

ESCUELA DE POSGRADO NEWMAN
MAESTRÍA EN
GESTIÓN MINERA Y AMBIENTAL



**Propuesta de optimización del sistema de tratamiento de
efluentes ácidos de la Compañía Minera La Arena S.A.**
La Libertad, Perú 2022

Trabajo de Investigación
para optar el Grado a Nombre de la Nación de:

Maestro en
Gestión Minera y Ambiental

Autor:

Bach. Meléndez Baltodano, Luis Javier

Docente guía:

Mtro. Niquen Espejo, Christopher

TACNA – PERÚ
2022

“El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en este trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor”

Índice

CAPITULO I: ANTECEDENTES DE ESTUDIO

| | |
|---|---|
| 1.1. Título del Tema..... | 1 |
| 1.2. Planteamiento del Problema..... | 1 |
| 1.3. Objetivos de la Investigación | 3 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 3 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.4. Justificación | 3 |
| 1.5. Metodología | 4 |
| 1.5.1. Tipo y Diseño de investigación | 4 |
| 1.5.2. Diagnóstico de la situación actual | 5 |
| 1.6. Principales definiciones | 5 |
| 1.7. Alcances y limitaciones..... | 8 |
| 1.7.1. Alcance de la investigación | 8 |
| 1.7.2. Limitación de la investigación | 8 |
| 1.8. Cronograma..... | 9 |

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

| | |
|--|----|
| 2.1. Bases teóricas de las variables y/o tópicos | 10 |
| 2.1.1. Drenaje Ácido de Mina (DAM) | 10 |
| 2.1.1.1. Generación de aguas ácidas..... | 10 |
| 2.1.2. Proceso de precipitación con Cal – Lodos de Alta Densidad (HDS) | 11 |
| 2.1.2.1. Condiciones de Operación | 13 |
| 2.1.2.1.1. pH operativo | 14 |
| 2.1.2.1.2. Tiempo de retención..... | 14 |
| 2.1.2.1.3. Producción de Lodo y relación de recirculación de lodos..... | 15 |
| 2.1.2.1.4. Aireación | 15 |
| 2.1.2.2. Calidad de agua tratada | 15 |
| 2.1.3. Marco legal | 16 |
| 2.1.3.1. Decreto Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos | 16 |
| 2.1.3.2. Decreto Ley N° 28611, Ley General del Ambiente..... | 17 |
| 2.1.3.3. Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.1.3.4. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen Disposiciones Complementarias | 21 |
| 2.2. Análisis comparativo de las bases teóricas | 22 |
| 2.2.1. Sistemas de tratamiento del drenaje ácido de mina | 22 |
| 2.3. Análisis crítico de las bases teóricas | 23 |

CAPITULO III: MARCO REFERENCIAL

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1. Reseña histórica | 25 |
| 3.2. Filosofía organizacional | 26 |
| 3.3. Diseño organizacional | 27 |
| 3.4. Productos y/o servicios | 28 |
| 3.5. Diagnóstico organizacional | 28 |
| 3.5.1. Matriz FODA | 28 |
| 3.5.1.1. Fortalezas | 28 |
| 3.5.1.2. Oportunidades | 28 |
| 3.5.1.3. Debilidades | 29 |
| 3.5.1.4. Amenazas | 29 |

CAPITULO IV: RESULTADOS

| | |
|--|----|
| 4.1. Diagnóstico | 30 |
| 4.2. Presentación de resultados | 30 |
| 4.3. Diseño de la Propuesta de Mejora | 31 |
| 4.4. Mecanismos de Control para las actividades de mejora propuestas | 32 |
| 4.5. Evaluación Económica | 32 |
| 4.5.1. Resumen del Costo de Capital | 32 |
| 4.5.2. Resumen de Costo Operativo | 33 |
| 4.5.3. Presupuesto | 34 |
| 4.5.4. Análisis económico de la implementación | 34 |

CAPITULO V: SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

| | |
|-------------------------------------|----|
| SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES | 36 |
| CONCLUSIONES | 37 |
| BIBLIOGRAFÍA | 38 |
| ANEXO | 41 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Criterios operativos de Diseño de Planta..... | 14 |
| Tabla 2 Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividad Minera-Metalúrgicos..... | 20 |
| Tabla 3 Cuadro comparativo de ahorro en el tratamiento de efluentes..... | 30 |
| Tabla 4 Criterios de diseño de la Planta HDS..... | 31 |
| Tabla 5 Criterios operativos de diseño de la Planta HDS..... | 32 |
| Tabla 6 Resumen de los costos de capital..... | 32 |
| Tabla 7 Resumen de los costos de operación..... | 33 |
| Tabla 8 Resumen de los gastos CAPEX para implementar la Planta HDS..... | 34 |
| Tabla 9 Análisis económico de la implementación de la Planta HDS..... | 35 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Cronograma de actividades Propuesta de Optimización de la Planta de Efluentes Ácidos | 9 |
| Figura 2 Esquema de una Planta de Tratamiento HDS..... | 13 |
| Figura 3 Diseño organizacional Compañía Minera La Arena S.A..... | 27 |
| Figura 4 Comparación del escenario de tratamiento con soda y con cal..... | 34 |
| Figura 5 Flowsheet de la Planta HDS propuesta para optimizar el sistema de tratamiento de efluentes..... | 41 |

CAPITULO I: ANTECEDENTES DE ESTUDIO

1.1. Título del Tema

Propuesta de optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la Compañía Minera La Arena S.A. La Libertad, Perú 2022.

1.2. Planteamiento del Problema

En la actualidad, el Perú se encuentra dentro de los países con gran cantidad y variedad de reservas de minerales del mundo. La explotación de estas reservas de mineral a tajo abierto o tajo cerrado, independientemente de la escala generan un impacto ambiental significativo en las áreas donde se desarrollen. Un aspecto ambiental propio de la minería debido al gran volumen de material estéril o desmonte apilado en las desmonteras que al entrar en contacto con las aguas de lluvia de la temporada húmeda es la generación de aguas ácidas en sus drenajes, debido a la lixiviación de los metales pesados (Cobre, Hierro, Manganeso, Zinc, Aluminio, etc.).

Y resaltar que la mayoría de las mineras en nuestro país, no cuentan con alguna infraestructura adecuada para realizar el tratamiento de estas aguas ácidas debido a la falta de conocimiento y compromiso. (Ahumada Melendez & Benites Horna, 2019) Esto debido al elevado costo de inversión en la implementación de las mismas y su operación. Estos drenajes ácidos generados que se caracterizan por un pH ácido deben ser tratados antes de su vertimiento a los cauces naturales cumpliendo con la normativa ambiental vigente. (Ministerio del Ambiente, 2022)

La Compañía Minera La Arena, actualmente recolecta y trata el agua de contacto (agua ácida) del depósito de desmonte II antes de su vertimiento al ambiente. Y desde el inicio de sus operaciones a mediados del 2013 optó por la neutralización con hidróxido de sodio como método de tratamiento de sus efluentes en un sistema de

tratamiento no convencional basado en agitaciones rápidas y lentas (serpentín) y una batería de pozas de sedimentación. La neutralización, coagulación y floculación para remover los metales pesados (Cobre, Hierro y Manganeso) se desarrolla en el serpentín. Posteriormente la solución acondicionada pasa por la batería de pozas para la sedimentación de los sólidos (separación de fase sólido/líquido) antes de su monitoreo y descarga al cuerpo receptor.

La compañía debido al plan de apilamiento de desmonte y cierre del botadero, lo clasifica en dos calidades: desmonte NAG (no generador de acidez) y desmonte PAG (con potencial de generar acidez). Esta clasificación genera dos calidades de agua ácida. Estas calidades de agua se diferencian por el valor del pH, la cantidad de sólidos en suspensión, el contenido de metales pesados y sulfatos. Estos metales en altas concentraciones como lo menciona Aduvive en el 2006, son nocivos para las actividades biológicas, contaminan los cursos de aguas y hasta pueden causar daños a las estructuras construidas por el hombre. La calidad de agua de la zona NAG se caracteriza por un drain down de 80 l/s aproximadamente con un contenido metálico que varía según la temporada (Cu de 30 mg/l a 180 mg/l, Fe 200 mg/l a 700 mg/l, Mn de 50 mg/l a 150 mg/l y pH 2.20 a 2.80). La calidad de agua de la zona PAG se caracteriza por un drain down de 20 l/s aproximadamente con un contenido metálico que varía según la temporada (Cu de 280 mg/l a 1100 mg/l, Fe 2000 mg/l a 8900 mg/l, Mn de 150 mg/l a 390 mg/l, Al de 700 mg/l a 950 mg/l y pH 2.00 a 2.48).

Este panorama actual viene generando preocupación en la compañía debido a la problemática ambiental que llevaría el incumplimiento de los LMP en los puntos de vertimiento (D.S. 010-2010-MINAM), los riesgos ergonómicos del personal operativo al manipular aproximadamente 30 toneladas de hidróxido de sodio por día, sumado a ello el elevado costo operativo de tratamiento por metro cúbico del agua ácida

generada y las políticas de mercado que impiden la libre comercialización de hidróxido de sodio, a un elevado costo. Estas condiciones sustentan la necesidad de evaluar un sistema de tratamiento convencional que abarque sistemas de aireación, tanques de agitación, floculadores y sedimentadores, permitiendo la optimización del consumo de los reactivos químicos basados en la química del agua de ambas fuentes. (De la Cruz García & Coronel Zárate, 2017)

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Diseñar una propuesta de optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la Compañía Minera La Arena S.A. en la sierra de la Libertad, para minimizar el costo operativo de tratamiento de aguas ácidas y el cumplimiento de los LMP en los puntos de vertimiento (DS 010-2010-MINAM).

1.3.2. Objetivos Específicos

1.3.2.1. Realizar un diagnóstico del actual sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la compañía minera La Arena S.A. en la sierra de la Libertad.

1.3.2.2. Determinar los parámetros operativos críticos usando lechada de cal para diseñar y optimizar el sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la compañía minera La Arena S.A. en la sierra de la Libertad.

1.3.2.3. Realizar la evaluación económica a nivel conceptual de la propuesta optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la compañía minera La Arena S.A. en la sierra de la Libertad.

1.4. Justificación

La presente investigación se justifica teóricamente en la aplicación de las nuevas tecnologías de tratamiento de aguas ácidas que son más productivas y eficientes.

Debido a que el sistema de tratamiento actual que utiliza hidróxido de sodio para la remoción de metales pesados no es el proceso más rentable para cumplir con la normativa ambiental vigente (DS 010-2010-MINAM). Este proceso produce un bajo volumen de lodo con un elevado porcentaje de humedad, el cual es difícil de flocular (el lodo generado es difícil de disponer). Debido a la falta de recirculación de lodo y a una oxidación deficiente en el serpentín, la eficiencia de remoción de metales es muy baja.

La presente investigación desarrollará una metodología que será aplicable a otros estudios que busquen asegurar el cumplimiento de los LMP en los puntos de vertimiento (D.S. 010-2010-MINAM), minimizar la generación de una problemática ambiental y reducir los posibles conflictos sociales con las comunidades de influencia.

La investigación cumplirá con su utilidad práctica, debido a que se pretende aportar una propuesta de optimización usando la tecnología adecuada, dentro de la gran variedad existente y tener un sistema de tratamiento eficaz, práctico y de bajo costo (High Density Sludge HDS).

1.5. Metodología

1.5.1. Tipo y Diseño de investigación

El presente trabajo de investigación será descriptivo; esto nos va a permitir describir el manejo de aguas de la compañía, mediante un análisis e interpretación del problema originado por la falta de un sistema de tratamiento convencional para el tratamiento de sus efluentes ácidos generados.

Referente a la finalidad de la investigación es aplicada ya que se pretende mejorar el manejo y gestión de las aguas generadas por el proceso operativo de la compañía minera, con una propuesta de un sistema de tratamiento de aguas ácidas usando lechada de cal. Un proceso de neutralización no convencional puede ser una opción

viable en el corto plazo, sin embargo, el alto volumen de lodos de baja densidad que se generan es una desventaja con el proceso HDS. En el 2016, Espinosa y otros mencionaron que el proceso HDS genera lodos de bajo volumen y alta densidad, costos de tratamiento más económicos (operación, equipo y reactivos químicos).

1.5.2. Diagnóstico de la situación actual

Para elaborar la propuesta de optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la compañía minera, es necesario tener un diagnóstico del proceso de tratamiento actual y el cumplimiento con la normativa ambiental vigente (DS 010-2010-MINAM). Dentro del diagnóstico actual se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Gestión y manejo de aguas ácidas generadas.
- Lista de equipos mayores.
- Ratios de consumo de reactivos químicos.
- Condiciones de operación (pH operativo, tiempos de retención, generación de lodo, recirculación de lodo, calidad de agua tratada).
- Costos operativos del tratamiento US\$/m³.

1.6. Principales definiciones

Agua de contacto (agua ácida). Según Mandros en el 2015, menciona: “Es el resultado de la interacción de aguas de origen natural con las sustancias minerales del yacimiento, instalaciones de proceso o que contienen residuos mineros (canchas de acopios, depósitos de estériles, embalses, afloramientos o alumbramientos de aguas mina y aguas de crecidas en depósitos de relave, entre otros). Estas condiciones producen acidificación y aumento de los contenidos de sólidos en suspensión, metales y sales en las aguas, respecto de su condición natural”.

El drenaje ácido de la mina son las aguas ácidas cargadas de metales pesados (hierro, cobre, manganeso, aluminio y otros) y sulfato que se forma en condiciones

naturales cuando el desmonte que contiene concentraciones de pirita es expuesto a la intemperie; ratificando lo indicado por Hanrahan en el 2012.

Botadero. Según Cavero sostiene que: “los botaderos son depósitos de rocas sin concentraciones de mineral de interés resultante de la explotación minera”.

Coagulación. En el 2011 Pérez y Urrea sostienen que: “La coagulación es un proceso de desestabilización y posterior agregación de partículas en suspensión coloidal presentes en las aguas tratadas, para potenciar la etapa de decantación o espesado en la que esas partículas deben separarse del agua”.

Desmonte. Schwarz en el 2013 sostiene que: “Es el material estéril o mineral de baja ley (ley de mineral que se encuentra por debajo del nivel económico de retorno Cut Off)”.

Drain down. Volumen drenado de agua de contacto (agua ácida).

DS 010-2010-MINAM. Es el decreto supremo realizado por el Ministerio del Ambiente que aprueba y controla los límites máximos permisibles para las descargas de los efluentes líquidos de la Actividad Minero-Metalúrgica.

Efluente Minero. Es la consecuencia del contacto del agua con el material estéril apilado en la desmontera, generando agua con cantidades significativas de metales pesados.

Salazar en el 2018 menciona que los procesos mineros-metalúrgicos generan diferentes tipos de efluentes en su operación como: aguas de relaves, drenajes ácidos de minas e infiltraciones, estos efluentes se caracterizan por un bajo pH y una alta acidez producto de las concentraciones de metales pesados y sulfatos.

En el Ministerio de Energía y Minas maneja el concepto de que el efluente minero es el resultado de la lixiviación de minerales sulfurados y metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas depositadas en las desmonteras cuando son

expuestas al aire y a la intemperie.

Floculación. Para Pérez y Urrea, “La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados decantadores”.

Lechada de Cal. “Es un fluido que está compuesto por una suspensión de hidróxido cálcico en agua, y puede producirse con diferentes porcentajes de sólidos y adaptarse a las necesidades propias de los procesos”, según lo indica INTICAL

LMP. El ministerio del Ambiente estableció que: “Los LMP son las medidas de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedidas causan o puede causar daño a la salud, al bienestar humano y al ambiente”.

NAG. El material estéril NAG, sin potencial de drenaje ácido de roca. (No generadora de acidez como lo menciona Díaz Riopa y otros en el 2019)

Neutralización. Es la reacción entre un ácido (agua ácida) y una base (solución de hidróxido de sodio), mediante el cual los compuestos químicos pierden sus propiedades ácidas o básicas.

PAG. El material estéril con potencial de drenaje ácido de roca (Posible generadora de acidez como lo menciona Díaz Riopa y otros en el 2019)

Sistema de tratamiento convencional. Estos sistemas de tratamiento logran mediante procesos secuenciales remover la carga metálica del agua ácida y permite cumplir con la normativa ambiental vigente. El sistema de tratamiento convencional es dividido en dos etapas. Cadorn y otro en el 2007 lo dividen en: “neutralización de agua ácida con una base (generalmente cal) y precipitación de los iones metálicos, en forma de hidróxidos seguido de espesamiento y/o filtración del lodo formado”.

1.7. Alcances y limitaciones

1.7.1. Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación se realizará en la compañía y será precedente para otras empresas del mismo rubro que busquen optimizar sus plantas de tratamiento con efluentes de buena calidad, procesos de fácil automatización, tecnología aprobada e implementada en gran cantidad de sitios mineros en todo el mundo y costos de neutralización más bajos.

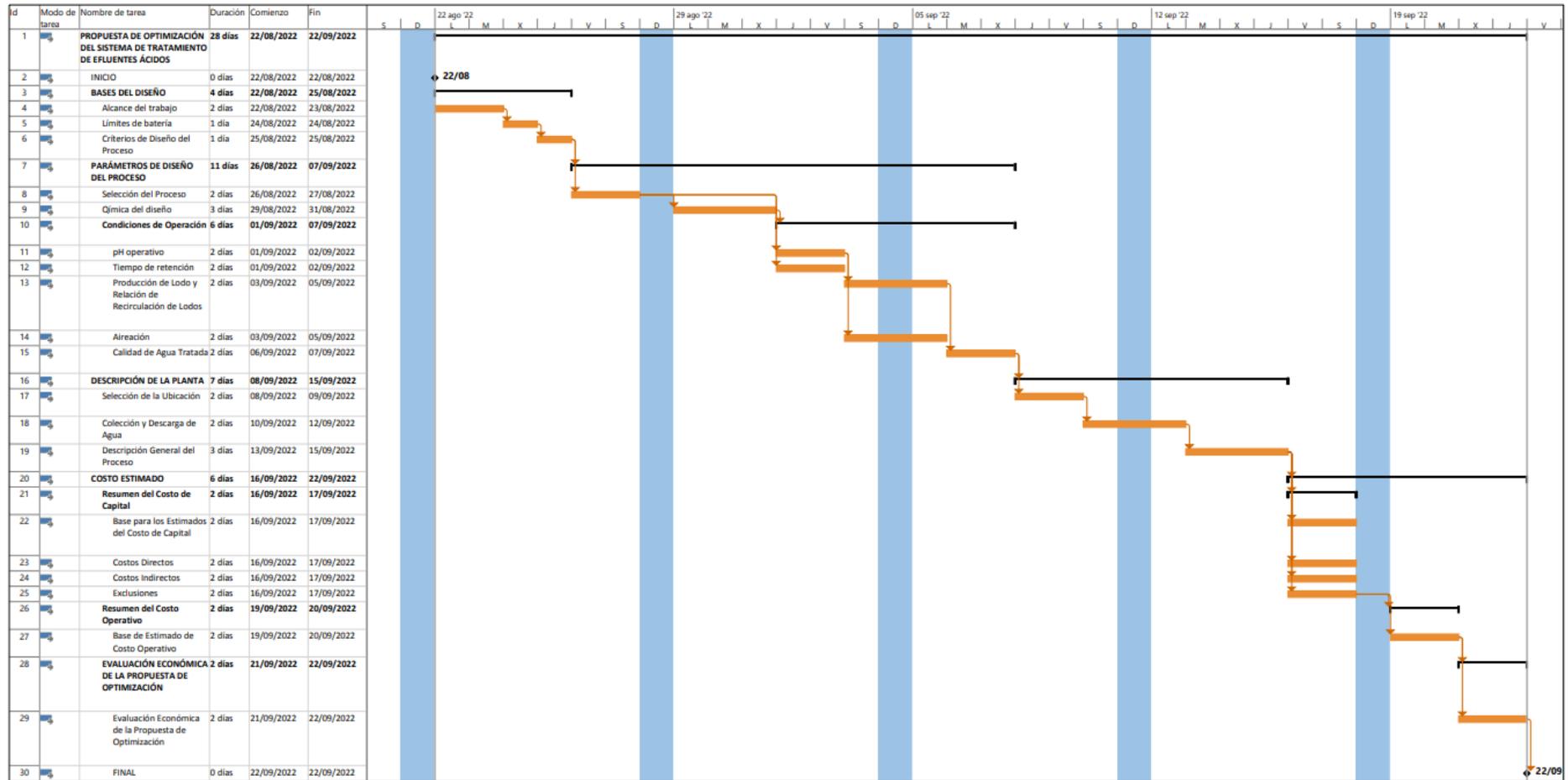
1.7.2. Limitación de la investigación

El proceso de optimización brinda la flexibilidad para lograr una calidad de agua tratada para un amplio rango de concentraciones metálicas a tratar, pero se ve limitado por el CAPEX (Costos capital, costos directos y costos indirectos), y los tiempos que demora la aprobación de los permisos por parte SENACE para la modificación del proceso operativo en el MEIA. La optimización del proceso también se limita siempre y cuando no exista control de los parámetros operáticos críticos de manera efectiva (pH operativo, tiempos de retención, aireación, tasa de recirculación de lodo).

1.8. Cronograma

Figura 1

Cronograma de actividad: Propuesta de Optimización de la Planta de Efluentes Ácidos.



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas de las variables y/o tópicos

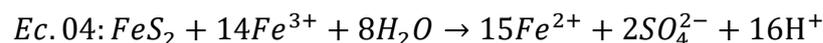
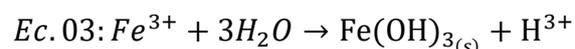
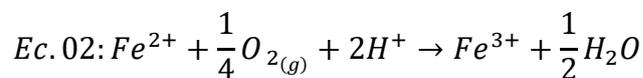
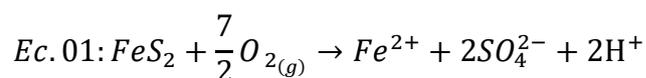
2.1.1. Drenaje Ácido de Mina (DAM)

El drenaje ácido de la mina como lo menciona Hanrahan en el 2012, es el agua ácida cargada de metales pesados (principalmente hierro) y sulfatos que se forma en ambientes naturales cuando los depósitos de desmonte que contienen pirita se exponen a la intemperie. Hurtado y Soto en el 2006, sostienen que, debido a la alta acidez y a la alta concentración de hierro, los drenajes ácidos de mina son de color rojizo.

2.1.1.1. Generación de aguas ácidas

La formación de las aguas ácidas de mina es el proceso de lixiviación de los metales pesados contenidos en el material estéril o desmonte (generalmente oxidación de la pirita), que se ve favorecida según López y otros debido a la facilidad con la que las aguas de lluvia y el aire entran en contacto con los sulfuros.

Nordstrom y Alpers mencionan que las reacciones que intervienen en la lixiviación de la pirita se pueden representar de la siguiente manera:



La reacción de lixiviación de la pirita provoca un incremento en el total de los sólidos disueltos y la acidez, que se asocia con la disminución del pH. Generalmente los Fe^{2+} se oxidarán a Fe^{3+} , debido al ambiente oxidante. Posteriormente según De la Cruz y

Coronel en el 2017 sostienen que, por encima de un pH de 3, los Fe^{3+} formados se precipitan mediante hidrólisis como hidróxido a medida que el pH continúa descendiendo.

Cinéticamente la lixiviación de la pirita en un principio es un proceso lento que termina con la formación de hidróxido de hierro. Posteriormente la capacidad neutralizadora del medio irá disminuyendo al igual que el pH. Esta condición contribuye a la aceleración significativa de la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} . En esta etapa es cuando la rápida oxidación de la pirita por acción del Fe^{3+} empieza a tener lugar a pH ácido, como lo describen López y otros en el 2002.

2.1.2. Proceso de precipitación con Cal – Lodos de Alta Densidad (HDS)

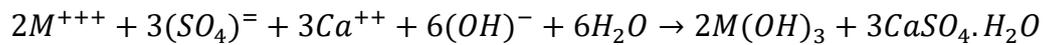
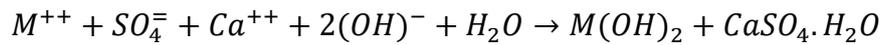
En el 2016, Espinosa y otros mencionan que cinco son las etapas que comprende el proceso de neutralización HDS: homogenización, neutralización, sedimentación, aireación y disposición de lodos.

Los consultores de ENVPHYS sostiene que la remoción eficiente del contenido metálico de las aguas ácidas de mina en una forma químicamente estable es principalmente el resultado de la formación de co-precipitados con hierro sobre las superficies de las partículas recirculadas de lodo. La estabilidad de los precipitados se ve influenciada directamente por la relación entre el hierro total y los metales totales en el agua a tratar.

En todos los casos, la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} es la reacción principal consumidora de oxígeno. Sin embargo, en el proceso HDS, se hace pasar aire a través del reactor para oxidación. El oxígeno transferido puede controlar la reacción e influenciar en las dimensiones de los equipos. El oxígeno transferido es el factor principal en el diseño del agitador, como lo aseguran los consultores de ENVPHYS.

La precipitación casi completa de los metales en forma de hidróxidos en el proceso

de neutralización se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:



Como se observa en las reacciones, los productos son precipitados en forma de hidróxidos de metales y sulfato de calcio. Si la concentración de sulfato en el agua a tratar es lo suficientemente alta, el sulfato de calcio superará su producto de solubilidad y precipitará formando parte del lodo. La presencia de sulfato de calcio incrementa la capacidad de taponamiento del lodo y es uno de los responsables del incremento de la estabilidad química del lodo. (ENVPHYS, 2022)

Las características principales del proceso HDS se pueden resumir en:

- La cal y el lodo recirculado se adicionan al tanque de mezclado de lodo-cal al inicio del proceso y esta mezcla se convierte en el agente neutralizante. Esta mezcla es descargada a un tanque de agitación rápida en donde se mezcla con el agua a tratar, logrando la neutralización.
- Esta mezcla es alimentada al reactor principal de cal, donde la combinación de aireación agresiva y agitación de alto corte asegura un rendimiento óptimo del proceso químico y mejora la eficiencia de la clarificación.
- La descarga de este tanque es tratada con floculantes en el tanque de floculación, y posteriormente pasa al clarificador.
- La función del clarificador es separar el efluente tratado del lodo, una parte del lodo generado es recirculado hacia el ingreso del proceso.

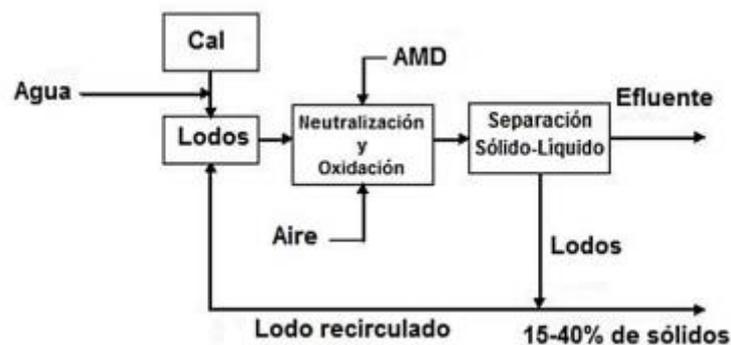
El proceso HDS es un proceso de tratamiento de aguas ácidas que maneja con parámetro operativo un pH en el rango de 9.0 a 9.6, rango donde la mayoría de metales pesados precipitan. La oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} ocurre rápidamente a este pH. El agente oxidante utilizado en el proceso es el oxígeno presente en el aire.

El proceso depende de la recirculación del lodo desde el efluente tratado y en la mayoría de plantas, esto se logra con un clarificador-espesador, que permite bombear el lodo generado.

La ventaja más importante del sistema HDS es la reducción sustancial del volumen de lodo generado por el incremento de su densidad. Un incremento de 5% de sólidos a 40% de sólidos es típico de los sistemas HDS. Este aumento reduce el volumen de lodo producido en 95%. (ENVPHYS, 2022)

Figura 2

Esquema de una Planta de Tratamiento HDS



Fuente: (Espinosa Rodríguez, Hidalgo Millán, & Delgado Delgado, 2016)

2.1.2.1. Condiciones de Operación

La base del proceso HDS es la adición de cal al lodo reciclado en un tanque de mezcla de cal/lodo en el ingreso del sistema de tratamiento, seguido de la reacción con la alimentación de agua ácida y la separación sólido/líquido en un clarificador antes de la recirculación del flujo de lodo. La mezcla de lodo y cal ayuda a convertir el lodo en un material denso y de libre drenaje con una viscosidad relativamente baja, lo que produce un lodo de mayor densidad. Los parámetros operativos que son extremadamente críticos para mantener las condiciones de lodo de alta densidad y lograr una alta eficiencia de remoción en el tratamiento incluye:

- pH operativo

- tiempo de retención
- relación de reciclaje de lodos
- aireación

Tabla 1

Criterios Operativos de Diseño de Planta HDS

| PARÁMETRO | VALOR | FUENTE |
|------------------------------|-----------------------|---|
| pH operativo | 9.6 | Experiencia |
| Tiempo de retención | 60 minutos | Experiencia |
| Relación de lodo recirculado | 0.5 – 1.5 (base seca) | Basada en la producción teórica de lodo |
| Aireación | 300 SCFM | Teórico |
| Producción de lodo | 22.9 g/L (diseño) | Teórico |

2.1.2.1.1. pH operativo

El pH es fundamental en la precipitación de metales pesados contenidas en las aguas ácidas en forma de hidróxidos. En base a la experiencia con efluentes que contienen concentraciones altas de Cadmio, Manganeseo y Zinc, se maneja un pH operativo de 9.6. A este valor de pH los metales de preocupación precipitan hasta bajas concentraciones.

2.1.2.1.2. Tiempo de retención

El tiempo de retención es fundamental para maximizar la dosificación del reactivo y proporcionar suficiente tiempo de reacción para completar la cinética de oxidación y precipitación. En base a la experiencia se ha determinado un tiempo de retención de 60 minutos para este tipo de calidad de agua. (ENVPHYS, 2022)

2.1.2.1.3. Producción de Lodo y relación de recirculación de lodos

La cantidad de lodos generados se determina en base a cálculos teóricos. Esta tasa se basa en la precipitación del hidróxido de metal asumiendo una eliminación del 98% e incluye un 13% de inertes como arenillas o cal sin reaccionar. La tasa de flujo de diseño se utiliza para dimensionar el equipo de purga y la recirculación de lodos, así como también para determinar los volúmenes anuales de lodos para su eliminación.

El lodo consistirá en el precipitado de hidróxido de metales y también puede estar presente algo de sulfato de calcio y carbonato de calcio, dependiendo de la concentración de sulfato en el agua a tratar. (ENVPHYS, 2022)

La recirculación de sólidos precipitados es fundamental en el proceso de HDS, específicamente en la maximización de la densidad. La cantidad de lodo que se puede reciclar tiene límites prácticos con respecto al volumen de alimentación entrante frente a la cantidad de lodo recirculado. Esta cantidad afecta significativamente en el tamaño del reactor, el tiempo de retención, el consumo de floculante y la densidad final del lodo. (ENVPHYS, 2022)

2.1.2.1.4. Aireación

Para producir lodos de alta densidad químicamente estables, es importante oxidar el hierro ferroso a hierro férrico. Esta reacción se da por acción del oxígeno presente en el aire y el pH debe ser mayor de 6. Teniendo en cuenta el pH del agua a tratar, se supone que el 60% del hierro estará presente como ion ferroso y requerirá oxígeno para su oxidación. Para determinar el requerimiento de oxígeno disuelto, en base a la experiencia se presume una eficiencia de transferencia de 15%. (ENVPHYS, 2022)

2.1.2.2. Calidad de agua tratada

El tratamiento de agua ácidas con el sistema de precipitación con cal que utiliza el proceso HDS, es muy confiable. El proceso es robusto y brinda flexibilidad para lograr

la calidad del agua tratada para un amplio rango de concentraciones, siempre que los parámetros operativos críticos se controlen, específicamente el pH, el tiempo de retención, la aireación y la tasa de recirculación de lodos. El proceso HDS está gobernado por este conjunto de parámetros operativos, que deben ser controlados de manera efectiva, de esta manera se puede lograr un rendimiento de tratamiento confiable y tener la capacidad de cumplir con los objetivos de descarga de manera consistente y cumpliendo la normativa ambiental vigente. (ENVPHYS, 2022)

2.1.3. Marco legal

En esta sección se hace un resumen del marco normativo aplicable a los pasivos mineros-metalúrgicos, con la finalidad de regular las obligaciones y responsabilidades que se deben de cumplir frente a la remediación ambiental y los sistemas de tratamiento de aguas de contacto.

2.1.3.1. Decreto Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos

Artículo 79°.- Vertimiento de agua residual

“La Autoridad Nacional es quien autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y los Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización”.

“En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua,

que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas”.

“Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado, como lo sostiene la Autoridad Nacional del Agua”.

Artículo 80°.- Autorización de vertimiento

“Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos respecto de las emisiones: someter los residuos a los necesarios tratamientos previos y comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación”.

“La Autoridad Nacional del Agua menciona que la autorización de vertimiento se otorga por un plazo determinado y prorrogable, de acuerdo con la duración de la actividad principal en la que se usa el agua y está sujeta a lo establecido en la Ley y en el Reglamento”.

2.1.3.2. Decreto Ley N° 28611, Ley General del Ambiente

Artículo 30°. - De los planes de descontaminación y el tratamiento de pasivos ambientales

“Los planes de descontaminación y de tratamiento de pasivos ambientales están dirigidos a remediar impactos ambientales originados por uno o varios proyectos de inversión o actividades, pasados o presentes. El Plan debe considerar su financiamiento y las responsabilidades que correspondan a los

titulares de las actividades contaminantes, incluyendo la compensación por los daños generados, bajo el principio de responsabilidad ambiental”.

“Las entidades con competencias ambientales promueven y establecen planes de descontaminación y recuperación de ambientes degradados. La Autoridad Ambiental Nacional establece los criterios para la elaboración de dichos planes”.

“La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con la Autoridad de Salud, puede proponer al Poder Ejecutivo el establecimiento y regulación de un sistema de derechos especiales que permita restringir las emisiones globales al nivel de las normas de calidad ambiental. El referido sistema debe tener en cuenta: a) Los tipos de fuentes de emisiones existentes; b) Los contaminantes específicos; c) Los instrumentos y medios de asignación de cuotas; d) Las medidas de monitoreo; y e) La fiscalización del sistema y las sanciones que correspondan”.

Artículo 31°. - Del Estándar de Calidad Ambiental

“El Estándar de Calidad Ambiental – ECA, es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos”.

Artículo 32°. - Del Límite Máximo Permisible

“El Límite Máximo Permisible – LMP, es la medida de la concentración o del 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. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro

en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos”.

“El LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los ECA. La implementación de estos instrumentos debe asegurar que no se exceda la capacidad de carga de los ecosistemas, de acuerdo con las normas sobre la materia”.

Artículo 117°. - Del control de emisiones

“El control de las emisiones se realiza a través de los LMP y demás instrumentos de gestión ambiental establecidos por las autoridades competentes”.

“La infracción de los LMP es sancionada de acuerdo con las normas correspondientes a cada autoridad sectorial competente”.

Artículo 120°. - De la protección de la calidad de las aguas

“El Estado, a través de las entidades señaladas en la Ley, está a cargo de la protección de la calidad del recurso hídrico del país”.

“El Estado promueve el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización, considerando como premisa la obtención de la calidad necesaria para su reúso, sin afectar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizarán”.

Artículo 121°. - Del vertimiento de aguas residuales

“El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido

en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes”.

Artículo 122°. - Del tratamiento de residuos líquidos

“Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia”.

2.1.3.3. Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas

El Decreto Supremo N°010-2010-MINAM se aplica a todas las actividades minero-metalúrgicas que se desarrollen dentro de todo el territorio nacional.

Artículo 4°. – Cumplimiento de los LMP y plazo de adecuación

“El cumplimiento de los LMP que se aprueban por el presente dispositivo es de exigencia inmediata para las actividades minero-metalúrgicas en el territorio nacional cuyos estudios ambientales sean presentados con posterioridad a la fecha de la vigencia del presente Decreto Supremo”.

Tabla 2

Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividad Minera – Metalúrgicos

| Parámetro | Unidad | Límite en cualquier | Límite para el |
|------------------|---------------|----------------------------|-----------------------|
|------------------|---------------|----------------------------|-----------------------|

| | | momento | promedio anual |
|-----------------------|------|----------------|-----------------------|
| pH | mg/L | 6-9 | 6-9 |
| SST | 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 |
| Zinc total | mg/L | 1.5 | 1.2 |

Fuente: Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2022)

2.1.3.4. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen Disposiciones Complementarias

Artículo 5°: Los Estándares de Calidad Ambiental para agua como referente obligatorio

“Los parámetros de los ECA para agua que se aplican como referente obligatorio en el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, se determinan considerando las siguientes variables, según corresponda: a) Los parámetros asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o la actividad productiva, extractiva o de servicios y d) El efecto de otras descargas en la zona, tomando en consideración los impactos ambientales acumulativos y sinérgicos que se presenten aguas arriba y aguas abajo de la descarga del efluente, y que influyan en el estado actual de la calidad ambiental

de los cuerpos naturales de agua donde se realiza la actividad”.

Artículo 7°: Verificación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua fuera de la zona de mezcla

“En cuerpos naturales de agua donde se vierten las aguas tratadas, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla, entendida esta zona como aquella que contiene el volumen de agua en el cuerpo receptor donde se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y dispersión, sin considerar otros factores como el decaimiento bacteriano, sedimentación, asimilación en materia orgánica y precipitación química”.

2.2. Análisis comparativo de las bases teóricas

2.2.1. Sistemas de tratamiento del drenaje ácido de mina

El tratamiento del drenaje ácido de mina se realiza con la finalidad de neutralizar la acidez, precipitando los metales pesados acorde a los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental y posteriormente poder descargar el efluente tratado al ambiente. (ENVPHYS, 2022)

Los procesos de tratamiento convencional requieren de operación continua, con dosificación de reactivos y mano de obra, tratan volúmenes altos, tiene un costo US\$/m³, requiere de control y mantenimiento periódico. Además de un manejo adecuado del lodo generado. Dentro de estos procesos podemos mencionar los siguiente:

- Precipitación con Cal (tipo Densadag). Es un sistema que usa cal hidratada. Produce un alto volumen de lodo con un 3% de sólidos.
- Precipitación con Cal – Lodos de Alta Densidad (HDS). Es un sistema que usa cal hidratada. El proceso utiliza el reciclaje de lodos, mejorando la

densidad y reduciendo el volumen de lodo con un elevado porcentaje de sólidos.

- Precipitación caustica. No es el proceso más rentable, produce un bajo volumen de lodo difícil de floccular y disponer.
- Intercambio iónico. Es un proceso que involucra un alto costo operativo y la necesidad de mano de obra debidamente capacitado.
- Ósmosis inversa. Es un proceso que involucra un alto costo operativo y la necesidad de mano de obra debidamente capacitado.

En el 2002, López y otros menciona que los métodos más usados en el tratamiento de aguas ácidas son: neutralización-precipitación, intercambio iónico, osmosis inversa, entre otros. El tratamiento que los especialistas consideran que tiene más aceptación y rentabilidad es el de neutralización-precipitación y eliminación de metales al agregar productos neutralizantes como la cal viva (CaO), cal apagada Ca (OH)₂, entre demás bases. Este método de neutralización-precipitación tiene dos variaciones que se basan en la densidad del lodo generado, estos métodos se diferencian en: un proceso de lodos de baja densidad, caracterizado por una densidad final que varía de 4 a 15 % de sólidos y el sistema de lodos de alta densidad (HDS) que presenta una densidad final que varía de 15 y 30 % de sólidos.

2.3. Análisis crítico de las bases teóricas

El proceso de precipitación con cal usando la tecnología de Lodos de Alta Densidad HDS, presenta muchas ventajas sobre otros sistemas de precipitación. La reducción del volumen de lodo y la mayor densidad involucra un incremento en la estabilidad del mismo, tanto física como química. En pocos días el lodo puede drenar hasta alcanzar un 65% de sólidos, al punto de que se puede manipular con equipos pesados. Químicamente el lodo ha demostrado excelentes características de estabilidad en

diferentes países donde se aplica esta tecnología. El seguimiento ambiental de depósitos de lodos por más de 25 años no ha demostrado evidencias de redisolución de metales y tampoco se ha identificado contaminación en el agua subterránea del área. Otras ventajas del proceso HDS que lo diferencia ampliamente de los demás sistemas de tratamiento incluyen: efluentes tratados de buena calidad, procesos fácilmente automatizables, tecnología probada, reducción de los inventarios de repuestos y costos de neutralización más bajos.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se busca optimizar el sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la Compañía Minera La Arena S.A. usando la tecnología de los Lodos de Alta Densidad HDS, para asegurar el cumplimiento de los LMP en los puntos de vertimiento (D.S. 010-2010-MINAM), minimizar la generación de una problemática ambiental futura y reducir los posibles conflictos sociales con las comunidades de influencia en el mediano plazo.

CAPITULO III: MARCO REFERENCIAL

3.1. Reseña histórica

La Compañía Minera La Arena S.A., luego de una campaña de exploraciones mediante taladros y trincheras realizadas en sus concesiones ubicadas en el distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, región de La Libertad, encontró yacimientos que le han permitido establecer reservas para producir barras metálicas tipo doré por más de 12 años continuos de operación de manera sostenible.

Geográficamente La Arena se emplaza en la vertiente oriental de la cordillera Occidental de los Andes Centrales, en el margen izquierdo del río Yamobamba. Su altitud varía entre los 3100 a 3700 m.s.n.m. Estas condiciones propician que haya precipitaciones pluviales durante los meses de Octubre a Marzo, que son captadas en el Botadero y terminan drenando como agua ácida en los subdrenajes.

La Compañía Minera desde el inicio de sus operaciones a mediados del 2013 optó por la neutralización con hidróxido de sodio como método de tratamiento de sus efluentes ácidos en un sistema de tratamiento no convencional basado en agitaciones rápidas y lentas, y una batería de pozas de sedimentación. Con esta infraestructura la Compañía Minera viene cumpliendo con los LMP en sus puntos de vertimiento, pero a un elevado costo de operación, que año a año se sigue incrementando.

Actualmente, la compañía está buscando optimizar el sistema de tratamiento de sus efluentes ácidos no convencional basado en una batería de pozas de sedimentación, con la finalidad de minimizar la generación de una problemática ambiental futura y reducir los posibles conflictos sociales con las comunidades de influencia en el mediano plazo. (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.2. Filosofía organizacional

La filosofía organizacional de la Compañía Minera La Arena S.A., se basa en ser una empresa minera comprometida en alcanzar un alto desempeño en la Gestión Integrada de Seguridad, Salud y Medio Ambiente, durante el desarrollo de sus actividades de exploración, explotación y cierre de minas en el Perú. La compañía se preocupa por tener claro las metas para poder obtener resultados positivos al momento de adquirir nuevos equipos tecnológicos, debido a que de esta forma se establece cual es la finalidad de la adquisición y la importancia de estos. Con ello se verificará si se puede realizar la propuesta de mejora, verificando los objetivos y la visión que tiene la Compañía. (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.2.1. Misión

Según la información del sitio web de la Compañía Minera La Arena S.A., su misión es: “Somos un grupo minero peruano que produce concentrados de plomo, cobre y zinc con altos contenidos de plata; comprometido a proteger el Ambiente, la Seguridad y Salud de todas las personas que trabajan en nombre o para la organización, brindando a nuestros inversionistas el mejor vehículo para aprovechar mejores precios de la plata en el mercado” (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.2.2. Visión

Según la información del sitio web de la Compañía Minera La Arena S.A., su visión es: “Ser el productor preeminente de plata en el Perú con una reputación de excelencia en el descubrimiento, la ingeniería, la innovación y el desarrollo sostenible” (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.2.3. Valores

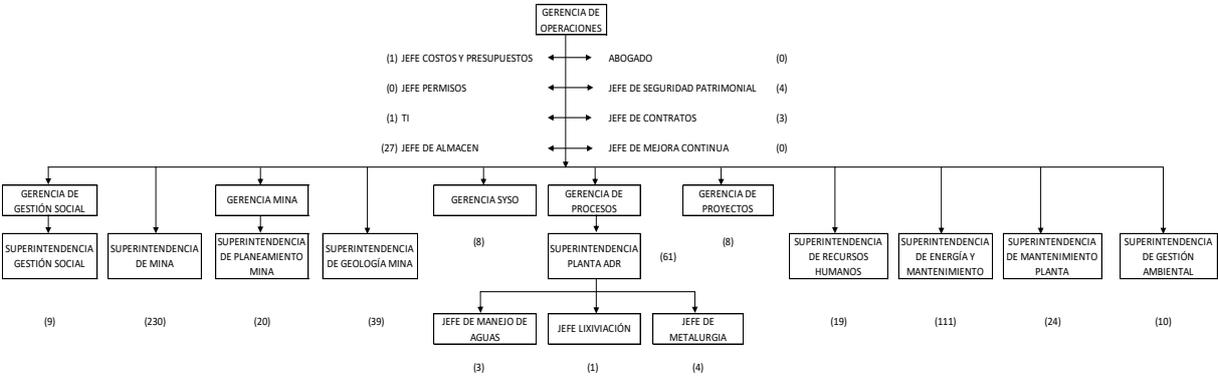
Según la información del sitio web de la Compañía Minera La Arena S.A., sus principales valores son:

- **Ética:** Operar nuestros negocios sin favoritismo, miedo, coacción, discriminación o acoso.
- **Honestidad:** Proveer información completa, correcta, exacta, oportuna y comprensible, a todos los organismos reguladores competentes, así como a los accionistas y a los empleados.
- **Integridad:** Operar de manera ética y responsable, cumpliendo con todas las leyes, normas y regulaciones aplicables.
- **Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente:** Proporcionar un lugar de trabajo seguro y saludable para todos nuestros empleados y contratistas.

3.3. Diseño organizacional

Según la información del sitio web de la Compañía Minera La Arena S.A., su diseño organizacional se representa:

Figura 3
Diseño organizacional Compañía Minera La Arena S.A.



Fuente: (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.4. Productos y/o servicios

Los productos que brinda la compañía minera La Arena S.A. son principalmente barras metálicas de tipo doré con contenido de Au y Ag. Hasta la actualidad la Compañía ha producido 105.4 KOz Au. (Compañía Minera La Arena S.A., 2022)

3.5. Diagnóstico organizacional

Para entender a la Compañía Minera La Arena S.A., se ha realizado un diagnóstico de acuerdo a las características de la compañía.

3.5.1. Matriz FODA

3.5.1.1. Fortalezas

- El personal tanto empleados y colaboradores tienen las actitudes y aptitudes para realizar todas las actividades operativas.
- Compromiso con el cuidado y protección del Medio Ambiente; y la Seguridad y Salud de todos sus colaboradores.
- Disponibilidad de recursos para la construcción de una Planta HDS para el tratamiento de las aguas ácidas a un menor costo de tratamiento.

3.5.1.2. Oportunidades

- Da facultades para aprender e involucrarse a sus empleados y colaboradores en la optimización de sus procesos.
- Reducción significativa de los costos de tratamiento de las aguas ácidas generadas en su botadero.
- Fortalecimiento de las relaciones sociales-económicas con las comunidades de influencia de la compañía.
- Disponibilidad en el mercado de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas ácidas de menor costo.

3.5.1.3. Debilidades

- Cuenta con Plantas de Tratamiento de Aguas Ácidas no convencionales y que tienen un costo muy elevado de operación.
- Usa Soda Caustica como reactivo neutralizante en sus procesos de tratamiento de aguas ácidas.

3.5.1.4. Amenazas

- Las Plantas de tratamiento de aguas ácidas están al máximo de sus capacidades y podría ser insostenible en los siguientes periodos de lluvias.
- Restricción de área en el botadero para encapsular el lodo generado por el sistema de tratamiento con soda caustica.
- La falta de tecnología adecuadas de tratamiento puede afectar el cumplimiento de los LMP en los puntos de vertimiento que tiene autorizado la Compañía.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1. Diagnóstico

El diagnóstico actual de la compañía minera La Arena S.A. tiene un panorama preocupante debido a que la gestión y manejo de las aguas ácidas generadas en el botadero se tratan en dos circuitos de tratamiento no convencionales que consiste en serpentines con una batería de pozas de sedimentación. Con el avance del minado se está apilando en el botadero mayores cantidades de material PAG, generando una mayor área de material potencialmente generador de acidez, que al entrar en contacto con las lluvias propias de la zona serán lixiviados y se tendrá un drenaje con una calidad de agua ácida de elevados contenidos metálicos. Actualmente, el circuito de efluentes en menos de 5 años ha elevado su ratio de consumo de soda caustica en más de 600% de 1.5 Kg/m³ a 9.5 Kg/m³ de agua tratada y si se realizase el tratamiento con cal el consumo actual sería de 10.15 Kg/m³ de agua tratada. Este ratio de consumo de reactivos se prevé que vaya aumentando paulatinamente.

Los costos operativos del tratamiento de efluentes solo para reactivos según el sistema de tratamiento actual son de 13.8 US\$/m³ y según pruebas de laboratorio la Planta HDS propuesta tendría un costo de 1.64 US\$/m³, lo que significa una reducción del costo de tratamiento de 88%.

4.2. Presentación de resultados

El actual sistema de tratamiento de los efluentes de la compañía minera La Arena S.A. no tiene la capacidad de tratar el 100% de estos, la capacidad máxima de tratamiento de este circuito es de 25 l/s y el drain down de este efluente superará los 45 l/s. La escasez de soda caustica en el mercado y su elevado costo son factores que contribuyen a optar por un sistema HDS, utilizando cal. De las pruebas realizadas

a nivel laboratorio se ha determinado que esta solución ácida requiere 10.15 Kg Cal/m³ de agua tratada y 9.5 Kg Soda/m³ de agua tratada.

Tabla 3

Cuadro comparativo de ahorro en el tratamiento de los efluentes.

| Unidades | Enero | Febrero | Marzo | Abril | ... | Setiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----|-----------|---------|-----------|-----------|
| Flujo (l/s) | 20 | 20 | 20 | 20 | ... | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Volumen (m ³ /mes) | 53,568 | 48,384 | 53,568 | 51,840 | ... | 51,840 | 53,568 | 51,840 | 53,568 |
| Ratio (Kg Soda/m ³) | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | ... | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 |
| Ratio (Kg Cal/m ³) | 10.15 | 10.15 | 10.15 | 10.15 | ... | 10.15 | 10.15 | 10.15 | 10.15 |
| Costo Soda (US\$/mes) | 737,899 | 666,490 | 737,899 | 714,096 | ... | 714,096 | 737,899 | 714,096 | 737,899 |
| Costo Cal (US\$/mes) | 54,372 | 49,110 | 54,372 | 52,618 | ... | 52,618 | 54,372 | 52,618 | 54,372 |
| %Reducción Costo | 93% | 93% | 93% | 93% | ... | 93% | 93% | 93% | 93% |

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 3, se observa que cambiar la soda por la cal en el proceso de tratamiento de los efluentes de la compañía minera conllevaría a una reducción significativa de 93% en el costo de tratamiento.

4.3. Diseño de la Propuesta de Mejora

La base del diseño de la Planta HDS, se basan en el caudal de diseño de 108 m³/h con un tiempo de retención de 60 minutos para la eliminación de metales pesados. Este tiempo de retención proporciona la maximización de los reactivos y permite mantener una tasa de tratamiento de 40 l/s por uno o dos días.

Tabla 4

Criterios de diseño de la Planta HDS

| Parámetros | Valor |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Flujo de diseño | 108 m ³ /h (30 l/s) |
| Flujo promedio | 72 m ³ /h (20 l/s) |
| Capacidad hidráulica | 144 m ³ /h (40 l/s) |
| Diseño de proceso y eficiencia | Diseñado para remover metales pesados |
| Tiempo de retención de diseño | 60 minutos |
| Vida de la Planta | 30 años |

| | |
|--|--|
| Repuestos instalados Automatización y control | Equipos críticos donde sea práctico Control de pH para automatizar el proceso |
|--|--|

4.4. Mecanismos de Control para las actividades de mejora propuestas

Los parámetros operativos que son extremadamente críticos para mantener las condiciones de lodo de alta densidad y lograr una alta eficiencia de tratamiento incluye: pH operativo, tiempo de retención, relación de reciclaje de lodos y aireación.

El rango seleccionado para cada parámetro se observa en la tabla 4.

Tabla 5

Criterios operativos de diseño de la Planta HDS

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|-----------------------|
| pH operativo | 9.6 |
| Tiempo de retención | 60 minutos |
| Relación de lodo recirculado | 0.5 – 1.5 (Base seca) |
| Aireación | 300 SCFM |
| Producción de lodo | 22.9 g/l (Diseño) |

4.5. Evaluación Económica

4.5.1. Resumen del Costo de Capital

El costo estimado de implementar una planta HDS para tratar un caudal de diseño de 30 l/s, es de \$2 983 979. Este monto cubre los costos de campo directos de la ejecución del proyecto, más los costos indirectos asociados con el diseño, la construcción y la puesta en marcha, sin incluir la preparación del área, los estanques, el bombeo y las tuberías de afluentes.

Tabla 6

Resumen de los Costos de Capital

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Abastecimiento de equipos de proceso | \$ 1,879,925.00 |
| Tuberías | \$ 300,000.00 |

| | |
|-----------------------------|------------------------|
| Plataforma y soportes | \$ 206,792.00 |
| Eléctrico | \$ 338,387.00 |
| Instrumentación | \$ 258,875.00 |
| Sub Total de Equipos | \$ 2,983,979.00 |

| | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Poza de sedimentación | No incluido |
| Preparación del sitio & obras civiles | No incluido |
| Instalación de equipos | \$ 722,650.00 |
| Costos Directos Totales | \$ 3,706,629.00 |

Costos Indirectos

| | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Abastecimiento de reactivos (Inicio) | \$ 15,000.00 | |
| Costos propietarios | - | 2,0% de costos directos |
| Transporte de equipos | \$ 282,000.00 | 15,0% de abastecimiento de equipos |
| Repuestos | \$ 132,000.00 | 7,0% de abastecimiento de equipos |
| Comisionamiento y arranque | \$ 66,575.00 | Estimado 2 semanas de entrenamiento |
| Permisos y tasas | No incluido | |
| Ingeniería de detalle | \$ 367,500.00 | 3500 horas |
| gestión de construcción | \$ 222,000.00 | 6,0% de costos directos |
| Sub Total de Costos Indirectos | \$ 1,085,075.00 | |

| | |
|--------------|------------------------|
| TOTAL | \$ 4,791,704.00 |
|--------------|------------------------|

La estimación está realizada como un nivel preliminar con una precisión esperada de $\pm 35\%$.

4.5.2. Resumen de Costo Operativo

Tabla 7

Resumen de los Costos de Operación

| Reactivos | Tasa Kg/m ³ | Flujo promedio anual de la planta m ³ /h | Costo Anual de Reactivo (t/a) | Costo Unitarios del Reactivo (USD/t) | Costo Anual del Reactivo (USD/a) |
|-------------------|--|---|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Cal hidratada | 10.15 | 108 | 9602.7 | \$140.00 | \$1,344,379.68 |
| Floculante | 0.005 | 108 | 4.7 | \$5,500.00 | \$26,017.20 |
| Sub-total: | | | | | \$1,370,396.88 |
| Item | Consumo Anual | | Costo Unitario USD | Costo Anual (USD/y) | |
| Utilities | | | | | |
| Energía Eléctrica | 198 HP (@65% Utilización) 2305 KW-h/d (@85% Eficiencia) | | \$0.22 | \$217,762.00 | |

| Operación & Mantenimiento | | | |
|--|--|-----------------------|------------------------------|
| Mantenimiento | 15 h/semana para mantenimiento mecánico 15 h/semana para instrumentos | 50 USD/h | \$78,000.00 |
| Personal | | | |
| Supervisor Operadores | 1 Supervisor, 8 h/d, 5 d/semana 2 Operadores, 12 h/d, 7 d/semana | 555 USD/h 40 USD/h | \$114,400.00 \$349,440.00 |
| Capital Operativo & Mantenimiento | | | |
| Mantenimiento operativo y análisis | 15% del personal operativo 2% de costo de capital | | \$69,576.00 \$59,695.00 |
| Subtotal | | | \$ 878,873.00 |
| Costo Directo Operativo Anual: \$ 2 259 270 por año | | | |

4.5.3. Presupuesto

Para implementar la Planta HDS propuesta, se requiere considerar:

Tabla 8

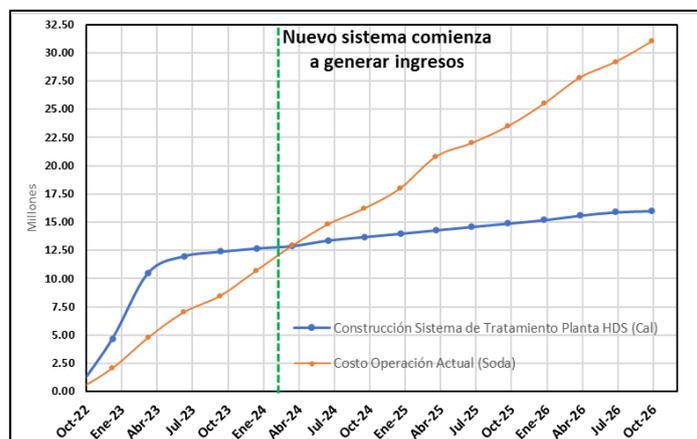
Resumen de los gastos CAPEX para implementar la planta HDS

| | |
|--|------------------------|
| Costos directos | \$ 3,706,629.00 |
| Costos indirectos (Incluye la ingeniería de detalle) | \$ 1,085,075.00 |
| Sistema Filtración – Decanter | \$ 300,000.00 |
| Contingencia 20% | \$ 1,008,340.00 |
| Monto total del Proyecto | \$ 6,100,044.00 |

4.5.4. Análisis económico de la implementación

Figura 4

Comparación del escenario de tratamiento con soda y con cal



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Análisis económico de la implementación de la Planta HDS

| Escenario N°2- Egresos (Q) | Implementación | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Q4-22 | Q1-23 | Q2-23 | Q3-23 | Q4-23 | Q1-24 | Q2-24 | Q3-24 | Q4-24 | Q1-25 | Q2-25 | Q3-25 | Q4-25 | Q1-26 | Q2-26 | Q3-26 | Q4-26 |
| Costo Construcción (USD) | 2,745,020 | 3,355,024 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Costo Reactivos - Cal (USD \$/mes) | - | - | 119,705 | 96,816 | 112,865 | 129,853 | 99,355 | 80,358 | 93,678 | 126,724 | 96,961 | 78,421 | 91,420 | 120,466 | 92,173 | 74,549 | 86,906 |
| Costo Energía (USD\$) | - | - | 55,500 | 55,500 | 55,500 | 55,500 | 55,500 | 55,500 | 55,500 | 44,955 | 44,955 | 44,955 | 44,955 | 42,735 | 42,735 | 42,735 | 40,028 |
| Costo Mantto (USD\$) | - | - | - | 0 | 39,000 | - | 39,000 | - | 39,000 | - | 39,000 | - | 39,000 | - | 39,000 | - | 39,000 |
| Costo Mov de Lodos (USD \$/mes) | - | - | 66,000 | 54,000 | 75,000 | 74,700 | 54,780 | 44,820 | 62,250 | 72,900 | 53,460 | 43,740 | 60,750 | 69,300 | 50,820 | 41,580 | 57,750 |
| Costo Transporte Cal a Mina | - | - | 77,808 | 62,931 | 73,362 | 101,692 | 77,808 | 62,931 | 73,362 | 101,692 | 77,808 | 62,931 | 73,362 | 101,692 | 77,808 | 62,931 | 73,362 |
| *Costo Op con Soda 2022-2023 | 1,962,774 | 2,702,824 | 936,640 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Flujo (USD) | 4,707,794 | 6,057,848 | 1,255,653 | 269,247 | 355,727 | 361,745 | 326,443 | 243,609 | 323,790 | 346,271 | 312,184 | 230,047 | 309,487 | 334,193 | 302,536 | 221,795 | 297,046 |
| Flujo Acumulado (USD) | 4,707,794 | 10,765,642 | 12,021,295 | 12,290,542 | 12,646,269 | 13,008,014 | 13,334,457 | 13,578,066 | 13,901,856 | 14,248,127 | 14,560,311 | 14,790,358 | 15,099,845 | 15,434,038 | 15,736,574 | 15,958,369 | 16,255,415 |
| Escenario N°1 Vs Escenario N°2 | Q4-22 | Q1-23 | Q2-23 | Q3-23 | Q4-23 | Q1-24 | Q2-24 | Q3-24 | Q4-24 | Q1-25 | Q2-25 | Q3-25 | Q4-25 | Q1-26 | Q2-26 | Q3-26 | Q4-26 |
| Ahorro x Quarter | -2,745,020 | -3,355,024 | 80,440 | 1,403,662 | 1,607,047 | 1,964,827 | 1,452,254 | 1,196,751 | 1,365,839 | 1,936,036 | 1,432,701 | 1,182,954 | 1,348,007 | 1,859,584 | 1,374,727 | 1,136,489 | 1,296,179 |
| Ahorro Acumulado | -2,745,020 | -6,100,044 | -5,289,604 | -3,885,942 | -2,278,895 | -314,068 | 1,138,186 | 2,334,937 | 3,700,776 | 5,636,812 | 7,069,513 | 8,252,467 | 9,600,474 | 11,460,058 | 12,834,785 | 13,971,274 | 15,267,453 |
| VPN (5%) | 15,560,868 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VPN (10%) | 14,937,629 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VPN (15%) | 14,375,993 | | | | | | | | | | | | | | | | |

CAPITULO V: SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

- Se debe considerar un plan de tratamiento de agua a largo plazo para poder diseñar una planta de tratamiento de aguas ácidas, pensando en el cierre de la mina.
- Se recomienda llevar a cabo medidas de mitigación como la instalación de sistema raincoat para reducir el flujo del drain down del efluente y reducir las concentraciones de metales en el efluente.
- Se recomienda la combinación de las dos fuentes de aguas ácidas generadas por la compañía antes del tratamiento, debido a que permitirá mejorar la eficiencia del tratamiento y será una opción más rentable.
- La implementación de una planta de lodos de alta densidad HDS, es la opción más viable debido a que produce lodos de mayor densidad y menor volumen (reduce las áreas requeridas para encapsular el lodo generado); menor costo operativo; fácilmente automatizable.

CONCLUSIONES

Se concluye que los 6.1 millones de dólares de inversión del sistema de tratamiento – Planta HDS - propuesto para optimizar el tratamiento de efluentes de la compañía minera La Arena S.A., se podrá recuperar en el segundo trimestre del 2024, es decir 1 año posterior a la implementación debido a que se reducirá en un 88% el costo de tratamiento de 13.8 US\$/m³ a 1.64 US\$/m³.

Se concluye que el sistema de tratamiento actual de la compañía con soda caustica no es un proceso rentable debido que el costo de tratamiento se incrementará significativamente año a año en un 100% por la variación propia de la calidad de agua ácida y la generación de lodo restringirá aún más este proceso de tratamiento debido a que se necesitará extensiones de área para almacenarlos debido a su baja densidad y difícil disposición.

Se concluye que la implementación de la planta HDS mejorará ampliamente el diagnóstico de la compañía en la gestión y manejo de efluentes debido a que permitirá tratar mayores volúmenes de solución, asegurando la calidad y cumpliendo con los LMPs en los puntos de vertimiento.

Se concluye que la implementación de la planta HDS fortalecerá las relaciones sociales y económicas, debido a que la materia prima (óxido de calcio) se podrá adquirir de los proveedores locales, teniendo una inversión aproximada de 2.6 millones de dólares.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Luyo, K. A. (2015). *Tratamiento de aguas ácidas de drenaje de mina con alto contenido de aluminio y manganeso por tecnología de lodos de alta densidad (HDS)*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Adurive, O. (2006). *Drenaje ácido de mina - Generación y tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, Madrid, España. Recuperado el 02 de 08 de 2022, de http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- Ahumada Melendez, J. L., & Benites Horna, R. M. (2019). *Diseño de una planta de tratamiento de agua ácida, para los drenajes ácidos de mina en el distrito de Huamachuco, Provincia de Sánchez Carrión*. Universidad César Vallejo, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Trujillo - La Libertad.
- Autoridad Nacional del Agua. (25 de 09 de 2022). *Ley de Recursos Hídricos, LEY N° 29388*. Obtenido de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/ley_29338_0_2.pdf
- Baca Sanchez, K. S. (2020). *Diseño y evaluación del sistema de tratamiento piloto para el efluente líquido de la mina Nueva Esperanza-Nivel 2, Cajamarca 2020*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/23994>
- Cadorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (2007). Advances in the Acid Mine Drainage Treatment. *Scientia et Technica Año XIII*(36), 6. Recuperado el 01 de 08 de 2022, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4799403.pdf>
- Cavero, M. (2013). Diseño de sistema de coberturas para botaderos mineros. *Gestión sostenible del agua*. Recuperado el 24 de 07 de 2022, de <https://gidahatari.com/ihes/disenosistema-coberturas-botaderos-mineros#:~:text=Los%20botaderos%20mineros%20son%20dep%C3%B3sitos,resultante%20de%20la%20explotaci%C3%B3n%20minera>
- Compañía Minera La Arena S.A. (2022). *Objetivos y Plan Estratégico*. Huamachuco - La Libertad.
- Cruz Perea, P. (2015). *Diseño y modelamiento de una planta de tratamiento de aguas en la unidad minera Iscaycruz-Oyon*. Cerro de Pasco.
- De la Cruz García, C. J., & Coronel Zárate, H. G. (Octubre de 2017). *Estudio de optimización del sistema de tratamiento de las aguas ácidas de un efluente minero*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Ingeniería química, Lima-Perú. Obtenido de https://www.academia.edu/35959352/Estudio_de_optimizaci%C3%B3n_del_sistema_de_tratamiento_de_las_aguas_%C3%A1cidas_de_un_efluente_minero_Tesis_para_optar_el_T%C3%ADtulo_Profesional_de_Ingeniero_Qu%C3%ADmico
- Díaz Riopa, F., Amorrortu Barreda, J., Penedo Ferreira, C., Núñez Fernández, P., García Álvarez, J. R., & Caballos, J. (2019). Manejo selectivo de los estériles de mina. *Actualidad Tecnológica*, 6. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7401430.pdf>
- ENVPHYS. (2022). *Diseño Conceptual de la Planta de Tratamiento de Aguas*. Lima-Perú.
- Espinosa Rodríguez, M., Hidalgo Millán, A., & Delgado Delgado, R. (2016). Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS). (U. A. Yucatán, Ed.) *Ingeniería*, 20(2), 64-75. Recuperado el 28 de 07 de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750928001.pdf>
- Gastañadui Cruz, J. J. (2021). *Aplicación del proceso Lodos de Alta Densidad y relación con costos operativos en el tratamiento de aguas ácidas de Mina*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

- Hanrahan, G. (2012). Aqueous Chemistry. Key Concepts in Environmental Chemistry. *ELSEVIER*, 73 - 106.
- Hurtado, A; Soto, J;. (2006). *Evaluación del tratamiento de agua ácida con plomo mediante fitorremediación*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- INTICAL. (2020). Planta Móvil de Lechada de Cal. *Tecnología que se traduce en valor*. Recuperado el 12 de 08 de 2022, de <https://www.intical.com.pe/brochure-lechada-de-cal.pdf>
- López, E; Aduvire, O; Baretino, D;. (2002). Tratamientos Pasivos de Drenajes Ácidos de Mina: Estado Actual y Perspectivas del Futuro. *113*(1), 3-21.
- Loroña Calderón, F., & Gomez Lora, W. (2017). *Propuesta de tratamiento para la eliminación de manganeso en la Planta de Neutralización de Aguas Ácidas, Victoria-Compañía Minera Volcan S.A.A., Perú*. Universidad Federico Villarreal.
- Mandros, A. (2015). Aguas de Contacto. 6. Recuperado el 11 de 08 de 2022, de <https://es.scribd.com/document/260172137/Aguas-de-Contacto>
- Medina Quispe, R. (2018). *Diseño y Operatividad de la Planta de Neutralización de Aguas Ácidas de Mina Paragsha Cerro de Pasco en Minera Volcan S.A.A.* Cerro de Pasco.
- Ministerio de Energía y Minas. (02 de 08 de 2022). *Guía Ambiental para el Manejo del Drenaje Ácido*. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (25 de 09 de 2022). *Decreto ley N° 17752, Ley General de Aguas*. Obtenido de [https://www2.congreso.gob.pe/Sicr/Comisiones/2004/Ambiente_2004.nsf/Documentosweb/8C45B66E6815D2DE05256F320055052B/\\$FILE/DL17752.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/Sicr/Comisiones/2004/Ambiente_2004.nsf/Documentosweb/8C45B66E6815D2DE05256F320055052B/$FILE/DL17752.pdf)
- Ministerio del Ambiente. (23 de 09 de 2022). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/#:~:text=%2D2017%2DMINAM.-,%2D,Agua%20y%20establecen%20Disposiciones%20Complementarias>.
- Ministerio del Ambiente. (24 de 09 de 2022). *Decreto Supremo N°010-2010-MINAM*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>
- Ministerio del Ambiente. (25 de 09 de 2022). *Ley N° 28611, Ley General del Ambiente*. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente>
- Ministerio del Ambiente. (11 de 08 de 2022). *Límites Máximos Permisibles*. Obtenido de <https://infoaireperu.minam.gob.pe/limite-maximo-permisible-lmp/>
- Nordstrom D., K., & Alpers C., N. (1999). *Geochemistry of acid mine waters*. USA: Economic Geology, Society of Economic Geologist.
- Pamo, L. (2002). *Tratamiento Pasivos de Drenajes Ácidos de Mina: Estado actual y perspectivas de futuro* (Vol. 113). Boletín Geológico y Minero.
- Pérez de la Cruz , F. J., & Urrea Mallebrera, M. A. (2011). Coagulación y floculación. *Abastecimiento de aguas*, 1-34. Recuperado el 26 de 07 de 2022, de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf
- Salazar, J. A. (2018). *Tratamiento de aguas ácidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la Planta Concentradora Victoria en la Provincia de Yauli - La Oroya*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química, Huancayo. Recuperado el 25 de 07 de 2022, de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5369/T010_44357729_M.pdf?sequence=1

Schwarz, M. (2013). ¿Qué es un botadero de desmonte de mina? Recuperado el 29 de 07 de 2022, de <http://max-schwarz.blogspot.com/2013/03/que-es-un-botadero-de-desmonte-de-mina.html>

Yáñez Yana, N. J. (2018). *Diseño de una planta de lodos de alta densidad (HDS) para el tratamiento de drenaje ácido*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

ANEXO

Figura 5

Flowsheet de la Planta HDS propuesta para optimizar el sistema de tratamiento de efluentes

