



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**FRACCIONAMIENTO GEOQUÍMICO DE EFLUENTES MINEROS Y
MITIGACIÓN DEL MANGANESO EN MINERÍA**

Línea de investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Medio Ambiente y
Desarrollo Sostenible

Autor

Mendoza Apolaya, Atilio

Asesor

Tello Malpartida, Omart Demetrio

ORCID: 0000-0002-5043-6510

Jurado

Malpartida Canta, Rommel

Rodriguez Rodriguez, Ciro

García Urritia Olavarría, Roque Jesus Leonardo

Lima - Perú

2025



FRACCIONAMIENTO GEOQUÍMICO DE EFLUENTES MINEROS Y MITIGACIÓN DEL MANGANESO EN MINERÍA

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	5%	3%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	DIANOIA GROUP S.A.C.. "Segundo ITS de la Primera MEIA-SD del Proyecto de Exploración Acumulación Cailloma 1,2 y 3-Etapa B-IGA0009811", R.D. N° 280-2017-MEM/DGAAM, 2020 Publicación	<1%
4	Submitted to Universidad Cientifica del Sur Trabajo del estudiante	<1%
5	mafiadoc.com Fuente de Internet	<1%
6	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
7	Sonia Lanteigne, Michael Schindler, Andrew M. McDonald, Kristina Skeries et al. "Mineralogy and Weathering of Smelter-Derived Spherical Particles in Soils: Implications for the Mobility of Ni and Cu in the Surficial Environment", Water, Air, & Soil Pollution, 2012 Publicación	<1%
8	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	<1%
9	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1%
10	eprints.gla.ac.uk Fuente de Internet	<1%



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

FRACCIONAMIENTO GEOQUÍMICO DE EFLUENTES MINEROS Y

MITIGACIÓN DEL MANGANESO EN MINERÍA

Línea de investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Autor

Mendoza Apolaya, Atilio

Asesor

Tello Malpartida Omart Demetrio

ORCID: 0000-0002-5043-6510

Jurado

Malpartida Canta, Rommel

Rodriguez Rodriguez, Ciro

García Urritia Olavarría, Roque Jesus Leonardo

Lima - Perú

2025

DEDICATORIA

A Dios, por darme sabiduría y luz para seguir el camino hacia la comprensión de la naturaleza y alcanzar el logro del Doctorado, asimismo agradezco a todas aquellas personas que con su apoyo y palabras optimistas me permitieron avanzar; especialmente al Dr. Omart Demetrio Tello Malpartida.

ÍNDICE

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Planteamiento del problema	9
1.2. Descripción del problema.....	10
1.3. Formulación del problema.....	10
1.3.1. Problema general	10
1.3.2. Problemas específicos	10
1.4. Antecedentes	11
1.5. Justificación.....	20
1.6. Limitaciones	20
1.7. Objetivos	21
1.7.1. Objetivo general	21
1.7.2. Objetivos específicos.....	21
1.8. Hipótesis.....	21
1.8.1. Hipótesis general	21
1.8.2. Hipótesis específicas.....	21
II. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Marco conceptual	23
2.2. Fundamento del fraccionamiento del drenaje ácido.....	23
2.3. Fundamento del proceso de remoción del manganeso	26
III. MÉTODO.....	28
3.1. Tipo de investigación	28
3.2. Población y muestra	28
3.3. Operacionalización de variables.....	28
3.3.1. Identificación de la variable independiente	28
3.3.2. Identificación de las variable dependiente.....	29
3.4. Instrumentos	29
3.5. Procedimientos	30
3.6. Análisis de datos.....	31

IV. RESULTADOS	32
4.1. Resultados experimentales de fraccionamiento de drenajes ácidos	32
4.1.1. Prueba de fraccionamiento para separación del hierro	33
4.1.2. Prueba de fraccionamiento para separación del manganeso	35
4.1.3. Prueba de fraccionamiento para separación del zinc	37
4.2. Resultados de remoción del manganeso de efluentes	39
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
VI. CONCLUSIONES	54
VII. RECOMENDACIONES	55
VIII. REFERENCIAS	56
IX ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros Termodinámicos para la Producción del ZnS.....	26
Tabla 2 Matriz de operaciones	29
Tabla 3 Balance de Fraccionamiento del Fe, Mn y Zn.....	38
Tabla 4 Resultados del Análisis Geoquímico de Rocas.....	40
Tabla 5 Potencial Neto de Neutralización de 18 Muestras de Rocas	41
Tabla 6 Resultados del Análisis Geoquímico de Sedimentos.....	42
Tabla 7 Potencial neto de Neutralización de 14 Muestras de Sedimentos	43
Tabla 8 Análisis Geoquímico de Aguas Superficiales.....	44
Tabla 9 Análisis Geoquímico de Aguas de Filtraciones Naturales.....	45
Tabla 10 Análisis Geoquímico de Aguas de Filtraciones Naturales.....	46
Tabla 11 Análisis Geoquímico de Aguas de Efluentes al Río Santiago	47
Tabla 12 Recuperación por día	50
Tabla 13 Balance de costo/Beneficio.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Estabilidad del Hierro	24
Figura 2 Diagrama de estabilidad del manganeso	25
Figura 3 Efluente minero inicial - Agua ácida a pH 2 con abundantes sulfatos, hierro y manganeso	32
Figura 4 Grafica mostrando separación del hierro en pH 5	33
Figura 5 Lodo con Fe(OH) ₃ en el fondo ($Fe^{+3} + 3OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_3$).....	34
Figura 6 Fracción de lodos de hierro como Fe(OH) ₃ separado entre pH 5 a 8.5	34
Figura 7 Separación de manganeso a pH 9	35
Figura 8 Lodo con Mn(OH) ₄ en el fondo del vaso ($Mn^{+4} + 4OH^{-} \rightarrow Mn(OH)_4$).....	35
Figura 9 Fracción de lodos de manganeso con Mn(OH) ₄ separado entre pH 8.5 a 9.5	36
Figura 10 Agua tratada al final del proceso de efluente fraccionado en pH 8.8, 0.04 mg/L Fe, y 0.03 mg/L Mn	36
Figura 11 Luego de la separación del hierro, queda el zinc en solución en un pH de 5	37
Figura 12 Etapa de precipitación del zinc como sulfuro de zinc ($ZnSO_4 + Na_2S \rightarrow ZnS + Na_2SO_4$)	37
Figura 13 Separación del Zn como ZnS a pH 9.....	38
Figura 14 Recuperación de Zn,Fe y Mn en TM por día	39
Figura 15 Separación del manganeso de efluente por acción del Cl ₂	48
Figura 16 Planta 2 de Tratamiento de Manganeso – Relavera	49
Figura 17 Proceso de Fraccionamiento en Continuo	51

Resumen

El objetivo de la tesis está orientado a innovar las condiciones experimentales del tratamiento de efluentes ácidos mineros desarrollando un fraccionamiento sistemático de los principales componentes metálicos del drenaje ácido minero generados por procesos geoquímicos de oxidación e hidrólisis de los sulfuros en las labores subterráneas, tajos, relaves y desmontes de los yacimientos de minerales. La investigación fue experimental utilizando muestras de drenajes ácidos de unidades mineras polimetálicas cuyas propiedades físico-químicas y estabilidad de los elementos permite desarrollar el fraccionamiento del Fe^{+3} , Mn^{+4} y Zn^{+2} de la fase líquida de un efluente minero ácido a sus fases sólidas utilizando un reactor con agitación controlada, optimizando las concentraciones, pH, potencial redox, utilizando como neutralizante solución saturada de cal y sulfuro de sodio; que permite obtener lodos con valores potenciales de hierro, manganeso y zinc de importancia en la sostenibilidad ambiental, asimismo un agua tratada de calidad para los cuerpos receptores del ecosistema minero. La remoción del manganeso innova la oxidación del Mn^{+2} en fase acuosa hasta su transformación en Mn^{+4} utilizando cloro en solución acuosa; de manera que el Mn^{+4} precipita en fase sólida y logra separarse de la fase líquida lo cual permite diseñar una planta para su mitigación y cumplir con los estándares calidad del agua y eliminar los impactos sobre la salud humana y ecosistemas.

Palabras clave: drenaje ácido, fraccionamiento geoquímico, mitigación, sostenibilidad ambiental

Abstract

The objective of the thesis is oriented to innovate the experimental conditions of the treatment of acid mining effluents by developing a systematic fractionation of the main metallic components of acid mining drainage generated by geochemical processes of oxidation and hydrolysis of sulfides in underground workings, pits, tailings and waste rock of mineral deposits. The research was experimental using samples of acid drainage from polymetallic mining units whose physicochemical properties and stability of the elements allows the fractionation of Fe +3, Mn +4 and Zn +2 from the liquid phase of an acid mining effluent to its solid phases using a reactor with controlled agitation, optimizing concentrations, pH, redox potential, using as neutralizer saturated solution of lime and sodium sulfide; which allows obtaining sludge with potential values of iron, manganese and zinc of importance in environmental sustainability, also a treated water of quality for the receiving bodies of the mining ecosystem. Manganese removal innovates the oxidation of Mn+2 in the aqueous phase until it is transformed into Mn+4 using chlorine in aqueous solution; such that the Mn+4 precipitates in the solid phase and can be separated from the liquid phase, which allows for the design of a plant for its mitigation and to comply with water quality standards and eliminate impacts on human health and ecosystems.

Keywords: acid drainage, fractionation, mitigation, environmental sustainability

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación permite desarrollar el fraccionamiento del Fe, Mn y Zn de efluentes mineros ácidos en base a sus propiedades físico-químicas y estabilidad de cada elemento pasando de sus fases líquidas a sólidas, controlando las concentraciones, pH y potencial redox; este proceso desarrollado permite obtener lodos con altos valores de hierro, manganeso y zinc; en las condiciones actuales las aguas ácidas son sometidos a procesos de neutralización, oxidación y floculación para obtener como resultado final lodos complejos orientados hacia una disposición que lleva a ocupar grandes áreas; por lo cual el objetivo de la investigación está orientado en establecer condiciones experimentales que permiten un fraccionamiento sistemático de los componentes principalmente metálicos, y agua tratada de calidad para los cuerpos receptores.

Asimismo, se desarrolla la remoción del manganeso de los efluentes basado en la identificación de las fuentes de generación, caracterización de sus aguas, y desarrollo de alternativas de remoción del Manganeso a nivel de Laboratorio hasta valores inferiores a 0,2 mg/L que permite cumplir con el marco legal ambiental. Finalmente realizaremos una evaluación de costos dentro del marco de la sostenibilidad ambiental.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad los efluentes de aguas ácidas son tratadas en forma global generando abundantes lodos complejos con altos contenidos de hidróxidos de metales los cuales son separados y su disposición ocupa grandes áreas; cuya utilidad es muy limitada; por lo cual la presente investigación desarrolla la opción de fraccionar el efluente, logrando que cada una de las fracciones corresponda a metales de importancia económica que influyen en la sostenibilidad ambiental de la actividad minera. Asimismo, plantea el desarrollo de un

proceso de remoción del manganeso en condiciones oxidantes controladas en un rango de pH apropiado para el cumplimiento de las normas ambientales.

1.2. Descripción del problema

Actualmente la minería metálica es de gran importancia en el país suministrando metales para la industria de materiales y dispositivos semiconductores; sin embargo los minerales que los contienen comúnmente son sulfuros o se encuentran asociados a otros sulfuros que por mecanismos hipógenos o supergénos interactúan con el agua y el oxígeno produciendo drenajes ácidos controlados por neutralización principalmente con cal en Perú, Canadá, Australia, Estados Unidos produciéndose grandes acumulaciones de lodos y bajo criterios de disminución de residuos se desarrolla en esta investigación procesos de fraccionamientos y programas de prevención y mitigación ambiental que lleva a una sostenibilidad ambiental.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo influye el fraccionamiento de residuos líquidos mineros y diseños de procesos de tratamientos en la preservación de los ecosistemas y sostenibilidad ambiental en base a procesos geoquímicos?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Qué balance de residuos se obtiene cuando se realiza un fraccionamiento con fines de sostenibilidad ambiental?

- ¿Qué factores de prevención se activan cuando se establece la geoquímica de rocas, sedimentos y aguas para el control ambiental del contexto exterior a la operación minera?
- ¿Cuál es el proceso de mitigación a seleccionar para remover metales de efluentes

1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes nacionales

Aduvire (2006), Santofimia et al. (2022) y Han et al. (2023) consideran los procesos convencionales la incorporación de agentes alcalinizantes —principalmente cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco — para neutralizar la acidez y establecer las condiciones necesarias que permitan la precipitación de metales pesados. La formación de hidróxidos insolubles de estos metales ocurre dentro de un rango de pH que oscila entre 8.5 y 10. El hidróxido ferroso se forma a partir del hierro ferroso cuando el pH supera 8.5, mientras que el manganeso alcanza la insolubilidad con valores de pH superiores a 9.5. Aunque el aluminio precipita a pH 5.5 en medio acuoso, recupera su solubilidad cuando el pH excede 8.5. Estas características determinan que la selección del método químico más adecuado dependa del tipo de metales presentes y sus concentraciones en las aguas ácidas. Las instalaciones operan frecuentemente elevando el pH hasta valores cercanos a 9.0, dado que condiciones de mayor basicidad incrementan la solubilidad del plomo y el zinc.

Pincetti-Zúniga et al. (2022) indican que los medios de vida de los ciudadanos de los valles agrícolas rurales de la árida Región de Arica y Parinacota, más al norte de Chile depende en gran medida del agua procedente de las precipitaciones a gran altura y de la escorrentía hacia zonas de menor elevación. No obstante, las concentraciones elevadas de arsénico, boro y otros elementos potencialmente tóxicos afectan la calidad hídrica,

particularmente en áreas rurales. Muestras ($n = 90$) de manantiales superficiales, subterráneos, fríos, geotérmicos y agua del grifo tratada y cruda, se estudiaron para evaluar la calidad del agua y determinar los principales controles geoquímicos sobre la composición, el origen y la evolución geoquímica del agua a lo largo de las rutas de flujo dominantes. Agua de las principales cuencas fluviales de la región (Lluta, San José, Codpa-Chaca, Camarones y Altiplánicas) fueron recolectados para el análisis hidrogeoquímico de un conjunto de elementos principales y traza, δD y $\delta^{18}O$. Nuestro nuevo conjunto de datos se complementó con datos hidroquímicos ($n > 1500$ puntos de datos) de fuentes secundarias. Los resultados muestran que el 72% de las muestras recolectadas tenían $As > 10 \mu g/L$ (pauta provisional de la OMS para el agua potable) y afectó al 44% de las aguas estudiadas utilizadas para beber ($n=32$). Según las pautas de riego chilenas, la salinidad elevada ($CE > 0,75 \text{ mS/cm}$) afectó al 80% de las aguas muestreadas, que también se vieron afectadas por niveles altos de B ($89\% > 0,75 \text{ mg/L}$) y As ($31\% > 50 \mu g/L$). La composición del agua fue fuertemente controlada por la mezcla de agua geotérmica y agua dulce en áreas de gran altitud. La concentración de As y B fue determinada por el tipo de entrada geotérmica. El nivel más alto de As ($\sim 21 \text{ mg/L}$) se asoció con aguas Na-Cl neutrales en la cuenca de Camarones, mientras que As más bajo ($\sim 5 \text{ mg/L}$) con aguas ácidas SO_4 en la cuenca Lluta. Además, se demostró que la concentración evaporativa y las interacciones sedimento-agua controlan el nivel de As en aguas superficiales y subterráneas aguas abajo. Este trabajo proporciona un análisis integral y un modelo conceptual de controles geoquímicos en las composiciones regionales del agua, contribuyendo a una mejor comprensión de los procesos geoquímicos que sustentan los desafíos de la calidad del agua en el norte de Chile.

Los valores de abundancia normal geoquímica de elementos en rocas, sedimentos y aguas permiten establecer un marco referencial respecto a las anomalías antropogénicas

generadas por la actividad minera; lo cual se ha demostrado en base a trabajos relacionados a impactos ambientales y planes de mitigación.

1.4.2. Antecedentes internacionales

Gonçalves et al. (2024), indican que la industria minera es una de las mayores fuentes de preocupación ambiental a nivel mundial. Aquí informamos por primera vez la aplicación de sorbentes impresos en 3D altamente porosos que contienen altas cantidades (50% en peso) de lodo rojo, un residuo peligroso derivados de la industria de la alúmina, para la remediación del drenaje ácido de mina (AMD). Inicialmente se evaluó la capacidad de sorción de los polímeros inorgánicos para la eliminación simultánea de cinco metales como, Cu(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II) y As(V) en aguas residuales sintéticas. El efecto inicial evaluó la concentración, el pH y el tiempo de contacto, alcanzando eficiencias de eliminación entre 64% y 98%, a pH 4 y concentración inicial de 50 mg/ L de cada catión, después de 24 h de tiempo de contacto. Las celosías impresas en 3D fueron luego utilizados para la remediación de muestras de agua AMD reales y el papel de la adsorción y la neutralización ácida fue investigado. Las celosías también se regeneraron y reutilizaron con éxito hasta cinco ciclos sin comprometer su desempeño. Este trabajo abre el camino para el aprovechamiento de un residuo industrial derivado de la producción de Alúmina como materia prima.

Yan et al. (2022) y Du et al. (2022) explican que el drenaje ácido de minas (AMD) es un problema global y causa impactos ambientales dañinos. AMD tiene alta acidez y contiene una alta concentración de metales pesados y metaloides, lo que lo hace tóxico para plantas, animales y humanos. Los tratamientos tradicionales para la AMD se han utilizado ampliamente durante mucho tiempo. Sin embargo, algunas limitaciones, como la baja eficacia y la contaminación secundaria, han llevado a que sean reemplazados por otros

métodos como los tratamientos de base biológica para la AMD. Este estudio revisó tres métodos de tratamiento de base biológica que utilizan algas, biocarbón y bacterias que pueden usarse por separado y potencialmente en combinación para un tratamiento eficaz y sostenible de la AMD. Identificando los mecanismos de eliminación y los parámetros esenciales que afectan el tratamiento del AMD. Todos los métodos de base biológica, cuando se aplicaron como un solo proceso y en combinación (por ejemplo, algas-biocarbón y algas-bacterias), se identificaron como tratamientos efectivos para la AMD. Además, se descubrió que todos estos métodos de base biológica se veían afectados por algunos parámetros (pH, temperatura, concentración de biomasa y concentración inicial de metales) al eliminar metales pesados de AMD. Sin embargo, no identificamos ninguna investigación centrada en la combinación de algas, biocarbón y bacterias como grupo para el tratamiento del AMD. Por lo tanto, debido al excelente desempeño en el tratamiento AMD de algas, el biocarbón y bacterias y la sinergia potencial entre ellas, esta revisión proporciona nuevos conocimientos y analiza la viabilidad de una combinación de algas, biocarbón y bacterias para el tratamiento de la AMD.

Thomas et al. (2022) y Sarker et al. (2023) establecen que el drenaje ácido minero (DAM), residuo resultante de las operaciones extractivas caracterizado por su contenido de sulfatos, hierro y metales pesados, constituye un factor de deterioro ambiental significativo que representa amenazas para la salud pública y el desarrollo sustentable. Áreas impactadas por AMD carecen de técnicas de remediación que atiendan de forma integral los requerimientos ecológicas, sociales y económicas de los afectados; comunidades, para las cuales la fitorremediación es una solución prometedora. Este artículo de revisión presenta la DAM y los entornos afectados por la DAM y analiza críticamente los enfoques de fitogestión, fitoprotección y fitorrestauración. hacia entornos afectados por AMD. La investigación y aplicación continua de estos enfoques ayudarán a optimizar el potencial de

generación de recursos e ingresos, abordar las preocupaciones sobre la pérdida de biodiversidad y el almacenamiento de carbono derivadas del cambio climático, y promover la gestión agrícola sostenible. Con enfoque en cultivos energéticos, la fitominería de elementos críticos, almacenamiento de carbono, y restauración de ecosistemas, esta revisión examina la investigación sobre fitorremediación que atienda oportunidades ambientales y económicas positivas para entornos impactados por AMD.

Hermassi et al. (2022) enfatizan que el drenaje ácido de mina (DAM) todavía se considera uno de los mayores desafíos de sostenibilidad minera debido a los grandes volúmenes de residuos generados y el elevado coste de tratamiento asociado.

Nuevas iniciativas de regulación sobre desarrollo sostenible, economía circular y la necesidad de elementos estratégicos como los Elementos de Tierras Raras (REE) pueden superar las iniciativas tradicionales de investigación dirigidas a desarrollar opciones de tratamiento de bajo coste y desarrollar iniciativas de investigación para identificar el beneficio potencial de considerar dicho AMD como un posible recurso secundario. Como ejemplo, este estudio desarrolla la integración de un proceso de tres etapas donde los REE se separan selectivamente de los metales base (por ejemplo, Fe, Al, Mn, Ca, Mg, Cd, Pb) y luego concentrarse para producir un subproducto rico en REE recuperado como fosfatos de REE. La separación selectiva de Fe (>99%) se logró mediante oxidación total a Fe (III) y posterior precipitación como schwertmannita en $\text{pH } 3,6 \pm 0,2$. Luego se extrajeron REE de AMD utilizando una resina de intercambio iónico sulfónico para producir REE concentrados.

Soluciones sulfúricas hasta 0,25 g/L REE. En una etapa final, la separación selectiva de REE de Al(III), Ca(II) y Mg(II) y elementos de transición (Cu, Zn, Ni) se logró mediante precipitación con soluciones de fosfato bajo un control de pH optimizado y concentración total de fosfato. El análisis XRD identificó minerales poco cristalinos. Mediante el uso de un tratamiento térmico se encontró la presencia de $\text{PrPO}_4(\text{s})$ y Cheralita ($\text{CePO}_4(\text{s})$) donde Ce es

sustituido por La y Ca y Xenotima ($\text{YPO}_4(\text{s})$). También se identificaron los principales minerales $\text{AlPO}_4(\text{s})$ Ca,Mg $\text{YPO}_4(\text{s})$.

Tum et al. (2022) en la provincia de Mondulkiri, describen que en Camboya, los mineros artesanales de oro vierten relaves y aguas residuales del procesamiento de oro en un afluente del río Prek Te. Durante el período pluvial, las concentraciones de metales pesados en el efluente se reducen mediante procesos de atenuación natural hasta alcanzar valores inferiores a los estándares establecidos por la OMS para agua de consumo humano; sin embargo, esto no ocurre en condiciones secas. Para comprender mejor el mecanismo de atenuación natural, en ambas estaciones se llevaron a cabo análisis detallados de las aguas residuales de los relaves y de los afluentes, los sedimentos de los afluentes, las rocas estériles y los minerales. La alta concentración de Fe disuelto en el afluente contaminado juega un rol relevante en la eliminación de As durante el proceso de temporada de lluvias, mientras que la concentración de otros elementos como Ni, Se y Cu disminuye debido a la dilución. La formación de Schwertmannita, controlada por bacterias oxidantes del hierro, solo se encontró en el fondo del afluente durante el período pluvial. En el período de estiaje, las concentraciones de As, Ni, Se y Cu se mantuvieron en sus niveles originales porque no hubo formación de schwertmannita ni dilución por el agua de lluvia. La schwertmannita existente también comienza a disolverse a medida que disminuye el pH. La dinámica estacional provoca el fallo de la atenuación natural; así, métodos para mantener su eficacia en la estación seca, se realizaron modelos geoquímicos. Determinar el papel importante de la formación de schwertmannita y la dilución del agua de lluvia en el afluente. La schwertmannita es un adsorbente potencial para la eliminación de As del drenaje. Sin embargo, la dilución proporcionó efectos indirectos. e impactos directos sobre el afluente, como aumento del pH y dilución de la concentración de elementos tóxicos.

Jiménez et al. (2023) explican que las aguas subterráneas contaminadas son un problema grave en los países desarrollados. El abandono de residuos industriales puede provocar un drenaje ácido que afecte a las aguas subterráneas y afecte gravemente al medio ambiente y a la infraestructura urbana. Examinamos la hidrogeología e hidroquímica de un área urbana en Almozara (Zaragoza, España); Construido sobre una antigua zona industrial, con depósitos de residuos de calcinación de pirita, existían problemas de drenaje ácido en los aparcamientos subterráneos. Perforación y la construcción de piezómetros, y las muestras de agua subterránea revelaron la existencia de un acuífero encaramado dentro de antiguos sulfuros relaves de molinos, donde los sótanos de los edificios interrumpieron el flujo de agua subterránea, lo que llevó a una zona de estancamiento de agua que alcanzaron valores extremos de acidez ($\text{pH} < 2$). Se desarrolló un modelo de transporte reactivo de flujo de agua subterránea utilizando el modelamiento para reproducir el flujo y la química del agua subterránea, con el fin de ser utilizado como una herramienta predictiva para guiar las acciones de remediación. El modelo reprodujo la química medida del agua subterránea simulando la pirita controlada cinéticamente y disolución de portlandita. El modelo predice que se producirá un frente de acidez extrema ($\text{pH} < 2$), coincidente con la pirita de Fe (III).

El mecanismo de oxidación que toma predominio, se propaga a 30 m/año si se supone un flujo constante. La disolución incompleta de la pirita residual (hasta un 18 % disuelta) predicha por el modelo indica que el drenaje ácido está limitado por el régimen de flujo en lugar de la disponibilidad de sulfuro. La instalación de colectores de agua adicionales entre la recarga, la fuente y la zona de estancamiento, junto con el bombeo periódico de la zona de estancamiento. Se espera que los resultados del estudio sirvan como base útil para la evaluación del drenaje ácido en áreas urbanas, ya que la urbanización de antiguos terrenos industriales está aumentando rápidamente en todo el mundo.

Adrianto et al. (2023) señalan que recientemente ha aumentado el interés hacia el reprocesamiento de residuos mineros, proceso dirigido a extraer materiales de valor, incluyendo metales y subproductos adicionales, de recursos previamente no aprovechados. La valorización de desechos mineros presenta beneficios ambientales comparados con los métodos convencionales de generación y disposición de residuos. No obstante, persiste la ausencia de una evaluación ambiental cuantitativa exhaustiva para el reprocesamiento masivo que considere proyecciones futuras y una amplia gama de indicadores ambientales. De esta manera, el estudio analiza los impactos del ciclo de vida y el potencial de recuperación de recursos vinculados con opciones de gestión de residuos mediante el reprocesamiento de relaves mineros a escala regional. Se seleccionaron como caso de estudio los relaves de cobre sulfurado en la UE. Realizamos evaluaciones prospectivas del ciclo de vida de futuros escenarios de reprocesamiento considerando tecnologías emergentes de recuperación de recursos, pronósticos de oferta y demanda del mercado y cambios en el sistema energético. Encontramos que algunas tecnologías de reprocesamiento y valorización en escenarios futuros pueden tener potenciales de reducción para múltiples indicadores de impacto. Sin embargo, los resultados de indicadores como el cambio climático y los impactos relacionados con la energía sugieren que escenarios específicos funcionan de manera subóptima debido a procesos que consumen mucha energía o recursos. El desempeño ambiental del reprocesamiento de relaves está influenciado por las rutas tecnológicas, la penetración del mercado de materiales secundarios y las opciones de productos desplazados. El equilibrio entre el cambio climático y los impactos relacionados con la energía, por un lado, y la toxicidad. Los impactos, por otro lado, requieren una evaluación crítica por parte de los tomadores de decisiones al promover el reprocesamiento de relaves alternativos.

La implementación de estrategias de recuperación de valor en la producción de materiales de construcción puede ahorrar hasta 3 Mt. de CO₂-eq. en el 2050 en comparación

con lo habitual, lo que ayudará al sector del cobre a mitigar los impactos climáticos. Sin embargo, se necesitan esfuerzos adicionales de mitigación del clima en la gestión del lado de la demanda para alcanzar el objetivo climático de 1,5 °C. Este trabajo proporciona una base científica para la toma de decisiones hacia un reprocesamiento y valorización más sostenible de los relaves sulfurados.

Xu et al. (2023) y Heim et al. (2023) indican que los minerales de óxido de manganeso (Mn) naturales a menudo se forman por oxidación microbiana de Mn (II), lo que resulta en fases de óxido de Mn(III/IV) nanocristalinas con alta reactividad que pueden influir en la absorción y liberación de muchos metales (por ejemplo, Ni, Cu, Co y Zn). Durante la formación, la estructura y composición de los óxidos de Mn biogénicos se pueden determinar alterado en presencia de otros metales, lo que a su vez afecta la capacidad de los minerales para unir estos metales. Los procesos están influenciados además por la química del ambiente acuoso y el tipo y fisiología de microorganismos involucrados. Condiciones que se extienden a entornos que tipifican las aguas residuales industriales y mineras. (por ejemplo, mayor contenido de sal, reducidos niveles de nutrientes y elevadas concentraciones metálicas) no se han investigado bien, por lo que limita la comprensión de las interacciones de los metales con los óxidos de Mn biogénicos. Integrando técnicas geoquímicas, microscópicas y espectroscópicas, se ha examinado la capacidad de los óxidos de Mn producidos por la oxidación de Mn (II).

Hongo ascomiceto *Periconia* sp. SMF1 aislado de la mina Minnesota Soudan para eliminar el contaminante metálico Co(II) de aguas sintéticas que son representativas de las aguas residuales mineras actualmente sometidas a esfuerzos de remediación. Comparamos dos estrategias de remediación aplicadas diferentes en las mismas condiciones: coprecipitación de Co con óxidos de Mn micógenos versus adsorción de Co con óxidos de Mn fúngicos preformados. Co(II) fue eliminado efectivamente de la solución por óxidos de

Mn fúngicos a través de dos mecanismos diferentes: incorporación y adsorción sobre óxidos de Mn. Estos mecanismos fueron similares para ambas estrategias de remediación, lo que indica la eficacia general de la eliminación de Co(II) por estos óxidos. Los óxidos de Mn micogénicos eran principalmente fases nanoparticuladas, poco cristalinas, similares a la birnessita, con ligeras diferencias dependiendo de las condiciones químicas durante la formación. La eliminación relativamente rápida y completa del Co (II) acuoso durante la biomineralización, así como la posterior incorporación estructural de Co a la estructura del óxido de Mn ilustró un ciclo sostenible capaz de remediar continuamente Co(II) de ambientes contaminados con metales

1.5. Justificación de la investigación

La evolución de la minería a generado un aumento progresivo de la explotación minera a fin de satisfacer la demanda mundial de metales para la obtención de materiales, sincrónicamente ha escalado la acumulación de residuos sólidos, líquidos y gaseosos; sin embargo bajo las orientación de acciones ambientales a desarrollarse durante el siglo XXI, se hace necesario reducir y minimizar los residuos bajo un marco de fraccionamiento de elementos reutilizables, lo cual se desarrolla en esta investigación para recuperar elementos económicos y tratamiento de efluentes con manganeso en condiciones críticas para incrementar la sostenibilidad ambiental y preservar los ecosistemas.

1.6. Limitaciones de la investigación

El desarrollo del trabajo de campo, monitoreo y caracterización de residuos sólidos y líquidos ha permitido desarrollar procesos experimentales a nivel de laboratorio, lo cual permite que estos sean extrapolados a casos de mayor envergadura como una planta de proceso en continuo y diseños de procesos de tratamientos; sin embargo pueden ocurrir distribuciones de elementos en medios acuosos que requieren de sustancias escasas y de alto

costo que limitan su desarrollo y aplicaciones para realizar un fraccionamiento como el boro, molibdeno, etc.

1.7. Objetivos

1.7.1. *Objetivo general*

Desarrollar proceso de fraccionamiento de metales de efluentes mineros y mitigación del manganeso.

1.7.2. *Objetivos específicos*

- Obtener compuestos óptimos para el fraccionamiento de metales desde un medio ácido a un medio alcalino.
- Determinar las operaciones unitarias para el fraccionamiento de metales y remoción del manganeso.
- Determinar los balances de masas del fraccionamiento y remoción del manganeso.

1.8. Hipótesis

1.8.1. *Hipótesis general*

Existe relación entre las propiedades de los elementos de efluentes mineros y su comportamiento físico químico para su fraccionamiento y remoción.

1.8.2. *Hipótesis específicas*

- Existe relación entre los diagramas de estabilidad termodinámicos y la selección de sustancias para su paso al estado sólido.
- Existe relación entre los procesos de laboratorio y procesos unitarios de operación en una planta en continuo.

- Existe relación entre el fraccionamiento y remoción de elementos con su balance de masa y eficiencia en la disminución de residuos.

II. MARCO TEORICO

2.1. Marco conceptual

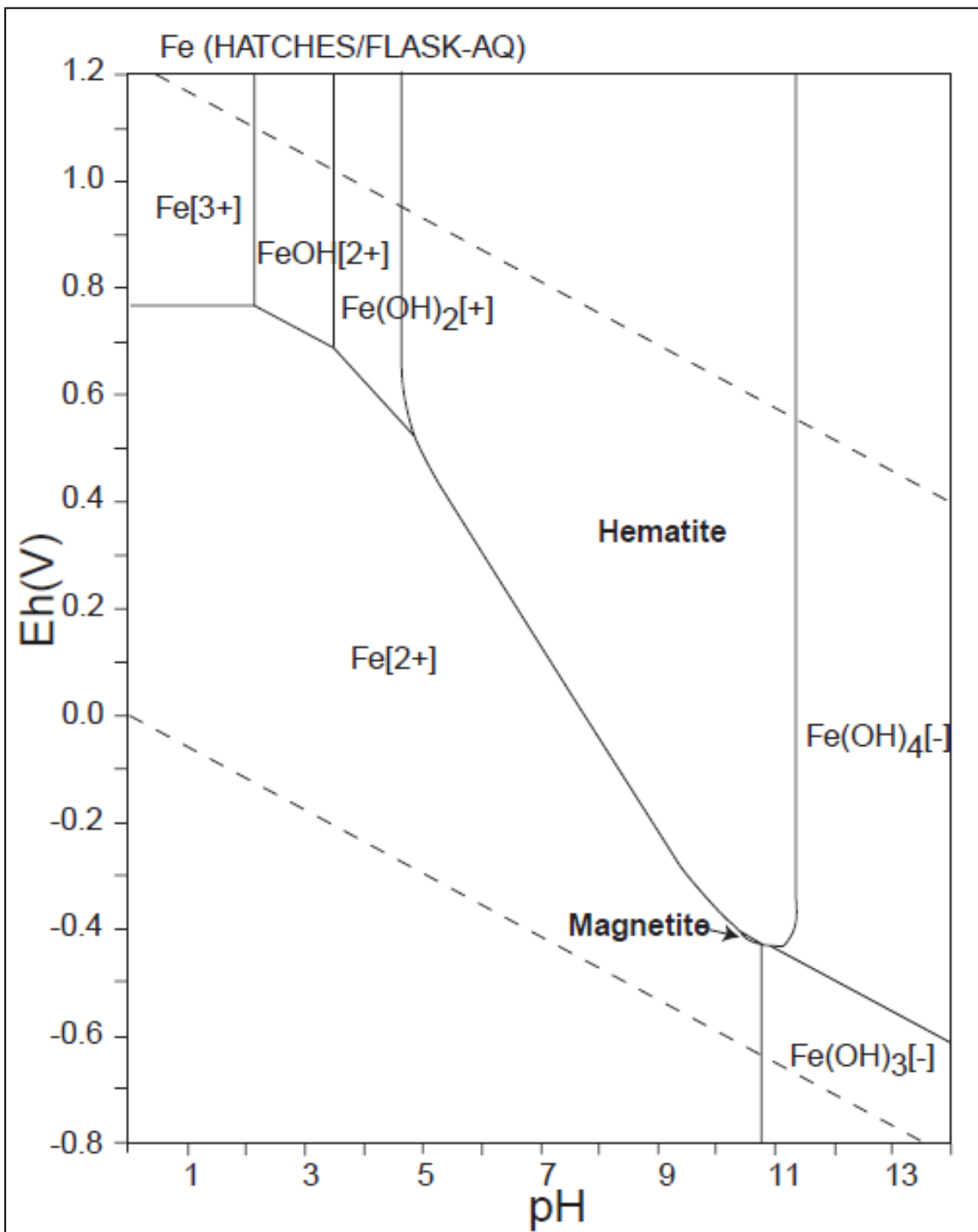
Esta investigación se desarrolla por medios químicos y físicos con pH específicos y uso de sustancias seleccionadas que permitan un paso de elementos de la fase líquida a sólido como en el caso de la separación del hierro, manganeso y zinc; utilizando en cada caso un reactor y sedimentación; de esta manera evitamos la precipitación acumulada de metales como hidróxidos lo cual lleva a un lodo y disposición final.

Para la etapa de mitigación del manganeso se logra realizando una fuerte oxidación con cloro que permite separarlo en un rango alcalino apropiado.

2.2. Fundamento del fraccionamiento del drenaje ácido

Para el caso del fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros utilizamos el principio del producto de solubilidad K_{ps} , que determina las condiciones requeridas para la formación de fases sólidas en medio acuoso. Esta formación ocurre cuando el producto de la concentración iónica Q en solución supera el valor de la constante del producto de solubilidad K_{sp} , cumpliendo la relación $(K_{sp}/Q) < 1$, lo que permite el fraccionamiento controlado de iones desde la solución hacia una fase sólida.

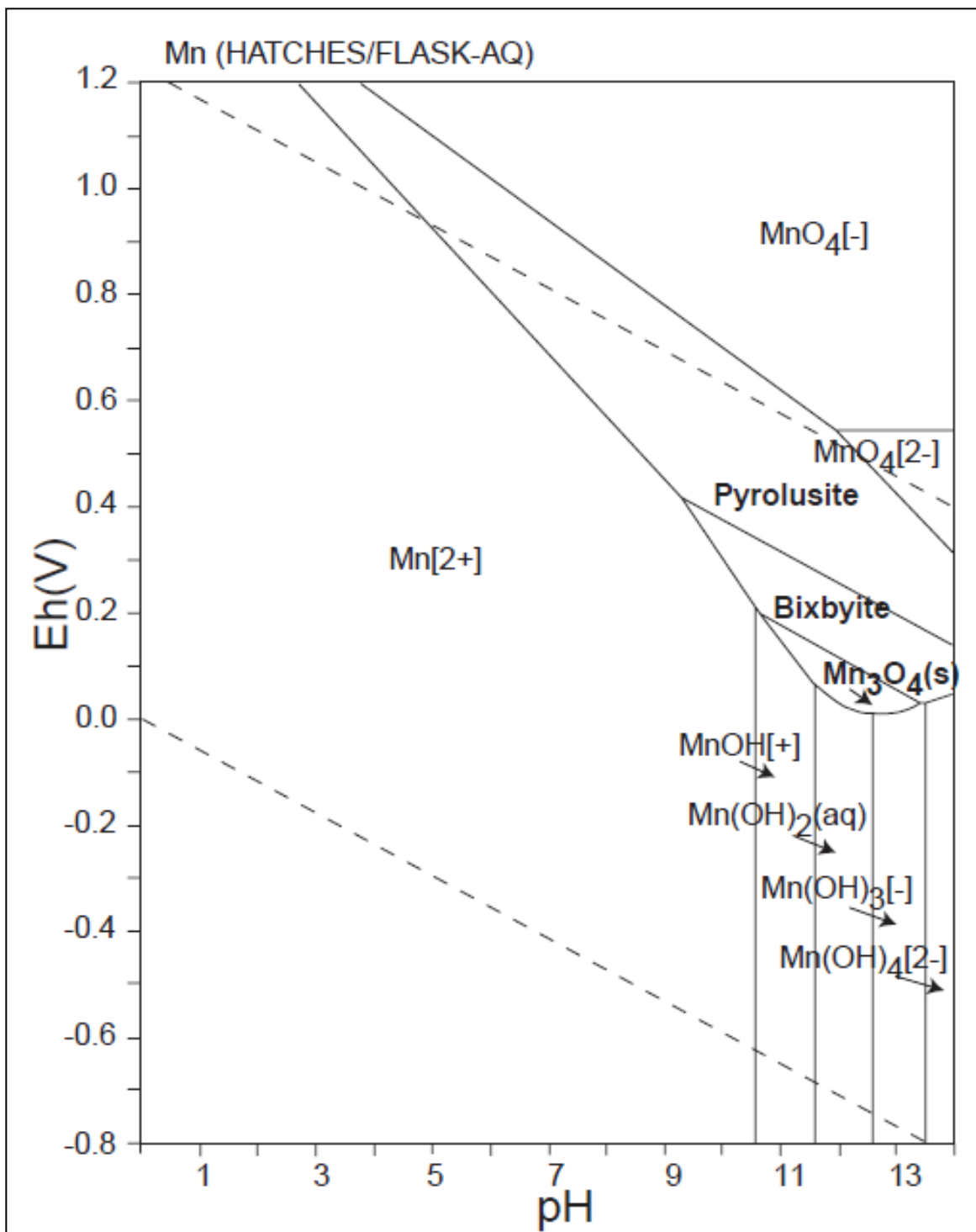
Asimismo, la utilización de los diagramas de estabilidad metálica en función del pH y Eh para implementar mecanismos de acondicionamiento en intervalos específicos, logrando la formación de fases sólidas que faciliten su eliminación mediante procesos de separación sólido/líquido como se indica en los diagramas del hierro y del manganeso.

Figura 1*Diagrama de Estabilidad del Hierro*

Nota. De "Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases", por N. Takeno, 2005.

Figura 2

Diagrama de estabilidad del manganeso



Nota. De "Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases", por N. Takeno, 2005.

En el caso de la separación del Zn de la fase líquida a la fase sólida, podemos observar que los cálculos termodinámicos indican un delta G (Variación de energía libre) negativo justificando el desarrollo de la reacción al agregar el Na₂S y producir ZnS sólido.

Tabla 1

Parámetros Termodinámicos para la Producción del ZnS

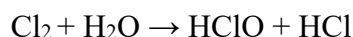
ZnSO₄ + Na₂S = ZnS + Na₂SO₄					
T	deltaH	deltaS	deltaG	K	Log(K)
C	kcal	cal/K	kcal		
0.000	-58.347	0.842	-58.577	7.448E+046	46.872
20.000	-58.457	0.453	-58.59	7.829E+043	43.684
40.000	-58.566	0.096	-58.596	7.901E+040	40.898
60.000	-58.669	-0.226	-58.594	2.764E+038	38.442
80.000	-58.768	-0.512	-58.587	1.819E+036	36.260
100.000	-58.859	-0.763	-58.574	2.037E+034	34.309

Nota. T=Temperatura°C H= Entalpía S =Entropía G=Energía Libre K=Constante de equilibrio

2.3. Fundamento del proceso de remoción del manganeso

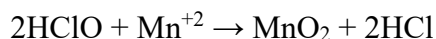
El proceso de remoción del manganeso de un efluente seleccionado incluye un proceso de oxidación del manganeso con cloro seguido de un ajuste del pH en medio alcalino a fin de coprecipitarlo con hidróxido de hierro.

Cuando el cloro es adicionado al agua ocurre la siguiente reacción reversible:



La solución resultante contiene cantidades equimolares del ácido débil hipocloroso y el ácido fuerte de ácido clorhídrico.

La oxidación del manganeso ocurre según la reacción:



El pH del agua es un parámetro crítico para el proceso de oxidación y remoción de hierro y manganeso. Por lo tanto, para la remoción de estos metales es necesario realizar primero un ajuste de pH y luego una oxidación.

El proceso industrial de remoción del manganeso se basa fundamentalmente en la construcción de dos plantas de tratamiento; donde en cada planta el agua del

efluente ingresaría a través de un salto hidráulico hacia una canaleta de mezcla y reacción química del agua con los reactivos en solución como cloro, cal y floculante, seguido de una poza de sedimentación donde en el lodo quedaría el manganeso; esta planta tendría un control automatizado para la adición de los reactivos y control del pH.

Cada planta contaría con una poza de contingencia en los trabajos de mantenimiento.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Aplicada y Explicativa

Según su finalidad la investigación aplicada está orientada a resolver problemas. Por los argumentos esta investigación es aplicada y explicativa por el objetivo planteado. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

3.2. Población y muestra

La población se ajusta a elementos en efluentes mineros que generan sostenibilidad ambiental y preservación de ecosistemas.

La muestra corresponde a tres contextos mineros emplazados en Ancash, La Libertad y Arequipa.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. *Identificación de la variable independiente*

Conjunto de metales

- Indicadores
 - Concentraciones de elementos
 - Fases sólidas formadas
 - Eficiencia de separación de elementos
- Escala para la medición de la Variable
 - Diagramas de pH versus remoción
 - Velocidad de sedimentación
 - Volumen de fases separadas y formadas

3.3.2. Identificación de las variable dependiente

Elementos separados

- Indicadores
 - Reactores y sedimentadores
 - Numero de reactores
 - Eficiencia de desempeño
- Escala para la medición de la Variable
 - Volúmenes de fracciones
 - Porcentaje de separaciones
 - Demanda de proceso

Tabla 2

Matriz de operaciones

Variable	Definición	Operatividad	Indicadores
Reactores	Cinética química	Controlable	Leyes
Eficiencia	Alta reacción	Evaluable	Balance

3.4. Instrumentos

Los instrumentos utilizados corresponden a equipos para operaciones unitarias en agitación, floculación y sedimentación; análisis espectral en la identificación y cuantificación de elementos del proceso de fraccionamiento orientadas por fichas de tablas de estabilidad físico-química y termodinámicas respecto a posibilidades de ocurrencia de reacciones químicas; asimismo fichas de estándares de calidad de agua.

3.5. Procedimientos

El procedimiento para el desarrollo del fraccionamiento de metales de drenajes ácidos y remoción del manganeso es de la siguiente manera: (Hernández-Sampieri et al., 2014)

- Etapa 1: Seleccionar drenajes ácidos de unidades mineras que utilizan el método clásico de neutralización con cal, floculación y sedimentación con disposición final de lodos totales ocupando grandes áreas.
- Etapa 2: Analizar las muestras a fin establecer un fraccionamiento o separación sistemática de metales de importancia en la sostenibilidad ambiental; asimismo conocer los caudales.
- Etapa 3: Formulación del proceso secuencial de innovación para el fraccionamiento en base a las propiedades de estabilidad físico-química y termodinámica de los metales seleccionados.
- Etapa 4: Selección del reactor, agitador, reactivos y sensores a utilizar durante el proceso experimental de fraccionamiento para un determinado volumen de drenaje ácido.
- Etapa 5: Desarrollo de pruebas experimentales a fin de optimizar la eficiencia del proceso.
- Etapa 6: Separaciones sólido/líquido, donde el sólido es la fracción de uno de los metales separados y el líquido contiene otro metal a ser separado hasta el final donde se tiene el agua tratada.
- Etapa 7: Análisis cuantitativo por métodos espectrométricos de los componentes de la fases sólidas y líquidas.
- Etapa 8: Balance de masas de los metales recuperados.
- Etapa 9: Diseño de planta piloto para recuperación en continuo de metales incluyendo un reactor con agitador y clarificador para la separación de cada metal.

- Etapa 10: Discusión de proceso, conclusiones y recomendaciones, bibliografía y anexos.

3.6. Análisis de datos

El análisis de la data obtenida por los instrumentos del proceso experimental se efectúa utilizando estadística descriptiva que permite cumplir con los propósitos del estudio. La data obtenida de las muestras de drenajes ácidos fueron interpretados utilizando los diagramas de estabilidad pH-Eh de los elementos fraccionados; asimismo las reacciones químicas propuestas fueron validadas utilizando el software termodinámico HH, el diseño de las plantas por AutoCAD, las poblaciones de datos geoquímicos son evaluados por el software SPSS 22 a través de métodos de estadística descriptiva e inferencial, la distribución bidimensional de datos geoquímicos mediante el software Surfer 15 y como herramienta en informática se trabajó con Microsoft Excel. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

- Validez de datos

En el marco de la validez de datos fueron validados a través de estándares referenciales y curvas de calibración de los elementos fraccionados que permiten obtener valores de correlación del orden de 0.997 entre los valores experimentales y las curvas de calibración. En la verificación de hipótesis se emplean datos muestrales elaborados y determinados mediante el factor de contraste de la prueba, implementando la correlación no paramétrica Rho de Spearman, lo cual evidencia la pertinencia de esta herramienta para su utilización en la investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Resultados experimentales de fraccionamiento de drenajes ácidos

El fraccionamiento de 1432 mg/L de hierro de un drenaje ácido con un pH de 1.5 se realiza en un reactor con 2 litros del efluente ácido en agitación controlada de 250 revoluciones por minuto (RPM) con adición del álcali de neutralización, floculación y sedimentación y control del pH y Eh; a fin de controlar los factores físico-químicos; cuyo resultado es graficado en la figura 4.

Figura 3

Efluente minero inicial - Agua ácida a pH 2 con abundantes sulfatos, hierro y manganeso



4.1.1. Prueba de fraccionamiento para separación del hierro

El fraccionamiento del hierro se realiza adicionando 80 ml de solución de cal(CaO) al 10%, a 2 litros de drenaje ácido que permite aumentar el pH hasta iniciar una meseta en un pH 5 como se muestra en la figura 4, y luego agregar el floculante magnafloc al 0.05% con agitación durante 1 minuto, seguido de una sedimentación sin agitación logrando una separación del hierro como un lodo de hidróxido de hierro y agua en la parte superior en un tiempo de retención de 5 minutos.

Figura 4

Grafica mostrando separación del hierro en pH 5

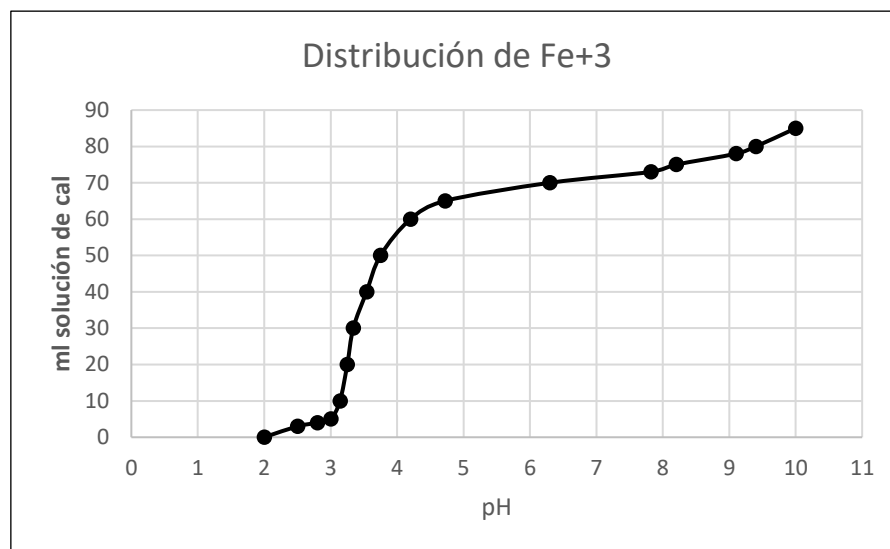
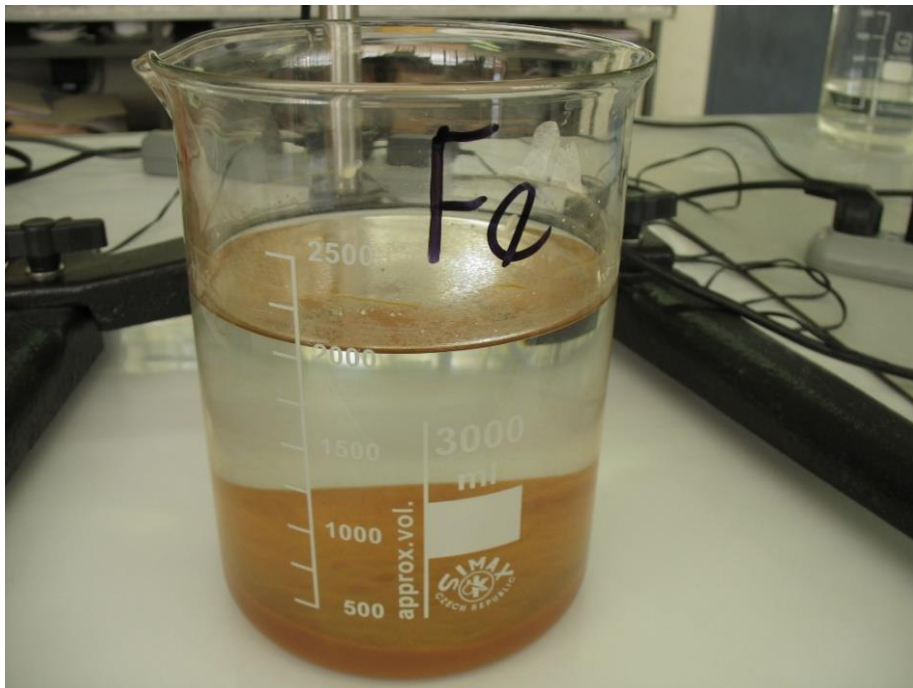
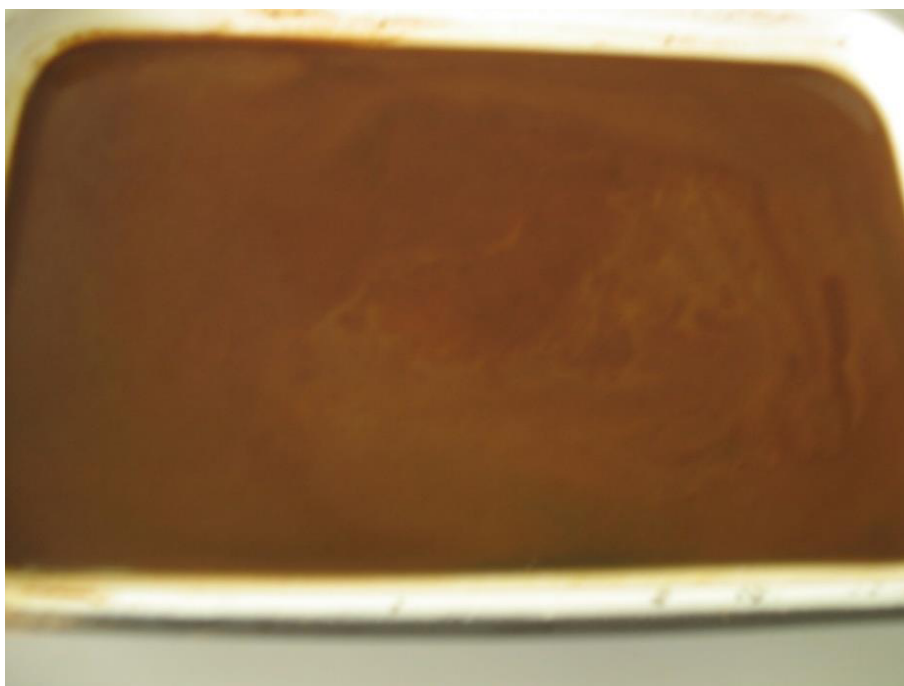


Figura 5

Lodo con $Fe(OH)_3$ en el fondo ($Fe^{+3} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$)

**Figura 6**

Fracción de lodos de hierro como $Fe(OH)_3$ separado entre pH 5 a 8.5



4.1.2. Prueba de fraccionamiento para separación del manganeso

Aumentado el pH con agitación a 250 RPM se inicia la precipitación alrededor pH 9

Figura 7

Separación de manganeso a pH 9

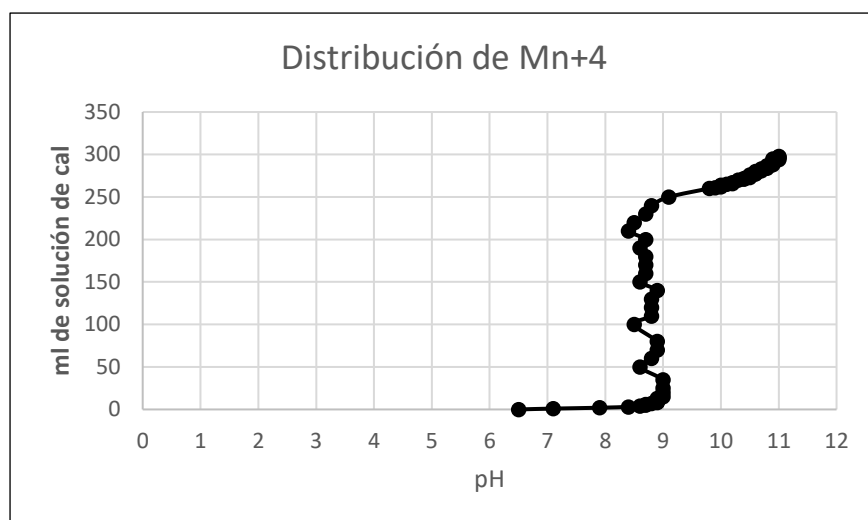


Figura 8

Lodo con Mn(OH)₄ en el fondo del vaso ($Mn^{+4} + 4OH \rightarrow Mn(OH)_4$)

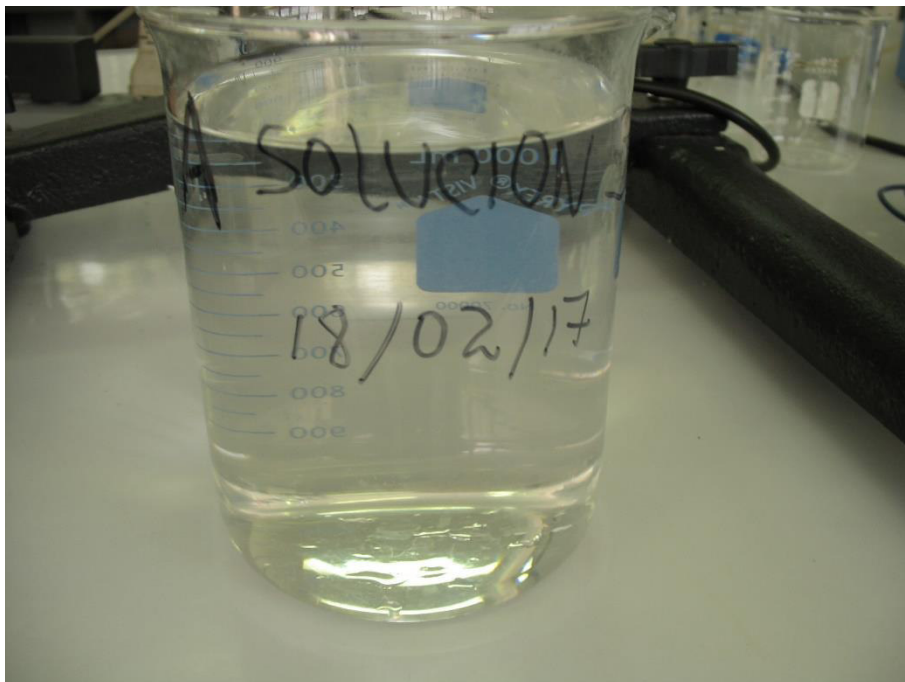


Figura 9

Fracción de lodos de manganeso con $Mn(OH)_4$ separado entre pH 8.5 a 9.5

**Figura 10**

Agua tratada al final del proceso de efluente fraccionado en pH 8.8, 0.04 mg/L Fe, y 0.03 mg/L Mn



4.1.3. Prueba de Fraccionamiento para Separación del Zinc

Figura 11

Luego de la separación del hierro, queda el zinc en solución en un pH de 5



Figura 12

Etapa de precipitación del zinc como sulfuro de zinc ($ZnSO_4 + Na_2S \rightarrow \underline{ZnS} + Na_2SO_4$)

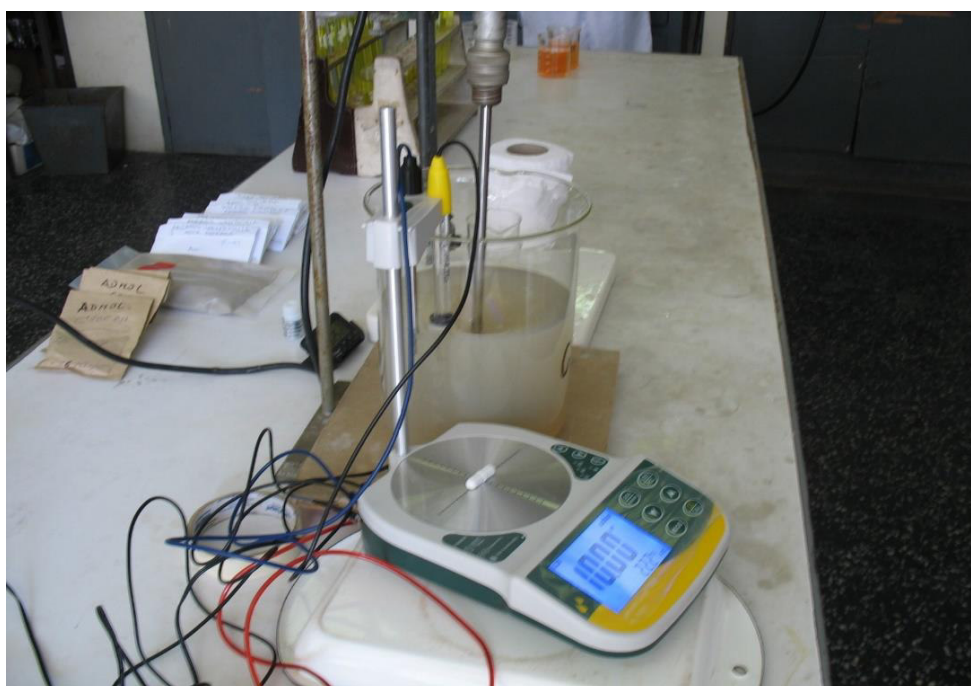
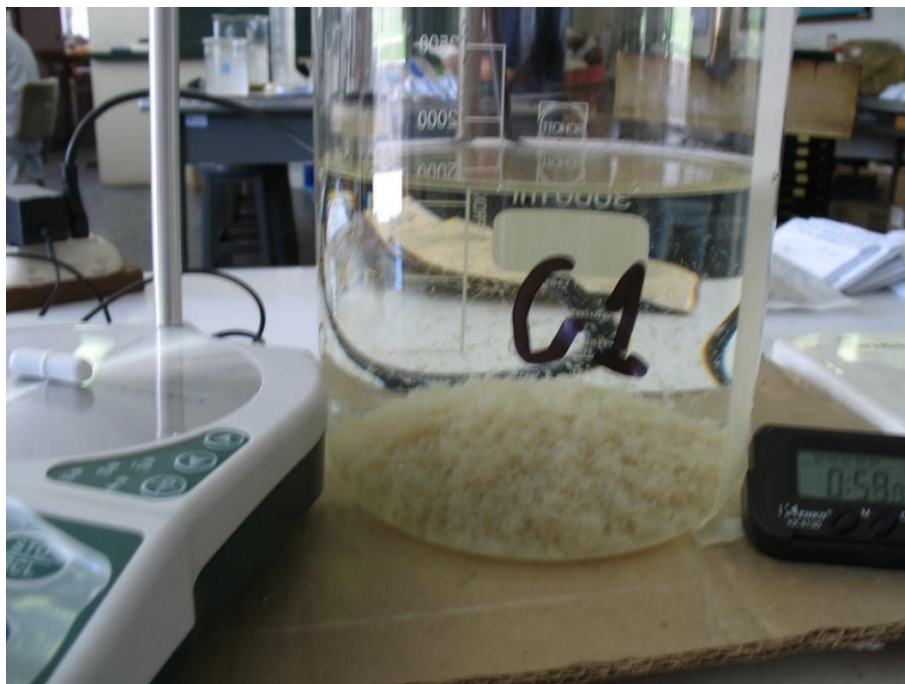
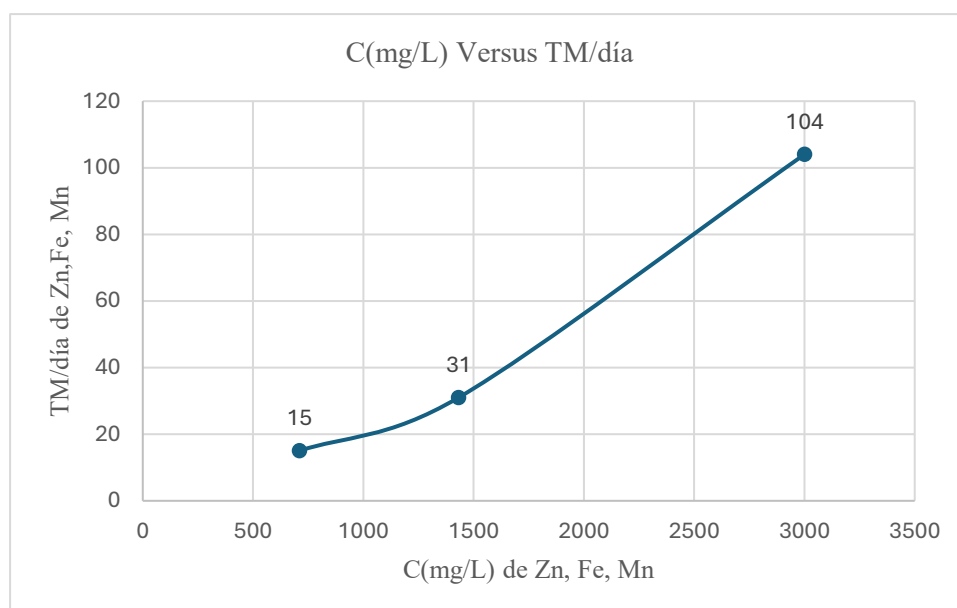


Figura 13*Separación del Zn como ZnS a pH 9***Tabla 3***Balace de Fraccionamiento del Fe, Mn y Zn*

Elemento	L/seg	mg/L	mg/seg	g/seg	g/día	Kg/día	TM/día
Fe	250	1432	358000	358	30931200	30931	31
Mn	400	3000	1200000	1200	103680000	103680	104
Zn	250	710	177500	178	15336000	15336	15

Elemento	C(mg/L)	TM/día	%Recuperación
Zn	710	15	95
Fe	1432	31	92
Mn	3000	104	90

Figura 14

Recuperación de Zn, Fe y Mn en TM por día

4.2. Resultados de remoción del manganeso de efluentes

Los resultados de la evaluación geoquímica de rocas, sedimentos, aguas naturales, y efluentes se desarrolla a fin de establecer los impactos sobre las aguas del río Santiago respecto a los ECAs III y IV del D.S. N° 002-2008-MINAM en Minera Bateas S.A.C., que se emplaza en el distrito y provincia de Caylloma, departamento de Arequipa; comprendiendo la confluencia de las microcuencas de las Quebradas Huarajo y Cuchilladas, ambas márgenes del río Santiago, afluente en las nacientes del río Apurímac; hasta el sur en el cerro San Francisco.

Las condiciones naturales del medio están determinadas por el contexto geológico de los volcánicos Tacaza emplazados en el Terciario Medio que nos define la distribución geoquímica normal de los elementos o valores de fondo de la zona en que ocurrió la

mineralización de las vetas en Minera Bateas y posterior movilidad de elementos, incluyendo Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Fe, As.

Tabla 4

Resultados del Análisis Geoquímico de Rocas

Nº	Muestra	Tipo de Roca	Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	Cd(ppm)	Mn(ppm)	Fe%	As(ppm)
1	HR1		29	56	146	1	701	3.39	193
2	HR1-D		83	21	143	2	1580	3.46	1
3	HR2	Andesita	43	16	149	2	931	3.14	1
4	CR3		68	23	80	2	1450	3.11	69
5	CR4		72	19	717	3	1441	3.74	1
6	SR6	Riolita	74	75	104	2	354	3.63	184
7	SR7		34	20	87	2	596	3.30	1
8	SR8		24	57	43	1	128	1.94	1
9	SR9		8	42	99	2	851	3.22	1
10	SR10		42	316	71	2	755	2.87	1
11	SR11	Andesita	66	26	90	4	4879	3.22	1
12	SR12		36	9	74	2	673	2.49	1
13	SR13		9	1	27	1	135	0.97	1
14	SR14		4	1	15	1	98	0.33	1
15	SR15	Riolita	15	1	34	1	91	0.68	1
16	SR16	Andesita	35	11	64	2	984	3.62	1
17	SR17	Riolita	49	2	44	2	229	1.28	1
18	SR19	Andesita	26	1	52	2	153	1.53	1
	Valor Normal	Andesita					1200		
	Valor normal	Riolita					400		

Tabla 5*Potencial Neto de Neutralización de 18 Muestras de Rocas*

Nº	Muestra	Tipo de Roca	pH	PN	%S	PA	PNN	PN/PA	SO4-2	Observaciones
1	HR1		6.6	35.00	2.22	69.35	-34.35	0.50	0.166	Presencia de sulfuros
2	HR1-1D		6.8	107.50	0.49	15.31	92.19	7.02	0.179	
3	HR2	Andesita	6.8	74.37	0.15	4.69	69.68	15.86	0.081	Presencia de sulfuros
4	CR3		6.6	26.25	0.32	10.00	16.25	2.63	0.110	
5	CR4		6.7	43.75	1.51	47.19	-3.44	0.93	0.093	
6	SR6	Riolita	6.8	25.62	0.35	10.94	14.68	2.34	0.190	
7	SR7		6.9	28.30	0.59	18.44	9.86	1.53	0.115	
8	SR8		6.8	16.87	0.07	2.19	14.68	7.70	0.114	
9	SR9		6.9	56.25	0.09	2.81	53.44	20.02	0.080	
10	SR10	Andesita	6.9	60.00	0.07	2.19	57.81	27.40	0.056	
11	SR11		7.2	236.25	0.01	0.31	235.94	762.10	0.060	
12	SR12		7.1	125.00	0.01	0.31	124.69	403.23	0.070	
13	SR13		6.7	16.56	0.02	0.62	15.94	26.71	0.157	
14	SR14		6.6	14.12	0.01	0.31	13.81	45.55	0.090	
15	SR15	Riolita	6.7	15.00	0.01	0.31	14.38	48.39	0.085	
16	SR16	Andesita	6.8	17.50	0.01	0.31	16.88	56.45	0.081	
17	SR17	Riolita	6.6	23.12	0.23	7.19	15.93	3.22	0.080	
18	SR19	Andesita	6.6	22.50	0.03	0.94	21.56	23.94	0.070	

Tabla 6*Resultados del Análisis Geoquímico de Sedimentos*

N°	Muestra	Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	Cd(ppm)	Mn(ppm)	Fe(ppm)	As(ppm)	Observaciones
1	HS1	20	22	84	1	308	1.52	1	-
2	HS1-1D	31	67	215	2	444	2.64	1	-
3	HS2	19	26	148	2	500	1.61	1	-
4	CS3	42	76	206	1	1286	1.78	1	Oxidación y sedimentación
5	CS4	54	93	433	3	5379	1.57	1	Oxidación y sedimentación
6	SS6	44	79	338	3	1626	2.13	1	Oxidación y sedimentación
7	SS7	76	141	449	4	2703	2.00	1	Oxidación y sedimentación
8	SS8	69	257	627	6	1770	2.80	188	Oxidación y sedimentación
9	SS9	86	271	907	9	8013	2.45	155	Oxidación y sedimentación
10	SS10	98	257	843	7	4067	2.92	97	Oxidación y sedimentación
11	SS11	101	317	1436	10	11614	2.57	84	Oxidación y sedimentación
12	SS12	161	116	766	7	3782	1.96	1	Oxidación y sedimentación
13	SS13	32	67	324	2	2102	2.17	1	Oxidación y sedimentación
14	SS14	61	156	823	6	8894	2.03	1	Oxidación y sedimentación

Tabla 7*Potencial neto de Neutralización de 14 Muestras de Sedimentos*

Nº	Muestra	pH	PN	%S	PA	PNN	PN/PA	SO ₄ ⁻²	Observaciones
1	HS1	6.6	21.50	0.12	3.75	17.75	5.73	0.081	Incierto
2	HS1-1D	6.6	19.37	0.10	3.12	16.25	6.21	0.075	Incierto
3	HS2	6.6	16.86	0.11	3.44	13.42	4.90	0.068	Incierto
4	CS3	6.6	14.37	0.16	5.00	9.37	2.87	0.070	Incierto
5	CS4	6.6	15.62	0.09	2.81	12.81	5.56	0.060	Incierto
6	SS6	6.7	21.25	0.05	1.56	19.69	13.62	0.09	Incierto
7	SS7	6.6	22.50	0.30	9.37	13.13	2.40	0.095	Incierto
8	SS8	6.7	24.37	0.10	3.12	21.25	7.81	0.131	Presencia de carbonatos
9	SS9	6.7	49.37	0.18	5.62	43.75	8.78	0.105	Presencia de carbonatos
10	SS10	6.6	28.12	0.10	3.12	25.00	9.01	0.075	Presencia de carbonatos
11	SS11	6.6	21.25	0.11	3.44	17.81	6.18	0.09	Incierto
12	SS12	6.6	24.48	0.20	6.25	18.23	3.92	0.123	Incierto
13	SS13	6.6	22.19	0.12	3.75	18.44	5.92	0.105	Incierto
14	SS14	6.6	25.00	0.31	9.69	15.31	2.58	0.147	Incierto

Tabla 8*Análisis Geoquímico de Aguas Superficiales*

N°	Muestra	Caudal L/seg	Unidades de pH	Conductividad Eléctrica µS/cm	Sulfatos mg/L	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
1	HA1	132.30	6.5	58	13.5	0.006	0.002	0.001	0.61	0.022	0.005	0.013
2	HA1-1D	1.50	6.5	59	27	0.003	0.002	0.001	0.399	0.019	0.005	0.023
3	HA2	106.70	6.5	99	37	0.004	0.002	0.001	0.346	0.028	0.008	0.011
4	CA3	2.01	6.5	355	200	0.004	0.002	0.005	0.553	0.747	0.016	0.109
5	SA6	4.37	6.5	362	180	0.005	0.003	0.002	0.045	0.113	0.022	0.025
6	SA7	390.61	6.5	428	255	0.007	0.003	0.002	0.142	0.570	0.023	0.063
7	SA8	260.00	6.5	415	260	0.008	0.004	0.003	0.238	0.523	0.032	0.084
8	SA9	448.94	7.0	107	19	0.007	0.004	0.006	0.071	0.337	0.028	0.061
9	SA10	6.25	6.5	169	77	0.001	0.003	0.001	0.161	0.009	0.01	0.025
	ECA III Riego Vegetales		6.5-8.5	<2000	300	0.05	0.005	0.2	1	0.2	0.05	2
	ECA III Bebida animales		6.5-8.4	<=5000	500	0.10	0.010	0.5	1	0.2	0.05	24
	ECA IV Ríos Costa y Sierra		6.5-8.5	-	-	0.05	0.004	0.02	-	-	0.001	0.03

Tabla 9*Análisis Geoquímico de Aguas de Filtraciones Naturales*

Nº	Muestra	Caudal L/seg	Unidades de pH	Conductividad Eléctrica µS/cm	Sulfatos mg/L	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
1	F-1-A	233.81	6.5	403	190	0.016	0.003	0.001	0.444	0.574	0.026	0.049
2	F-1-D	240.00	6.5	407	185	0.053	0.004	0.003	0.532	0.609	0.028	0.076
3	F-2-A	230.88	6.5	401	195	0.018	0.004	0.003	0.352	0.555	0.027	0.075
4	F-2-D	267.50	7.0	452	235	0.030	0.005	0.016	0.836	0.543	0.037	0.133
5	F-3/F-4-A	160.13	6.5	467	255	0.020	0.005	0.003	0.667	0.669	0.030	0.169
6	F-3/F-4-D	161.50	6.5	460	260	0.021	0.005	0.011	1.269	0.747	0.039	0.198
7	F-5-A	177.33	6.5	397	185	0.025	0.006	0.012	1.052	0.753	0.036	0.190
8	F-5-D	163.00	6.5	431	195	0.023	0.001	0.001	0.049	0.048	0.001	0.001
9	F-6-A	118.26	7.0	47	240	0.024	0.006	0.006	1.022	0.741	0.039	0.146
10	F-6-D	123.86	7	654	230	0.024	0.005	0.005	0.888	0.701	0.027	0.141
11	F7/F8/F9-A	115.65	7	341	210	0.026	0.005	0.006	0.990	0.717	0.036	0.147
12	F7/F8/F9-D	145.74	7	281	215	0.026	0.004	0.008	1.137	0.596	0.048	0.137
13	F-10-A	190.75	7	307	220	0.018	0.004	0.005	0.723	0.575	0.041	0.134
	ECA III Riego Vegetales		6.5-8.5	<2000	300	0.05	0.005	0.2	1	0.2	0.05	2
	ECA III Bebida animales		6.5-8.4	<=5000	500	0.10	0.010	0.5	1	0.2	0.05	24
	ECA IV Ríos Costa y Sierra		6.5-8.5	-	-	0.05	0.004	0.02	-	-	0.001	0.03

Tabla 10*Análisis Geoquímico de Aguas de Filtraciones Naturales*

N°	Muestra	Caudal L/seg	Unidades de pH	Conductividad Eléctrica μS/cm	Sulfatos mg/L	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
14	F-10-D	245.35	6.5	490	235	0.019	0.004	0.008	0.916	0.618	0.049	0.150
15	F-12-A	308.34	6.5	256	230	0.017	0.004	0.004	0.283	0.485	0.029	0.086
16	F-12-D	317.25	6.5	311	215	0.017	0.004	0.007	0.861	0.582	0.054	0.132
17	F-14-A	276.00	6.5	419	210	0.016	0.004	0.005	0.715	0.578	0.046	0.106
18	F-14-D	261.55	7.0	272	220	0.013	0.004	0.003	0.781	0.599	0.044	0.109
19	F-15-A	237.50	6.5	315	235	0.017	0.005	0.005	0.767	0.641	0.045	0.101
20	F-15-D	241.63	6.5	151	260	0.017	0.006	0.003	0.706	0.609	0.040	0.092
21	F-16-A	258.94	7.0	357	200	0.007	0.004	0.001	0.160	0.356	0.015	0.047
22	F-16-D	287.19	6.5	107	250	0.007	0.004	0.002	0.140	0.372	0.014	0.046
23	F-17-A	297.68	7.0	143	245	0.007	0.004	0.001	0.141	0.376	0.018	0.039
24	F-17-D	339.38	7.0	146	260	0.008	0.004	0.005	0.432	0.432	0.027	0.066
25	F-19-A	199.25	7.0	342	275	0.021	0.005	0.004	0.760	0.576	0.031	0.112
26	F-19-D	249.50	7.0	200	240	0.026	0.005	0.004	0.775	0.587	0.029	0.136
	ECA III Riego Vegetales		6.5-8.5	<2000	300	0.05	0.005	0.2	1	0.2	0.05	2
	ECA III Bebida animales		6.5-8.4	<=5000	500	0.10	0.010	0.5	1	0.2	0.05	24
	ECA IV Ríos Costa y Sierra		6.5-8.5	-	-	0.05	0.004	0.02	-	-	0.001	0.03

Tabla 11*Análisis Geoquímico de Aguas de Efluentes al Río Santiago*

N°	Muestra	Caudal L/seg	Unidades de pH	Conductividad Eléctrica µS/cm	Sulfatos mg/L	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
1	E03-A	73.00	7.0	54	130	0.003	0.002	0.003	0.205	0.017	0.015	0.013
2	E03-D	229.62	6.5	77	210	0.019	0.003	0.007	0.651	0.672	0.034	0.053
3	E05-A	145.74	6.5	120	240	0.039	0.004	0.007	1.028	0.595	0.029	0.128
4	E05-D	145.10	6.5	78	220	0.030	0.004	0.008	1.101	0.635	0.030	0.127
5	EF-04-A	271.30	7.0	238	225	0.015	0.004	0.004	0.583	0.584	0.031	0.125
6	EF-04-D	274.88	7.0	501	230	0.015	0.004	0.007	0.689	0.598	0.030	0.133
7	E-12-A	274.88	7.0	314	235	0.014	0.004	0.005	0.657	0.568	0.030	0.123
8	E-12-D	275.88	7.0	384	265	0.017	0.003	0.003	0.623	0.573	0.019	0.120
9	EF-3-A	275.88	7.0	438	225	0.012	0.004	0.004	0.486	0.645	0.020	0.113
10	EF-3-D	276.00	7.0	90	245	0.014	0.004	0.004	0.501	0.558	0.017	0.104
11	EF-06-A	393.00	7.0	122	330	0.007	0.004	0.002	0.150	0.340	0.011	0.040
12	EF-06-D	407.60	7.0	211	430	0.007	0.004	0.003	0.115	0.398	0.011	0.046
	ECA III Riego Vegetales		6.5-8.5	<2000	300	0.05	0.005	0.2	1	0.2	0.05	2
	ECA III Bebida animales		6.5-8.4	≤5000	500	0.10	0.010	0.5	1	0.2	0.05	24
	ECA IV Ríos Costa y Sierra		6.5-8.5	-	-	0.05	0.004	0.02	-	-	0.001	0.03

- Diagrama de flujo

El proceso seleccionado comprende una adición del cloro para oxidación del manganeso, un ajuste del pH con cal, un floculante y luego un sedimentación.

Figura 15

Separación del manganeso de efluente por acción del Cl_2

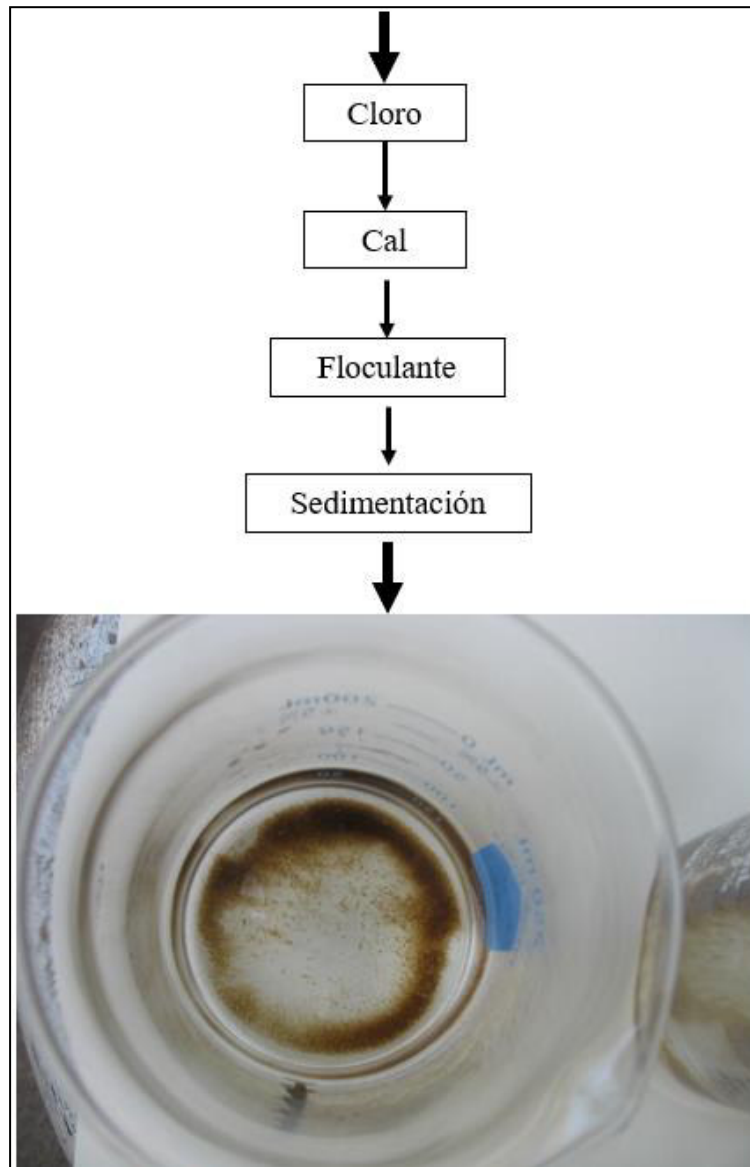
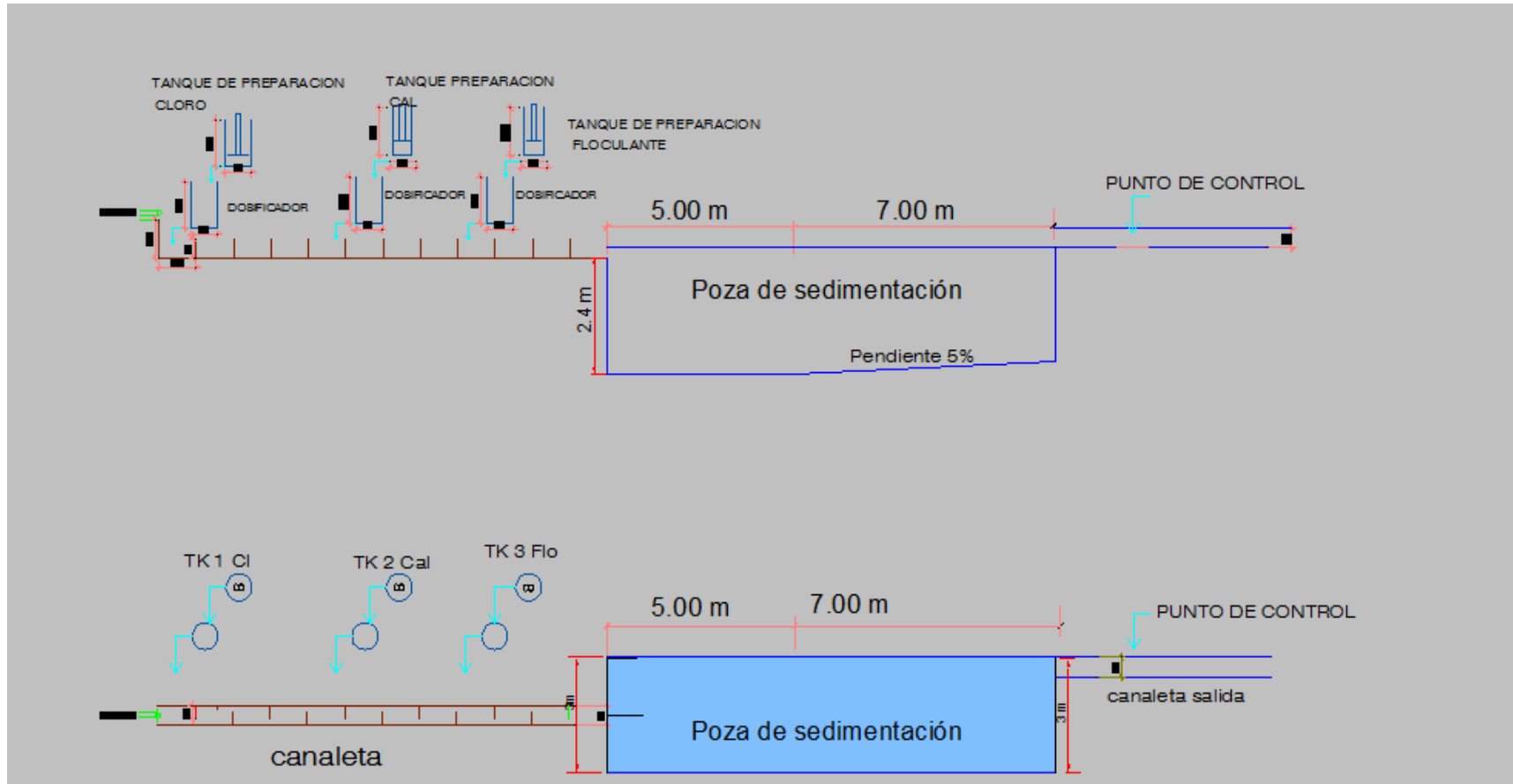


Figura 16

Planta 2 de Tratamiento de Manganeso – Relavera



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. El fraccionamiento Geoquímico secuencial corresponde a una serie de procesos físico-químicos secuenciales a fin de obtener fracciones independientes de metales como el caso del hierro, manganeso y zinc; los dos primeros como hidróxidos y el tercero como sulfuro; diferente a los métodos experimentales convencionales de obtener un lodo final constituido por una mezcla de material con usos muy restringidos; mostrándose en la tabla la recuperación por día.

Tabla 12

Recuperación por día

Elementos	TM/día
Fe	31
Mn	104
Zn	15

5.2. El fraccionamiento geoquímico de un efluente nos lleva a una disminución de los residuos y a condiciones de sostenibilidad ambiental por el valor económico asociado a cada fracción de elemento independiente; asimismo una menor área para disposición de residuos.

5.3. Los resultados del fraccionamiento de efluentes ácidos que permiten separar el hierro, manganeso y zinc nos permite inducir el desarrollo de un proceso de fraccionamiento en continuo utilizando el efluente ácido como materia inicial y un conjunto de reactores y clarificadores que nos permitan separar productos A, B y C como se indica en la figura 16, obteniéndose un efluente final controlado lo cual llevaría a una sostenibilidad ambiental y preservación de ecosistemas.

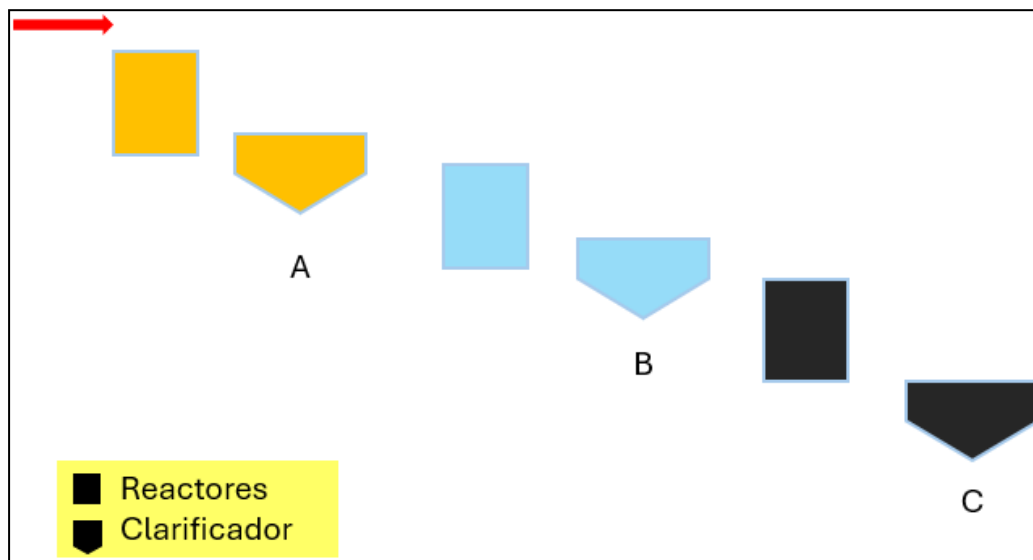
5.4. El diseño del proceso depende fundamentalmente de las características del efluente que se genera durante el desarrollo de la operación minera, lo cual estaría relacionado al

tipo de yacimiento mineral.; así podríamos tener fraccionamientos Fe y Cu ó Fe,Cu, Mo, etc.

5.5. Los diagramas de pH versus Eh (potencial redox) son de importancia a fin de orientar la transición para pasar de un fase acuosa a una fase sólida donde se recupera el metal como hidróxido o sulfuro.

Figura 17

Proceso de Fraccionamiento en Continuo



5.6. Durante el proceso de separación de una fase líquida del sólido con el metal hemos utilizado un bomba peristáltica, para pasar la fase líquida remanente a otro reactor ; esto nos permite desarrollar un proceso secuencial a una escala piloto; siendo a escala de planta un reactor y un clarificador que permite una separación sólido/líquido a gran velocidad.

5.7. Otro aspecto de importancia es que podemos utilizar diferentes sustancias que reaccionen específicamente con el elemento que deseamos separar verificado por las condiciones termodinámicas; siendo un ejemplo muy interesante la separación del zinc donde utilizamos sulfuro de sodio a fin de precipitar sulfuro de zinc equivalente a la esfalerita.

5.8. Los efluentes mineros de drenajes ácidos investigados corresponden a sistemas acuosos con predominancia de cationes como hierro, manganeso, zinc y aniones principalmente sulfatos relacionados al tipo de yacimiento donde ha ocurrido la hidrólisis y oxidación de los sulfuros, necesario verificarlo durante la caracterización inicial del efluente.

5.9. El manganeso ocurre comúnmente en los efluentes como Mn^{+2} por lo cual requerimos oxidarlo con aire durante la agitación para pasarlo a Mn^{+4} en la etapa de neutralización, lográndose pasarlo a un fase sólida en un pH de 10 o mayor y luego el efluente residual hay que disminuir el pH para cumplir con la normatividad ambiental; sin embargo en la investigación realizada logramos innovar haciendo una oxidación con cloro; lo cual nos permite precipitarlo en el rango del pH de la normatividad ambiental.

5.10. El análisis del costo/beneficio del fraccionamiento se ilustra en la tabla siguiente para los casos del zinc, hierro y manganeso; donde los beneficios son mayores que los costos.

Tabla 13

Balance de costo/Beneficio

Productos	\$/TM	\$/TM	\$/TM	TM/día	\$/día	\$/día	\$/día
Zn (ZnS)	2616			15	39240		
Fe (Fe ₂ O ₃)		100		31		3100	
Mn (MnO ₂)			3	104			312

Los costos de planta, reactivos, operatividad, energía y otros serian del orden del 60% quedando un 40 % para usos en sostenibilidad ambiental.

VI. CONCLUSIONES

El trabajo de investigación evalúa el fraccionamiento físico-químico de drenajes ácidos influyendo positivamente en la sostenibilidad ambiental minera al recuperar metales con valores económicos y disminuyendo las zonas para disposición de residuos que permiten preservar los ecosistemas y cuerpos receptores.

6.1. El fraccionamiento del drenaje ácido se logra con variaciones químicas selectivas del pH en la solubilidad de los elementos utilizando cal y sulfuro de sodio que permite la separación del Fe, Mn y Zn (tabla 3); en un proceso que utiliza reactores y clarificadores en forma secuencial.

6.2. El fraccionamiento geoquímico de los efluentes mineros y la mitigación del manganeso influye en la disminución física de las zonas de disposición para la acumulación de residuos lodosos (tabla 12) eliminando impactos ambientales sobre los ecosistemas.

6.3. Se cuantifica el balance de masa de los residuos obtenidos por los procesos clásicos de neutralización y los procesos de fraccionamientos del drenaje ácido, disminuye a un orden del 10%; lo cual lleva a utilizar áreas pequeñas para la disposición de los residuos finales; asimismo permite recuperar valores de zinc, hierro y manganeso obtenidos al final del proceso correspondiendo a recuperaciones del 95, 92 % y 90% (tabla 3) necesarios para uso industrial. Para la mitigación del manganeso se realiza utilizando cloro como oxidante del manganeso que permite optimizar la remoción del manganeso y diseñar plantas para su tratamiento. Los costos de remoción del manganeso son del orden de 0,06 \$/m³, disminuyendo su valor en época de estiaje.

6.4. Se determina que la sostenibilidad ambiental permite disminuir los costos de tratamiento de efluentes ácidos por la adición de metales recuperados que aumentan los valores (tabla 12) en la comercialización de los metales y cumplir con los estándares de calidad ambiental.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Se requiere diseñar una planta con una serie de reactores con agitación y clarificadores en serie que permitan acondicionar y separar las fracciones metálicas del efluente ácido minero en continuo.

7.2. Durante el acondicionamiento puede utilizarse caliza en malla -200 que permite llevar el pH hasta 5; lo cual llevaría a una disminución del consumo de cal.

7.3. Emplear solución saturada de cal para optimizar el control en la separación de hierro y manganeso.

7.4. La aireación mediante agitación facilita la oxidación del Mn^{+2} a Mn^{+4} ; no obstante, es posible acelerar esta cinética mediante la utilización de H_2O_2 .

7.5. La cinética de oxidación del Mn^{+2} utilizando cloro permite remover el manganeso como MnO_2 en el rango de pH entre 8.5-9.0 utilizando cal seguido de una floculación y sedimentación que nos permite descargar el efluente tratado a los cuerpos receptores cumpliendo con los criterios de calidad ambiental que permiten la preservación de los ecosistemas.

7.6. Implicancias en el desarrollo de las comunidades aledañas por el aumento del índice de desarrollo humano relacionado a la salud, educación y economía.

VIII. REFERENCIAS

- Adrianto, L. R., Ciacci, L., Pfister, S., & Hellweg, S. (2023). Toward sustainable reprocessing and valorization of sulfidic copper tailings: Scenarios and prospective LCA. *Science of The Total Environment*, 871, 162038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162038>
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje acido de mina. Generación y Tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España
- Du, T., Bogush, A., Mašek, O., Purton, S., & Campos, L. C. (2022). Algae, biochar and bacteria for acid mine drainage (AMD) remediation: A review. *Chemosphere*, 304, 135284. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135284>
- Gonçalves, N. P. F., Da Silva, E. F., Tarelho, L. A. C., Labrincha, J. A., & Novais, R. M. (2024). Simultaneous removal of multiple metal(loid)s and neutralization of acid mine drainage using 3D-printed bauxite-containing geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132718. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132718>
- Han, Z., Levett, A., Edraki, M., Jones, M. W. M., Howard, D., & Southam, G. (2023). Accelerating bioleaching of tungsten mining wastes using indigenous acidophilic bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131490. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131490>
- Heim, W. A., Bosworth, D., DiGiorgio, C., Stephenson, M., & Gill, G. (2023). Effects of vegetation on methylmercury concentrations and loads in a mercury contaminated floodplain. *Science of The Total Environment*, 901, 165864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165864>
- Hermassi, M., Granados, M., Valderrama, C., Ayora, C., & Cortina, J. L. (2022). Recovery of rare earth elements from acidic mine waters: An unknown secondary resource. *Science of The Total Environment*, 810, 152258. <https://bit.ly/4kNzWoD>

- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Jiménez, J., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Sanchez Navarro, J. Á., Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2023). The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain). *Science of The Total Environment*, 896, 165293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165293>
- Pincetti-Zúniga, G. P., Richards, L. A., Daniele, L., Boyce, A. J., & Polya, D. A. (2022). Hydrochemical characterization, spatial distribution, and geochemical controls on arsenic and boron in waters from arid Arica and Parinacota, northern Chile. *Science of The Total Environment*, 806, 150206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150206>
- Santofimia, E., González, F. J., Rincón-Tomás, B., López-Pamo, E., Marino, E., Reyes, J., & Bellido, E. (2022). The mobility of thorium, uranium and rare earth elements from Mid Ordovician black shales to acid waters and its removal by goethite and schwertmannite. *Chemosphere*, 307, 135907. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135907>
- Sarker, S. K., Pownceby, M. I., Bruckard, W., Haque, N., Bhuiyan, M., & Pramanik, B. K. (2023). Unlocking the potential of sulphide tailings: A comprehensive characterization study for critical mineral recovery. *Chemosphere*, 328, 138582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138582>
- Takeo, N. (2005). *Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases*. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2022). A critical review of phytoremediation for acid mine drainage-impacted environments. *Science of The Total Environment*, 811, 152230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152230>

- Tum, S., Toda, K., Matsui, T., Kikuchi, R., Kong, S., Meas, P., Ear, U., Ohtomo, Y., Otake, T., & Sato, T. (2022). Seasonal effects of natural attenuation on drainage contamination from artisanal gold mining, Cambodia: Implication for passive treatment. *Science of The Total Environment*, 806, 150398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150398>
- Xu, T., Roepke, E. W., Flynn, E. D., Rosenfeld, C. E., Balgooyen, S., Ginder-Vogel, M., Schuler, C. J., & Santelli, C. M. (2023). Aqueous Co removal by mycogenic Mn oxides from simulated mining wastewaters. *Chemosphere*, 327, 138467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138467>
- Yan, S., Cheng, K. Y., Ginige, M. P., Morris, C., Deng, X., Li, J., Song, S., Zheng, G., Zhou, L., & Kaksonen, A. H. (2022). Sequential removal of selenate, nitrate and sulfate and recovery of elemental selenium in a multi-stage bioreactor process with redox potential feedback control. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127539. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127539>

IX. ANEXOS

A. ABUNDANCIA NORMAL DE MANGANESO

La distribución global normal o niveles de fondo natural del manganeso en los diferentes tipos de roca en la litósfera se indican a continuación.

Rocas Volcánicas

		%Mn	Mn(ppm)
1	Basalto	0.14	1400
2	Andesita	0.12	1200
3	Dacita	0.07	700
4	Traquita	0.10	1000
5	Riolita	0.04	400

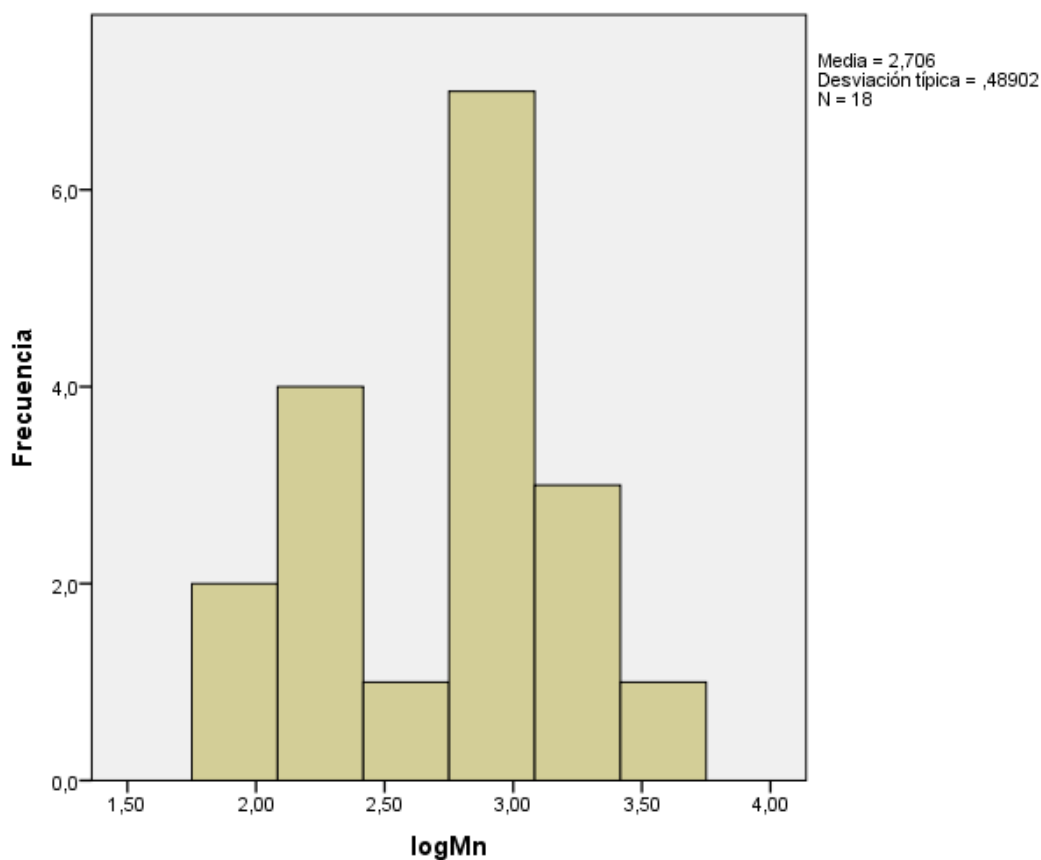
Rocas Intrusivas

		%Mn	Mn(ppm)
1	Granito	0.006	60
2	Granodiorita	0.07	700
3	Cuarzo diorita	0.09	900
4	Diorita	0.12	1200

B.- VALORES GEOQUÍMICOS DE MANGANESO EN ROCAS

La distribución log normal primaria del manganeso en las rocas es de tipo bimodal, correspondiendo la primera distribución a las rocas silicificadas como las riolitas y la segunda distribución a las andesitas cuyos valores geoquímicos normales se dan en la tabla siguiente.

Distribución del Manganeso en ppm

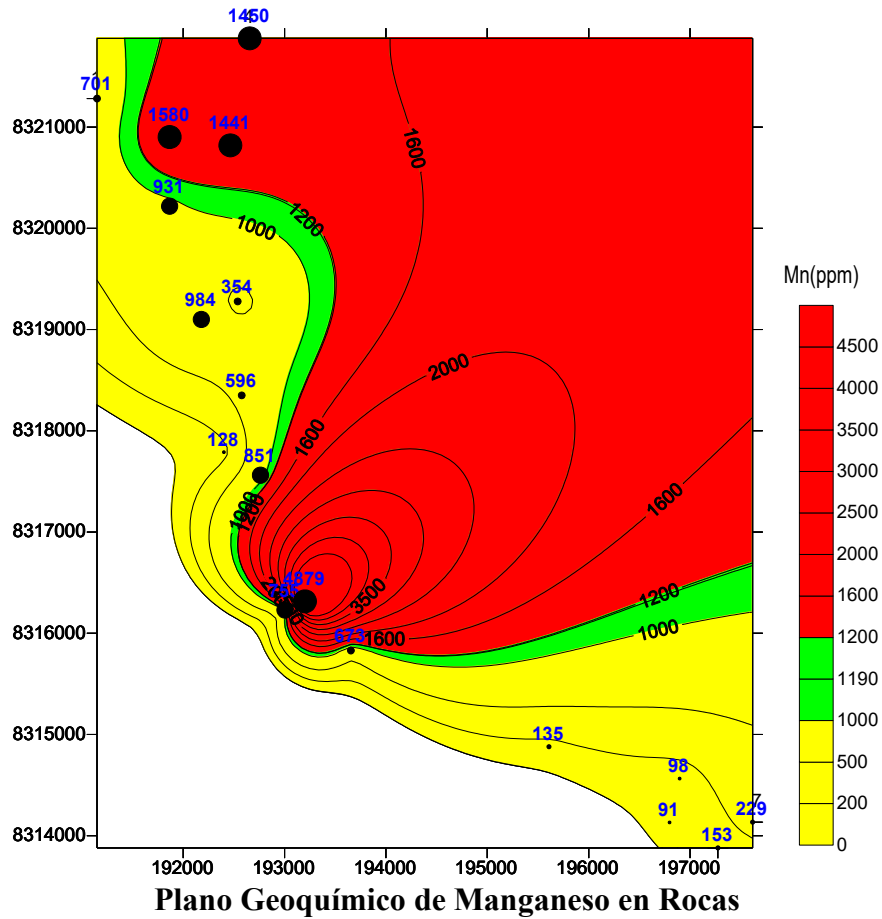


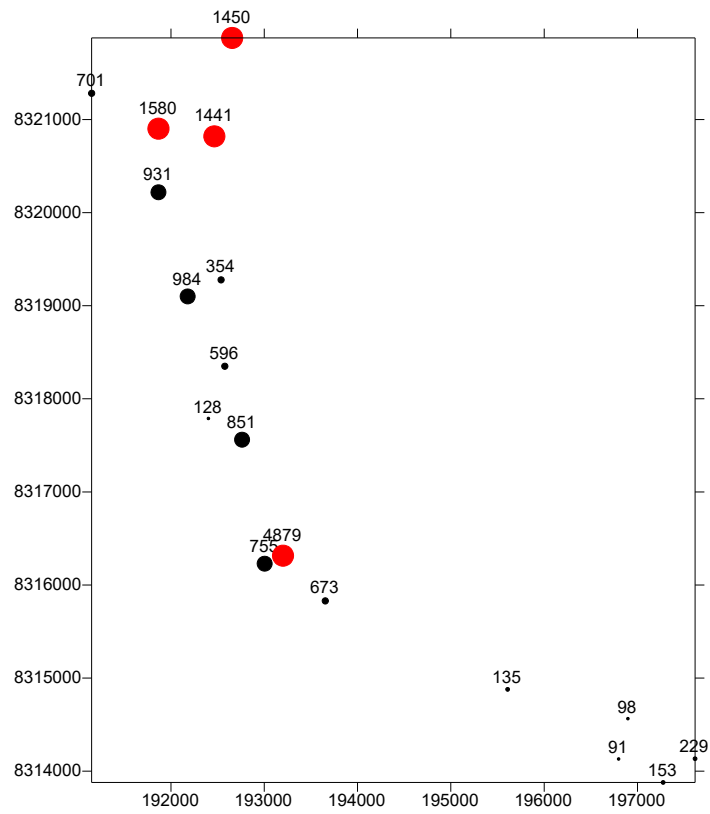
Abundancia Normal del Manganeso

Poblaciones	Abundancia Normal Manganeso	2 veces desviación estándar	Valores anómalos Manganeso
Primera población Rocas Riolitas	180 ppm	5 ppm	Igual y Mayores a 185 ppm
Segunda Población Rocas Andesitas	1190 ppm	10 ppm	Igual y mayores a 1200 ppm

C. PLANOS GEOQUÍMICO DE MANGANESO EN ROCAS

Siendo las rocas volcánicas de andesitas porfiríticas predominantes en las unidades litológicas de Minera Bateas en el plano geoquímico se mostrará los patrones de dispersión primaria del manganeso relacionados a las rocas volcánicas andesitas.





Concentración de Manganeso (ppm) en Rocas dentro del Plano Geoquímico

Nota. En rojo corresponde a valores mayores a 1200 ppm

Matriz de consistencia

Título: Problema General	Fraccionamiento geoquímico de afluentes mineros y mitigación del manganeso en minería Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Dimensión	Indicadores
¿Como influye el fraccionamiento geoquímico de afluentes mineros en la mitigación del manganeso en la minería?	Determinar cómo influye el fraccionamiento geoquímico de afluentes mineros y la mitigación del manganeso en la minería.	Existe relación entre el fraccionamiento geoquímico de afluentes mineros y la mitigación del manganeso en la minería	VI: Fraccionamiento geoquímico de afluentes mineros	Fraccionamiento químico Fraccionamiento físico	N° Reactores N° Sedimentados Indicadores
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Especificas	Variable Dependiente	Dimensión	Factores químicos
¿En qué medida influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con los factores químicos en la minería?	Evaluar en qué medida influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con los factores químicos en la minería	Existe relación directa entre el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso con relación a los factores químicos en la minería	VD: Fraccionamiento y mitigación del manganeso en minería	Eficacia de separación de elementos	Factores Físicos
¿De qué manera influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con los factores físicos en la minería?	Calcular de qué manera influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con los factores físicos en la minería	Es significativa la relación entre el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con los factores físicos en la minería	VD: Fraccionamiento y mitigación del manganeso en minería	Eficiencia de la mitigación del manganeso	Balance de masa
¿Cómo influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con el balance de masa en la minería?	Cuantificar cómo influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso con relación al balance de masa en la minería.	Es significativa la relación entre el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación al balance de masa en la minería.	VD: Fraccionamiento y mitigación del manganeso en minería	Eficiencia de la mitigación del manganeso	Costo/Beneficio de la Sostenibilidad Ambiental
¿Cómo influye el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación con la sostenibilidad ambiental?	¿Cómo influye la medida del fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso con relación a la sostenibilidad ambiental?	¿Es significativa la medida del fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y la mitigación del manganeso en relación a la sostenibilidad ambiental?	VD: Fraccionamiento y mitigación del manganeso en minería	Eficiencia de la mitigación del manganeso	Costo/Beneficio de la Sostenibilidad Ambiental