden llegar a causar daños a las estructuras construidas por el hombre. Debido al elevado coste que representa el tratamiento en depuradoras convencionales, es necesario buscar una solución a este problema (Aduvire, 2006: 6).

2.2.2. Mecanismos de formación de drenajes ácidos

La formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias (Fig. 2).

La velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno. - Aunque la velocidad de reacción depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente aguas ácidas. Los sulfuros de otros metales (plomo, cinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro. En parte, debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y también porque forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación (Aduvire, 2008: 7).

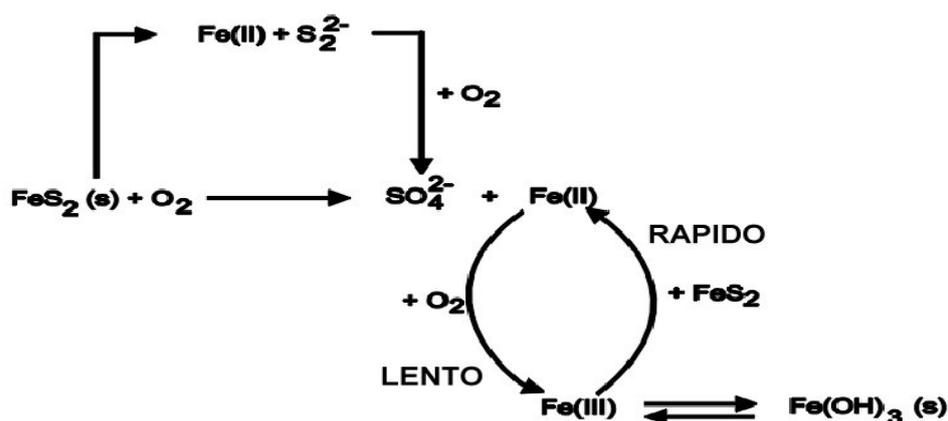


Figura N° 1: Mecanismos de formación de drenajes ácidos de mina

Fuente: Aduvire (2006)

2.2.3. Formación de drenajes ácidos

Aduvire (2006: 9-11), considera que el proceso de formación de aguas ácidas, en su conjunto, también se puede explicar en tres etapas.

1ª etapa. La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que bajo Condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa e indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias

(fundamentalmente *Thiobacillus ferrooxidans*) se producen a un ritmo semejante. Por lo general, la alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente.

2ª etapa. La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto.

3ª etapa. Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), el ion férrico se ve afectada por las reacciones de oxidación-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. En resumen, el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En este momento se producen grandes cantidades de ácido y se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

El mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se auto cataliza (si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%).

2.2.4. Características del drenaje ácido de mina

Adivire (2006: 45-54), considera que el drenaje ácido de mina se caracteriza por:

- Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación.

- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose.

- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado entre 10⁵ y 10⁶ veces respecto al mecanismo directo).

- Valores de pH por debajo
- Contienen gran cantidad de sólidos
- Alto contenido de metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni, etc.)
- Concentraciones elevadas de sulfatos

2.2.5. Problemática de los drenajes ácidos de Mina

La contaminación del agua de mina se debe en general a la introducción de sustancias o de ciertas formas de energía como el calor, que provocan cambios en sus características físicas y químicas. La acidificación de las aguas de mina crea numerosos problemas, ya que en contacto con el aire producen la oxidación química y biológica de los sulfuros, dando como resultado el incremento de la acidez en el medio, además los factores que influyen en la generación de las aguas ácidas a partir de los materiales rocosos que contienen sulfuros son los siguientes: el pH, la cantidad de oxígeno que entra en contacto con los materiales sulfurosos, la temperatura, el ritmo al que los productos de reacción son evacuados del lugar de reacción, la capacidad de neutralización de las rocas estériles en el lugar de reacción, la humedad y la disponibilidad de dióxido de carbono, así como de nutrientes y elementos traza esenciales para la existencia de microorganismos, también en general, las aguas ácidas tienen muy bajo pH, contienen una gran cantidad de sólidos disueltos, una elevada acidez total y un alto contenido en elementos traza y compuestos inorgánicos. Con frecuencia, las aguas ácidas están asociadas a la existencia de labores mineras, sin embargo, dicho fenómeno no está restringido a las actividades extractivas, pues puede ocurrir siempre que se expongan materiales y rocas con cierto contenido de sulfuros a la acción del aire y al agua, como en el caso de grandes excavaciones de las obras públicas en terrenos sulfurosos (Aduvire, 2006: 5-7).

2.2.6. Metales pesados

Son considerados metales pesados aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm³ cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%. No obstante, en primer lugar, conviene clarificar que el término metales pesados es impreciso (Navarro, 2007: 13).

También Romegialli (2005: 25) define como metales pesados a aquellos metales cuyas densidades son 5 veces mayores que la del agua o más, tales como cadmio, plomo y mercurio. - Dentro de las muchas propiedades que presentan los metales, una de las más importantes es que nunca se degradan. A diferencia de muchos contaminantes orgánicos que se degradan con la exposición a la luz solar o al calor, los metales persisten y nunca desaparecen.

Los metales tienen muchas propiedades importantes para la salud humana. Algunos metales son esenciales para la buena salud, y la deficiencia de ellos puede conducir a enfermedades. La falta de hierro, por ejemplo, causa anemia. Al mismo tiempo, metales que en cantidades pequeñas son suficientes para una buena salud, pueden llegar a ser tóxicos si se ingieren en grandes dosis. El molibdeno es requerido por ciertas enzimas para su funcionamiento en forma apropiada, pero el exceso puede conducir a la enfermedad de la gota (Romegialli, 2005: 27).

2.2.7. Plomo

El agua y los alimentos, constituyen la fuente principal de ingestión de plomo en las personas que no estén expuestas a algún trabajo, y del total ingerido, sólo se absorbe, desde el tubo digestivo, una pequeña fracción de entre 5 a 10%, si están expuestos a períodos largos de tiempo, y cerca del 90% del plomo absorbido se acumula en el sistema óseo, mientras que en la sangre, apenas llega a un poco más del 1% , y para estimar la cantidad de plomo en la ingestión, se determina la cantidad de plomo en las heces, ya que cerca del 90% de este metal se expulsa por esta vía (O.M.S., 1976: 56).

El envenenamiento en niños con plomo, una ocurrencia demasiado común, puede conducir a convulsiones, daño cerebral, o muerte. Ocasionalmente, los metales pueden introducirse en alimentos mediante la disolución de recipientes metálicos por alimentos ácidos, además los síntomas son típicos de intoxicación alimentaria, y presentan vómitos y diarrea, comúnmente varias horas luego de ingerir la comida. Estos síntomas se dan cuando la exposición al metal es frecuente y la concentración del mismo es alta, en este caso estamos frente a un envenenamiento agudo, también la ingesta excesiva de plomo puede traer diversas consecuencias dependiendo de la concentración absorbida y del tipo de metabolismo del afectado, entre ellas tenemos problemas de aprendizaje, reducción del coeficiente intelectual, hiperactividad en los niños, alta presión en los adultos, recién nacidos prematuros y de bajo peso (Romegialli, 2005: 15-18).

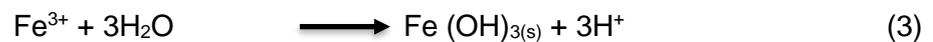
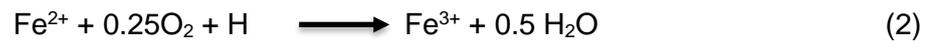
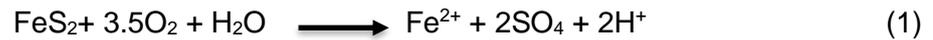
Los efectos del plomo son los mismos si se ingiere o inhala, puede llegar a afectar a casi todos los órganos y sistemas en el cuerpo dependiendo de su nivel de concentración en el organismo, y el más sensible es el sistema nervioso, sobre todo en niños, además la exposición prolongada en adultos puede producir debilidad en los dedos, las muñecas o los tobillos, ya que afecta al sistema óseo. La exposición al plomo también produce un pequeño aumento de la presión sanguínea, especialmente en personas de mediana edad y de edad avanzada, y puede causar anemia; también puede dañar seriamente el cerebro y los riñones hasta causar la muerte. En mujeres embarazadas, la exposición a niveles altos de plomo puede producir pérdida del embarazo. En hombres, la exposición a altos niveles puede alterar la producción de espermatozoides (Ospina, 2012: 19).

2.2.8. Hierro

Es un elemento abundante en la corteza terrestre, esencial para los organismos vivos. La importancia de este metal catiónico radica en las funciones que ejecuta como cofactor de varias enzimas importantes, componente activo de intermediarios de cadenas de transporte de electrones y componente esencial de proteínas con función de transporte. – además el hierro se encuentra en dos estados de oxidación en la naturaleza: el ión férrico (Fe^{+3} , la forma oxidada) y el ión ferroso (Fe^{+2} , la

forma reducida), bajo condiciones oxidantes y alcalinas se favorece la oxidación del ión ferroso al ión férrico, ocasionando la precipitación del hierro, ya que los compuestos férricos son insolubles en agua (Campo, 2002: 35).

Campo (2002: 36), considera las principales reacciones en la formación del DAM son:



El hierro no tiene consecuencias adversas para la salud en concentraciones bajas, pero cuando las concentraciones alcanzan niveles de 300-600 mg por cada kilogramo de peso corporal, estamos frente a una intoxicación aguda, y esto puede causar depresión, respiración agitada, convulsiones, fallas respiratorias, problemas cardíacos y coma (Marín, 1996: 46).

2.2.9. Cobre

El cobre es un metal rojo claro, blando maleable y dúctil. Funde a 1038°C. Debido a su potencial de electrodo estándar positiva es insoluble en ácido clorhídrico y en ácido sulfúrico diluido, aunque en presencia de oxígeno puede tener lugar alguna disolución además se encuentra en la naturaleza, tanto como elemento nativo, o bien integrado numerosos compuestos como óxidos o Hidróxidos, sulfato de hierro y cobre o carbonato cúprico. El cobre es un elemento esencial para el hombre estando involucrado en la formación de hemoglobina, junto al cobalto, y en la de los eritrocitos que a su vez intervienen en el desarrollo de los sistemas óseo y nervioso central (Vogel, 2007: 14).

2.2.10. Zinc

El zinc es un metal blanco azulado, el metal puro se disuelve muy lentamente en ácidos y álcalis, la presencia de impurezas o el contacto con platino o cobre, producidos por el agregado de unas gotas de las

soluciones de estos metales, acelera la reacción. Esto explica la solubilidad del zinc comercial (Vogel, 2007: 30).

El zinc existe principalmente en forma de iones metálicos libres. En consecuencia, la biodisponibilidad de este metal pesado en aguas estancadas naturales es mucho más alta que en el caso de plomo o cadmio y también su tendencia de bioacumulación es más alta. Para mamíferos, la presencia de zinc impacta la absorción de calcio y cobre y en consecuencia afecta el crecimiento de los huesos. A parte de eso, zinc puede tener efectos hemolíticos (Bocángel & Erzinger, 2004: 12).

2.2.11. Efectos en la salud

Para comprender de qué manera los contaminantes (metales disueltos) presentes en las aguas ácidas pueden generar afecciones a nuestro organismo, necesitamos saber un poco más en qué estado entran en él, tiempo de exposición, concentración, y cómo salen del mismo, además las sustancias tóxicas no afectan en igual magnitud a todos los órganos con los que tienen contacto. Cada órgano es susceptible de ser dañado por ciertos químicos de acuerdo a las características de los mismos y el tiempo de exposición (O.M.S., 1976: 46).

La concentración de contaminantes en el cuerpo del hombre se expresa frecuentemente en unidades de peso por peso, pero no se toma como referencia el cuerpo entero, más bien, las concentraciones en el cuerpo a menudo se depositan en los huesos, en la grasa o en alguna otra parte del cuerpo en la que el contaminante tiende a albergarse. Una importante excepción son las concentraciones en la sangre, y su concentración se da en unidades de peso del contaminante por volumen de sangre también los metales ejercen sus efectos de muchas maneras, pero comúnmente dentro de las células del cuerpo. Algunos desorganizan reacciones químicas, otros bloquean la absorción de alimentos esenciales, mientras que otros cambian las formas de compuestos químicos vitales, dejándolos inútiles. Algunos metales comprometen a alimentos en el estómago, impidiendo su absorción en el cuerpo. El resultado de estas acciones depende del órgano específico del cuerpo y del metal involucrado (Romegialli, 2005: 22-25).

2.2.12. Tratamiento tipo de aguas ácidas en una planta convencional de LDS

El proceso de tratamiento convencional Lodos de Baja densidad (LDS) más común utilizado en el tratamiento de aguas ácidas es el que emplea cal, en cuya etapa inicial se produce la neutralización de la acidez y finaliza con la oxidación del hierro ferroso para formar hidróxido férrico que es insoluble y precipita, además el proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5; con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso. Estas cubas disponen de unos agitadores que garantizan una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo, también en un depósito más pequeño se recogen las aguas de recirculación de los fangos del decantador y las aguas sucias procedentes del lavado de los filtros. Seguidamente el agua pasa por gravedad a los tanques de aireación, donde el oxígeno atmosférico se incorpora al agua mediante unas turbinas de agitación y se consigue la oxidación del hierro ferroso y el manganeso (Aduvire, 2006: 86-87).

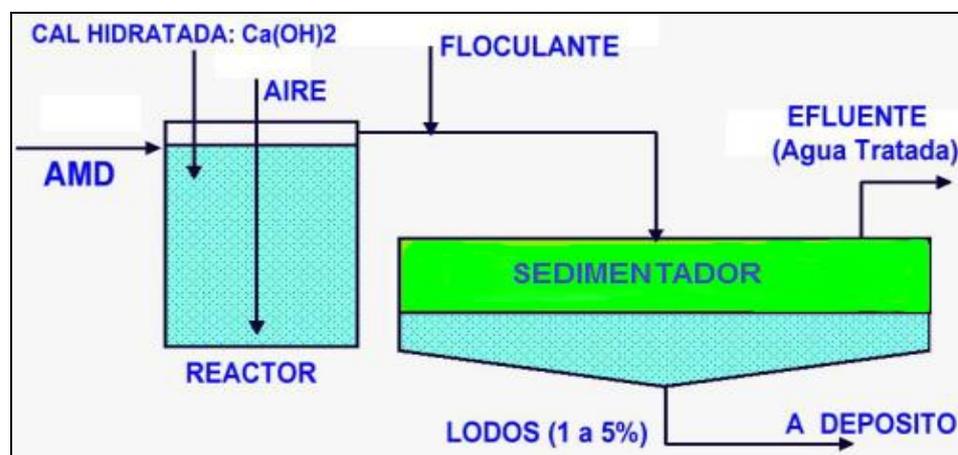


Figura Nº 2: Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas

Fuente: Aduvire (2006)

En el canal de rebose de los tanques de aireación se añade policloruro de aluminio, que es un floculante primario. El agua entra a continuación en los decantadores-floculadores o clarificadores, transportando ya los pequeños flóculos de los precipitados coloidales y materiales en suspensión. Para producir el encadenamiento de dichos

flóculos y posterior decantación se dosifica sobre una campana de reacción un polielectrolito aniónico, que es un compuesto polímero. El lecho de fangos que se forma en el fondo del decantador se barre hacia el centro mediante un rastrillo giratorio y su purga se efectúa desde la arqueta central inferior, además el agua clarificada que sale del decantador pasa a unas centrifugadoras o a unos filtros de arena distribuyéndose por medio de unos canales longitudinales. El material del lecho de filtrado suele ser arena silíceas, que es soportada por un falso fondo constituido por losas prefabricadas de hormigón armado, que disponen de unas boquillas que sirven para coleccionar de forma uniforme el agua filtrada y distribuir el agua y el aire de lavado necesario para la limpieza del filtro, que son apartados por un canal longitudinal situado en la parte inferior. La selección del tamaño del clarificador o sedimentador se puede realizar en función al caudal de tratamiento y la densidad de los lodos producidos, también de la batería de filtros y antes de su vertido a los cauces públicos, el agua pasa a un depósito de ajuste de pH, por lo general las plantas disponen de sistemas automáticos de control de pH, por lo que a la salida de los citados filtros se adiciona una pequeña cantidad de ácido sulfúrico si se necesita bajar la alcalinidad, consiguiéndose la mezcla y homogeneización mediante un agitador rápido del tipo turbina con paletas. En otros casos se emplea dióxido de carbono (procedente de la combustión sumergida de propano en un pequeño tanque de reacción) como alternativa más económica, si existe una limitación en la cantidad de sulfatos en el agua de salida del proceso. También suele existir al final del proceso otro pH-metro que realiza el ajuste fino y que va provisto de alarma que en caso de anomalía cierra la entrada de agua a la planta depuradora. - En cuanto a los fangos producidos, se envían directamente a unas balsas de almacenamiento donde una vez secados se extraen y se vierten en las escombreras mezclados con los estériles rocosos de mina, en algunos casos también se aprovecha parte de estos fangos en los trabajos de revegetación, además estas plantas depuradoras exigen bastante servidumbre durante la operación, así como el empleo de productos químicos. De igual forma requieren un mantenimiento continuo de los equipos y estructuras. Todo ello conduce a unos costes de tratamiento considerables, que pueden oscilar entre los 0,15 y los 0,5 euros/m³ dependiendo de la dosificación de cal necesaria. - En cuanto a las inversiones específicas de

este tipo de instalaciones convencionales de aguas ácidas pueden oscilar entre 4.200 a 7.800 euros/m³/hora de capacidad de tratamiento de la planta (Aduvire, 2006: 88).

2.2.13. Fases del tratamiento químico de drenajes ácidos de mina

Se utiliza cal hidratada Ca(OH)₂ que es particularmente útil para tratar grandes caudales en condiciones de alta acidez. Como la cal hidratada es hidrófoba, para conseguir una buena mezcla con el agua, se precisa de un dispositivo de agitación. Cuando se pretende eliminar el hierro, en el propio proceso de agitación se incorpora la aireación necesaria para lograr la oxidación del hierro ferroso hasta transformarse en hierro férrico y conseguir la mayor eliminación de éste, además los lodos que se obtienen presentan una gran cantidad de sulfato cálcico, que desde los decantadores pueden bombearse a una balsa de almacenamiento o en algunos casos, escurrir el agua en filtros prensa para una manipulación más cómoda de los sólidos. Esta técnica tiene una limitación cuando se requiere alcanzar un pH muy alto para precipitar metales como el manganeso. - La alteración más significativa sobre las aguas que produce la actividad minera es la polución con partículas en suspensión y la acidificación de las mismas, esto incide directamente sobre la calidad de las aguas y el aprovechamiento del suelo. Por lo que, se requiere un control de los parámetros físico-químicos y un adecuado tratamiento de los efluentes, que por lo general se realiza en dos fases (Aduvire, 2006: 84-85).

a) Eliminación de sólidos en suspensión por sedimentación

Los sólidos en suspensión constituyen una de las fuentes más frecuentes de contaminación física de las aguas. Esta se produce por la fuerza erosiva del agua que provoca en su circulación superficial el arrastre de partículas sólidas. El tratamiento más común consiste en retener las aguas en unas balsas o repasadores durante un tiempo suficiente para que se produzca la decantación de los sólidos. Si el agua clarificada no está contaminada químicamente y cumple los estándares de calidad requeridos, esta agua puede verterse directamente a un cause público o reutilizarse en las operaciones de la

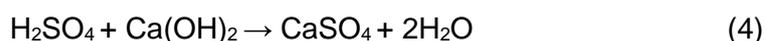
explotación minera, caso contrario, debe procederse a su tratamiento en una instalación mediante un proceso químico (Aduvire, 2006: 84).

b) Neutralización química de drenajes ácidos

El proceso de neutralización de las aguas ácidas mediante la adición de sustancias alcalinas es el que actualmente se lleva a cabo en la mayoría de las minas que generan efluentes de este tipo. El tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y precipitación. Las reacciones principales que tienen lugar según el tipo de agente alcalino que se utilice son:

Neutralización del ácido con una base.

Con cal:



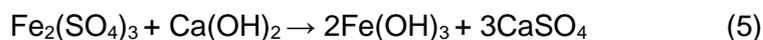
Oxidación del hierro ferroso a férrico.

Se lleva a cabo tomando oxígeno de la atmósfera mediante la agitación de las aguas en unos tanques. Con esto se consigue modificar el estado del hierro haciéndolo insoluble.

Precipitación de los hidróxidos de hierro.

Los hidróxidos se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos.

Con cal:



La separación de los sólidos insolubles se realiza en decantadores circulares o rectangulares, ayudada por la acción de floculantes. La filtración en las diversas variantes puede emplearse como sistema complementario, además los agentes alcalinos a emplear son muchos: cal rápida, cal hidratada, roca caliza, caliza en polvo, magnesita, dolomía, sosa cáustica, cenizas de sosa e hidróxido de amonio. Pero, en la práctica los más usados son: la cal, la cal hidratada y la caliza. La concentración de metales pesados en el

efluente puede reducirse por precipitación como hidróxidos a distintos valores de pH, por ejemplo, el pH mínimo para el Pb^{+2} es 6,3; para el Fe^{+2} es 9,5 y para el Mn^{+2} es 10,6. Hay que tomar precauciones cuando están presentes metales anfóteros como el cinc y el aluminio que se disuelven en la solución si ésta es demasiada alcalina (Aduvire, 2006: 85-86).

2.2.14. Química del proceso

a) Neutralización

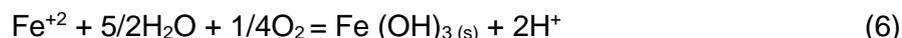
Esto quiere decir que tenemos que rebajar las concentraciones de los iones H^+ y OH^- , hasta valores próximos a los que contiene el agua. En la práctica industrial, la situación no es tan estricta y se considera que el líquido está neutralizado cuando el valor de pH es de 7 a 9. A este intervalo de pH lo denominaremos convencionalmente en el tratamiento de aguas industriales, “zona de neutralización” (Roberto Rodríguez, 2006: 13).

La neutralización se produce mezclar efluentes ácidos y alcalinos en un reactor y disponer de alguna capacidad de retención de cargas fuertes en ácido o álcali. Si la actividad industrial del caso genera desechos tanto ácidos como alcalinos, se deben utilizar tanto la acidez como la alcalinidad excedente para producir un efluente neutro (Leandro Herrera, 1998: 9).

b) Oxidación química

Los procesos de oxidación química se utilizan preferentemente cuando los líquidos contienen compuestos no biodegradables o difíciles de degradar, en especial especies inorgánicas. Entre los tipos de compuestos más tratados podemos citar: sulfitos y sulfuros, complejos de los metales pesados, también durante el proceso de oxidación es importante controlar los siguientes parámetros: pH, potencial redox, concentración de $O_2(g)$, y el exceso de oxidante en el efluente. La realización de estos procesos a escala industrial necesita algunas consideraciones, que dependen de las características y objetivos del tratamiento. Así, en el diseño de algunos procesos, se han considerado la siguiente reacción química: Es posible utilizar

oxígeno gas disuelto en aire para oxidar el Hierro Fe^{+2} a Fe^{+3} , según la siguiente reacción:



Este proceso requiere de una instalación específicamente dimensionada. (Cortina, 2006: 33).

c) pH

El pH toma generalmente valores entre 0 y 14, denominándose neutro al pH 7 y ácido y básico a los valores de pH inferiores y superiores a 7, respectivamente. En la mayor parte de las aguas naturales, el pH está controlado por la precipitación y disolución de especies carbonatadas, aunque en muchas de las aguas mineras depende directamente de la disolución de sulfuros metálicos y de la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos, además en relación con el concepto de pH, otros parámetros importantes son la acidez y la alcalinidad de las aguas. Se denomina acidez a la capacidad de un agua para neutralizar alcalinidad y viceversa. La alcalinidad también puede ser expresada como la capacidad de una solución para mantener fijo el pH frente a la adición de protones a la solución. - Una solución ligeramente ácida puede tener algo de alcalinidad por lo que, en el ámbito del tratamiento de aguas contaminadas es frecuente hablar de Capacidad de Neutralización de Acidez, que puede ser expresada como la cantidad de ácido que es necesario añadir a una solución para que su pH comience a variar. De acuerdo con esta definición, una solución con capacidad de neutralización de acidez nula es netamente ácida mientras que, si la capacidad de neutralización es superior a 0, la solución posee alcalinidad, independientemente de su pH (Aduvire, 2006: 59-60).

En la mayoría de los casos, uno de los objetivos prioritarios durante tratamiento de las aguas contaminadas es el de proporcionar alcalinidad a las aguas tratadas, ya que la mayor parte de los contaminantes, especialmente los metales como Fe, necesitan pH al menos cercanos a la neutralidad para precipitar y ser retirados de las aguas contaminadas (Rodriguez, 2000: 34).

d) Precipitación de metales pesados

La adición de cal al agua libera iones hidroxilo en la solución elevando el pH de esta en consecuencia precipitan los metales disueltos, un proceso de LDS opera en niveles de 8.8 a 9 a fin de lograr la total remoción de metales (Aduvire, 2006: 1).

e) Remoción

Muestra de agua + cal + floculante en pH= 8.8-9.0

La remoción de metales pesados se realiza por precipitación de formas insolubles del metal en solución en el caudal a tratar. Por lo tanto, requiere de procesos de sedimentación; por precipitación se entiende la desolubilización de una molécula o átomo ionizado que estaba previamente disuelto, seguido de su caída hacia el fondo de un recipiente. La ruta más usual para desolubilizar metales es la formación de hidróxidos metálicos mediante la alcalinización de la solución. La reacción consiste en llevar el efluente con metales disueltos al pH de mínima solubilidad del metal en cuestión (Leandro Herrera, 1998: 18).

f) Floculación

Las partículas de tamaño muy fino sedimentan con mucha lentitud, para aumentar la velocidad de sedimentación, es decir mejorar la separación sólido-líquido se utiliza la floculación.- Todas las partículas ejercen fuerzas de atracción mutuas, las cuales solamente son efectivas en una escala muy pequeña lo anterior generalmente es anulado debido a la presencia de una atmósfera cargada eléctricamente alrededor de cada partícula, que genera fuerzas de repulsión entre cada una de las partículas que se aproximan, por lo tanto en cualquier sistema en particular, existe un balance entre las fuerzas de atracción y las de repulsión eléctrica presentes en la interfase sólido-líquido (Minas, 2000: 56).

Los procedimientos de floculación facilitan la sedimentación. Las partículas gruesas sedimentan directamente, pero en el caso de las partículas coloidales, por su naturaleza, ellas están dispersas en un

estado estable. La floculación es un procedimiento para juntar esas partículas coloidales en flóculos, por la acción de floculantes que se adsorben en la superficie de dichas partículas y las unen. Debido a la agregación de partículas coloidales formando flóculos, se aumenta el tamaño efectivo de las partículas y en consecuencia su peso para acelerar la velocidad de sedimentación (metalurgia, 2001: 23).

g) Sedimentación

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada, además luego el tanque de neutralización y oxidación rebosa en un clarificador convencional. Después se añade un floculante de polímero diluido al rebose del tanque de neutralización oxidación a fin de promover la remoción de sólidos en el clarificador. El agua clara y tratada es extraído en frascos de muestreo para su respectivo análisis de metales pasados. (Valencia, 2000: 20).

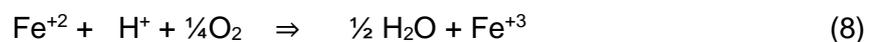
h) Precipitación de metales

Valencia, (2000: 46), considera la adición de cal en el agua libera iones de hidróxido en la solución, elevando el pH del agua ácida:



En consecuencia, se precipitan algunos metales disueltos, como por ejemplo el hierro:

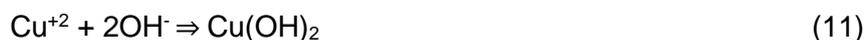
El ion ferroso Fe^{+2} debe oxidarse para formar Fe^{+3} de tal manera que pueda precipitarse, siguiendo la secuencia de la ecuación (2) y se generara:



El ion ferroso es estable en condiciones de pH bajo, mientras que el ion férrico es precipitado en condiciones básicas.



El zinc, el cobre y plomo que se encuentra en la alimentación también se precipitaran, con reacciones similares:



2.2.15. Consideraciones para neutralización y remoción de metales pesados

A pesar de la gran cantidad de sistemas de tratamiento activo para el tratamiento del DAM, existe un diseño claramente indicado que sirva de modelo, ya que la neutralización y remoción de drenajes ácidos de mina, requiere comprender la química del agua cruda, la técnica que se aplicará, las condiciones climáticas de la zona, la topografía, geología y la experiencia en la aplicación de esta tecnología.- Por lo tanto, se ha elegido un procedimiento convencional de tratamiento de aguas ácidas de mina, con la tecnología de lodos de baja densidad en el cual es posible la optimización el uso de energía eléctrica y equipos que requieren un mantenimiento costoso (Bocángel & Erzinger, 2004: 15).

Bocángel & Erzinger, (2004: 56), Manifiesta que se tiene que tener en cuenta las consideraciones básicas que se presenta:

a) Conocer las características del agua:

Se requiere la información completa de los parámetros físicos y químicos que están presentes en el agua que se va tratar, e identificar cuáles sobrepasa los LMPs, para determinar el tipo de tecnología que se va emplear para mejorar su calidad.

b) Determinar el caudal neutralizar:

Es uno de los datos que se considera, porque depende del diseño y la capacidad de la planta piloto o escala industrial.

2.2.16. Ventajas y desventajas de neutralización de drenaje ácido de mina por metodología de lodos de baja densidad (LDS)

Para conocer las ventajas y las desventajas que tiene la aplicación de humedales artificiales en el tratamiento de aguas, se presenta a continuación un cuadro comparativo (Aduvire, 2006: 83).

Tabla N° 1: Ventajas y desventajas del tratamiento de DAM con la metodología de Lodos de Baja Densidad (LDS)

Agente de precipitación	Ventajas	Desventajas
Ca(OH) ₂	Bajo costo	Impurezas proceso lento, precipita CaSO ₄ , CaCO ₃
	Precipitación de sólidos	Generación de lodos
	Inmovilización de metales pesados	Hidróxidos de metales pesados en el lodo

Fuente: Extraído de Aduvire (2006).

2.2.17. Descripción de los reactivos

a) Hidróxido de calcio

El Hidróxido de calcio se forma mezclando cal viva más agua suficiente para lograr una hidratación adecuada, obteniendo un polvo muy fino hidratado y seco. Sus características se presentan en la Tabla N°2.

Tabla N° 2: Características físicas químicas del hidróxido de calcio

Características	Unidad	Valores/composición
Formula química		Ca(OH) ₂
Peso Molecular	g/mol	74.096
Punto Descompresión	°C	580
Índice de Refracción		1.574 y 1.545
Calor de Solución	Kcal	+2.79
Formación Cristalina		Hexagonal
Solubilidad a 0°C	g/l	1.85
Solubilidad a 100°C	g/l	0.71
Peso específico		2.2
Densidad en Granza	g/l	400-560
Calor específico a 10°F	BTU/lb	0.29
Calor de Hidratación	Cal/mol	15.3
Porcentaje de CaO puro	%	60

Fuente: Aduvire (2006)

b) Floculante AR- 3775

Son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas larga.

Tabla N° 3: Características físico químicas del floculante AR-3775

Características	Unidad	Valores/composición
Componente		Polímero aniónico
Presión de vapor		ND
Polimerización		No sucede
Temperatura ebullición	°C	120
Toxicidad oral LD50	mg/kg	7500
Solubilidad en agua		completo
Porcentaje de pureza	%	100

Fuente: Hoja MSDS Laboratorio Arenas S.A.C.

2.2.18. Alternativas de reúso del agua tratada

Dependiendo de las características del efluente, el agua tratada se puede emplear para actividades agrícolas y pecuarias. Generalmente estos sistemas de tratamiento son empleados para recuperar la calidad de aguas residuales municipales, las cuales contienen altos porcentajes de carga orgánica, coliformes y fosfatos, pero poca concentración de metales pesados, en comparación con las aguas provenientes de drenajes ácidos.- por tal motivo se requiere hacer un seguimiento más estricto para utilizar las aguas de drenaje ácido tratadas, por los riesgos que representa la concentración de metales aún después del tratamiento (Moscoso, 2002: 17).

2.2.19. Ventajas del reúso

Más allá de los beneficios ambientales, se tienen ventajas adicionales para quienes reúsan las aguas tratadas, entre ellas tenemos las siguientes.

- Incremento de la productividad agrícola, debido a la disminución de elementos contaminantes en el agua tratada que se usa para el riego.
- Se evita que se contamine fuentes superficiales y ecosistemas por donde discurre, ya que se cuenta con suministro constante de aguas tratadas.
- Se reduce el uso de fertilizantes.
- Se recupera el paisaje.

2.3. Definición de términos

a) Límite máximo permisible (LMP): Instrumento de gestión ambiental que regula la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (MINAM, 2010: 40).

b) Neutralización: La neutralización es el fenómeno que se presenta al reaccionar un ácido con una base en solución acuosa. Los iones hidrónio del ácido y los iones oxidrilo de la base, se combinan para formar agua y una sal (Campo, 2002: 12).

- c) Partículas en suspensión (Sólidos totales):** Es el contenido total de la materia sólida en el agua, comprendiendo tanto materia orgánica como inorgánica, estos sólidos pueden encontrarse como: Sólidos Disueltos, Sólidos en Suspensión, Sólidos Sedimentables y Sólidos no Sedimentables (Minas, 2000: 16).
- d) Precipitado:** Es el sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química. A este proceso le llamamos precipitación y puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto, esto es, que no acepta más soluto y que al no poder ser disuelto, dicho soluto forma el precipitado (Minas, 2000: 16).
- e) Sedimentación:** Proceso de depósito y asentamiento por gravedad de la materia en suspensión en el agua (Minas, 2000: 18).
- f) Sólidos totales en suspensión:** Materiales de tamaño microscópico presentes en el agua, y pueden eliminarse por decantación o filtración (Minas, 2000: 24).
- g) Sólidos sedimentables:** Fracción del total de sólidos en el agua que se separan de la misma por acción de la gravedad, durante un periodo determinado (Minas, 2000: 30).
- h) Solubilidad:** Cantidad máxima de sustancia que se disuelve en una determinada cantidad de disolvente (Minas, 2000: 45).
- i) Turbiedad:** Claridad relativa del agua que depende, en parte, de los materiales en suspensión en el agua (Minas, 2000: 60).
- j) Viscosidad:** Es la resistencia al cambio de forma del agua, en el agua la viscosidad disminuye regularmente con la temperatura, la viscosidad cambia más rápidamente que la densidad y por eso afecta notablemente todos los procesos de tratamiento del agua (Minas, 2000: 61).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del área de estudio

La Cía. Minera Huancapetí desarrolla actividades mineras en el distrito de La Merced, provincia de Aija, departamento de Ancash. Sus actividades implican la extracción de minerales (plata, cobre, zinc y plomo) y el procesamiento de los mismos. La extracción de minerales la realiza desde tres bocaminas denominadas Caridad, Coturcán y Hércules. De éstas se generan drenajes ácidos que son conducidas y tratadas en una planta de tratamiento mediante la tecnología de lodos de baja densidad antes de ser vertidas al río Hércules. En la Figura N° 01 se visualiza la ubicación de las operaciones de Minera Huancapetí, las bocaminas y de la Planta Piloto de tratamiento de drenajes ácidos en relación a la ciudad de Aija.

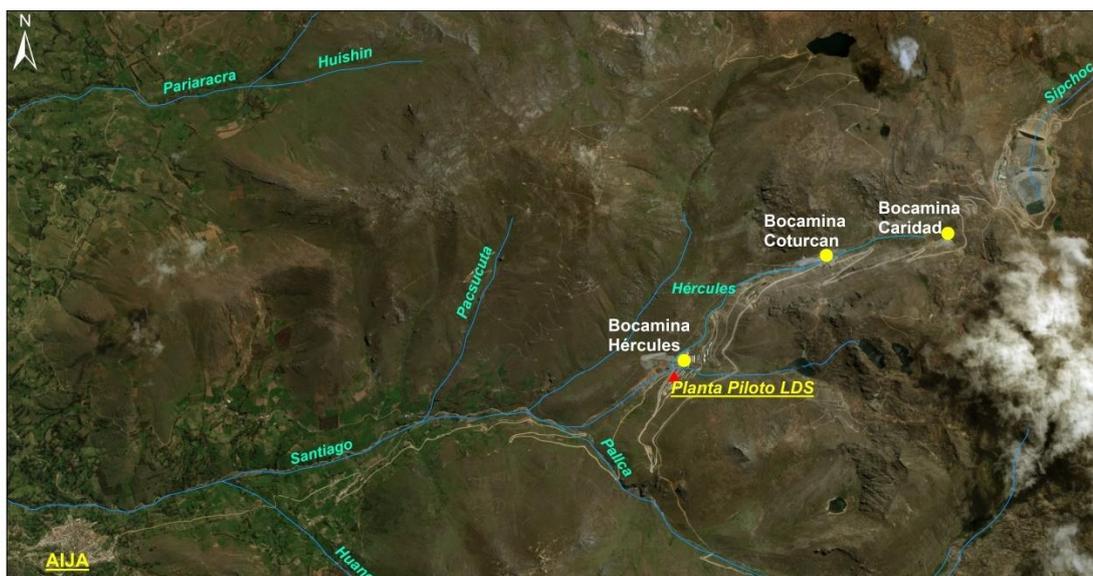


Figura N° 03: Imagen satelital área de estudio

Fuente: Imagery (23/04/2015)

La Tabla N° 4 presenta las coordenadas de ubicación del lugar donde se tomó la muestra de drenaje ácido de mina y de la Planta Piloto.

Tabla N° 4: Ubicación de componentes de la Planta Piloto

Componente	Coordenadas UTM WGS84 Z18S		
	Este	Norte	Altitud (msnm)
Canal ingreso (a 10 metros de la Planta Piloto)	219550	8919682	4060
Planta Piloto	219575	8919675	4057

3.2. Método de investigación

3.2.1. Tipo de investigación

Aplicativo

3.2.2. Diseño de investigación

No experimental

3.2.3. Nivel de investigación

Preexperimental

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

60 l/s de drenaje ácido de mina.

3.3.2. Muestra

30 litros de drenaje ácido de mina empleados en el estudio.

3.4. Caracterización del drenaje ácido de mina

Los drenajes ácidos generados en las bocaminas son recolectados en un mismo canal para ser conducidas hacia la planta de tratamiento. De manera adicional a la planta de tratamiento ya existente, Minera Huancapetí ha implementado una nueva Planta Piloto a fin de optimizar el tratamiento de

drenajes mediante lodos de baja densidad. En la presente investigación se trataron 30 litros de drenaje ácido de mina en la Planta Piloto. Para ello se caracterizó el drenaje ácido de mina antes de su ingreso a la Planta Piloto, así como después su tratamiento.

A fin de caracterizar el drenaje ácido antes de su ingreso a la Planta Piloto, se analizaron los parámetros de pH, turbiedad y concentración de metales (cobre, zinc, hierro y plomo). Dichos análisis se efectuaron en el Laboratorio Químico de Cía. Minera Huancapetí. Los resultados del análisis de laboratorio se presentan en los anexos.

3.5. Tratamiento del drenaje ácido de mina mediante la tecnología de lodos de baja densidad (LDS)

3.5.1. Determinación del volumen a tratar

Dado que la capacidad de la Plata Piloto es de 10 litros, la muestra de 30 litros de drenaje ácido de mina fue homogenizada y dividida en volúmenes de 10 litros para los respectivos tratamientos con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a concentraciones de 2.5%, 5% y 10%.

3.5.2. Preparación de la solución de Hidróxido de Calcio

Se prepararon soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en volúmenes 10 L en concentraciones de 2.5, 5 y 10% (p/v) en agitación constante a 40 RPM por 20 minutos.

3.5.3. Neutralización del drenaje ácido de mina

A los 10 litros de drenaje ácido de mina se fueron añadiendo volúmenes de la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con medición constante del pH hasta obtener valores en el rango de 8.8 a 9. Al mismo tiempo a este proceso se incorporó oxígeno mediante burbujeo a fin de promover la oxidación del hierro. Se aplicaron tres concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 2.5%, 5% y 10%.

3.5.4. Remoción de metales

Tras la neutralización, la solución fue derivada a un tanque de sedimentación, al mismo tiempo fue mezclada con el floculante AR-7537 con una concentración de 0.03% (v/v) a fin de acelerar la sedimentación de

los hidróxidos metálicos formados. El tiempo de sedimentación fue de 15 minutos. Finalmente, de la fase líquida se extrajeron muestras del agua tratada para su análisis físico-químico en laboratorio. Los análisis se realizaron por triplicado.

3.5.5. Balance de masa

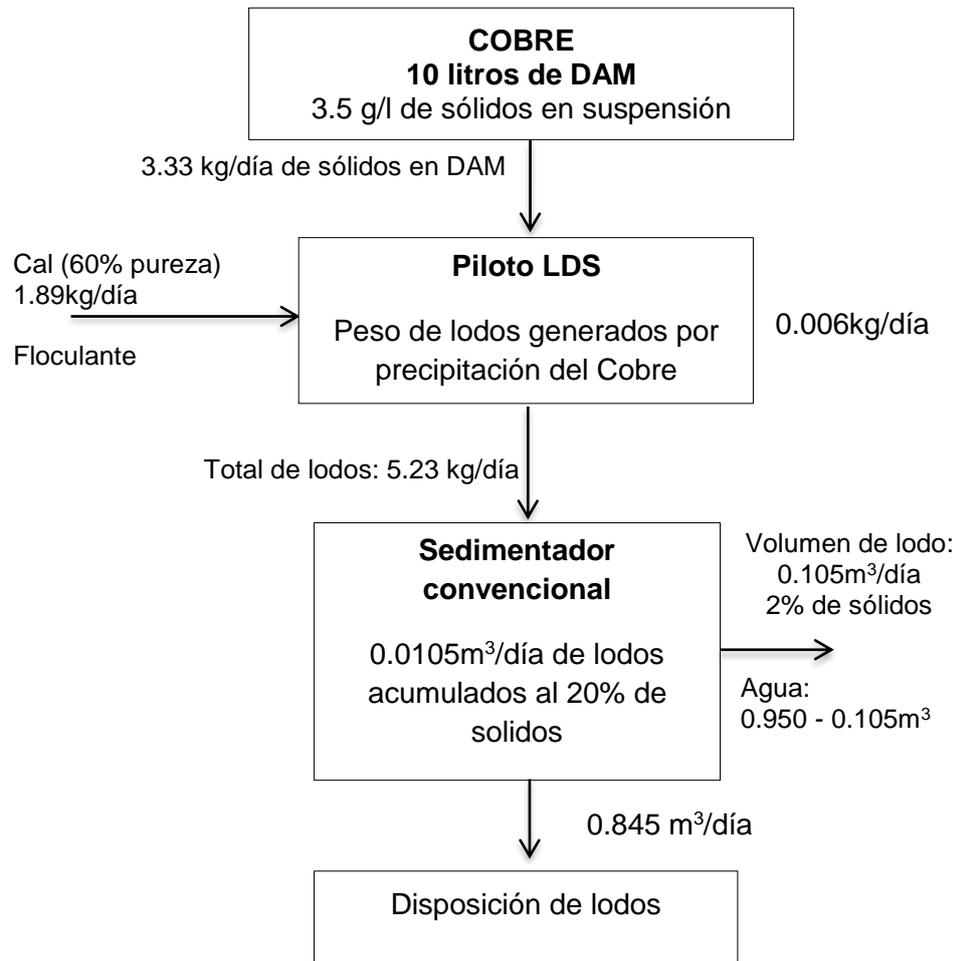


Figura N° 04: Balance de masa del Cobre.

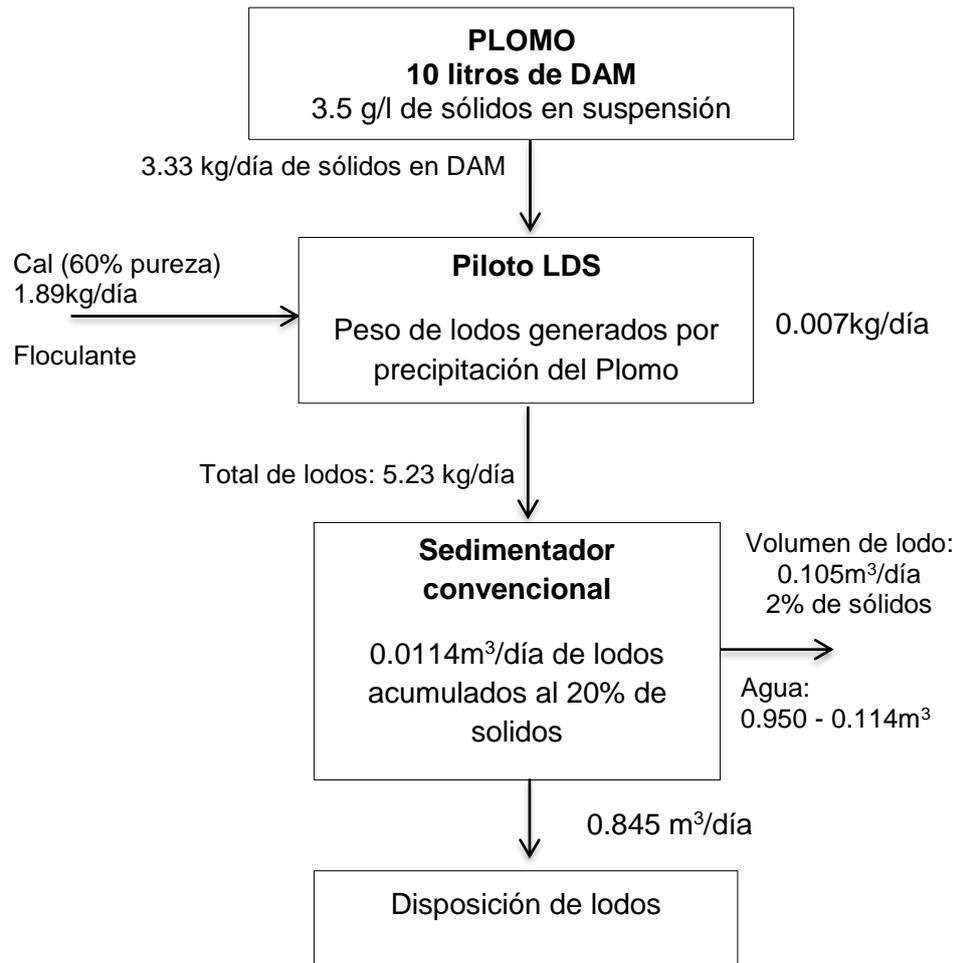


Figura N° 05: Balance de masa del Plomo.

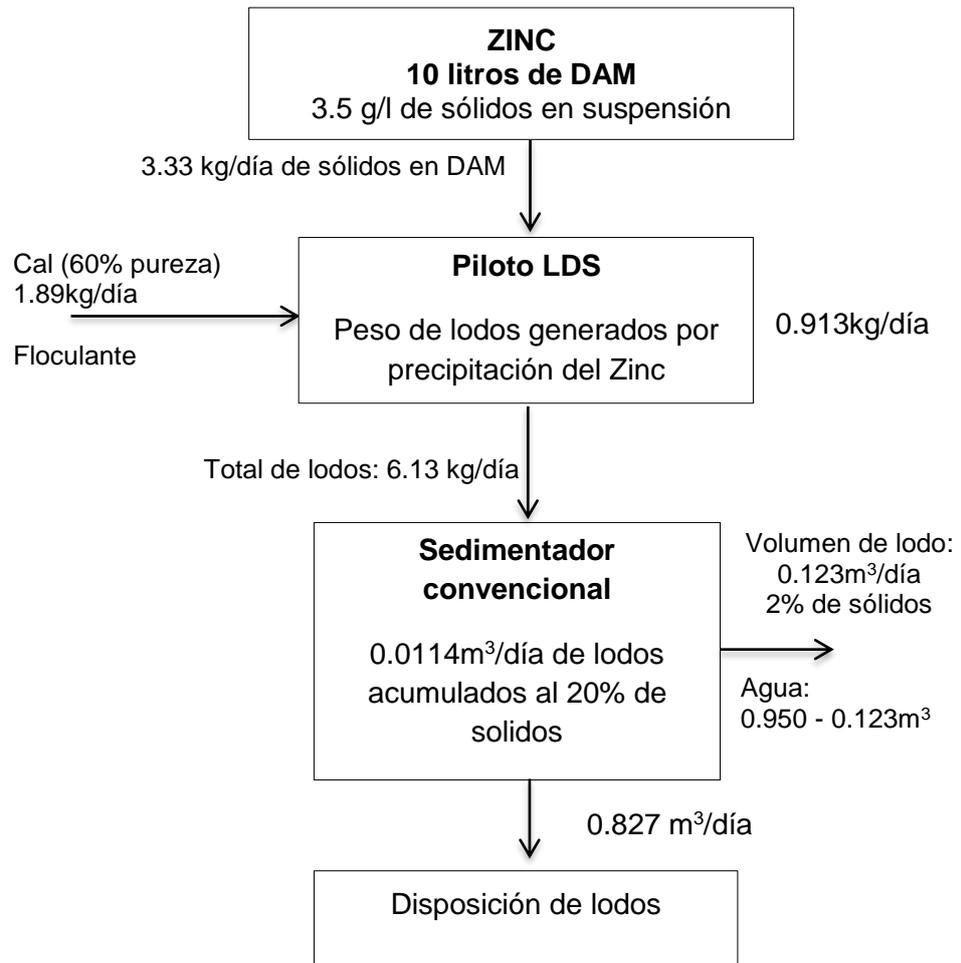


Figura N° 06: Balance de masa del Zinc

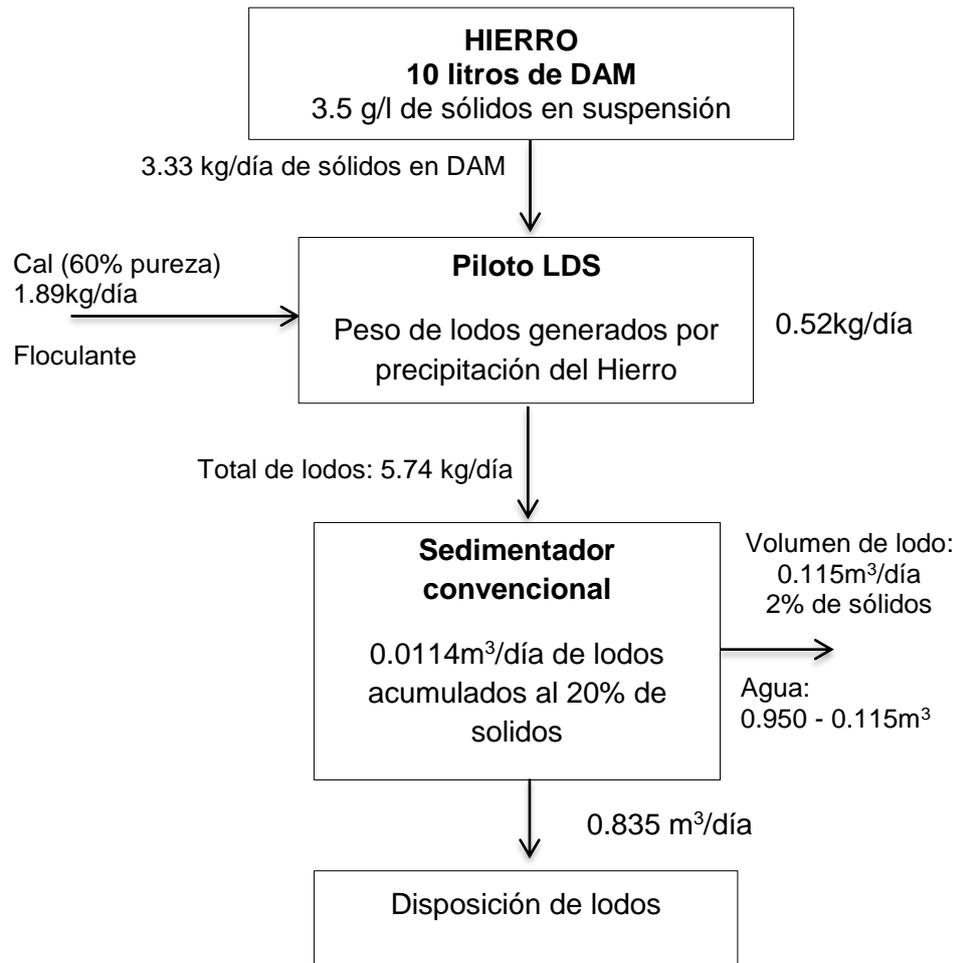


Figura N° 07: Balance de masa del Hierro

3.6. Parámetros de diseño del Piloto LDS

Los parámetros hidrológicos y de diseño se presentan en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5: Parámetros hidrológicos y de diseño

Parámetros del diseño	Und	Cantidad
Tiempo de residencia del reactor	Min	16
Área superficial	m ²	0.022
Tamaño del tanque reactor	m ³	0.1
pH operativo		8.8-9
Tasa de abastecimiento de aire	mg/l	103.18
Caudal	l/s	0.011
Velocidad de sedimentación	m/s	0.00051
Viscosidad	m ² /s	1.31*10 ⁻⁶
CAL (Ca(OH)₂)		
Disponibilidad de cal útil	%	60
Dosificación de la cal en el flujo	g/l	1.3
Concentración de lechada de cal	%	2.5, 5, 10
Consumo de cal	t/d	0.00124
POLIMEROS		
Dosificación del polímero	mg/l	1.4
Consumo de polímero	Kg/d	0.00133
Concentración de la solución del polímero	%	0.03
Tasa de alimentación de solución de polímeros	l/min	0.92
LODOS		
Tasa de generación de lodos	g/l	5.9
Producción de lodos	t/d	0.0057
Producción de impurezas	Kg/d	0.54
Sólidos de lodos	%	2
Tasa de disposición de lodos	m ³ /d	0.114
COSTOS DE OPERACION		
Solución de hidróxido de calcio (2.5%)	\$/m ³	0.090
Solución de hidróxido de calcio (5%)	\$/m ³	0.209
Solución de hidróxido de calcio (10%)	\$/m ³	0.117

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

5.1. Caracterización física – química del drenaje ácido de mina

La Cía. Minera Huancapetí presenta tres bocaminas en actual explotación Caridad, Coturcan y Hércules. De cada una de ellas afloran de manera permanente los drenajes ácidos de mina. Dichos drenajes son derivados a una misma Planta de Tratamiento. Para el presente estudio, las muestras fueron tomadas del canal de ingreso a la Planta, cuyo resultado de la caracterización física – química se presentan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 6: Concentración de metales disueltos y totales, pH y turbiedad del drenaje ácido de mina

Metal	Concentración (mg/L)				pH	Turbiedad (NTU)
	Cu	Pb	Zn	Fe		
Disuelto	3.968	3.750	285.400	4.280	3.54	60
Total	4.233	6.541	632.700	362.100		

Nota: El muestreo se realizó el 21/11/2016

5.2. Neutralización del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí

La remoción de metales como el cobre, plomo, zinc y hierro mediante el tratamiento químico con Ca(OH)_2 requiere que la solución donde ocurre la reacción química presente un pH entre 8.8 y 9. Asimismo, es importante conocer el volumen de Ca(OH)_2 necesario para alcanzar dicho pH. En este sentido, se realizaron experimentos empleando concentraciones de Ca(OH)_2 de 2.5, 5 y 10% en distintos volúmenes. Los resultados se presentan en la Figura N° 8.

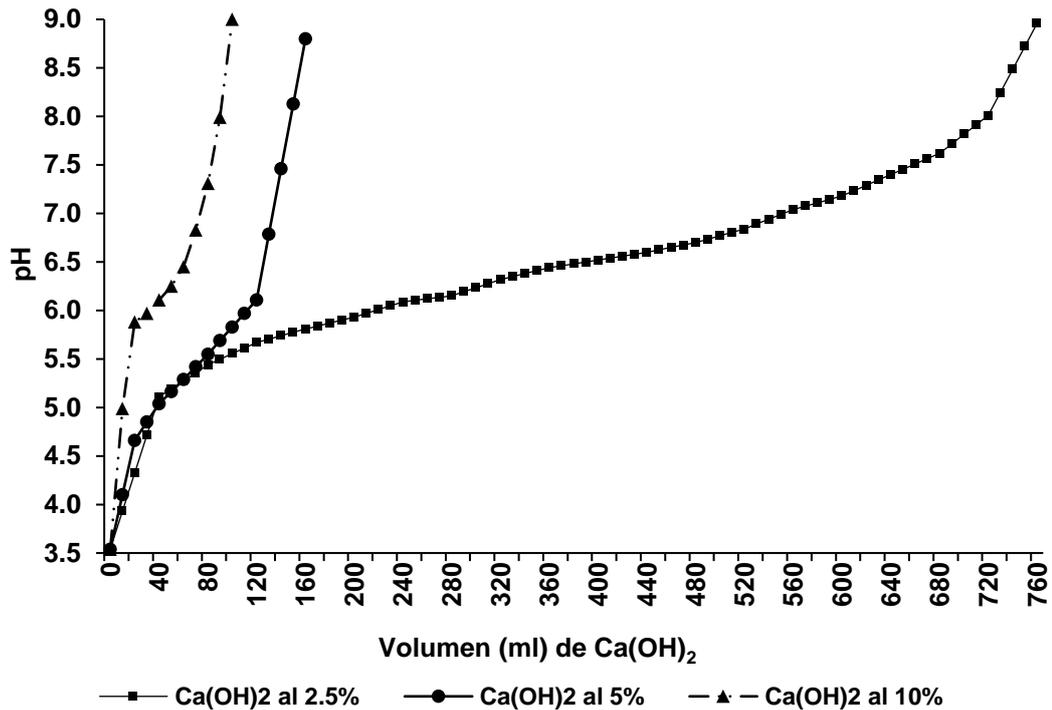


Figura N° 08: Efecto de la concentración y volumen de Ca(OH)_2 en el pH de las muestras tratadas

5.3. Remoción de hierro, cobre, plomo y zinc del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto

Tabla N° 7: Concentración promedio de metales a la entrada, salida y removidos por el sistema LDS

Cal Ca(OH)_2 (%)		Concentración (mg/L)			
		Cu	Pb	Zn	Fe
2.5	Entrada	4.233	6.541	632.700	362.100
	Salida	0.055	0.099	0.689	0.092
	Removido	4.178	6.442	632.011	362.008
5	Entrada	4.233	6.541	632.700	362.100
	Salida	0.046	0.113	0.345	0.606
	Removido	4.187	6.428	632.355	361.494
10	Entrada	4.233	6.541	632.700	362.100
	Salida	0.057	0.168	0.572	0.729
	Removido	4.176	6.373	632.128	361.371

La Figura N° 9 presenta la disminución del hierro, cobre, plomo y zinc hasta concentraciones por debajo de los límites máximos permisibles establecidos mediante D.S. N° 010-2010-MINAM.

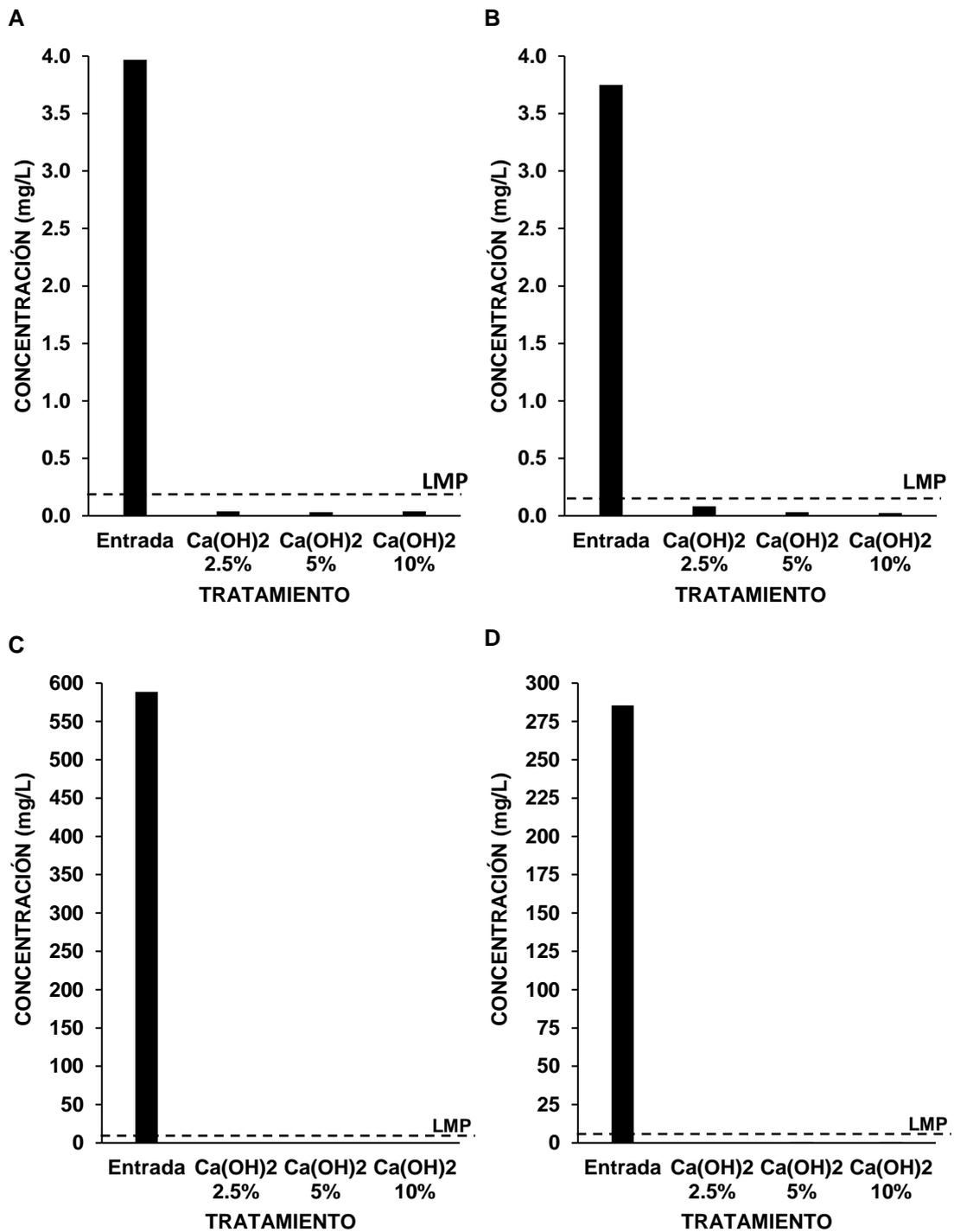


Figura N° 09: Concentración de metales antes y después de los tratamientos con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. (A) Cobre, (B) Plomo (C) Zinc (D) Hierro.

Nota: LMP hace referencia a los límites máximos permisibles según D.S. N° 010-2010-MINAM

5.4. Eficiencia de remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina

Tabla N° 8: Eficiencia de remoción de metales pesados por el sistema LDS

Ca(OH) ₂ (%)	Eficiencia de remoción (%)			
	Cu	Pb	Zn	Fe
2.5	98.70	98.5	99.89	99.97
5	98.91	98.3	99.95	99.83
10	98.65	97.4	99.91	99.80

En la Figura N° 10 se presenta la eficiencia de remoción de cobre, plomo, zinc y hierro, la cual es superior al 97%.

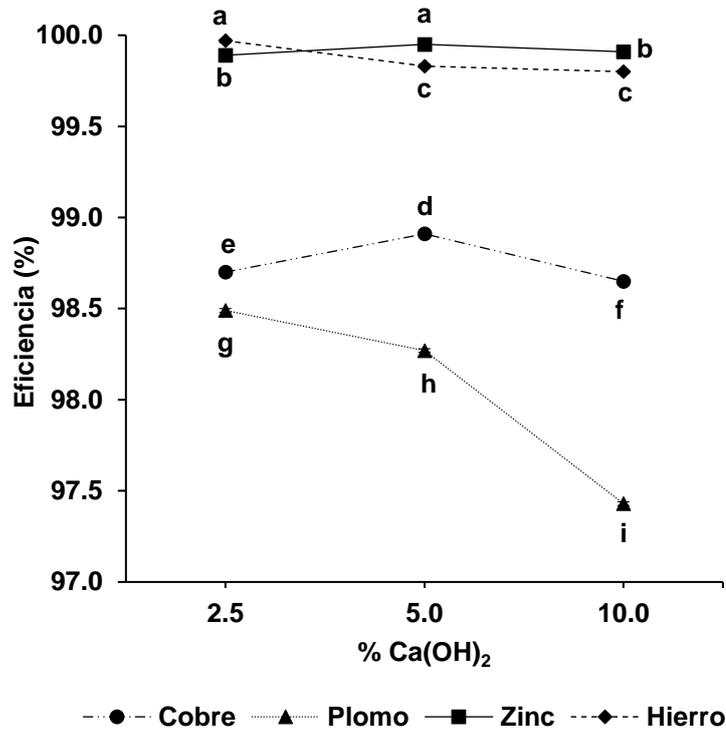


Figura N° 10: Efecto de la concentración de Ca(OH)₂ sobre la eficiencia de remoción de cobre, plomo, zinc y hierro.

Nota: Los resultados son promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Promedios con letra diferente son significativamente diferentes (Prueba Tukey, p<0.01)

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Caracterización física – química del drenaje ácido de mina

Los resultados del análisis de laboratorio del drenaje ácido de mina muestran que las concentraciones de cobre, plomo, zinc y hierro exceden los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2010-MINAM. Lo mismo sucede para el pH.

La hidrogeoquímica de las labores mineras contribuye con la incorporación de dichos metales en el drenaje ácido de mina. En así que, el hierro procede de los minerales de pirita, que presenta un alto contenido de hierro y sulfatos, y al no presentar valor económico es dispuesto en desmonteras o dentro de las bocaminas en donde generan lixiviados que discurren y forman el DAM. La presencia de la calcopirita en el material estéril contribuye con el cobre; del mismo modo la presencia de galena y esfalerita contribuye con el plomo y el zinc respectivamente. En tanto que el pH ácido del drenaje ácido de mina se debe a la solubilización de pirita con la consecuente liberación de sulfato y iones metálicos.

4.2. Neutralización del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de la Cía. Minera Huancapetí

La prueba de neutralización mostró que el pH aumenta a medida que también se incrementa la cantidad de Ca(OH)_2 . El pH del drenaje ácido de mina que entra al reactor de neutralización y oxidación fue 3.54, que luego de la adición de cal el pH del efluente fue de 8.96 (con 2.5% de Ca(OH)_2), 8.8 (con 5% de Ca(OH)_2) y 9.0 (con 10% de Ca(OH)_2).

Con una concentración del 2.5% de Ca(OH)_2 el proceso de neutralización ocurre de manera lenta, requiriendo incluso un mayor tiempo de reacción. Mientras que una concentración del 5% de Ca(OH)_2 permite neutralizar el drenaje ácido de mina de manera más eficiente, con un menor tiempo de reacción por tanto genera un menor costo de operación.

La neutralización de drenaje ácido de mina mediante el sistema LDS observada en este estudio se relaciona con el reporte del Proyecto Aurífero La Zanja (Cajamarca). En dicho estudio se empleó cal en fase sólida, lo cual no resulta recomendable por requerir de mayores tiempos de reacción, mientras que en el presente estudio se emplearon soluciones de cal, permitiendo reducir los tiempos de reacción y por ende optimizar el proceso LDS.

Un estudio similar realizado por la Minera San Simón (La libertad) se usa una variante de esta metodología, que consiste en neutralización del DAM en pozas de neutralización, en donde el sistema consta de cilindros de mezcla, el cual genera costos de operación y mantenimiento elevados, a diferencia de la metodología de lodos de baja densidad que consistió en la optimización del sistema convencional de LDS.

4.3. Remoción de hierro, cobre, plomo y zinc del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto

La aplicación de lodos de baja densidad (soluciones de Ca(OH)_2) permitió la remoción del cobre, plomo, zinc y hierro. Las concentraciones de estos metales luego del tratamiento LDS se encuentran dentro de los límites máximos permisibles para efluentes mineros-metalúrgicos establecidos según el D.S. N° 010-2010-MINAM.

Para el caso del cobre, su concentración antes del ingreso a la Planta Piloto fue 4.233 mg/L y a la salida fue de 0.046 mg/L, lográndose una remoción de 4.187 mg/L cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 5%. Consecuentemente, la concentración de este metal en la salida se encuentra por debajo del límite máximo permisible (0.5 mg/L) establecido según D.S. N° 010-2010-MINAM.

Para el caso del plomo, su concentración antes del ingreso a la Planta Piloto fue de 6.541 mg/L y a la salida fue de 0.099 mg/L, lográndose una remoción de 6.442 mg/L cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%.

Consecuentemente, la concentración de este metal en la salida se encuentra por debajo del límite máximo permisible (0.2 mg/L) establecido según D.S. N° 010-2010-MINAM.

Para el caso del zinc, su concentración antes del ingreso a la Planta Piloto fue de 632.7 mg/L y a la salida fue de 0.345 mg/L, lográndose una remoción de 632.355 mg/L cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 5%. Consecuentemente, la concentración de este metal en la salida se encuentra por debajo del límite máximo permisible (1.5 mg/L) establecido según D.S. N° 010-2010-MINAM.

Para el caso del hierro, su concentración antes del ingreso a la Planta Piloto fue de 362.1 mg/L y a la salida fue de 0.092 mg/L, lográndose una remoción de 362.008 mg/L cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%. Consecuentemente, la concentración de este metal en la salida se encuentra por debajo del límite máximo permisible (2 mg/L) establecido según D.S. N° 010-2010-MINAM.

4.4. Eficiencia de remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina

Los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad (soluciones de hidróxido de calcio) presentó eficiencias de remoción mayores al 97% para el hierro, zinc, cobre y plomo. La comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($\alpha=0.05$) muestra que el sistema LDS resulta más efectivo para la remoción de hierro y zinc empleando concentraciones de Ca(OH)_2 del 2.5 y 5% respectivamente. En tanto que la remoción del cobre y plomo ocurre en menor grado que el hierro y zinc.

Los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia en la planta de tratamiento de drenaje ácido de mina Kumurana-La Lava (Bolivia), con la tecnología convencional con adición de lechada de cal, se puede observar eficiencias de eliminación altas y hasta muy altas de 85% para el cobre disuelto y 99% en el caso del hierro, en ambos casos en relación a los resultados de la remoción a nivel planta piloto de LDS de la Cía. Minera Huancapetí, son inferiores.

Para el caso del cobre, de acuerdo a la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($\alpha=0.01$) muestra que la mayor eficiencia (98.91%) en su remoción se dio cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 5%.

Asimismo, la remoción del cobre empleando concentraciones de Ca(OH)_2 del 2.5% y 10% alcanzó eficiencias del 98.70% y 98.65% respectivamente.

Para el caso del plomo, de acuerdo a la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($\alpha=0.01$) muestra que la mayor eficiencia (98.49%) en su remoción se dio cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%. Asimismo, la remoción del plomo empleando concentraciones de Ca(OH)_2 del 5% y 10% alcanzó eficiencias del 98.27% y 97.43% respectivamente.

Para el caso del zinc, de acuerdo a la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($\alpha=0.01$) muestra que la mayor eficiencia (99.95%) en su remoción se dio cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 5%. Asimismo, la remoción del zinc empleando concentraciones de Ca(OH)_2 del 2.5% y 10% alcanzó eficiencias del 99.89% y 99.91% respectivamente.

Para el caso del hierro, de acuerdo a la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($\alpha=0.01$) muestra que la mayor eficiencia (99.97%) en su remoción se dio cuando se empleó una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%. Asimismo, la remoción del hierro empleando concentraciones de Ca(OH)_2 del 5% y 10% alcanzó eficiencias del 99.83% y 99.80% respectivamente.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La neutralización del drenaje ácido de mina con un pH inicial de 3.54, permitió elevar el pH a valores de 8.96, 8.8 y 9 empleando concentraciones de Ca(OH)_2 de 2.5%, 5% y 10% respectivamente.
- El sistema de lodos de baja densidad permitió remover el cobre, plomo, zinc y el hierro en cantidades de 4.187 mg/L, 6.442 mg/L, 632.355 mg/L y 362.008 mg/L respectivamente. Las concentraciones finales de estos metales se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2010-MINAM.
- El sistema de lodos de baja densidad presentó eficiencias de remoción del 98.91%, 98.49%, 99.95% y 99.97% para el cobre, plomo, zinc y hierro respectivamente. Para el plomo y hierro se requirió una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%, mientras que para el zinc y cobre del 5%.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda para futuros tratamientos considerar la dosificación de la lechada de cal al 2.5%, por presentar el menor costo de operación.
- Según los resultados obtenidos se recomienda un estudio más extenso y preciso a nivel planta piloto de LDS para determinar los parámetros óptimos para el proceso de neutralización y remoción de metales pesados.

- Se sugiere caracterizar el efluente del DAM hasta la especiación química los metales pesados, para determinar los procesos químicos óptimos en la neutralización y remoción.
- Se recomienda el aprovechamiento económico de las leyes de metales contenidos en los lodos generados por esta tecnología de lodos de baja densidad (LDS), por la elevada concentración del zinc y el hierro en el efluente minero.
- Reutilizar el efluente de las aguas tratadas, en la preparación de reactivos como la lechada de cal y preparación de la solución del floculante.
- Realizar experimentos con los lodos generados en cierre de minas-remediación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Acido de Mina Gen (Danilo Bocángel, Florian Erzinger, 2004)eracion y Tratamiento. Madrid.
- Bocángel, D., & Erzinger, F. (2004). Planta de Tratamiento Activo Kumurana La Lava. Programa de Investigacion, 55.
- Campo, A. (2002). Estudio de la Cinética de Oxidación de Hierro en Sistemas Acuicos. Bogotá: Uiversidad de los Andes.
- Cica, c. (2012). Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua de mina y evaluacion de potimización de proceso- unidad minera La Zanja. La Zanja.
- Cortina, M. A. (2006). Tratamiento de Agua Contaminada. Tratamiento de Aguas Contaminadas por Actividades Minero-Metalurgicos.
- E., G. Z. (1998). Tratamiento Fisico Químico de drenajes Ácidos de Mina. Tecnologias Limpias en las Industrias Extractivas- Minero Metalurgicos y Petrolera, 258.
- Loaiza, R. (2014). Drenaje ácido natural y de metales pesados en cabeceras de cuenca altoandina. Lima: Universidad peruan acayetano heredia.
- Marín, G. R. (1996). Química, Microbiología y Control Analítico de Aguas. Bogotá-Colombia.
- Metalurgia, M. d. (2001). Guia ambiental para el manejo de aguas en actividades minero metalúrgicas. La Paz.
- MINAM. (2010). Limites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalurgicos. Decreto supremo N° 010-2010-MINAM.
- Moscoso, J. (2002). Proyecto Regional: Sistemas Integrados de Tratamiento y uso de Aguas Residuales en América Latina. convenio IDRC- OPS/HEP/CEPIS.
- Navarro, J. &. (2007). Aspectos Bioquímicos y Genéticos de la Tolerancia y Acumulación de Metales Pesados en Plantas. Ecosistemas.
- O.M.S. (1976). Riesgos del ambiente humano para la salud. En O.M.S., Riesgos del ambiente humano para la salud (págs. 162-163). Washington: Health Hazards of the Human Environment.
- Ospina, C. (2012). Validación de la Metodología de Detección de lod Metales en Agua Tratada por Absorción Atómica. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Roberto Rodríguez, A. G. (2006). Tratamiento de Aguas Contaminadas por Actividades Minero-Metalurgicas. Instituto Geológico y Minero de España.
- Rodriguez, P. A. (2000). Sistema de Tratamiento de Aguas Contaminadas por Minería. Instituto de Ciencias de la Tierra, Centro Superior de Investigaciones Científicas.
- Romegialli, F. (2005). Introducción a la Toxicología Ambiental. Chile: Universidad de Concepción.

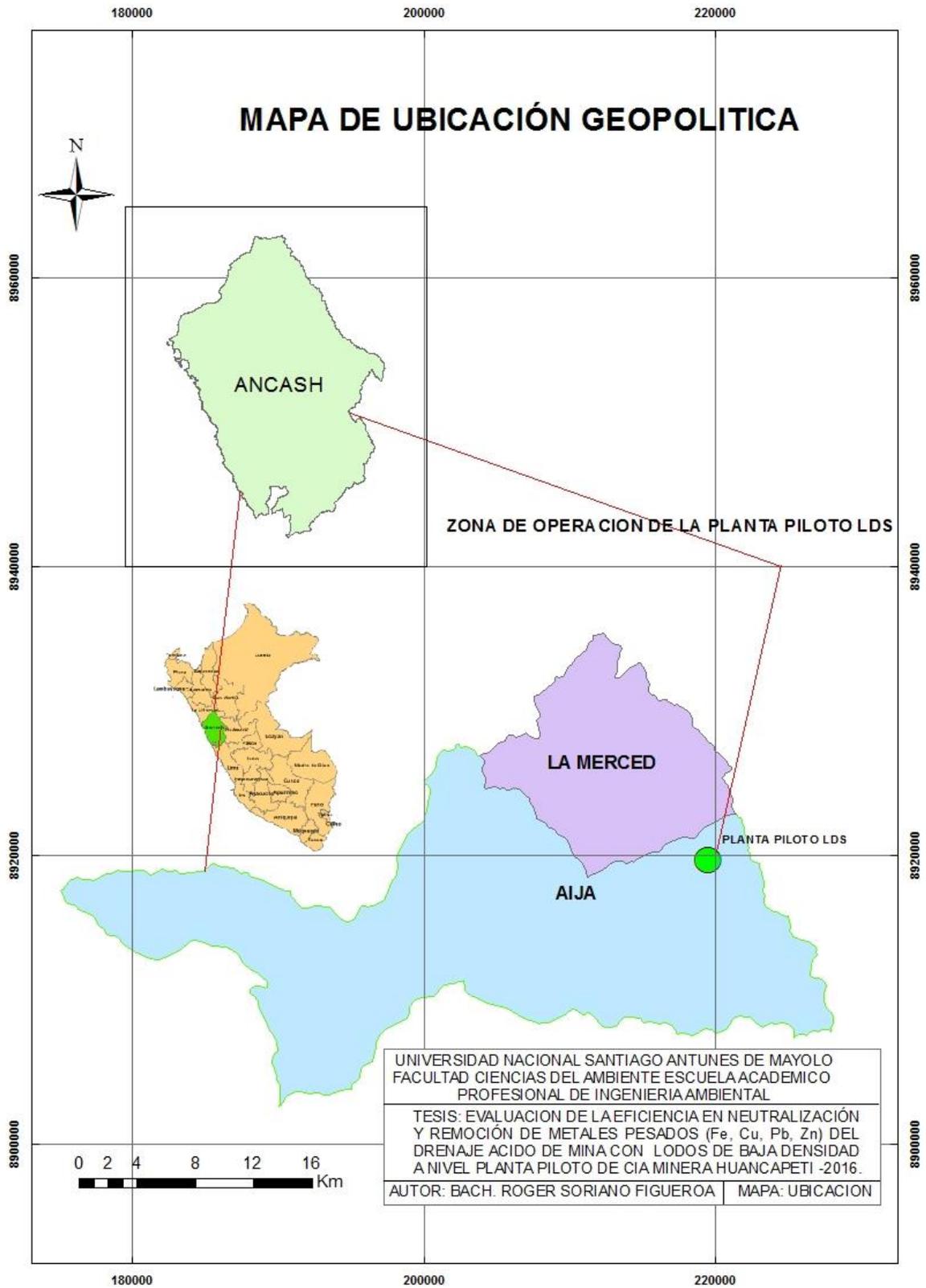
Valencia, J. A. (2000). Teoria y Purificación del Agua. Santa Fe de Bogotá: Rodrigo Pertuz Molina.

Vogel, A. I. (2007). Química Analítica Cualitativa . Buenos Aires: Kapelusz S.A.

Z., L. H. (1998). Proceso de neutralización de residuos líquidos.

ANEXOS

ANEXO 1: Mapa de ubicación del lugar de estudio



ANEXO 2: Resultados de los análisis de laboratorio

REPORTE DE LABORATORIO HUANCAPETI SAC

REPORTE DE ANALISIS DE MUESTRAS DE AGUA: EFLUENTES DE MINA



Ing. Edwin Gómez
Rodríguez
Jefe de Laboratorio
Químico
COMPAÑIA MINERA
HUANCAPETI S.A.C
Av. República de Colombia #
791 Of. 804, San Isidro, Lima.

FECHA : 21/11/2016

EFLUENTES MINA - METALES DISUELTOS -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	3.968	3.750	588.500	285.400	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.040	0.082	0.526	0.084	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.033	0.033	0.229	0.432	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.040	0.025	0.206	0.437	8.96	11.00

EFLUENTES MINA - METALES TOTALES -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	4.233	6.541	632.700	362.100	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.055	0.099	0.689	0.092	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.046	0.113	0.345	0.606	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.057	0.168	0.572	0.729	8.96	11.00

REPORTE DE LABORATORIO HUANCAPETI SAC

REPORTE DE ANALISIS DE MUESTRAS DE AGUA: EFLUENTES DE MINA



Ing. Edwin Gómez
Rodríguez
Jefe de Laboratorio
Químico
COMPAÑIA MINERA
HUANCAPETI S.A.C
Av. República de Colombia #
791 Of. 804, San Isidro, Lima.

FECHA : 21/11/2016

EFLUENTES MINA - METALES DISUELTOS -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	3.967	3.749	588.499	285.399	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.039	0.081	0.525	0.083	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.032	0.032	0.228	0.431	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.039	0.024	0.205	0.436	8.96	11.00

EFLUENTES MINA - METALES TOTALES -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	4.232	6.540	632.699	362.099	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.054	0.098	0.688	0.091	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.045	0.112	0.344	0.605	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.056	0.167	0.571	0.728	8.96	11.00

REPORTE DE LABORATORIO HUANCAPETI SAC

REPORTE DE ANALISIS DE MUESTRAS DE AGUA: EFLUENTES DE MINA



Ing. Edwin Gómez
Rodríguez
Jefe de Laboratorio
Químico
COMPAÑIA MINERA
HUANCAPETI S.A.C
Av. República de Colombia #
791 Of. 804, San Isidro, Lima.

FECHA : 21/11/2016

EFLUENTES MINA - METALES DISUELTOS -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	3.969	3.751	588.501	285.401	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.041	0.083	0.527	0.085	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.034	0.034	0.230	0.433	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.041	0.026	0.207	0.438	8.96	11.00

EFLUENTES MINA - METALES TOTALES -PILOTO

Muestra	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	p H	NTU
Entrada	4.234	6.542	632.701	362.101	3.54	60.00
Ca(OH) ₂ 2.5%	0.056	0.100	0.690	0.093	9.00	10.00
Ca(OH) ₂ 5%	0.047	0.114	0.346	0.607	8.80	9.00
Ca(OH) ₂ 10%	0.058	0.169	0.573	0.730	8.96	11.00

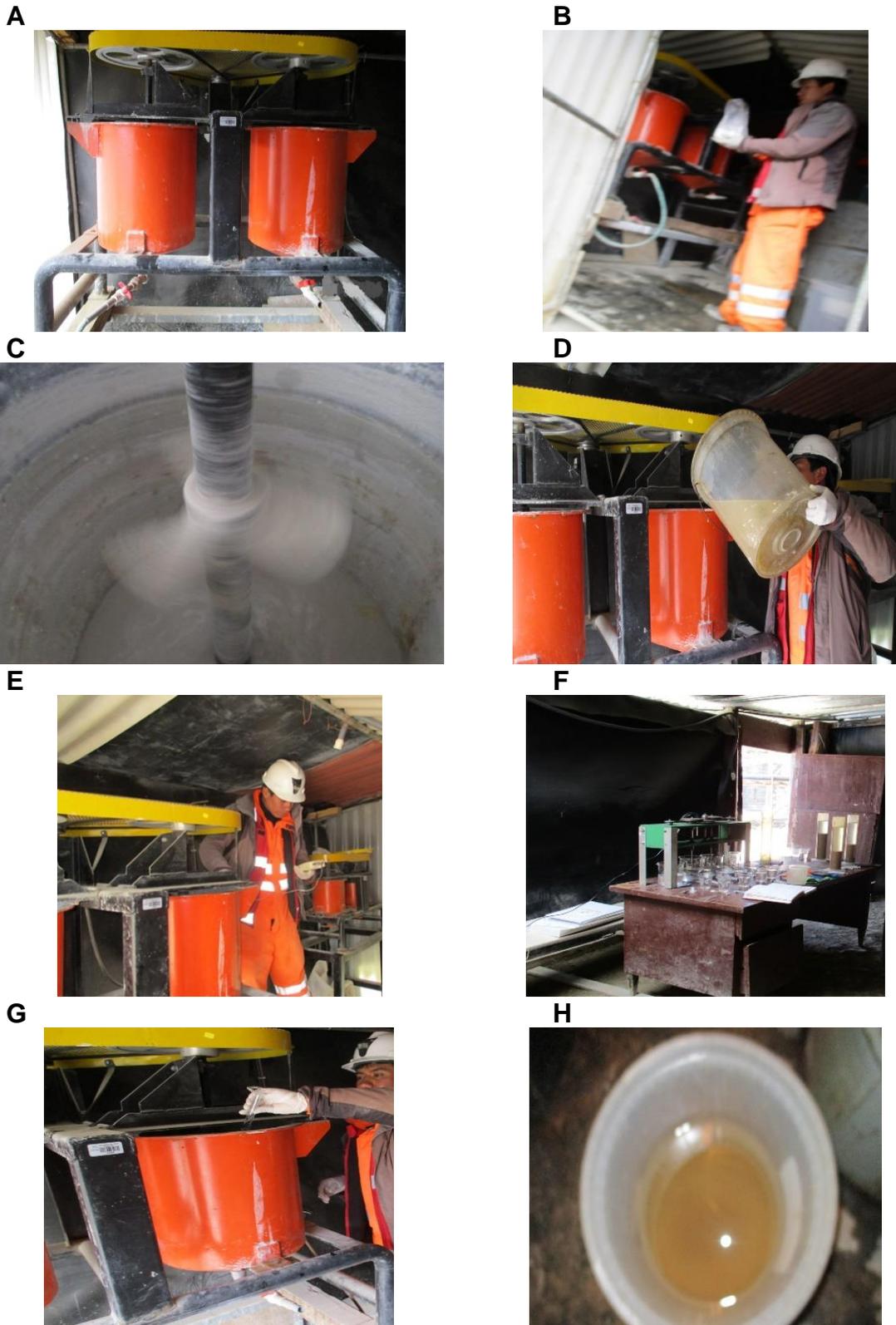
**ANEXO 3: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos
de actividades minero - metalúrgicas**

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

(*) En muestra no filtrada

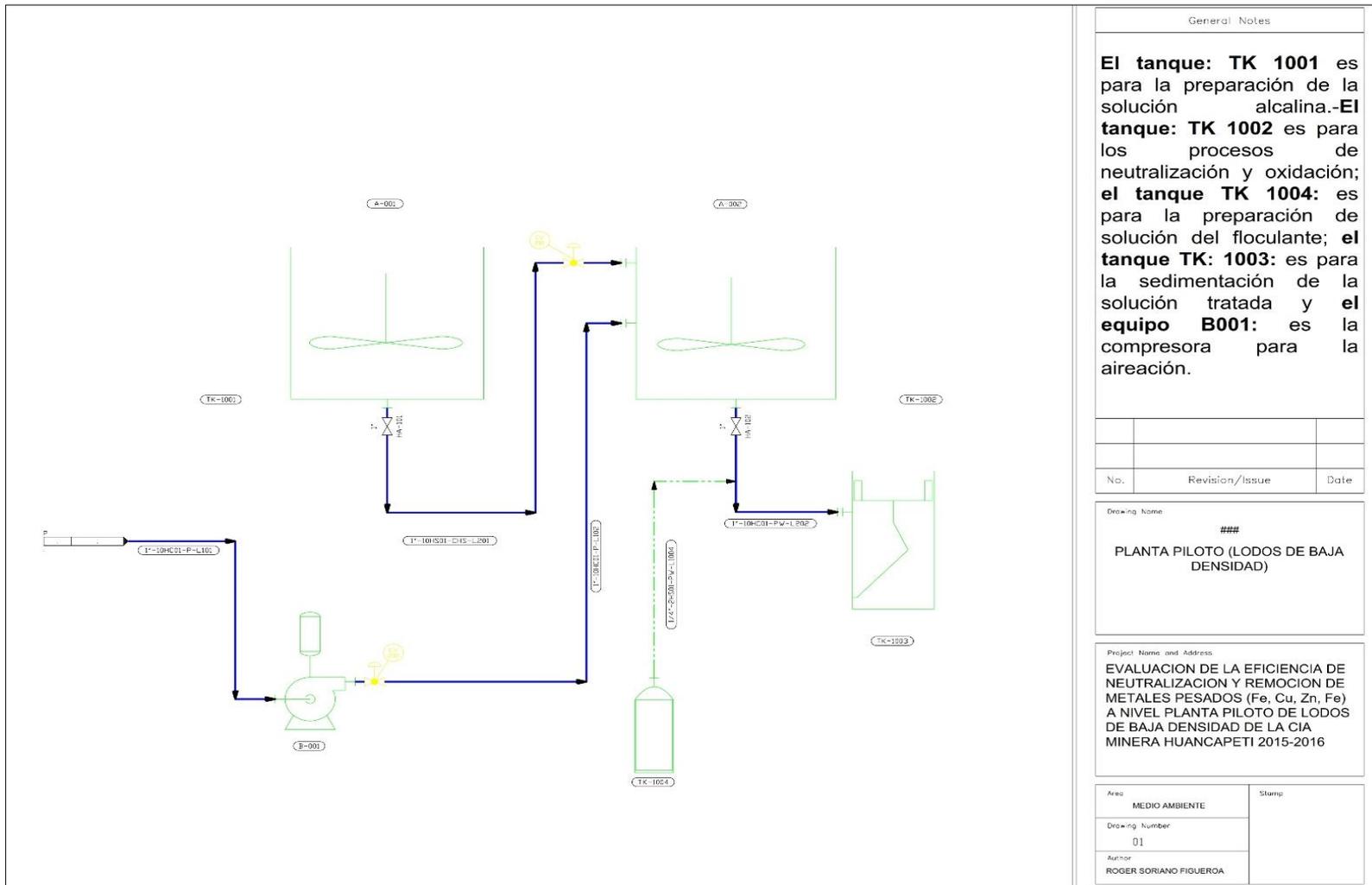
Fuente: R.M. N.º 011-96-EM/VEM

ANEXO 4: Panel fotográfico



Fotografías: (A) Planta piloto (LDS), (B) Preparación de lechada de cal, (C) Solución del hidróxido de calcio, (D) Llenado de muestra de relave en el reactor alcalino, (E) Proceso de neutralización y oxidación), (F) Prueba de jarras y sedimentación, (G) Proceso de floculación, (H) Proceso de sedimentación.

ANEXO 5: Esquema de la Planta Piloto LDS



General Notes

El tanque: TK 1001 es para la preparación de la solución alcalina.-**El tanque: TK 1002** es para los procesos de neutralización y oxidación; **el tanque TK: 1003:** es para la sedimentación de la solución tratada y **el equipo B001:** es la compresora para la aireación.

No.	Revision/Issue	Date

Drawing Name

###

PLANTA PILOTO (LÓDOS DE BAJA DENSIDAD)

Project Name and Address

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Fe, Cu, Zn, Fe) A NIVEL PLANTA PILOTO DE LÓDOS DE BAJA DENSIDAD DE LA CIA MINERA HUANCAPETI 2015-2016

Area	Stamp
MEDIO AMBIENTE	
Drawing Number	
01	
Author	
ROGER SORIANO FIGUEROA	

ANEXO 6: Comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey para la eficiencia de remoción de metales

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% Remoción	36	1.00	1.00	0.01

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	24.00	11	2.18	21820.91	<0.0001
Concentración	24.00	11	2.18	21820.91	<0.0001
Error	2.4E-03	24	1.0E-04		
Total	24.01	35			

Test: Tukey Alfa=0.01 DMS=0.03525

Error: 0.0001 gl: 24

Concentración	Medias	n	E.E.	
Fe 2.5	99.97	3	0.01	A
Zn 5	99.95	3	0.01	A
Zn 10	99.91	3	0.01	B
Zn 2.5	99.89	3	0.01	B
Fe 5	99.83	3	0.01	C
Fe 10	99.80	3	0.01	C
Cu 5	98.91	3	0.01	D
Cu 2.5	98.70	3	0.01	E
Cu 10	98.65	3	0.01	F
Pb 2.5	98.49	3	0.01	G
Pb 5	98.27	3	0.01	H
Pb 10	97.43	3	0.01	I

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.01$)