

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Textil



INFORME FINAL

**OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA
PRODUCCIÓN DE SULFATO DE ZINC**

Para obtener el título profesional en Ingeniería Química.

Elaborado por

Luis Cesar Gutierrez Medrano

 [0009-0005-3412-7012](https://orcid.org/0009-0005-3412-7012)

Asesor

Dr. Jorge Luis Breña Ore

 [0000-0001-6450-7052](https://orcid.org/0000-0001-6450-7052)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Gutierrez Medrano [1]
Referencia/Reference	[1] L. Gutierrez Medrano, " <i>Optimización en el proceso de lixiviación para la producción de sulfato de zinc</i> " [Informe final de curso de actualización profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Gutierrez, 2025)
Referencia/Reference	Gutierrez, L. (2025). <i>Optimización en el proceso de lixiviación para la producción de sulfato de zinc</i> . [Informe final de curso de actualización profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos aquellos compañeros, amigos y maestros que me inculcaron el valor de la resiliencia para continuar y poder culminar con cualquier proyecto.

A mi familia que siempre me brindan su apoyo y aliento, ya que gracias a su confianza me recuerdan que siempre se puede lograr lo que uno se propone.

Y a mí mismo por cada esfuerzo silencioso que realizo a diario por seguir aprendiendo y creciendo, lo que me recuerda que el compromiso con los demás debe empezar con uno mismo.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la facultad de ingeniería química y textil por brindarme las herramientas y el espacio necesario con los cursos dictados para llevar a cabo este informe. Asimismo, extendiendo mi gratitud a los profesores y compañeros que, de una u otra forma, contribuyeron con sus conocimientos y sugerencias a enriquecer este trabajo.

De manera especial, quiero reconocer el apoyo incondicional de mi familia y amigos, quienes me acompañaron durante este proceso, brindándome ánimo y motivación en los momentos más desafiantes.

Resumen

El presente trabajo tiene por finalidad optimizar el proceso de lixiviación de concentrados oxidados de zinc mediante la optimización del porcentaje de recuperación de zinc, empleando técnicas estadísticas y pruebas experimentales a nivel planta.

El estudio se clasifica como una investigación aplicada, ya que su objetivo es mejorar un proceso industrial existente. Es de tipo descriptivo, pues busca caracterizar las variables que influyen en la lixiviación. Se emplea un enfoque cuantitativo, utilizando herramientas estadísticas y modelos matemáticos para analizar la interacción entre variables y definir condiciones óptimas de operación. La investigación sigue un método analítico y un diseño no experimental ex post facto, basándose en la recopilación y análisis de datos existentes.

Entre las principales conclusiones, se identificó que los factores con mayor impacto en la recuperación de zinc son la relación sólido-líquido y la temperatura de reacción. Asimismo, los resultados muestran que es posible alcanzar recuperaciones superiores al 80%, y que, bajo condiciones optimizadas, este valor puede incrementarse hasta un 98%. Estas condiciones deben ser validadas mediante experimentación adicional.

Palabras clave: proceso, lixiviación, optimización, recuperación

Abstract

The purpose of this study is to optimize the leaching process of oxidized zinc concentrates by optimizing the zinc recovery percentage using statistical techniques and experimental tests at the plant level.

The study is classified as applied research, as its objective is to improve an existing industrial process. It is descriptive, as it seeks to characterize the variables that influence leaching. A quantitative approach is used, utilizing statistical tools and mathematical models to analyze the interaction between variables and define optimal operating conditions. The research follows an analytical method and a non-experimental ex post facto design, based on the collection and analysis of existing data.

Among the main conclusions obtained through statistical techniques, the most influential factors in zinc recovery in the tests performed were the solid-liquid ratio and the reaction temperature. Furthermore, the zinc recovery percentage can exceed 80% and, under optimal conditions, reach up to 98%. These results should be tested in further experiments.

Keyword: process, leaching, optimization, recovery

Tabla de Contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	5
1.2.1 Planteamiento General del Problema de Investigación	8
1.2.2 Planteamientos Específicos del Problema de Investigación	8
1.3 Objetivos del estudio	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Antecedentes de investigación	9
2 Capítulo II. Marco teórico y conceptual	14
2.1 Marco teórico	14
2.1.1 Hidrometalurgia del Zinc	14
2.1.2 Termodinámica de lixiviación del zinc	19
2.1.3 Cinética de lixiviación del zinc	27
2.2 Marco conceptual	34
2.2.1 Reactores Discontinuos	34
2.2.2 Agitación	40

2.2.3	Cristalización.....	44
3	Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación	47
3.1	Metodología.....	47
3.2	Desarrollo del trabajo.....	48
3.2.1	Preparación y caracterización de la muestra.....	50
3.2.2	Pruebas experimentales	52
3.2.3	Diseño factorial de variables	54
3.2.4	Gráficos estadísticos en el diseño de experimentos.....	56
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	62
	Conclusiones.....	63
	Recomendaciones.....	64
	Referencias bibliográficas.....	65
	Anexos	68

Lista de Tablas

Tabla 1	Concentraciones típicas de impurezas solución de ZnSO_4	15
Tabla 2	Concentraciones máximas de impurezas en solución de ZnSO_4	16
Tabla 3	Ecuaciones electroquímicas equilibrios termodinámicos del agua	21
Tabla 4	Ecuaciones electroquímicas equilibrios termodinámicos del Zn.....	23
Tabla 5	Síntesis equilibrios químicos diagrama potencial-pH Zn/agua	26
Tabla 6	Métodos de lixiviación más frecuentemente usados	28
Tabla 7	Caracterización de muestras de materia prima de zinc.....	51
Tabla 8	Resultados de pruebas experimentales a nivel planta	53
Tabla 9	Diseño fraccionado de factores y niveles en pruebas experimentales	56

Lista de Figuras

Figura 1	Diagrama E-pH del agua a 298.15 K y 101.33 kPa.....	23
Figura 2	Diagrama E-pH sistema Zn-H ₂ O a 298.15 K/101.33 kPa/[a _i]=1M.....	27
Figura 3	Representación de lixiviación con disolución completa	30
Figura 4	Determinación control de mecanismos según energía de activación	33
Figura 5	Tipos de reactores químicos usados en la industria.....	35
Figura 6	Esquema de un tanque con agitación	41
Figura 7	Tipos de agitadores	42
Figura 8	Comportamiento hidrodinámico de diferentes agitadores	43
Figura 9	Solubilidad del sulfato de zinc heptahidratado con la temperatura	45
Figura 10	Rango de zona metaestable en solución acuosa	46
Figura 11	Esquema para la determinación del %recuperación de Zn	49
Figura 12	Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con interacciones	57
Figura 13	Diagrama de Pareto de efectos estandarizados sin interacciones	58
Figura 14	Gráfica de efectos principales para la recuperación de zinc.....	59
Figura 15	Gráfica de cubos para la recuperación de zinc	59
Figura 16	Gráfica de contorno relación sólido-líquido-temperatura de reacción..	60
Figura 17	Gráfica de superficie de recuperación Zn.....	61
Figura 18	Optimizador de respuesta para la recuperación de zinc.....	62

Abreviaturas

PLS	Pregnant Liquid Solution	[-]
E	Potencial óxido-reducción	[V]
E ⁰	Potencial óxido-reducción estándar	[V]
pH	Concentración de iones hidronio	[-]
M	Molaridad	[mol/L]
F	Constante de Faraday	[C/mol]
R	Constante general de los gases	[J/mol. K]
T	Temperatura	[K]
r _i	Velocidad de reacción	[mol/L. s]
n	Orden de reacción	[-]
k	Constante de velocidad	[1/s]
C	Concentración de reactante	[mol/L]
E _a	Energía de activación	[J/mol]
T	Tiempo	[s]
%R _{Zn}	Porcentaje de recuperación de Zn	[-]

Introducción

El proceso de lixiviación es una técnica fundamental en la hidrometalurgia, utilizada para la extracción selectiva de metales de interés a partir de concentrados minerales. En el caso del zinc, la lixiviación ácida con ácido sulfúrico es el método más comúnmente empleado para disolver los óxidos de zinc y obtener sulfato de zinc en solución, el cual posteriormente es purificado y cristalizado para su uso en diversas aplicaciones industriales.

Sin embargo, el proceso de lixiviación de concentrados oxidados de zinc enfrenta diversos desafíos operativos que afectan su eficiencia y rentabilidad. Entre estos factores se encuentran la variabilidad en la composición de las materias primas, la influencia de parámetros como la temperatura, el pH, la relación sólido-líquido, entre otras que pueden reducir la calidad del producto final. La optimización de este proceso es crucial para mejorar la recuperación de zinc, así como la reducción de costos operativos.

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el proceso de lixiviación de concentrados oxidados de zinc mediante la mejora del porcentaje de recuperación de Zn. Para ello, se emplean técnicas estadísticas y pruebas experimentales a nivel planta, con el fin de analizar la interacción entre variables operativas y definir las condiciones óptimas de operación.

A través de esta investigación, se espera contribuir a la optimización del proceso de lixiviación, permitiendo un mejor aprovechamiento del zinc contenido en las materias primas y garantizando la producción de un sulfato de zinc de alta calidad. Además, los resultados obtenidos pueden servir como referencia para futuras investigaciones y mejoras en la industria de procesamiento de metales no ferrosos.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El proceso de lixiviación desempeña un papel fundamental en la industria química y metalúrgica, ya que por medio de un mecanismo de transferencia de masa se disuelve un compuesto sólido con algún agente disolvente con el objetivo de extraer alguno o varios componentes solubles del sólido, se le define como un proceso hidrometalúrgico y que se basa en la recuperación selectiva del metal valioso de interés.

Entre los diferentes tipos de lixiviación aplicables para la producción de sulfato de zinc podemos encontrar la lixiviación ácida con agitación que es el método más común y utilizado en la industria para extraer el zinc a partir de óxidos y concentrados que contengan este metal, siendo el agente lixivante el ácido sulfúrico concentrado debido a su mayor uso comercial, en el caso de minerales sulfurados es imprescindible un proceso de tostación para su conversión de sulfuros a óxidos para su disolución con ácido sulfúrico, ya que los minerales sulfurados tienen una baja solubilidad con este tipo de ácidos además que presenta una reacción muy lenta y no permite una extracción eficiente del zinc en condiciones normales, este tipo de lixiviación tiene como ventaja un proceso más rápido y una gran eficiencia en la disolución, no obstante, puede disolver impurezas como el hierro, cobre, plomo, cadmio, aluminio, entre otros. Lo cual precisaría una purificación posterior mediante precipitación selectiva con compuestos que presenten un cierto grado de alcalinidad para la regulación en el pH de la solución terminada después de la reacción.

También existen la lixiviación biológica, en el que se usan bacterias u hongos para la extracción de zinc y la lixiviación alcalina, en el que se usan soluciones de hidróxidos, pero no son muy comunes en la industria de fertilizantes debido a su baja velocidad de extracción.

Existen otros métodos como la extracción por solventes en la que se usan extractantes orgánicos como derivados fosforados, derivados de aminas o cetonas modificadas para separar selectivamente el zinc de otras impurezas, el zinc se transfiere a la fase orgánica, dejando las impurezas en la fase acuosa residual, se utiliza soluciones diluidas de ácido para lavar la fase orgánica por posible presencia de trazas de elementos no deseados. Se recupera mediante una solución acuosa adecuada con pH controlado para que el zinc pase desde la fase orgánica hacia la fase acuosa, a partir de esa solución purificada obtener el sulfato de zinc, resulta oportuno mencionar que con este método ayuda a reducir la generación de residuos en contraste a los procesos tradicionales.

El proceso de lixiviación es controlado mediante la termodinámica y cinética química, con ello se puede aumentar la recuperación de zinc, favorecer a la obtención de una solución lixivante cargada y con ello a la obtención de sulfato de zinc como producto final.

Sin embargo, diversos factores pueden afectar a la eficiencia del proceso, como son la variabilidad en la eficacia de la materia prima manipulada, relación sólido-líquido, agitación, temperatura de reacción, entre otros. Para que el proceso de lixiviación se realice sin inconvenientes lo apropiado es que las materias primas contengan un contenido de zinc del 80% como mínimo, para que de esa forma la generación de residuos después de la lixiviación ácida con agitación sea mínima y la presencia de otros elementos en su composición no alteren el rendimiento del proceso.

El sulfato de zinc es una sal inorgánica que es usada en diferentes aplicaciones industriales, agrícolas y farmacéuticas debido a las propiedades que presenta. Su fórmula química es ZnSO_4 , y generalmente se presenta en sus formas hidratadas, siendo las más comunes el sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) la cual se presenta típicamente como un sólido cristalino blanco y el sulfato de zinc monohidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) la cual se presenta típicamente como un sólido pulverizado blanco, las cuales presentan un gran valor comercial.

Tiene diversas aplicaciones, en agricultura como un micronutriente esencial para las plantas. El zinc es vital para el desarrollo de clorofila, la fotosíntesis y la formación de proteínas en las plantas. Las deficiencias de zinc en los suelos pueden llevar a un crecimiento deficiente de los cultivos, por lo que se aplica sulfato de zinc para corregir estas deficiencias, especialmente en cultivos como arroz, maíz y hortalizas. Además, se utiliza para la prevención de enfermedades en plantas, ya que también tiene propiedades fungicidas.

Se usa principalmente como suplemento para tratar deficiencias de zinc en el cuerpo humano. El zinc es un elemento fundamental que participa en la respuesta inmunológica, la regeneración de tejidos y la producción de proteínas del mismo modo en producción de material genético. Su deficiencia puede causar trastornos como el retraso en el crecimiento, la caída del cabello, la pérdida del apetito y la mayor susceptibilidad a infecciones, asimismo se utiliza para infecciones como el acné y dermatitis.

Utilizado en la industria alimentaria como aditivo y suplemento nutricional. Se agrega a algunos productos alimenticios, especialmente en la fortificación de cereales y alimentos procesados, con el fin de asegurar una ingesta adecuada de zinc, un mineral esencial para la salud.

En la industria, el sulfato de zinc se utiliza como reactivo en diversos procesos químicos. Uno de los usos más relevantes es en la galvanización de metales, donde se utiliza en la producción de recubrimientos protectores de zinc sobre superficies metálicas, lo que ayuda a prevenir la corrosión. Además, se emplea en la fabricación de baterías, pigmentos y en la producción de materiales.

Actúa como reactivo químico en la industria metalúrgica para el proceso unitario de flotación de minerales funcionando como agente depresor de sulfuros de hierro, su acción permite que el zinc se separe del hierro, optimizando la flotación de la esfalerita en presencia de colectores como los xantatos, facilita la separación de las especies valiosas presentes en un mineral del material inerte no requerido, como también ocurre en los minerales de plomo-zinc o cobre-zinc.

También se usa en sistemas de enfriamiento y soluciones de proceso para evitar la corrosión de equipos y tuberías de acero en plantas de refinación.

El sulfato de zinc es estable, pero puede reaccionar con bases fuertes para formar hidróxido de zinc (Zn (OH)_2), que es insoluble en agua. Esta propiedad lo hace útil en la separación y purificación de zinc en procesos químicos. Aunque generalmente seguro para su uso en las aplicaciones mencionadas, debe manejarse con precaución. La exposición prolongada o en grandes cantidades puede causar efectos contraproducentes a la integridad del individuo. La ingestión excesiva de sulfato de zinc puede llevar a síntomas de intoxicación como náuseas, vómitos y diarrea. Al tener contacto directo con la dermis u ojos, genera irritación. Por lo tanto, se deben tomar precauciones al manipular este compuesto, asimismo tomando en cuenta su almacenamiento en lugares seguros.

En concentraciones elevadas, puede tener efectos adversos al medio ambiente. Su presencia en cuerpos de agua puede alterar los ecosistemas acuáticos, ya que el zinc es tóxico para muchos organismos acuáticos en grandes cantidades. Por esta razón, es

esencial que las industrias que manejan sulfato de zinc implementen prácticas de gestión ambiental que minimicen su liberación al medio ambiente.

1.2 Descripción del problema de investigación

El proceso en la lixiviación del sulfato de zinc es una etapa clave en la metalurgia extractiva del zinc, ya que define la eficiencia y rentabilidad de todo el proceso. A través de la disolución selectiva del zinc contenido en diversas materias primas, como concentrados minerales o residuos industriales, se obtiene una solución rica en zinc que posteriormente se somete a etapas de purificación y cristalización. Sin embargo, la optimización de este proceso enfrenta varios desafíos, entre los que destacan la variabilidad en la composición de las materias primas, la presencia de impurezas que afectan la calidad del producto final, la eficiencia en el uso de reactivos y la necesidad de mejorar la extracción del zinc en la reacción.

Uno de los inconvenientes más recurrentes en la optimización de la lixiviación del zinc es la variabilidad de las materias primas utilizadas. Debido a que estas provienen de distintas canteras, la ley de zinc puede variar significativamente, desde un 30% hasta un 90%. Esta variabilidad afecta la eficiencia de la extracción, ya que las cantidades de reactivos necesarios a usar y las condiciones operativas deben ajustarse constantemente para maximizar la recuperación del metal, asimismo al tener un menor contenido de zinc, genera un mayor contenido de conglomerados, conocido usualmente como torta que se obtiene en la etapa de filtración, la cual debe pasar por un segundo proceso de lavado con ácido sulfúrico para extraer el contenido de zinc que aún puede quedar como remanente en este conglomerado, no debiendo superar el 5% en concentración.

Por otra parte, la granulometría de las materias primas también desempeña una función fundamental en la lixiviación, puesto que existen casos en que el material después de un proceso de cernido presenta restos de contaminantes no metálicos, así como

presencia de zinc metálico los cuales pueden superar el 10% de material retenido, asimismo hay situaciones en que el 90 % del material ingresado presenta tamaños de partícula superiores a los 4 mm, para lo cual es imperativo un proceso de molienda. La implementación de estos controles es indiscutible en el pretratamiento del material para garantizar una alimentación homogénea a los reactores y al mismo tiempo evitar deterioros en estos sistemas fabricados a base de fibra de vidrio para las reacciones.

La temperatura es otro factor determinante, ya que influye en la cinética de disolución, temperaturas más altas pueden acelerar la reacción, pero también pueden aumentar la solubilidad de impurezas no deseadas. En las investigaciones de (Ermukhanova et al., 2024) sugieren que la temperatura en la reacción debe estar por encima de los 70°C para obtener las sales de sulfato de zinc (pág.2). El tiempo de residencia debe ser suficiente para permitir una extracción eficiente del zinc sin prolongar innecesariamente el proceso.

Cabe agregar que las impurezas presentes en las materias primas es otro factor que afecta al rendimiento del proceso de extracción, elementos como hierro, plomo, cobre, aluminio, potasio son solubles en medios ácidos y pueden generar reacciones secundarias no deseadas, como puede ser el caso de formación de sulfato de potasio por elevado contenido de potasio, provocando que los iones zinc se enlacen con un menor contenido de sulfatos en la solución filtrada después de finalizada la reacción, lo cual genera que el contenido de zinc en el producto terminado sea mucho menor a lo esperado, también se puede mencionar el caso del aluminio cuando supera valores de 3% a 5% de concentración, ya que puede formar compuestos coloidales, incrementando la viscosidad de la solución filtrada la cual dificulta la permeabilidad de la solución a través de los filtros. No obstante, en particular, el cadmio representa un problema crítico ya que presenta afinidad con el zinc, debido a su similitud química y geológica lo que dificulta su separación en las etapas posteriores de purificación. El control de estas impurezas requiere de un monitoreo

constante de la solución lixiviada con métodos de purificación, como la precipitación selectiva o proceso de cementación con polvo de zinc. Una optimización adecuada de estos pasos puede incrementar la calidad del producto final y reducir costos asociados a tratamientos adicionales. Para maximizar la eficiencia del proceso de lixiviación, es crucial optimizar variables operativas clave, como la concentración de ácido sulfúrico, el pH, la temperatura, el tiempo de residencia y la agitación del sistema. El control del pH es esencial para evitar la precipitación prematura de elementos no deseados.

Dadas las condiciones que anteceden, es preciso evaluar la interacción y el grado de influencia que tienen los parámetros en la etapa de lixiviación como pueden ser la concentración de zinc en la solución filtrada, la concentración de metales pesados, el pH y la densidad de la solución a la temperatura final de la reacción, entre otros con los parámetros del producto terminado como pueden ser: la concentración de zinc, el contenido de metales pesados, el rango de pH al 5%, entre otros; para lo cual se analizará el proceso de producción del sulfato de zinc en sus etapas.

En lo que respecta al año 2024, el nivel de incidencias con mayor frecuencia que se ha presentado es la variación en el contenido de zinc en el producto terminado, el cual alcanzó aproximadamente entre un 50% - 60 % de observaciones presentadas, lo cual ha generado diversos problemas durante la etapa de reacción, entre las cuales se tiene dificultades operativas en el uso de materias primas por presentar bajas leyes de zinc, pérdidas de material y generación de desperdicios por reprocesamiento, la cual en más del 90% de las situaciones se opta por mixear con otras fuentes de materia prima para obtener una mayor recuperación y mejora en el rendimiento, provocando en reiteradas oportunidades la elevación de los costos de producción.

En resumen, la optimización para el proceso de lixiviación en la producción de sulfato de zinc requiere un enfoque integral que abarque el control de la variabilidad de las

materias primas, la reducción de impurezas, la optimización de variables operativas y el monitoreo y control del proceso.

De la descripción del problema de investigación se puede plantear las siguientes interrogantes:

1.2.1 Planteamiento General del Problema de Investigación

¿Es posible optimizar el proceso de lixiviación en la producción del sulfato de zinc?

1.2.2 Planteamientos Específicos del Problema de Investigación

¿Cuáles son los parámetros que influyen en el porcentaje de recuperación de zinc en el proceso de lixiviación del sulfato de zinc?

¿Es posible determinar el porcentaje de recuperación óptimo del zinc en el proceso de lixiviación?

1.3 Objetivos del estudio

Los objetivos del estudio se basan en lo siguiente:

1.3.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de lixiviación para la producción del sulfato de zinc

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar los parámetros que influyen en el porcentaje de recuperación de zinc en el proceso de lixiviación del sulfato de zinc

Determinar el porcentaje de recuperación óptimo de zinc en el proceso de lixiviación

1.4 Antecedentes de investigación

Antecedentes a nivel nacional

Las investigaciones de Fretell & Palomino (2011) desarrollaron una tesis titulada “Obtención del sulfato de zinc heptahidratado a nivel industrial en Doe Run Perú, La Oroya División” (p.1), con el propósito de alcanzar la titulación en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. La finalidad del estudio consistió en analizar la viabilidad de producir sulfato de zinc heptahidratado a partir de residuos provenientes de los desechos de los circuitos de zinc de la planta metalúrgica de Doe Run. Las conclusiones más importantes fueron la viabilidad en la obtención de sulfato de zinc heptahidratado con un 95 % de pureza, de capacidad de producción de 3600 TM/año, con un valor actual neto de 2,171,148 dólares americanos en un tiempo de recuperación de la inversión de 1.8 años y una tasa Interna de retorno (TIR) del 87 %, lo cual la hace económicamente viable. Esta tesis establece la importancia de analizar como la lixiviación afecta la composición de la solución y la calidad del sulfato de zinc heptahidratado para que sea económicamente viable.

Por otra parte, en las investigaciones de Moreno (2024) se realizó una tesis sobre la “Lixiviación de zinc y plomo de un concentrado de esfalerita y galena proveniente de la zona minera Chinapintza empleando solventes eutécticos profundos” (p.1), a fin de lograr la titulación de magíster en Metalurgia. El presente análisis se enfocó en examinar la recuperación de zinc y plomo de un concentrado de esfalerita y galena mediante lixiviación con ácido sulfúrico y solventes eutécticos. Las conclusiones más importantes fueron que el uso de estos solventes ofrece ventajas significativas en comparación con los métodos ácidos tradicionales, la recuperación de zinc mediante lixiviación con ácido sulfúrico alcanzó el 96% en muestras tostadas a 600°C durante 8 horas, asimismo se comprobó que estos solventes permiten una recuperación eficiente sin necesidad de tratamientos previos, lo que representa un beneficio en términos de costos operativos y reducción de

impactos ambientales. Además, los ensayos de lixiviación con ácido sulfúrico y ácido nítrico mostraron que los solventes eutécticos profundos presentan mayor selectividad y eficiencia en la disolución de metales, alcanzando una recuperación de zinc de aproximadamente el 99 % bajo ciertas condiciones experimentales. Esta tesis aborda la lixiviación de zinc desde un mineral complejo, en la cual considera parámetros como la temperatura, velocidad de agitación, tiempo de lixiviación, entre otros; los cuales presentan las bases para el desarrollo en la optimización de la lixiviación de sulfato de zinc.

En las investigaciones de Corzo (2008) se desarrolló una tesis titulada “Optimización del proceso de purificación de sulfato de zinc mediante el cambio de temperatura y cantidad de polvo de zinc” (p.1), para obtener el título profesional de ingeniero químico. Se llevó a cabo este estudio con la intención de optimizar el proceso de purificación en la producción del sulfato de zinc mediante la modificación en la temperatura y la cantidad de polvo de zinc, este estudio se enfocó en mejorar la eliminación de impurezas como el níquel (Ni), cobalto (Co), arsénico (As), antimonio (Sb), cobre (Cu), cadmio (Cd) y hierro (Fe) en sulfato de zinc en solución, la cual es crucial para obtener un producto final que cumpla con los estándares requeridos para la electrodeposición de zinc metálico. Entre las principales conclusiones se llegó a optimizar el proceso aumentando la temperatura de 45°C a 80°C, evidenciando que la temperatura es el factor más importante en la optimización y reduciendo la cantidad de polvo de zinc de 300 kg a 290 kg, también se determinó que en el proceso de purificación no se eliminaba eficazmente impurezas como el níquel (Ni) y cobalto (Co), lo cual afectaba a la electrodeposición del zinc y finalmente se comprobó que a una temperatura de 80 °C se logra una mejor precipitación de impurezas, lo cual aseguraba cátodos de zinc de alta calidad. La importancia de esta tesis se basa en el concepto de la purificación de las soluciones lixiviantes antes de continuar por otras etapas posteriores ya que afecta de forma significativa a otros procesos como la electrodeposición aplicada a la obtención de zinc.

Antecedentes a nivel internacional

De acuerdo con la información de Jianxing (2012) se desarrolló una patente titulada “Método de producción de sulfato de zinc monohidratado” (p.1), se llevó a cabo este trabajo con la intención de desarrollar un método eficiente para la producción de sulfato de zinc monohidratado a partir de residuos de zinc, utilizando un proceso de lixiviación y purificación múltiple para obtener un producto de alta calidad apto para la industria de alimentos, optimizando su purificación mediante oxidación con aire, adición de polvo de zinc, carbón activado y reutilización de la solución madre. Sus principales conclusiones destacaron la obtención de un producto con bajo contenido de impurezas como el plomo, cadmio y arsénico, adecuado para la industria de alimentación animal, y la implementación de un proceso con mayor eficiencia y menor generación de residuos. Esta investigación se relaciona con el presente estudio, ya que aborda la optimización del proceso de lixiviación para la producción de sulfato de zinc, permitiendo analizar mejoras en la extracción y purificación del zinc, así como la reducción de impurezas mediante estrategias de refinamiento químico.

Cabe agregar que en los estudios de Ermukhanova et al. (2024) desarrollaron un artículo titulado “Tecnología para la producción de sulfato de zinc monohidratado” (p.1), la finalidad del estudio consistió en desarrollar una tecnología para la producción de sulfato de zinc monohidratado a partir de residuos que contienen zinc usando ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno para la purificación. Entre sus principales conclusiones se identificaron que la lixiviación de los residuos de zinc con ácido sulfúrico al 25% produce un proceso exotérmico que no requiere calentamiento adicional, ya que la reacción genera suficiente calor para mantener la temperatura por encima de los 70°C, condición necesaria para la formación del sulfato de zinc monohidratado. Además, destacaron la importancia de la purificación del sulfato de zinc obtenido, utilizando peróxido de hidrógeno para eliminar impurezas como hierro, cobre, cadmio y níquel. La evaporación de la solución

resultante se realizó a temperaturas entre 70 y 90°C, seguida de un proceso de secado a 105°C para obtener el producto final en forma de polvo. Además, se demostró que el producto final obtenido cumplía con los estándares de calidad necesarios para su uso en la agricultura y como aditivo alimentario.

En ese mismo sentido, en las investigaciones de Liu (2019) se desarrolló una patente titulada “Método para la producción de sulfato de zinc monohidratado” (p.1), el presente análisis se enfocó desarrollar un método que mejore la estabilidad del producto y reduzca los problemas de formación de grumos, mediante la optimización de las etapas de lavado, reacción, filtración, evaporación y secado. Entre las principales conclusiones se tiene que el método propuesto, que incluye el lavado del óxido de zinc con agua caliente (90-100°C), la adición de peróxido de hidrógeno e hidróxido de zinc para eliminar impurezas de hierro y ácido sulfúrico en exceso, y la evaporación controlada con aire caliente, resultó en un producto con mayor estabilidad y menor tendencia a formar grumos. Asimismo el uso de aire caliente durante la evaporación permitió controlar el tamaño de los cristales, lo que facilitó el secado y redujo los problemas de deshidratación en el producto final, por otra parte el secado por microondas a una frecuencia de 915 MHz durante 5-10 minutos demostró ser eficaz para obtener un producto final de alta calidad, con un contenido de $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ superior al 97.9% y una baja proporción de grumos ya que aborda aspectos clave como la eliminación de impurezas, el control del tamaño de los cristales y la mejora en la eficiencia del secado. Estos elementos son fundamentales para optimizar el proceso de lixiviación, ya que la metodología de lavado con agua caliente y el control de la cristalización influyen en la calidad del producto terminado y en la eficiencia del proceso.

Asimismo, en los estudios de Jiang et al. (2018) donde desarrollaron una patente titulada “Método para la producción conjunta de sulfato de zinc monohidratado y sulfato de zinc heptahidratado” (p.1), este trabajo tuvo como meta desarrollar un método para la

producción conjunta de sulfato de zinc monohidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a partir de materiales que contienen zinc, con el fin de reducir los costos de producción, simplificar el proceso y minimizar el consumo de energía y la inversión en equipos. Entre las principales conclusiones se desarrolló un método que permite la producción conjunta de sulfato de zinc monohidratado y heptahidratado, evitando la necesidad de procesos de evaporación y concentración, lo que reduce significativamente los costos de energía y la inversión en equipos, el proceso utiliza una solución de sulfato de zinc obtenida mediante extracción con disolventes, lo que permite una mayor pureza del producto final y reduce la necesidad de procesos de purificación adicionales, la producción conjunta de ambos tipos de sulfato de zinc permite equilibrar el exceso de ácido y agua generado durante el proceso para obtener sulfato de zinc monohidratado, lo que evita problemas de expansión de ácido y agua en el proceso. El método propuesto reduce los costos de producción, ya que evita la necesidad de grandes cantidades de zinc para la purificación y simplifica el proceso de producción.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

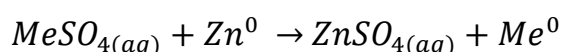
2.1.1 *Hidrometalurgia del Zinc*

La lixiviación es un método de recuperación relativamente reciente dentro de la metalurgia. Este término se emplea para referirse al procedimiento en el cual un material pulverizado es disuelto con el propósito de extraer sus componentes solubles.

De esta manera, la lixiviación se considera un proceso hidrometalúrgico, ya que utiliza el agua como medio de transporte junto con reactivos químicos específicos para separar los minerales de interés de aquellos sin valor comercial. Debido a esta técnica, es posible procesar depósitos que, debido a su baja concentración de mineral, suelen implicar altos costos por tonelada. En el caso de los concentrados oxidados de zinc, la lixiviación está regulada por factores termodinámicos y cinéticos. A través de estos principios, es posible optimizar la selectividad del proceso para el zinc, incrementar la eficiencia en su recuperación y solucionar inconvenientes operacionales.

La metalurgia del zinc se efectúa predominantemente por vía hidrometalúrgica, desplazando casi por completo los procesos pirometalúrgicos convencionales, en la fase de lixiviación el objetivo principal es extraer el metal valioso de los óxidos de zinc para la obtención de la solución lixiviada cargada o también conocido como PLS. Algunas impurezas presentes en los concentrados de zinc y que no han sido eliminadas deben ser separadas para no comprometer la calidad del zinc.

Según Azabache et al. (2023) “el proceso de purificación se fundamenta en que los elementos presentes junto al zinc en solución deben ser removidos antes, debido a que poseen un potencial electroquímico más positivo que el del zinc. En términos teóricos, esto implica que, al agregar zinc metálico a la solución, las impurezas se precipitarán (cementarán) como resultado de la reducción de sus iones, según la siguiente reacción” (p.54):



Me puede ser cobre o cadmio como en la purificación en frío

No obstante, la eliminación (cementación) del cobre y el níquel requiere una fase adicional en el proceso. Para ello, la temperatura debe elevarse a 90 °C, incorporándose tartrato de antimonio y potasio ($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$) y sulfato de cobre ($CuSO_4$) como catalizadores en un procedimiento de purificación en caliente. Además, se añade sulfato de plomo ($PbSO_4$) para minimizar el riesgo de que el cobalto vuelva a disolverse.

A continuación, en la tabla 1 se presentan las concentraciones típicas de las principales impurezas en la solución de sulfato de zinc durante la etapa de purificación:

Tabla 1

Concentraciones típicas de impurezas solución de $ZnSO_4$

Parámetros	Especificaciones (mg/L)
Sólidos	<500 (Solución clara)
Cu	1000 – 1500
Cd	400 – 600
Co	10 – 12
Ni	<10
Fe	<5
Sb	<1
As	<1

Nota. Tomado de Votorantim Metais (2020)

No obstante, el níquel (Ni) y el arsénico (As) no suelen ser controlados de manera rutinaria. De igual forma, los límites máximos permitidos de impurezas en el sulfato de zinc en solución, resultantes del proceso de purificación se muestran en la tabla 2:

Tabla 2

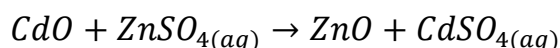
Concentraciones máximas de impurezas en solución de $ZnSO_4$

Parámetros	Especificaciones (mg/L)
Co	<0.25
Cu	<0.20
Cd	<1.00
Sb	<0.03
Pb	<7
Fe	<5
Ni	<0.01
Ge	<0.01
As	<0.01
Se	<0.01
Ti	<0.01

Nota. Tomado de Votorantim Metais (2020)

De la misma forma Azabache et al. (2023) explica que “el proceso de purificación se basa en que todos los elementos a eliminar poseen un potencial electroquímico más alto que el zinc. En términos teóricos, esto implica que, al agregar zinc metálico en polvo a la solución, impurezas como el cobre (Cu) y el cadmio (Cd) precipitan por reducción en una primera etapa de purificación conocida como fría. No obstante, la eliminación del cobalto (Co) y el níquel (Ni) requiere una segunda fase de purificación denominada "caliente", en la cual la temperatura se eleva a 90 °C. En esta etapa, se añade tartrato de antimonio y potasio ($C_8H_4K_{12}O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$) como catalizador, junto con sulfato de plomo ($PbSO_4$) para minimizar el riesgo de que el cobalto vuelva a disolverse” (p.55).

Además, según Azabache et al. (2023) se menciona que “si el pH de la solución es elevado, la superficie del zinc puede oxidarse, dificultando la cementación. El cadmio precipitado es más susceptible que el zinc a este fenómeno, disolviéndose con mayor facilidad en la solución neutra de sulfato de zinc según la siguiente reacción:



Por esta razón, es recomendable minimizar la exposición al oxígeno durante la cementación, con el fin de reducir el consumo excesivo de polvo de zinc en el proceso” (p.55).

La presencia normal de calcio en los concentrados es suficientemente alta para hacer que las soluciones se encuentren siempre saturados totalmente con yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). La solubilidad del yeso en una solución de sulfato de zinc aumenta con la temperatura hasta un máximo entre 50° y 60°C y luego disminuye. Junto con su capacidad para formar fácilmente soluciones sobresaturadas, este comportamiento conduce a serios problemas de incrustación en superficies frías, tales como tuberías y en superficies calientes, por lo que es recomendable la inclusión de una fase de eliminación de yeso en la solución purificada.

De acuerdo con lo mencionado por De Fuentes (2021) en “la fase de purificación en frío, los elementos que se precipitan por cementación en esta primera etapa son el Cu y el Cd, junto con el As, Sb, Ge, Co y parcialmente el Ni. El tiempo de reacción es aproximadamente de 30 minutos, durante los cuales casi todo el Cu y alrededor del 90% del Cd se precipitan por cementación. Este tiempo es crucial, ya que después de 1.5 horas, el Cd comienza a disolverse. El pH se mantiene entre 4.5 y 4.7, y la temperatura varía entre 60° y 80°C” (p.61). La cantidad de polvo de Zn que se debe añadir se determina utilizando la siguiente fórmula no estequiométrica:

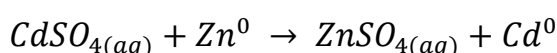
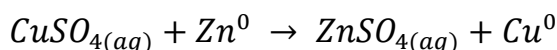
$$Zn \left(\frac{g}{L} \right) = 0.50 + 0.95 * Cu \left(\frac{g}{L} \right) + 1.50 * Cd \left(\frac{g}{L} \right)$$

El polvo de zinc utilizado en esta fase tiene una malla inferior a 200 micras. De acuerdo con lo mencionado por Azabache et al. (2023) “en ciertos casos, se recomienda calentar la solución mediante una ligera inyección de vapor para prevenir la formación de sulfatos básicos de zinc y la precipitación de yeso debido al enfriamiento, ya que estos precipitados afectan negativamente la velocidad de filtración del cemento” (p.58).

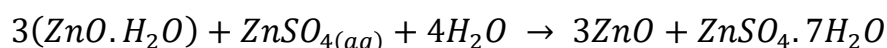
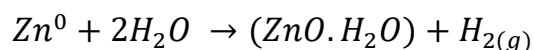
Asimismo Azabache et al. (2023) describe que “la solución filtrada en la etapa de purificación en frío se dirige hacia la segunda etapa de purificación, conocida como la etapa caliente, mientras que las tortas de filtración se remiten al tratamiento del residuo Cu-Cd para recuperar el exceso de Zn y disolver el Cd” (p.58).

En base a la misma línea Azabache et al. (2023) también menciona que “las reacciones químicas que ocurren en la etapa de purificación fría se dividen en:

- Precipitación de impurezas por cementación:



- Formación de sulfatos básicos de zinc (que disminuyen la velocidad de filtración del cemento) con la generación de hidrógeno debido a la alta reactividad del polvo de zinc.



Para lo cual es esencial mantener una buena ventilación para mantener la concentración de hidrogeno por debajo de los límites de explosión” (p.58).

2.1.2 Termodinámica de lixiviación del zinc

El estudio de la termodinámica del proceso de lixiviación en concentrados de zinc tiene como objetivo comprender las reacciones tanto químicas como electroquímicas que ocurren en función de las especies presentes. Conforme avanza el proceso, las reacciones alcanzan un estado de equilibrio, tanto desde la arista química como electroquímica. Una manera efectiva de representar la termodinámica de sistemas en soluciones acuosas es a través de representaciones gráficas conocidas como Diagramas de Potencial-pH o también denominados Diagramas de Pourbaix, las cuales se describen a continuación.

2.1.2.1 Diagramas Potencial - pH

Son representaciones gráficas que muestran la estabilidad de las especies químicas en función del potencial eléctrico (E) y el pH de la solución acuosa. Se usan ampliamente en la electroquímica y la metalurgia extractiva para evaluar la corrosión, pasivación y estabilidad de los metales en medios acuosos (Pourbaix, 1974).

Estos diagramas se basan en la termodinámica del equilibrio y no consideran los efectos cinéticos. Se construyen a partir de la ecuación de Nernst, que relaciona el potencial de un electrodo con las concentraciones de las especies en solución (Bard & Faulkner, 2001).

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Donde:

- E es el potencial de electrodo en una semirreacción de reducción (en V)
- E^0 es el potencial estándar de reducción (en V)
- R es la constante de los gases (8.314 J/mol. K)

- T es la temperatura absoluta (en K)
- n es el número de electrones transferidos
- F es la constante de Faraday (96500 C/mol)
- Q es el cociente de reacción

Para ecuaciones de la forma: $aA + bB \rightarrow cC + dD$

$$Q = \frac{[C]^c * [D]^d}{[A]^a * [B]^b}$$

Donde $[A]$, $[B]$, $[C]$ y $[D]$ son presiones parciales en caso de gases y/o concentraciones molares de iones disueltos. A las sustancias en estado sólido se le asigna concentración unitaria, por tal forma no aparecen en la expresión de Q

Para efectos prácticos la ecuación de Nernst se puede usar de la siguiente forma a una temperatura de 298 K:

$$E = E^0 - \frac{0.06}{n} \log Q \text{ (Reducción)} ; \quad E = E^0 + \frac{0.06}{n} \log Q \text{ (Oxidación)}$$

En estos diagramas, las líneas horizontales representan reacciones redox, las líneas verticales indican cambios en la acidez del sistema y las líneas inclinadas combinan ambos efectos (Habashi, 1999).

El zinc forma parte de los sistemas metálicos cuyo comportamiento en soluciones acuosas es clave para procesos como la lixiviación y la electrodeposición. A valores de pH bajos, el Zn^{+2} es la especie dominante, lo que favorece su solubilización en medios ácidos. A pH intermedios, puede precipitar como hidróxidos insolubles, mientras que en condiciones muy alcalinas tiende a formar complejos solubles como el $[Zn(OH)_4]^{2-}$ (Sole & Oliver, 2019)

La estabilidad del Zn en soluciones acuosas depende de su interacción con otros elementos, como el hierro o el plomo, cuyos diagramas pueden superponerse y afectar la eficiencia del proceso de lixiviación. Por ello, el diseño de estrategias para la recuperación de zinc debe considerar cuidadosamente el equilibrio de especies en cada etapa del proceso (Moore, 2012).

2.1.2.2 Construcción del diagrama potencial-pH del agua

Dado que se analiza el equilibrio termodinámico de especies en disolución acuosa, resulta fundamental incorporar en los gráficos de potencial (E) versus pH los márgenes de estabilidad del agua. Los equilibrios termodinámicos relevantes en el agua se presentan en la tabla 3.

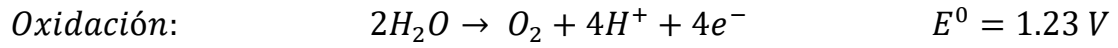
Tabla 3

Ecuaciones electroquímicas equilibrios termodinámicos del agua

Medio Ácido	Oxidación	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	$E^0 = 1.23 V$
	Reducción	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$E^0 = 0.00 V$
Medio Básico	Oxidación	$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$	$E^0 = 0.401 V$
	Reducción	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$E^0 = -0.83 V$

Nota. Tomado de Bard (2017)

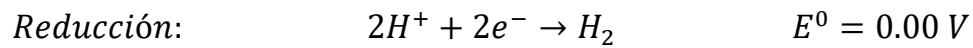
Para ilustrar los equilibrios termodinámicos del agua en un diagrama de potencial versus pH, se emplean las ecuaciones electroquímicas que describen las reacciones en ambientes ácidos y básicos. Estas reacciones están estrechamente vinculadas con la concentración de iones y el pH.



$$E = E^0 + \frac{0.06}{4} \log[P_{O_2}][H^+]^4$$

$$E = E^0 + \frac{0.06}{4} \log[P_{O_2}] + 0.06 \log [H^+]$$

$$E_{H_2O/O_2} = 1.23 + 0.02 \log P_{O_2} - 0.06 \text{pH} \dots (1)$$



$$E = E^0 - \frac{0.06}{2} \log \frac{[P_{H_2}]}{[H^+]^2}$$

$$E = E^0 - \frac{0.06}{2} \log[P_{H_2}] + 0.06 \log [H^+]$$

$$E_{H_2/H^+} = -0.03 \log P_{H_2} - 0.06 \text{pH} \dots (2)$$

Para $P_{H_2} = P_{O_2} = 101.33 \text{ kPa}$ (1 atm), las ecuaciones (1) y (2) se reducen a lo siguiente:

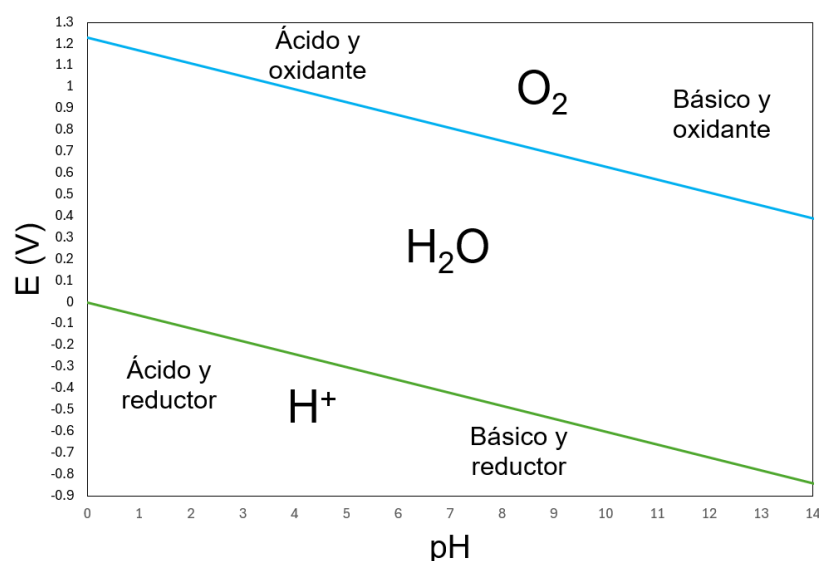
$$E_{H_2O/O_2} = 1.23 - 0.06 \text{pH}$$

$$E_{H_2/H^+} = -0.06 \text{pH}$$

Estas últimas expresiones conciernen a rectas de pendiente -0.06, las cuales se visualizan en la figura 1. La zona entre las líneas es la región de estabilidad termodinámica del agua bajo una presión de 101.33 kPa y para una temperatura de 298.15 K

Figura 1

Diagrama E-pH del agua a 298.15 K y 101.33 kPa



2.1.2.3 Construcción del diagrama potencial-pH del zinc en agua

En esta parte se detalla la construcción simplificada y uso del diagrama E-pH del sistema Zn-H₂O usando la ecuación de Nernst y considerando que todas las especies metálicas en solución tienen una actividad química de valor unitario, asimismo las semirreacciones mostradas en la tabla 4 se desarrollan a condiciones estándar (P=101.33 kPa y T=298.15 K). El diagrama obtenido permite analizar la lixiviación de óxidos de zinc, así como de la estabilidad del zinc metálico como tal.

Tabla 4

Ecuaciones electroquímicas equilibrios termodinámicos del Zn

$Zn^{2+}_{(ac)} + 2e^{-} \rightarrow Zn_{(s)}$	$E^0 = -0.763 V$
$Zn_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow ZnO_{(s)} + 2H^{+}_{(ac)} + 2e^{-}$	$E^0 = -0.439 V$
$Zn_{(s)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow (ZnO_2)^{2-}_{(ac)} + 4H^{+}_{(ac)} + 2e^{-}$	$E^0 = 0.441 V$

Nota. Tomado de Bard (2017)

Para la construcción del diagrama E-pH se usarán cada una de las semirreacciones mostradas en la tabla 4.

Semirreacción 1:

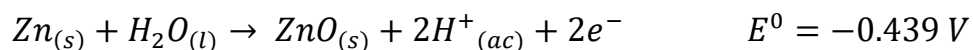


$$E = E^0 - \frac{0.06}{2} \log \frac{[Zn]}{[Zn^{2+}]}$$

En este caso, se consideran que $[Zn]=1$. Si $[Zn^{2+}]=1M$

$$E = -0.763 \text{ V}$$

Semirreacción 2:



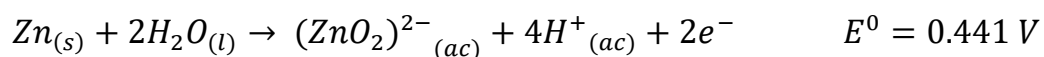
$$E = E^0 + \frac{0.06}{2} \log \frac{[ZnO][H^{+}]^2}{[Zn][H_2O]}$$

Se consideran que $[Zn]=[ZnO]=[H_2O]=1$

$$E = -0.439 + \frac{0.06}{2} \log [H^{+}]^2$$

$$E = -0.439 - 0.06pH$$

Semirreacción 3:



$$E = E^0 + \frac{0.06}{2} \log \frac{[(ZnO_2)^{2-}][H^+]^4}{[Zn][H_2O]^2}$$

Se consideran que $[Zn] = [H_2O] = 1$. Si $[ZnO_2^{2-}] = 1M$

$$E = 0.441 + \frac{0.06}{2} \log [H^+]^4$$

$$E = 0.441 + 2 * 0.06 \log [H^+]$$

$$E = 0.441 - 0.12pH$$

De acuerdo con las ecuaciones, se observa que la primera expresión representa a una línea horizontal ya que depende únicamente del potencial, mientras que las dos últimas dos expresiones representan líneas oblicuas de pendiente negativa que dependen del pH y el potencial.

Para la construcción del diagrama E-pH se usarán cada una de las ecuaciones desarrolladas, así como las obtenidas para el agua para el sistema Zn-H₂O

Haciendo un cuadro resumen de las ecuaciones consideradas que rigen la termodinámica del sistema Zn-H₂O en soluciones acuosas, se tienen los siguientes modelos, expuestos en la tabla 5.

Tabla 5*Síntesis equilibrios químicos diagrama potencial-pH Zn/agua*

Equilibrio Químico	Modelo Matemático
Zn/Zn^{2+}	$E = -0.763 \text{ V}; \text{pH} < 5.40$
Zn/ZnO	$E = -0.439 - 0.06\text{pH}; 5.40 < \text{pH} < 14.70$
$\text{Zn}/\text{ZnO}_2^{2-}$	$E = 0.441 - 0.12\text{pH}; \text{pH} > 14.70$
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$	$E = 1.23 - 0.06\text{pH}$
H_2/H^+	$E = -0.06\text{pH}$

Nota. Tomado de *Delahay & Pourbaix (1951)*

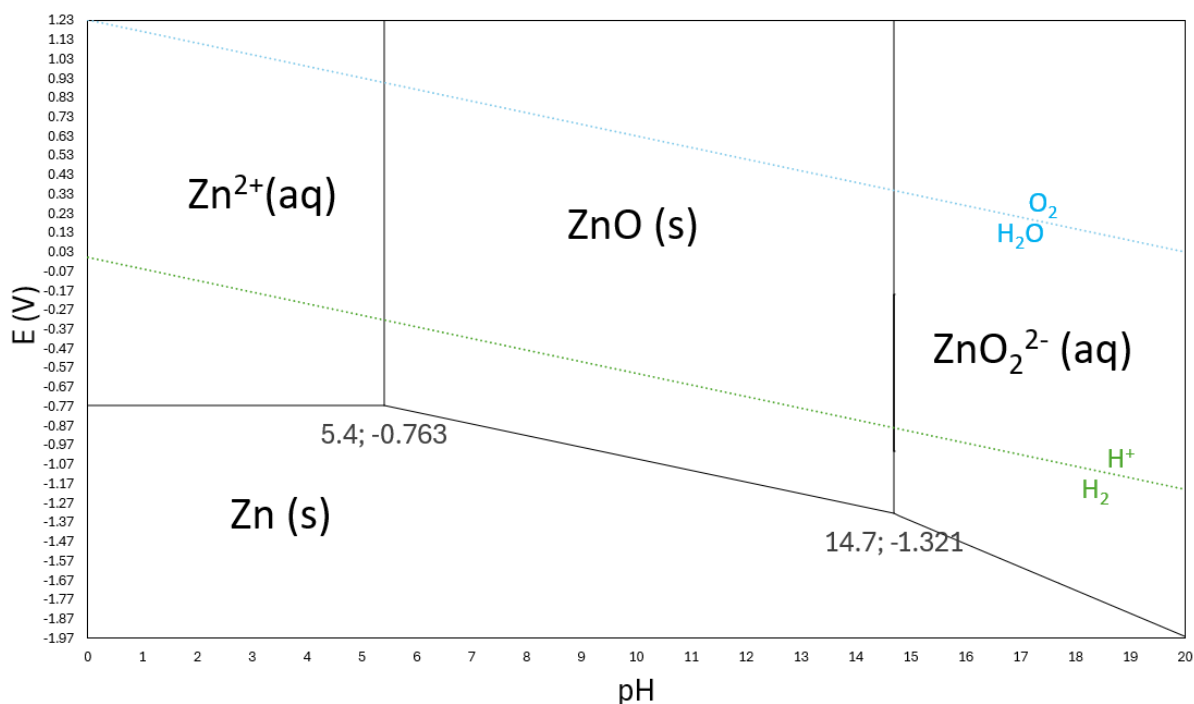
De acuerdo con lo mostrado en la tabla 5, se construye el gráfico de potencial-pH correspondiente al sistema Zn-H₂O, presentado en la figura 2, indica que la disolución de las especies oxidadas de zinc es factible desde el punto de vista termodinámico en condiciones de acidez.

Además, para que el Zn^{2+} en disolución permanezca estable, es necesaria la presencia de una cantidad específica de acidez libre, lo que impide su precipitación a valores de pH superiores a 5.40.

De la misma manera se puede notar que a lo largo de todo el intervalo de pH, el zinc metálico es termodinámicamente estable estando en contacto con agua, pero sin la presencia de oxígeno u otro agente oxidante.

Figura 2

Diagrama E-pH sistema Zn-H₂O a 298.15 K/101.33 kPa/[a_i]=1M



Estos diagramas aparte de poder ayudar a definir las condiciones más favorables durante el proceso de lixiviación para la extracción de metales, también permiten determinar las zonas de inmunidad, pasivación y corrosión de los metales como el zinc para determinar en qué condiciones las especies se mantienen estables y de esa forma prevenir la corrosión de estructuras que contengan a metales como el zinc.

2.1.3 Cinética de lixiviación del zinc

La cinética de lixiviación del zinc se refiere al estudio de la velocidad y los mecanismos mediante los cuales el zinc es extraído de sus minerales o concentrados durante el proceso de lixiviación. Las reacciones de lixiviación son reacciones heterogéneas sólido-líquido. El comportamiento de un sólido en lixiviación depende de su composición y grado de pureza. En ciertas situaciones, el sólido mantiene su tamaño a lo largo del tiempo, lo cual ocurre debido a una baja concentración de la especie reactiva en el sólido o a la generación de un producto sólido que ocupa el mismo volumen que el

material original. Por el contrario, si el sólido es de alta pureza, existe la posibilidad de que disminuya su tamaño, exponiendo una superficie libre de impurezas, o de que se formen sólidos no adheridos sobre su superficie (Levenspiel & Tojo, 1993)

Que una reacción sea viable desde el punto de vista termodinámico ($\Delta G < 0$) no garantiza que ocurra en un intervalo de tiempo determinado, ya que su velocidad depende de la cinética química. Este aspecto es clave tanto en el diseño como en la evaluación financiera de los procesos. Además, en plantas en funcionamiento, mejorar la cinética suele traducirse en una optimización del rendimiento del proceso.

Tabla 6

Métodos de lixiviación más frecuentemente usados

Método	Diámetro partícula	Conversión	Costos CAPEX	Costos OPEX
Lixiviación por agitación	<0.5 mm (-30 mallas)	90 – 95% en 24 horas	Alto	Alto
Percolación	<10 mm	80% en una semana	Alto	-
Pilas	Chancado	50% en meses	Bajo	Bajo
In situ	Roca fragmentada	50% en 1 a 2 años	Bajo	Bajo

Nota. Tomado de Uceda (2016)

Como se puede ver en la tabla 6, hay muchos métodos de lixiviación en la cual el tiempo en la conversión de cada uno de ellos varía significativamente uno de otro, por otra parte Uceda (2016) menciona “el método de más rápida extracción es el de agitación, la elección de alguno de estos métodos va a depender de varios factores como el tamaño de partícula, la tasa de producción, el costo y la composición del concentrado. Asimismo la cinética química trata dos aspectos elementales: la explicación del mecanismo de reacción, es decir, la secuencia de etapas y estados intermedios que ocurren durante el proceso,

junto con la formulación de una ley de velocidad que describa de manera precisa y detallada la rapidez de la reacción, implica, en la práctica experimental, obtener un conjunto de datos de concentraciones de los componentes de un sistema específico en función del tiempo, para luego derivar la ecuación de velocidad a partir de dichos valores” (p.240).

2.1.3.1 Clasificación de las reacciones

Una de las maneras en clasificar las reacciones químicas es de acuerdo con el número de fases comprendidas, las cuales pueden ser sólido, líquido o gas. Por esa parte se tienen a las reacciones homogéneas, que pueden ser químicas o electroquímicas en la que todos los reactantes o productos corresponden a una sola fase y la reacción se da de manera uniforme a través de todo el volumen de la fase.

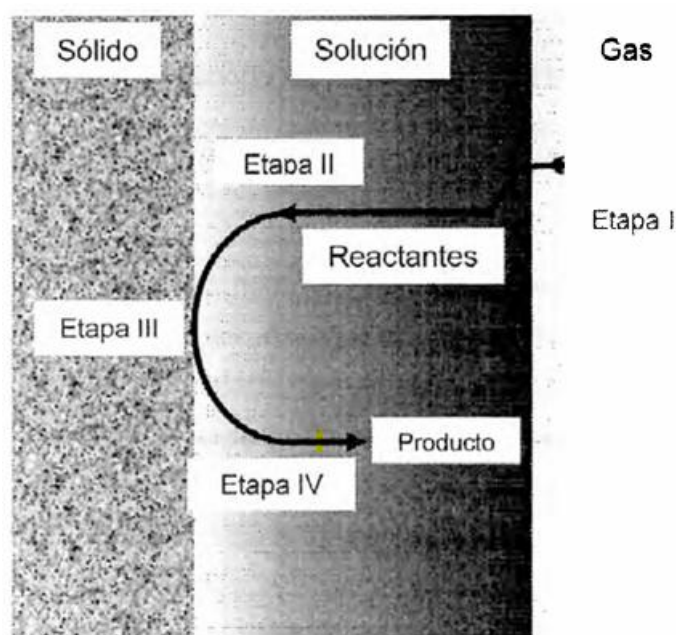
Por otra parte, también se tienen a las reacciones heterogéneas, que pueden ser químicas o electroquímicas en la que los reactantes o productos forman parte de más de dos fases y la reacción se desarrolla en los límites de una fase común, conocida como interfase, en este tipo de reacciones la variación de la concentración de los reactantes en función del tiempo puede tener mayor relevancia para determinar la cinética total, ya que también se considera el transporte de los reactantes de una fase mayor a la interfase de reacción, este tipo de reacciones es la que más se encuentra en los procesos hidrometalúrgicos debido al contacto del mineral sólido con el agente lixivante, la cual se encuentra en medio acuoso.

Los sistemas heterogéneos, en las cuales las reacciones se desarrollan en una interfase donde ocurre transferencia de masa de una fase a otra, el control de este tipo de reacciones es mediante la velocidad de reacción o por transferencia de masa de los reactantes presentes hacia la superficie de contacto de las dos fases.

En la figura 3 se representa un esquema sintético para la lixiviación de reacción heterogénea en la que hay disolución completa del concentrado de interés, es decir incorpora la disolución de especies puras que no producen residuos sólidos como consecuencia de la reacción.

Figura 3

Representación de lixiviación con disolución completa



Nota. Imagen tomada de Surco (2012)

De acuerdo con lo mencionado por Surco (2012) “en el diagrama presentado se identifican cuatro etapas principales durante la reacción. En la primera etapa, se produce el transporte de masa de los reactantes desde la fase gaseosa a través de la interfase gas-solución, seguido de su disolución. En la segunda etapa, de manera similar, ocurre el transporte de masa de los reactantes a través de la interfase solución-sólido hacia la superficie del sólido. En la tercera etapa, tiene lugar la reacción química o electroquímica en la superficie del sólido, específicamente a través de la doble capa electroquímica.

Finalmente, en la cuarta etapa, se lleva a cabo el transporte de masa de las especies generadas a través de la interfase hacia el interior de la solución.

La etapa que determina la velocidad de una reacción química o electroquímica es aquella que presenta la menor rapidez (etapa controlante o paso determinante de la velocidad). El control de la reacción global puede estar influenciado por el transporte de masa (etapas I, II o IV), por la reacción química o electroquímica (etapa III) o ser de tipo mixto. Generalmente, las reacciones homogéneas tienden a ser más rápidas que las heterogéneas, ya que solo requieren transporte de masa en una única fase, y las especies en solución reaccionan con mayor rapidez. Por otro lado, las reacciones heterogéneas involucran el transporte de masa a través del límite entre dos fases, lo que en muchos casos se convierte en la etapa limitante del proceso, siguiendo un mecanismo de difusión” (p.60)

2.1.3.2 Modelo matemático de la cinética

Un modelo matemático es cualquier conjunto completo y coherente de ecuaciones matemáticas que representen una entidad en áreas como la química, la física, la biología, la psicología, la sociedad o incluso en un modelo matemático distinto (Davis & Hersh, 1981). En este contexto, la ecuación matemática utilizada para describir la cinética de una reacción química se expresa de la siguiente manera:

$$r_i = k \cdot C_1^{n_1} \cdot C_2^{n_2}$$

Donde r_i representa la velocidad de reacción, k es la constante de velocidad, C indica la concentración de los reactivos y n es el orden de la reacción, este último indica como cambia la velocidad cuando se modifican las concentraciones. En el caso particular de que solo exista un reactivo en solución, la ecuación se simplifica así:

$$r = -k.C^n$$

Esta ecuación establece que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la concentración del reactivo elevado a un exponente correspondiente al orden de la reacción. Al integrar esta expresión, se puede determinar cómo varía la concentración en función del tiempo para un valor determinado de k y n . En procesos de lixiviación de minerales oxidados de zinc, como la hemimorfita ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y la smithsonita (ZnCO_3), generalmente siguen una cinética de primer orden ($n = 1$). Sin embargo, el mecanismo de disolución y el tipo de control pueden depender del agente lixivante utilizado y de las condiciones del proceso (Ordoñez & Delgado, 2023).

Por otra parte, Svante Arrhenius, en 1889, identificó que la velocidad de las reacciones químicas se incrementa con la temperatura en proporción a la cantidad de moléculas en el sistema. Esta relación se describe mediante la ecuación de Arrhenius, que permite analizar la dependencia de la constante de velocidad con la temperatura:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

Donde k es la constante de velocidad, A es el factor preexponencial de Arrhenius, R es la constante de los gases, E_a es la energía de activación y T es la temperatura absoluta. Para determinar la energía de activación, se grafica el logaritmo natural de k frente al inverso de la temperatura ($1/T$).

Al interpretar estos gráficos, se pueden diferenciar tres posibles controles en la reacción, las cuales se visualizan en la figura 4:

Control 1: Una pendiente elevada, la cual sugiere un control químico o zona de control por reacción, es decir, que la velocidad de reacción está limitada por los procesos de transferencia de carga o la naturaleza de la reacción química.

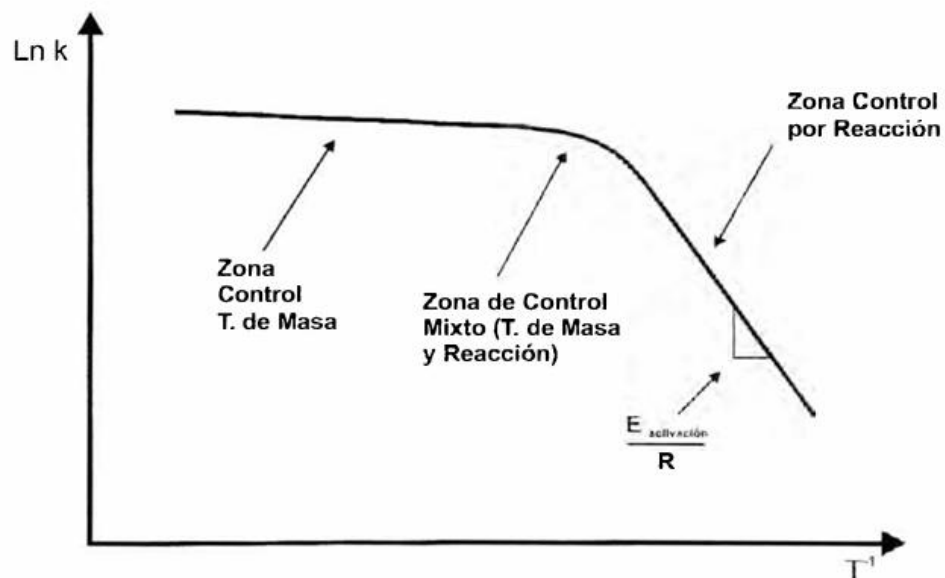
Control 2: Si la pendiente es cercana a cero, es una zona de control por transferencia de masa, es decir el proceso está dominado por un control difusional, indicando que la difusión de las especies químicas es el factor limitante.

Control 3: En algunos casos, se observa un comportamiento mixto o zona de control mixto, donde la reacción comienza con un control difusional y posteriormente pasa a un control químico.

Este análisis es crucial para comprender el comportamiento cinético de las reacciones químicas y optimizar procesos como la lixiviación en la industria metalúrgica.

Figura 4

Determinación control de mecanismos según energía de activación



Nota. Imagen tomada de Habashi (1993)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Reactores *Discontinuos*

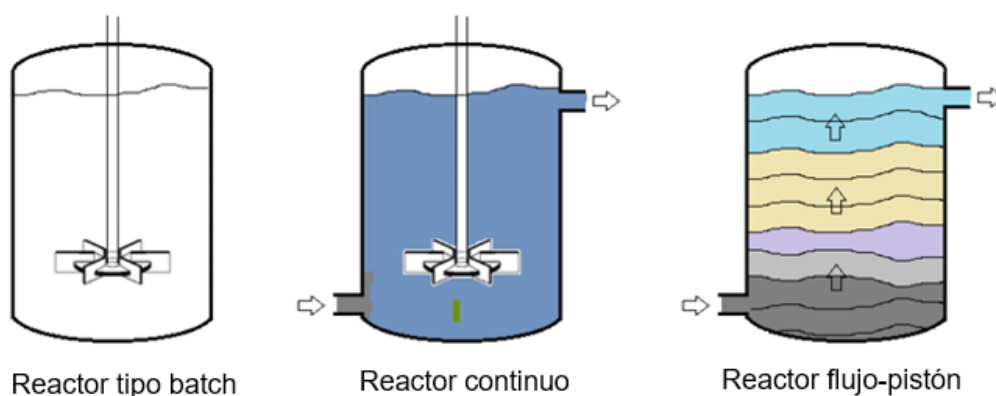
De acuerdo con lo mencionado por (Gupta, 2003) “un reactor está diseñado principalmente para reunir las especies reaccionantes bajo condiciones en las cuales las reacciones químicas sean favorables, suministrar la energía requerida y, en última instancia, permitir la separación de las fases del producto reaccionado. Más a menudo de lo que se piensa, la etapa de tratamiento químico que ocurre en un reactor es el núcleo del proceso. Esta etapa es crucialmente importante para determinar el éxito o el fracaso del proceso, en función de su viabilidad económica.

Existen numerosos reactores con distintos diseños. Sin embargo, la mayoría de ellos pueden clasificarse en ciertos tipos, cada uno caracterizado por algunas características esenciales en común. Por ejemplo, los reactores pueden clasificarse en continuos o discontinuos. También pueden clasificarse según su función; por ejemplo, hay reactores utilizados exclusivamente para operaciones pirometalúrgicas. Del mismo modo, existen reactores diseñados específicamente para llevar a cabo operaciones hidrometalúrgicas o electrometalúrgicas.

En términos generales, en el contexto de los reactores de proceso, estos pueden estar compuestos por varias unidades más pequeñas que operan en serie o en paralelo, de modo que todo el conjunto de unidades funciona de manera conjunta para implementar el proceso deseado. Como ejemplos, se pueden mencionar las celdas de flotación en el procesamiento de minerales, los mezcladores-decantadores en hidrometalurgia y las celdas de electroobtención y electrorrefinación en electrometalurgia” (p.81).

Figura 5

Tipos de reactores químicos usados en la industria



Nota. Imagen tomada de Velázquez (2017)

De acuerdo con lo mostrado en la figura 5 y según lo mencionado por Velázquez (2017) “los reactores se pueden clasificar como reactores de tanque agitado y reactores de flujo pistón. Los reactores de tanque agitado en su diseño se pretenden que no haya gradientes de concentración, ni gradientes de temperatura en su interior, de tal manera que tenga propiedades homogéneas en cualquiera de sus puntos debido a la operación de agitación. A su vez estos se pueden clasificar como reactores tipo discontinuos o tipo batch y reactores continuos, los reactores tipo batch o también llamados por lotes se caracterizan porque los reactivos se ingresan al reactor y se dejan un determinado tiempo para que reaccionen, el cual es conocido como tiempo de retención ,al cabo de ese tiempo se extraen los productos, repitiendo el proceso, en los reactores continuos los reactivos y productos entran y salen permanentemente del reactor y en los reactores de flujo pistón los reactivos discurren mediante un desplazamiento durante el cual se van produciendo las diversas transformaciones, de tal forma que a lo largo del reactor se presentan distintas capas con concentraciones diferentes de los distintos componentes. En las capas iniciales a la entrada del reactor predominarán los reactivos, en las capas finales, a la salida del reactor, predominarán los productos” (p.2).

Por otra parte, según Froment et al. (2009) “los reactores discontinuos o también conocidos como tipo batch se utilizan generalmente para reacciones en fase líquida. Cuando se requiere mantener un catalizador sólido en suspensión o cuando hay dos fases líquidas, como en la nitración de aromáticos, es necesario un agitador. La agitación también es fundamental para homogeneizar la temperatura dentro del reactor y mantenerla en el nivel deseado mediante un eficiente intercambio de calor, ya sea a través de una camisa o una serpentina interna.

Por esta razón, el reactor batch suele considerarse espacialmente uniforme en términos de composición y temperatura, aunque la composición varía con el tiempo. En algunos casos, una secuencia de temperaturas puede favorecer la selectividad o permitir alcanzar una conversión completa de manera segura.

En la operación batch pura, los reactantes se cargan completamente al inicio del proceso. Sin embargo, para mejorar el control de temperatura, esta estrategia puede no ser la más adecuada, y los reactantes pueden añadirse de manera progresiva dentro del reactor. En este caso, se considera que el reactor opera en modo semibatch. Asimismo, en ciertas reacciones, se puede retirar un producto intermedio, como el agua en una esterificación sujeta a equilibrio, con el fin de lograr una conversión completa de los reactantes.

Los reactores batch y semibatch se utilizan con mayor frecuencia en procesos de baja capacidad de producción, donde el costo de la mano de obra y el tiempo de inactividad representan solo una pequeña fracción del costo unitario del producto. Son comunes en la industria de productos químicos especializados, polímeros y productos farmacéuticos, especialmente en plantas con una amplia variedad de productos” (p.385).

Un reactor discontinuo opera en estado no estacionario, es decir sus variables operativas cambian con el tiempo, se cargan completamente con los reactantes al inicio

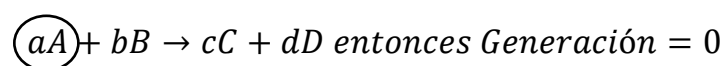
de la reacción, sin que haya entrada o salida del material durante el proceso. Sin embargo, puede ser beneficioso modificar esta estrategia agregando reactivos de forma controlada para mejorar el rendimiento.

De acuerdo con el balance general de materia:

$$\textit{Entrada} - \textit{Salida} + \textit{Generacion} - \textit{Consumo} = \textit{Acumulación}$$

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida} = 0 \text{ (Reactor discontinuo)}$$

Si el balance de materia se realiza en términos de un reactivo clave o limitante, al que se denominará A según:



El balance de materia para reactores discontinuos quedaría de la siguiente forma:

$$-\textit{Consumo} = \textit{Acumulación}$$

$$-(r_A)V = \frac{dn_A}{dt}$$

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt}$$

La acumulación representa la variación del número de moles de A por unidad de tiempo mientras que el consumo corresponde a los moles de A que reaccionan en todo el volumen de reacción, considerando el volumen de la solución en reacción constante, se puede tener la expresión en términos de la concentración del reactivo A. De la misma forma la velocidad de reacción r_A del reactivo A se define como:

$$r_A = k \cdot C_A^n$$

Por lo general los minerales oxidados son de primer orden, si se considera ello $n=1$, se tendría la siguiente expresión integrada:

$$k \cdot C_A = -\frac{dC_A}{dt}$$

$$k \cdot dt = -\frac{dC_A}{C_A}$$

$$k \int_0^t dt = -\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A}$$

$$\ln C_A - \ln C_{A0} = -kt$$

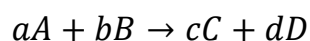
$$\ln C_A = \ln C_{A0} - kt$$

Al linealizar la expresión y usando datos experimentales del $\ln C_A$ con el tiempo t se puede determinar la constante de velocidad k a una temperatura determinada, la cual estaría representada por la pendiente y el $\ln C_{A0}$ como el intercepto.

Si la velocidad de reacción depende de ambos reactantes, entonces la velocidad de reacción sería de la siguiente forma:

$$r_A = k \cdot C_A^n \cdot C_B^m$$

Si la concentración de B también es limitada, se puede considerar $n=m=1$, siguiendo una cinética de segundo orden, en cuyo caso, se debe considerar lo siguiente:



$$\frac{C_{A0} - C_A}{a} = \frac{C_{B0} - C_B}{b}$$

$$C_B = C_{B_0} - \frac{b}{a}(C_{A_0} - C_A)$$

Con ello la expresión de la velocidad se puede expresar como sigue:

$$r_A = k \cdot C_A \cdot C_B$$

$$r_A = k \cdot C_A \cdot \left[C_{B_0} - \frac{b}{a}(C_{A_0} - C_A) \right]$$

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k \cdot C_A \cdot \left[C_{B_0} - \frac{b}{a}(C_{A_0} - C_A) \right]$$

$$\frac{dC_A}{dt} = -k \cdot C_A \cdot \left[C_{B_0} - \frac{b}{a}(C_{A_0} - C_A) \right]$$

$$\frac{dC_A}{dt} = -k \left[\left(C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0} \right) \cdot C_A + \frac{b}{a} C_A^2 \right]$$

$$\int_{C_{A_0}}^{C_A} \frac{dC_A}{\left[\left(C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0} \right) \cdot C_A + \frac{b}{a} C_A^2 \right]} = -k \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{\left(C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0} \right)} \ln \left[\frac{C_A}{\frac{b}{a} C_A + C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0}} \right]_{C_{A_0}}^{C_A} = -kt$$

Resolviendo y ordenando la expresión resultante de tal forma que se pueda obtener una expresión lineal, se tiene lo siguiente:

$$\ln \left[\frac{C_A}{\frac{b}{a} C_A + C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0}} \right] = \ln \left[\frac{C_{A_0}}{C_{B_0}} \right] - k \cdot \left(C_{B_0} - \frac{b}{a} C_{A_0} \right) t$$

Al linealizar la expresión y usando datos experimentales del $\ln (C_A / (b/a \cdot C_A + C_{B0} - b/a \cdot C_{A0}))$ con el tiempo t se puede determinar la constante de velocidad k a una temperatura determinada, la cual estaría representada por la pendiente de la recta y el $\ln (C_{A0} / C_{B0})$ como el intercepto.

2.2.2 Agitación

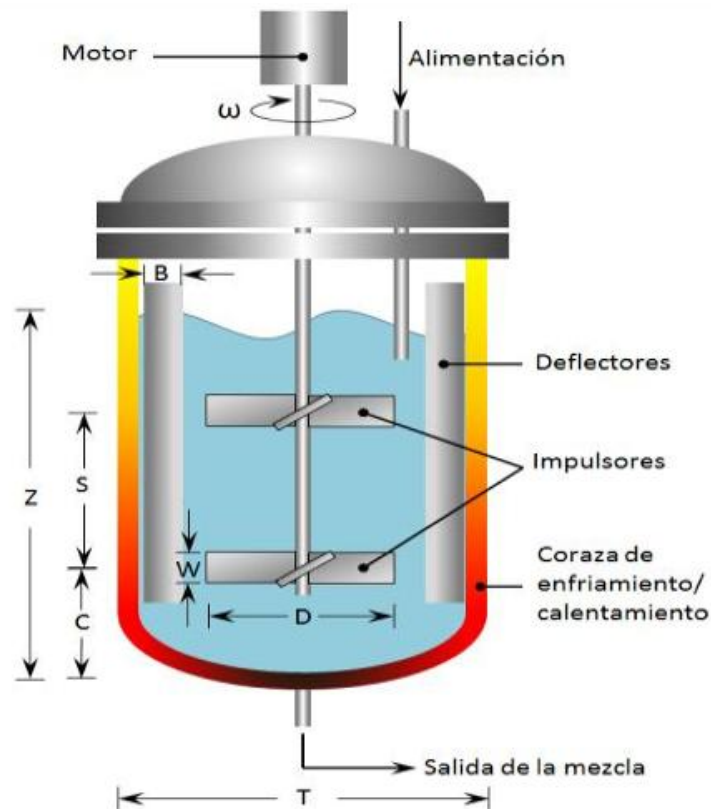
De acuerdo con lo mencionado por McCabe et al. (2007) “La agitación y mezclado es una operación unitaria presente en la gran mayoría de los procesos industriales. Esta operación involucra sistemas de una sola fase o de varias fases líquidas, sólidas y gaseosas y se puede realizar en mezcladores estáticos o en sistemas agitados. Por su importancia, la agitación y el mezclado se han estudiado desde los comienzos de la civilización, cuando la humanidad tuvo necesidad de mezclar alimentos, tintas, materiales ornamentales, arcilla, etc. y su diseño inicialmente respondía más a la necesidad de dispersar las diferentes sustancias presentes en una mezcla, que a lograr un mezclado eficiente. Sería muy difícil encontrar dentro de los procesos industriales un proceso que no involucre de alguna manera u otra un proceso de mezclado, ya sea para promover la homogeneización de las fases, mejorar el contacto entre los reactivos en reactores agitados, dispersar aire en caldos de cultivo, agilizar la rapidez de transferencia de calor en el caso de recipientes con calentamiento externo, realizar operaciones de lixiviación de sólidos y una larga lista más de casos en donde la utilización de tanques agitados es parte fundamental y central del proceso productivo. Incluso, pudiera decirse que el éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluido” (p.1).

La operación unitaria de agitación consiste en forzar un fluido a moverse dentro de un recipiente mediante medios mecánicos como se muestra en la figura 6 con diversos propósitos entre los cuales se presentan los siguientes: mezcla de líquidos miscibles,

disolución de sólidos en líquidos, dispersión de gases en líquidos, mejora de la transferencia de calor y dispersión de partículas en un fluido.

Figura 6

Esquema de un tanque con agitación



Nota. Imagen tomada de Uribe et al. (2012)

Los tipos de agitadores que existen en la industria se clasifican en función del tipo de flujo que generan, se tienen los que presentan flujo axial, mueve el fluido en dirección paralela al eje del agitador, los agitadores de hélice se encuentran en esta categoría puesto que presentan una alta velocidad los cuales son recomendados para líquidos de baja viscosidad. El otro tipo son los de flujo radial, mueven el fluido de forma perpendicular al eje del agitador, los agitadores de turbina forman parte de esta categoría ya que son adecuados para una amplia gama de viscosidades, asimismo también se encuentran los

agitadores de paletas los cuales operan a velocidades bajas o moderadas, generando flujo radial y tangencial, estos tipos de agitadores son mostrados en la figura 7.

Figura 7

Tipos de agitadores

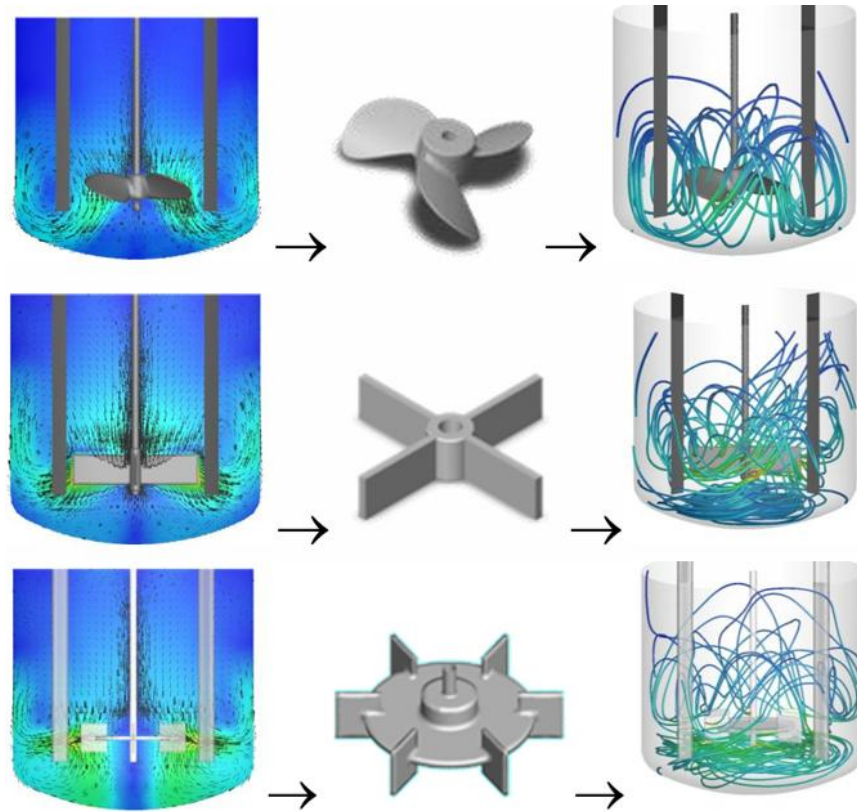


Nota. Imagen tomada de Uribe et al. (2012)

Entre los factores que influyen en la eficiencia de la agitación se encuentran el diseño del tanque la cual involucra su forma, altura de la solución y presencia de deflectores; la velocidad del agitador, la cual está relacionada con la potencia requerida y la turbulencia generada; la viscosidad y densidad del fluido ya que con ello se determinan el tipo de flujo y el consumo energético, finalmente también se considera que para determinar la potencia requerida de un agitador se considera el número de Reynolds (Re) y el número de potencia (Po), las cuales se relacionan mediante ecuaciones adimensionales. En la figura 8 se muestran los comportamientos hidrodinámicos de un tanque agitado con el uso de diferentes agitadores con el uso de simuladores CFD.

Figura 8

Comportamiento hidrodinámico de diferentes agitadores



Nota. Imagen tomada de Uribe et al. (2012)

De acuerdo con las imágenes presentadas en la figura 8, Uribe et al. (2012) describe lo siguiente “se observa claramente el patrón de agitación para los impulsores de tipo radial y de tipo axial. En el caso de los agitadores de tipo radial, se observa que se forman dos regiones de agitación y hay poco intercambio de fluido entre ellas, por lo que se podría asegurar que este tipo de agitadores no favorece el mezclado, pero, sin embargo, proporciona bastante corte que puede provocar que dos fluidos inmiscibles se dispersen entre sí, por lo que pueden ser adecuados para la dispersión de fases inmiscibles, como un gas en un líquido, y la formación de emulsiones. Por otro lado, en los de tipo axial no se observa la formación de estas regiones, en cambio se observa que las líneas de trayectoria se distribuyen a lo largo de toda la altura del tanque, por lo que el mezclado

será más homogéneo que con los del tipo radial, promoviendo así un mezclado más uniforme a lo largo de la altura del tanque. En este último tipo de agitadores, la eficiencia será mayor, ya que se promueve el bombeo sobre el corte” (p.2).

2.2.3 *Cristalización*

La formación de cristales ocurre cuando la concentración de una sustancia en un solvente excede su producto de solubilidad. No obstante, en la mayoría de los casos, este proceso se ve limitado por factores cinéticos, lo que provoca que el crecimiento cristalino solo tenga lugar en soluciones sobresaturadas. Existen distintos métodos para inducir y mantener este estado metaestable de sobresaturación.

Según lo mencionado por Mullin (2001) “la nucleación es la formación de cuerpos sólidos diminutos, embriones núcleos o semillas, que actúan como centros de cristalización, entre los factores que influyen en la nucleación están presentes la agitación, choque mecánico, fricción y presiones extremas, asimismo destaca el papel de la supersaturación o superenfriamiento como condición necesaria pero no suficiente. Al mismo tiempo la nucleación heterogénea es la más común en sales como el sulfato de zinc heptahidratado, ya que explica que la presencia de impurezas o superficies extrañas preexistentes puede reducir la barrera energética para la nucleación, facilitando la cristalización a menores grados de supersaturación” (p.182).

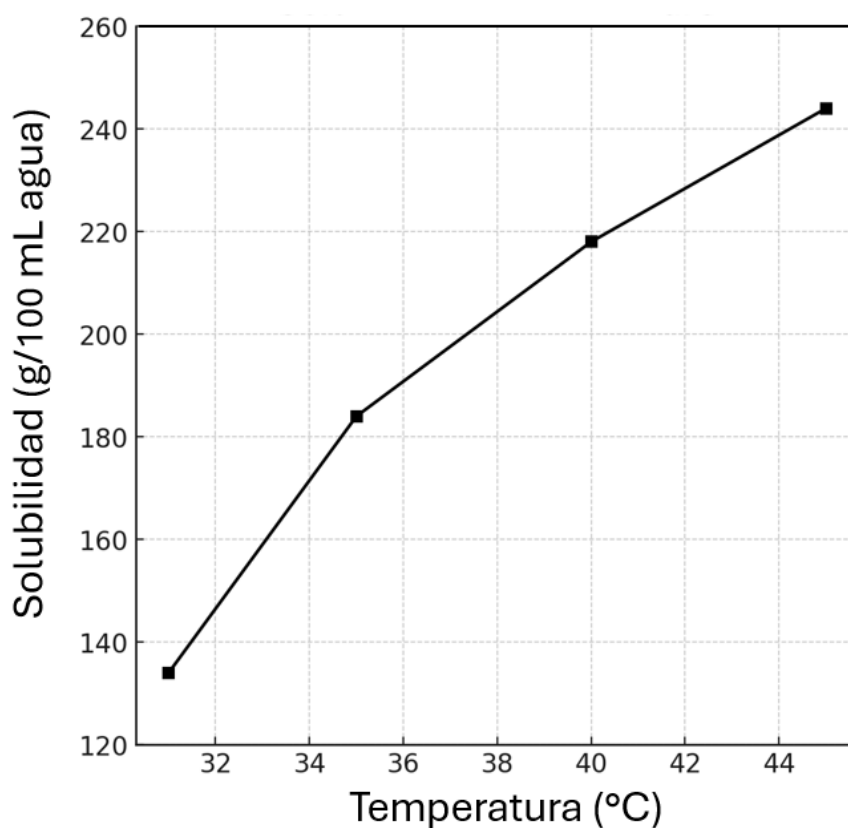
Desde la posición de Kanagadurai et al. (2009) “se estudia la cinética de nucleación, el crecimiento y las propiedades de los cristales diamagnéticos de sulfato de zinc heptahidratado, de donde se realizaron determinaciones experimentales de la solubilidad, el ancho de zona metaestable y los valores del periodo de inducción en solución acuosa a diferentes temperaturas.

Para ello de forma experimental se determinó la solubilidad, el ancho de zona metaestable y los valores del periodo de inducción del sulfato de zinc heptahidratado en solución acuosa a diferentes temperaturas (30, 35, 40 y 45 °C)

La solubilidad se determinó gravimétricamente y se observó su aumento con la temperatura de acuerdo con lo mostrado en la figura 9" (p.872).

Figura 9

Solubilidad del sulfato de zinc heptahidratado con la temperatura



Nota. Imagen tomada de (Kanagadurai et al., 2009)

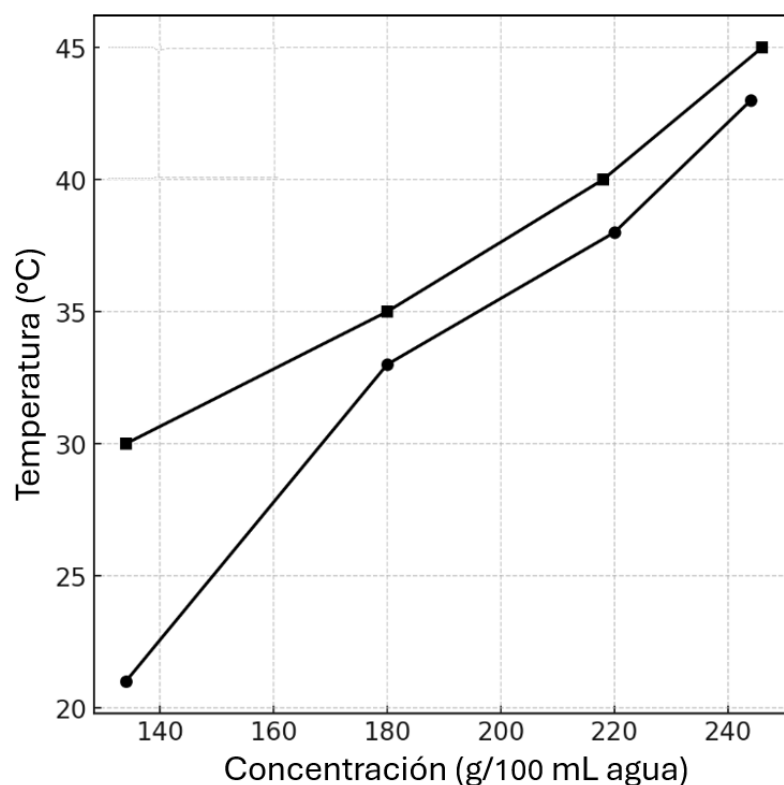
La zona metaestable en la cristalización es el rango de sobresaturación donde una solución puede mantenerse sin que ocurra nucleación espontánea inmediata. Cuando se incrementa la concentración de un soluto en un solvente, se pueden distinguir tres zonas la primera de ellas es la zona de solubilidad o insaturada, donde la solución puede disolver

más soluto sin que se forme precipitado ni cristales. Luego se tiene la zona metaestable o sobresaturada pero estable donde a pesar de que la solución se encuentra sobresaturada, los cristales no se forman espontáneamente y donde es necesario aplicar un estímulo como la agitación o cambios de temperatura para que se dé la cristalización y por último se tiene la zona de sobresaturación inestable o también llamada nucleación espontánea donde la solución es altamente sobresaturada, lo que trae consigo la formación instantánea de núcleos cristalinos sin necesidad de estímulos externos.

El ancho de la zona metaestable para el sulfato de zinc heptahidratado se midió mediante el método politérmico convencional, observándose una disminución de este con el aumento de la temperatura la cual se muestra en la figura 10.

Figura 10

Rango de zona metaestable en solución acuosa



Nota. Imagen tomada de (Kanagadurai et al., 2009)

Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1 Metodología

El presente trabajo corresponde a una investigación por actualización de conocimientos, en la cual se ha desarrollado considerando que el tipo de investigación en función del propósito es aplicado ya que tiene como objetivo abordar la mejora en el proceso de lixiviación del sulfato de zinc a través de análisis de variables operativas como la concentración de soluciones, tamaño de partícula, rangos de temperatura, recuperación del metal valioso de interés, entre otras variables. Este enfoque permite implementar mejoras concretas en el proceso, asegurando mayor eficiencia, reducción de variabilidad y mejoras en el rendimiento.

Por el alcance del estudio es una investigación del tipo descriptiva ya que se busca caracterizar y comprender en detalle las variables y condiciones involucradas en el proceso, el enfoque facilita la identificación de los factores clave que influyen durante el proceso de lixiviación, al describir y cuantificar las variables involucradas, se establece una base sólida para posteriormente proponer mejoras y optimizaciones.

Por el enfoque es de naturaleza cuantitativa, ya que se busca obtener inferencias a partir de datos numéricos obtenidos mediante la medición de diversas variables. Mediante el uso de herramientas como el control estadístico y modelos matemáticos, se pretende analizar la interacción entre las variables. Del mismo modo, a través de técnicas estadísticas como los gráficos de efectos y las superficies de respuesta, se busca identificar las condiciones óptimas para el proceso de lixiviación. Este enfoque garantiza resultados objetivos, reproducibles y aplicables, lo que permite optimizar el uso de

reactivos y proponer mejoras en el proceso, asegurando una producción más rentable y controlada.

Por el método de investigación, es analítico ya que se pretende identificar relaciones entre las variables y extraer conclusiones a partir de los datos cuantitativos. La selección de técnicas y modelos de análisis también se relaciona con el planteamiento del problema, el tipo de diseño y estrategias elegidas para los procedimientos, el análisis puede ser sobre los datos originales (datos directos) o puede requerir de su transformación (Hernández et al., 2014).

Por el diseño es no experimental, ex post facto o retrospectivo ya que permite analizar y evaluar datos ya existentes o procesos que han sido implementados previamente, sin la necesidad de manipular variables en un entorno controlado para la producción de sulfato de zinc. Al utilizar este diseño retrospectivo, se pueden examinar registros históricos, datos operativos y resultados de producciones anteriores para identificar patrones, tendencias y factores que han influido en la eficiencia del proceso.

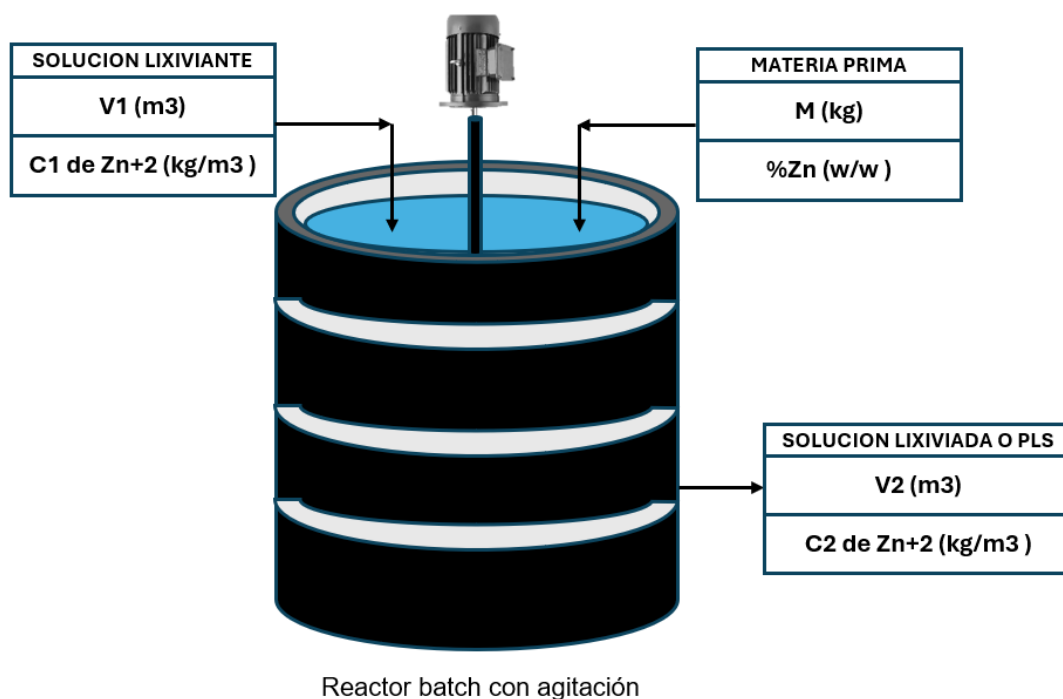
3.2 Desarrollo del trabajo

El presente trabajo tiene como finalidad identificar las variables principales en el proceso de lixiviación en reactores tipo batch que influyen en la optimización del %recuperación de zinc para la producción de sulfato de zinc, entre las variables a considerar para el análisis previo se encuentran los siguientes: el contenido en porcentaje de la materia prima de Zn, el tiempo de reacción en horas, la temperatura de reacción en grados celsius, la relación solido-liquido, el ratio de consumo de ácido sulfúrico en kg por kilogramo de materia prima, el número de malla para tamaño de partícula, la densidad de la solución lixiviada final o PLS y el pH de la solución lixiviada final o PLS.

En la etapa de lixiviación la principal variable a optimizar es el porcentaje de recuperación de Zn, ya que un valor más alto indica una extracción más eficiente del zinc presente en la materia prima. Esto no solo maximiza el aprovechamiento del mineral, sino que también reduce la generación de residuos con zinc no lixiviado. Además, permite obtener un sulfato de zinc con la pureza y concentración requeridas que cumplan con las especificaciones establecidas para su uso en fertilizantes o procesos metalúrgicos, se espera que el %recuperación alcance valores no menores del 90%, es por ello por lo que se realizará un diseño con pruebas experimentales desarrolladas anteriormente. Para determinar el %recuperación se muestra un esquema mostrado en la figura 11 de cómo se relacionan las variables para su cálculo.

Figura 11

Esquema para la determinación del %recuperación de Zn



El % de recuperación de Zn se calcula de la siguiente forma:

$$\%Recuperación\ Zn = \frac{Masa\ Zn\ extraido}{Masa\ Zn\ materia\ prima} * 100\%$$

$$\%Recuperación\ Zn = \frac{Masa\ Zn\ (PLS) - Masa\ Zn\ (Solución\ lixiviente)}{Masa\ Zn\ (materia\ prima)} * 100$$

$$\%Recuperación\ Zn = \%R_{Zn} = \frac{V_2 * C_2 - V_1 * C_1}{M * (\% \frac{Zn}{100})} * 100\%$$

Donde:

- C_1 es la concentración inicial de Zn en la solución lixiviente (kg/m³)
- C_2 es la concentración final de Zn en la solución lixiviada o PLS (kg/m³)
- V_1 es el volumen de la solución lixiviente (m³)
- V_2 es el volumen de la solución lixiviada o PLS (m³)
- M es la masa de la materia prima usada (kg)

3.2.1 Preparación y caracterización de la muestra

Las muestras de materia prima son seleccionadas por lotes, cada lote utilizado en un batch representa una prueba diferente, los ingresos a planta por lote corresponden entre 10 a 20 toneladas métricas de materia prima presentados en big bags, el material de trabajo es obtenido muestreando todos los big bags ingresados, cada muestra tiene alrededor de 10 kg de material, con ello se asegura en tener una muestra representativa del concentrado. Luego es preparado antes de su análisis químico, se procedieron a tomar 16 muestras.

Las muestras pasan primero por un proceso de homogenización y cuarteado. Luego, se tamizan con malla número 5, cuya abertura es de 4 mm, para determinar su granulometría. La mayor parte de la muestra presenta tamaños de partícula inferiores a 4 mm, representando aproximadamente más del 90% de la distribución total. Una vez preparada la muestra, se procede a realizar el análisis químico del contenido de Zn

mediante técnica volumétrica, siguiendo métodos de ensayo específicos. Asimismo, se determinaron otros elementos que podrían afectar el proceso de lixiviación, utilizando la técnica instrumental de absorción atómica. Los resultados de la caracterización se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Caracterización de muestras de materia prima de zinc

Caracterización de materia prima de zinc por lote de prueba								
Lote de prueba	%Zn	%Cu	%Fe	%Cd	%Pb	%Al	Malla 5(%)	Malla - 5(%)
1	65.760	0.257	1.490	0.004	0.207	0.896	3.070	96.930
2	65.810	0.307	1.540	0.054	0.257	0.946	3.070	96.930
3	65.710	0.207	1.440	0.003	0.157	0.846	3.070	96.930
4	65.760	0.257	1.490	0.004	0.207	0.896	3.070	96.930
5	63.406	0.033	8.383	0.007	0.204	4.764	0.000	100.00
6	70.120	0.036	7.030	0.001	0.305	4.384	0.000	100.00
7	70.120	0.036	7.030	0.001	0.305	4.384	0.000	100.00
8	85.160	0.022	1.090	0.005	0.027	1.266	0.260	99.740
9	85.336	0.043	2.844	0.012	0.129	1.900	2.922	97.078
10	86.067	0.089	6.744	0.013	0.343	3.362	8.790	91.210
11	85.909	0.087	6.532	0.017	0.336	3.264	8.487	91.513
12	85.918	0.087	6.545	0.017	0.336	3.270	8.506	91.494
13	86.430	0.092	7.230	0.002	0.361	3.587	9.480	90.520
14	70.120	0.036	7.030	0.001	0.305	4.384	0.000	100.00
15	66.662	0.034	7.773	0.002	0.268	4.592	0.000	100.00
16	32.840	0.001	0.592	0.063	0.002	4.197	0.000	100.00

3.2.2 Pruebas experimentales

Cabe destacar que las pruebas experimentales se desarrollaron el año 2023 en una planta de producción de sulfato de zinc para uso como fertilizante, una vez que se tienen los lotes de prueba caracterizados para un batch determinado, se comienza con el llenado de los reactores con solución lixivante, agua potable o una mezcla de ambos antes de empezar con las reacciones, previamente se determina la concentración del contenido de Zn inicial de esta solución en g/L, para conocer la cantidad de Zn inicial en kg, posteriormente con agitación mecánica se adiciona la materia prima y luego la cantidad de ácido sulfúrico correspondiente según estequiometría.

El ácido sulfúrico usado presenta una concentración del 98 % en relación peso/peso con una densidad de 1.83 kg/L, la capacidad de los reactores están entre los 20 a 25 metros cúbicos, para una preparación se mantiene un volumen de solución de entre 16 a 19 metros cúbicos de preparado.

Por lo general durante la reacción, la temperatura del proceso se encuentra en un intervalo de 65 a 75 grados celsius, durante el proceso de lixiviación se debe mantener el nivel de la solución. Al finalizar la reacción se analizan ocho variables que pueden influir en el %recuperación de Zn, las cuales serán designadas desde X_1 hasta X_8 .

Donde:

- X_1 es el contenido de Zn en la materia prima (%)
- X_2 es el tiempo de reacción (horas)
- X_3 es la temperatura de reacción ($^{\circ}\text{C}$)
- X_4 es la relación sólido-líquido antes de reacción (kg material/kg solución)
- X_5 es el ratio de consumo de ácido sulfúrico (kg ácido/kg materia prima)
- X_6 es el tamaño de partícula (número de malla)

- X_7 es la densidad de la solución lixiviante o PLS (Kg/L)
- X_8 es el pH de la solución lixiviante o PLS

Los resultados de las ocho variables consideradas después de haber realizado las pruebas experimentales se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Resultados de pruebas experimentales a nivel planta

Resultados de pruebas experimentales									
Lote	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	%R_Zn
1	65.76	11	68	0.26	0.97	5	1.51	4.03	61.09
2	65.81	15	74	0.27	0.95	5	1.49	3.73	54.26
3	65.71	14	75	0.26	0.96	5	1.54	3.94	52.38
4	65.76	11	75	0.27	0.93	5	1.53	3.69	63.57
5	63.41	16	75	0.27	0.89	-80	1.51	3.88	58.10
6	70.12	17	73	0.23	1.08	-80	1.52	3.86	70.98
7	70.12	15	75	0.26	1.05	-80	1.55	3.93	78.59
8	85.16	6	75	0.07	1.25	5	1.54	3.76	71.27
9	85.34	21	75	0.14	0.86	5	1.53	4.04	48.61
10	86.07	13	75	0.13	1.10	5	1.55	4.06	65.92
11	85.91	15	75	0.15	1.10	5	1.5	4.22	82.58
12	85.92	15	70	0.19	1.13	5	1.49	3.89	86.56
13	86.43	15	70	0.13	1.26	5	1.52	2.77	79.61
14	70.12	15	70	0.16	1.02	-80	1.51	4.27	91.14
15	66.66	15	70	0.22	0.96	-80	1.51	4.31	80.05
16	32.84	15	70	0.39	0.49	-80	1.52	3.64	81.43

3.2.3 *Diseño factorial de variables*

Para la optimización del %recuperación de Zn se seleccionaron un total de ocho variables o factores, la mayoría se obtienen de las mediciones posteriores a las pruebas en planta puesto que pueden ser significativas en el proceso de lixiviación, se realizó un diseño fraccionado de los ocho factores considerados con dos niveles de resolución cuatro, de tal forma que se pueda estimar el impacto de los efectos principales sin que se mezclen, con ello el número de experimentos se reduce a 16 corridas.

La elección de las variables o factores a considerar en el diseño de experimentos es en base a su impacto sobre la eficiencia del proceso y la recuperación del zinc. Entre los criterios considerados se hace mención que el contenido de zinc de la materia prima es influyente puesto que determina la cantidad de zinc disponible para ser extraído, así mismo afecta la cinética de lixiviación y el consumo de ácido sulfúrico para su extracción.

El tiempo de reacción influye en el grado de disolución del zinc, un tiempo insuficiente puede resultar en una baja recuperación. En el caso de la temperatura de reacción, un valor alto puede contribuir a aumentar la velocidad de lixiviación, aunque al mismo tiempo puede generar reacciones secundarias no favorables.

La relación solido-liquido en caso de ser alta, es decir al presentar un menor volumen de solución puede generar una mayor concentración de Zn disuelto, pero también puede provocar una saturación más rápida, provocando que en cortos periodos se dé la cristalización de la solución, lo que limita la disolución del metal. En el caso de una relación más baja, es decir un mayor volumen de solución, favorece la disolución de Zn al reducir la concentración de iones en fase líquida, pero también diluye el lixiviado esto se puede dar durante el control del nivel durante la reacción, lo que puede afectar la eficiencia de recuperación.

Por otra parte, el ratio de consumo de ácido sulfúrico expresado como kilogramos de ácido consumido por kilogramo de materia prima usada, permite determinar la cantidad de reactivo necesario para la disolución del zinc sin generar un consumo excesivo. El número de malla por tamaño de partícula afecta la superficie de contacto entre el sólido y la solución, partículas más finas aumentan la velocidad de lixiviación, pero pueden generar problemas de filtración.

La densidad de la solución lixiviada final o PLS indica la concentración de solutos en la solución lixiviada, afecta la recuperación de zinc en etapas posteriores y además permite establecer un rango que permita identificar la formación de cristales. Finalmente, el pH de la solución lixiviada final o PLS controla la estabilidad de la solución y la formación de compuestos secundarios, un pH muy bajo puede favorecer la disolución de impurezas, mientras que un pH inadecuado puede precipitar zinc y reducir su recuperación. El diseño de estos ocho factores se muestra en la tabla 9.

Tabla 9*Diseño fraccionado de factores y niveles en pruebas experimentales*

FACTORES		NIVELES	
		-1	1
X1	Contenido de Zn materia prima (%)	30	90
X2	Tiempo de reacción (horas)	6	24
X3	Temperatura de reacción (°C)	68	75
X4	Relación sólido-líquido (Kg sólido/kg de líquido)	0.05	0.40
X5	Ratio consumo ácido (kg ácido/kg de materia prima Zn)	0.45	1.30
X6	Tamaño de partícula (malla)	-80	5
X7	Densidad PLS (kg/L)	1.45	1.55
X8	pH PLS	2.75	4.35

3.2.4 Gráficos estadísticos en el diseño de experimentos

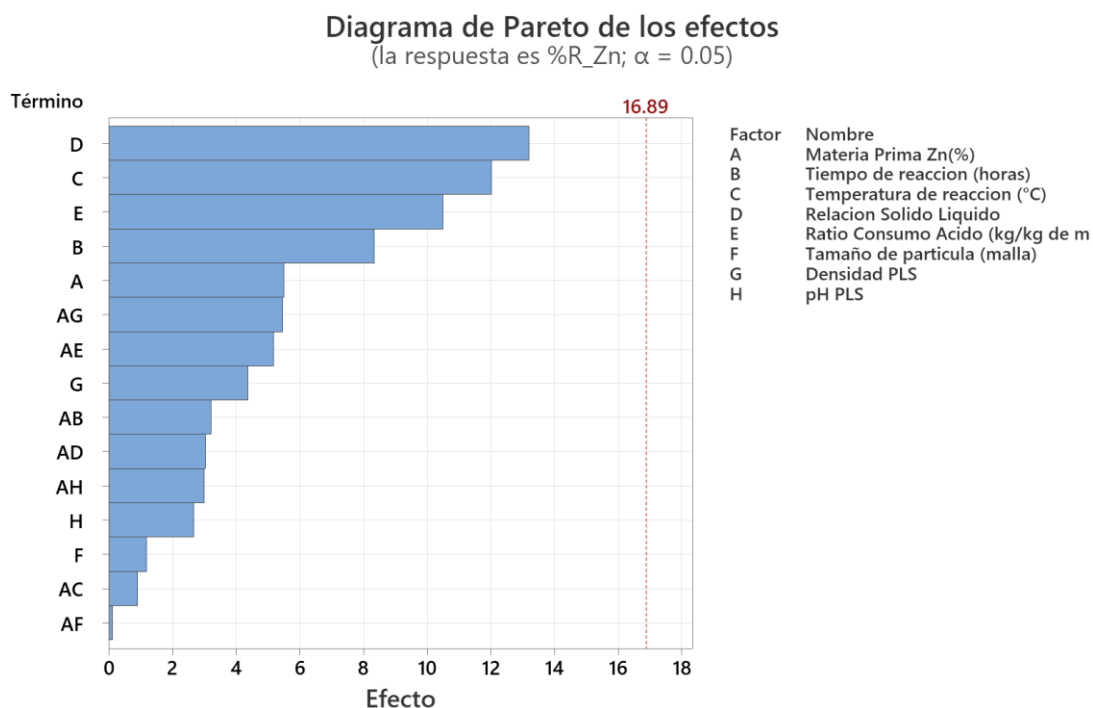
Después de haber realizado un análisis estadístico a los factores en el diseño de experimentos para la recuperación de zinc se obtienen una serie de gráficos estadísticos para determinar las variables que tienen mayor significancia en el proceso de lixiviación, entre ellas se encuentra el diagrama de Pareto, la cual se muestra en la figura 12.

Como se visualiza los términos D y C correspondientes a la relación sólido-líquido y a la temperatura de reacción respectivamente presentan una mayor tendencia de significancia, si bien no superan el umbral de significancia estadística de 16.89 con un nivel

de confianza del 95%, de igual forma determinan ser los factores con mayor efecto para la recuperación de zinc.

Figura 12

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con interacciones

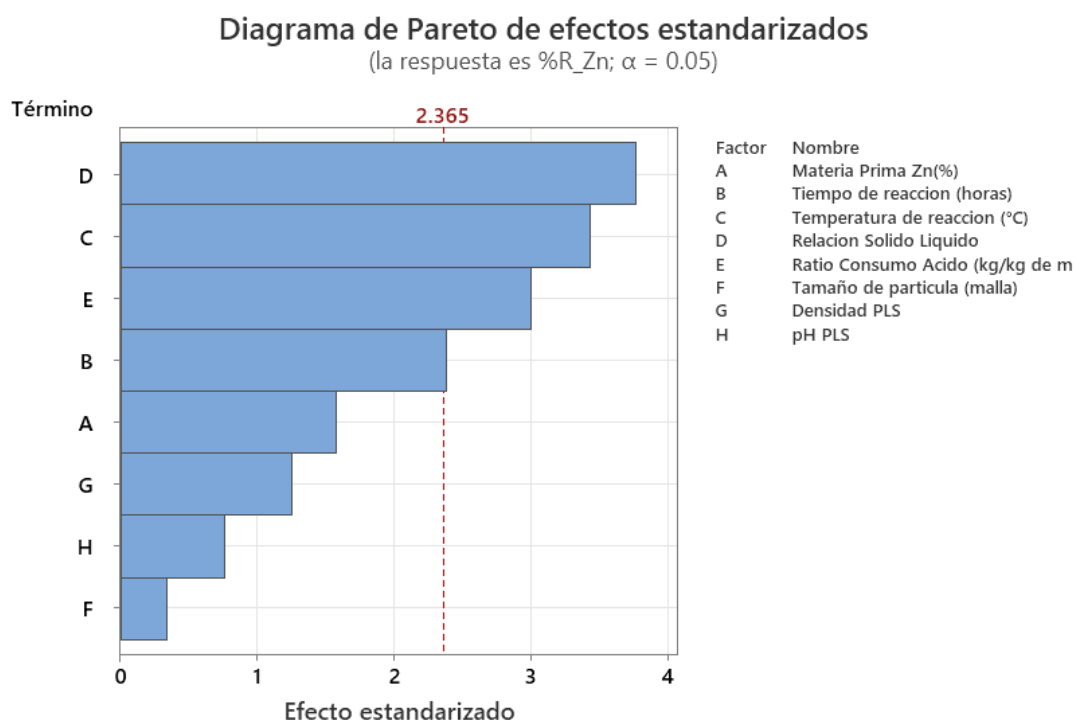


Por otra parte, según lo mostrado en la figura 13, al realizar un cambio en el análisis considerando solo los factores principales sin involucrar a las interacciones que puede haber entre ellas, se confirma que las variables con mayor significancia se presentan en la relación sólido-líquido y la temperatura de reacción sobrepasando el umbral de significancia de 2.365 con un nivel de confianza del 95%, lo cual indica que ambas variables son estadísticamente significativas.

Lo mismo se podría mencionar del ratio de consumo de ácido sulfúrico representado por la letra E, ya que según el diagrama de Pareto también es estadísticamente significativa, sin embargo, se debe comparar con otra graficas para verificar ello.

Figura 13

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados sin interacciones

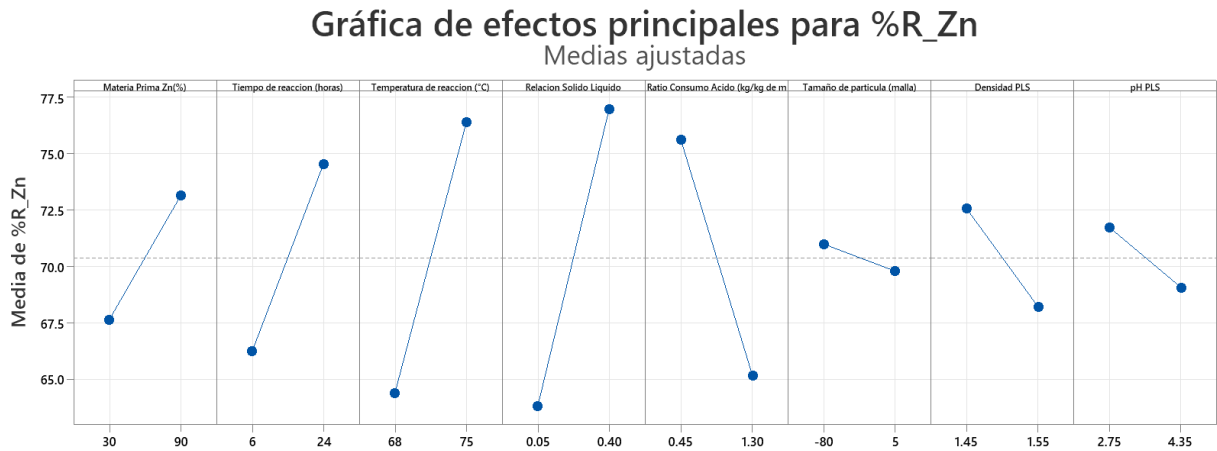


De acuerdo a lo visualizado en la figura 14, se ve la gráfica de efectos principales de las 8 variables, entre las cuales se puede descartar aquellas rectas con pendiente negativa como pueden ser la densidad y el pH del PLS, el tamaño de partícula y también el ratio de consumo de ácido que presenta un efecto contrario en la recuperación de zinc, confirmando nuevamente que la relación sólido-líquido y la temperatura de reacción al tener las pendientes mas pronunciadas, sugieren un impacto significativo en la recuperación de zinc.

Si bien las gráficas del contenido de zinc en la materia prima y el tiempo de reacción presentan también pendientes positivas, el rango de variación en la recuperación de zinc es menor en comparación con las pendientes de sólido-líquido y temperatura de reaccion.

Figura 14

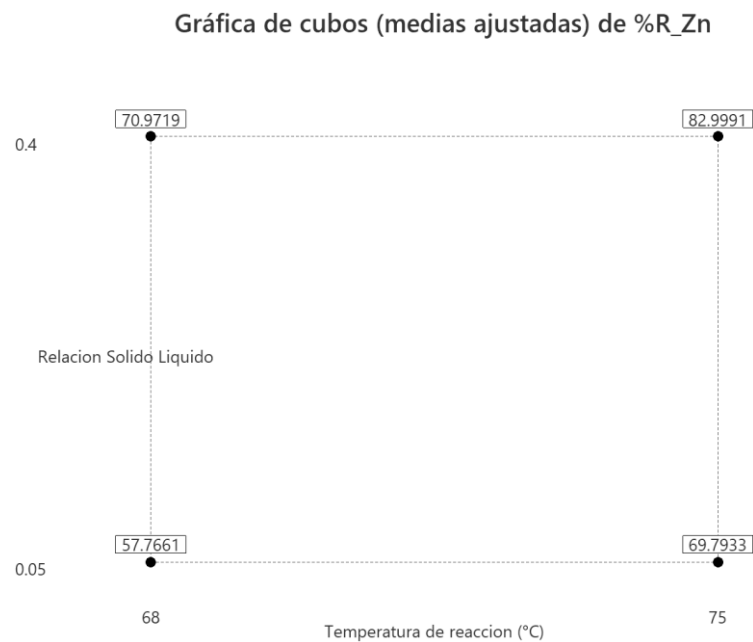
Gráfica de efectos principales para la recuperación de zinc



Con relación a lo mencionado anteriormente, se muestra en la figura 15 la gráfica de cubos, en la cual al considerar los dos factores de mayor significancia se puede apreciar que la mayor recuperación de zinc en el proceso de lixiviación se da cuando se controla la temperatura de reacción a 75°C y a una relación sólido-líquido inicial de 0.40 consiguiendo una recuperación del 82.9991% de zinc

Figura 15

Gráfica de cubos para la recuperación de zinc



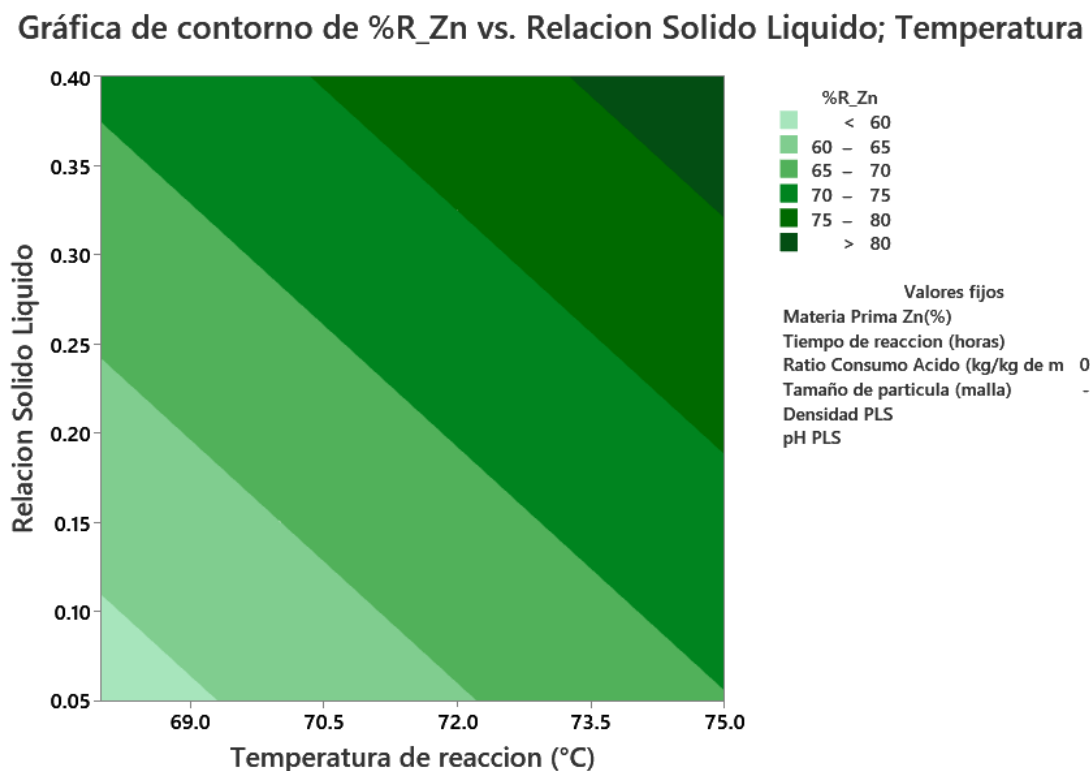
En la figura 16, se visualiza la gráfica de contorno donde se ve a través de franjas de color verde gradual las zonas donde se obtiene la mayor recuperación de Zn (>80%) siendo la óptima aquella que presenta una zona más oscura donde la relación sólido-líquido es de 0.40 y la temperatura de reacción de 75°C.

Por otra parte, en zonas de temperatura donde la temperatura de reacción está por debajo de los 70°C o relación sólido-líquido menor a 0.20, la recuperación cae por debajo del 70%.

Asimismo, se puede mencionar que la variación en la recuperación sigue un patrón diagonal, lo que indica una fuerte interacción entre los dos factores.

Figura 16

Gráfica de contorno relación sólido-líquido-temperatura de reacción

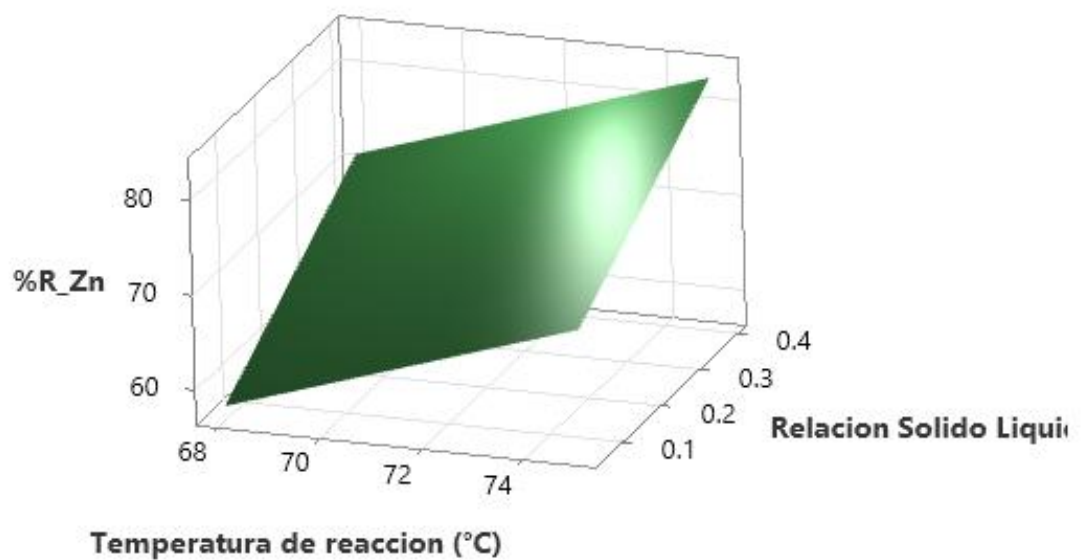


Por último, en la figura 17 se contempla la gráfica de superficie, que guarda relación con la gráfica de contorno, donde al tener una superficie inclinada se contempla de forma clara la zona donde se da la mayor recuperación de Zn en el proceso de lixiviación.

Asimismo, se puede mencionar que las gráficas de superficie pueden tener otras formas diferentes a planos inclinados. Lo cual dependerá del tipo de diseño experimental que se quiera evaluar.

Figura 17

Gráfica de superficie de recuperación Zn



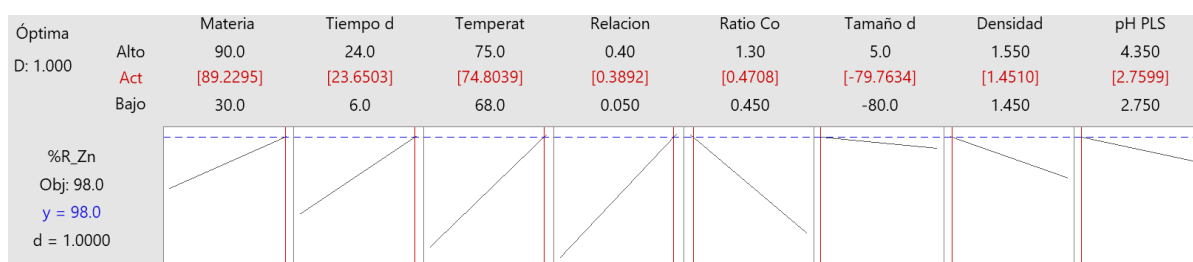
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

De acuerdo con las pruebas realizadas se puede mencionar que la optimización de la recuperación de zinc mediante el diseño de experimentos con las pruebas realizadas da como valor un 82.9991% de recuperación, considerando a los factores principales que son relación sólido-líquido con un valor de 0.40 y a la temperatura de reacción con un valor de 75°C.

Según el optimizador de respuesta mostrado en la figura 18 para una recuperación del 98% de zinc la temperatura de reacción debería de ser de 74.80°C y con una relación sólido-líquido de 0.39, para verificar ello se debe de realizar otras pruebas de lixiviación que estén centrados en la recopilación de datos de estas dos variables para nuevamente realizar un diseño de experimentos y verificar si se alcanza valores de recuperación óptimos cercanos al 98%.

Figura 18

Optimizador de respuesta para la recuperación de zinc



De acuerdo con el optimizador de respuesta para lograr una recuperación del 98% de Zn, las otras variables deben tener los siguientes valores: contenido de 89.23% de zinc en la materia prima, un tiempo de reacción de 23.7 horas, un ratio de consumo de ácido sulfúrico de 0.47 kg de ácido por kg de materia prima usada, un tamaño de partícula de malla -80, una densidad de solución lixivante de 1.45 kg/L y un pH de 2.76

Conclusiones

El proceso de lixiviación para la producción de sulfato de zinc se puede optimizar para muestras que presentan una gran variabilidad en los factores principales que están involucrados para ello se requiere que los datos de los factores estudiados sean de buena calidad en la medición. De acuerdo con los objetivos propuestos en el presente estudio se establecen las siguientes conclusiones:

1. Los parámetros principales que influyen en la recuperación de zinc en las pruebas realizadas son el factor relación solido-líquido y la temperatura de reacción.
2. La composición de zinc en la materia prima afecta al proceso, pero no es un factor determinante para la optimización de la recuperación de zinc.
3. El porcentaje de recuperación de zinc en el proceso de lixiviación puede alcanzar valores por encima del 80% y estadísticamente puede llegar al 98% de recuperación, lo cual se debe corroborar con otro tipo de diseños experimentales que permitan verificar la optimización.

Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo un estudio adicional que replique la presente investigación, incorporando nuevas variables que puedan ser medidas y controladas durante el proceso de lixiviación. Entre estas variables se incluyen: las revoluciones por minuto (RPM) de los agitadores en los reactores tipo batch, la acidez libre tanto de la solución lixivante como de la solución lixiviada, el porcentaje de sólidos generados al término del proceso de lixiviación, así como la realización de pruebas con un tamaño de partícula de la materia prima inferior a $0.180\ \mu\text{m}$, equivalente a la malla 80. Este enfoque permitiría ampliar el análisis y obtener una comprensión más detallada de los factores que influyen en la eficiencia del proceso de lixiviación.

Por otro lado, se recomienda poder realizar estudios adicionales que permitan monitorear el proceso durante la reacción, mediante la medición de la concentración en función del tiempo, con el objetivo de determinar la cinética de la reacción y establecer tiempos óptimos de control en el proceso de lixiviación. Asimismo, se sugiere desarrollar gráficas de control y gráficos de capacidad que faciliten la supervisión y el manejo del proceso, enfocándose en las variables más relevantes. Este enfoque contribuiría a optimizar la eficiencia y el control del proceso de lixiviación.

Referencias bibliográficas

- Azabache, B., Peláez, J., & Osorio, J. (2023). *Business consulting para Nexa Resources*.
<https://orcid.org/0000-0001-8121-8658>
- Bard, A. (2017). *Standard Potentials in Aqueous Solution* (First edition). Routledge.
- Corzo, A. (2008). *Optimización del proceso de purificación de Sulfato de Zinc mediante el cambio de temperatura y cantidad de polvo de zinc Doe Run*.
- Davis, P., & Hersh, R. (1981). *The mathematical experience*. Houghton Mifflin Company.
- De Fuentes, Iván. (2021). Propuesta de mejora para disminuir los reprocesos del producto en una refinería de zinc utilizando herramientas lean manufacturing Ivan de La Fuente. *Tesis*.
- Delahay, P., & Pourbaix, M. (1951). *Potential-pH Diagram of Zinc and Its Applications to the Study of Zinc Corrosion*.
- Ermukhanova, S., Khatsrinov, A., Suleymanova, A., & Vodop'yanova, S. (2024). Technology of zinc sulfate monohydrate production. *Herald of Technological University*, 27(5), 87–90. https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_5_87
- Fretell, D., & Palomino, A. (2011). *Obtención del sulfato de zinc heptahidratado a nivel industrial en Doe Run Peru La Oroya división*.
- Froment, G., Bischoff, K., & De Wilde, J. (2009). *Chemical reactor analysis and design*. 1–902.
- Gupta, C. (2003). *Chemical metallurgy : principles and practice*. Wiley-VCH.

- Habashi, F. (1993). *A Textbook of Hydrometallurgy*. Metallurgie Extractive Quebec.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. *Mc Graw Hill*, 1–634.
- Jiang, H., Zhu, F., Ai, Q., & Jiang, Y. (2018). Método para la producción conjunta de sulfato de zinc de monohidrato y sulfato de zinc heptahidrato. *Patente No. CN108910938A*, 1–8.
- Jianxing, H. (2012). Método de producción de sulfato de zinc monohidratado. *Patente CN 102351240 A*, 1–6.
- Kanagadurai, R., Durairajan, R., Sankar, R., Sivanesan, G., Elangovan, S., & Jayavel, R. (2009). *Nucleation kinetics, growth and characterization studies of a diamagnetic crystal-zinc sulphate heptahydrate (ZSHH)* (Vol. 6, Issue 3). <http://www.e>
- Levenspiel, O., & Tojo, B. (1993). *Kinetic Leaching*.
- Liu, Z. (2019). *Un método de producción de sulfato de zinc monohidratado*.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7th ed.).
- Moreno, K. (2024). *Lixiviación de Zinc y plomo de un concentrado de esfalerita y galena proveniente de la zona minera Chinapintza empleando solventes eutecticos profundos*.
- Mullin, J. (2001). *Crystallization*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4833-2.X5000-1>

Ordoñez, Á., & Delgado, E. (2023). *“Procedimiento hidrometalúrgico para la lixiviación en medio oxidante-amoniaco de minerales polimetálicos con contenidos de cobre, zinc, oro y plata; alternativa adaptable a operaciones de la pequeña minería.”*

Surco, M. (2012). *Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de lixiviación de cobre* [Universidad Nacional de Ingeniería].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_f5a04f1cc7b2415897a8be86f75b9fa6/Details

Uceda, D. (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*.

Uribe, A., Rivera, R., Aguilera, A., & Murrieta, E. (2012). *Agitación y mezclado* (Vol. 4).

Velázquez, B. (2017). *Balance de masas y energía en reactores químicos*.

Votorantim Metais. (2020). *Manual de procesos productivos*.

Anexos

ANEXO 01

Determinación de Zn por volumetría

Pesar 1.50 g de muestra en vaso de precipitado de 250 ml, usar luna de reloj como protección, agregar 10 ml de agua destilada + 20 ml de $\text{HNO}_{3(\text{cc})}$. Inicialmente se desprenderán vapores pardos. Realizar el ataque por 3 horas en bajo calor hasta punto pastoso. Procurar la máxima disolución del material.

Tras el ataque anterior, preparar directamente en el vaso 20 ml de agua regia (primero 15ml de $\text{HCl}_{(\text{cc})}$ y luego 5ml de $\text{HNO}_{3(\text{cc})}$) y realizar el ataque por 3 horas en bajo calor hasta punto pastoso. Procurar la máxima disolución del material. Lavar luna de reloj y trasvasar todo el contenido en fiola de 200 ml. Enrasar, agitar y tomar alícuota de 50 mL hacia un vaso de 250 mL (Lavar el interior de la pipeta con agua destilada).

Enfriar y agregar 10 ml de $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{cc})}$, procurando limpiar el vaso antes de pasar a calentarlo, calentar hasta que la solución presente humos blancos, (antes es posible que se formen humos marrones y amarillos, eliminación de vapores nitrosos, dejar que se oxide totalmente), cuando ya no se vea ningún cambio y solo se vea los humos blancos, bajar de la plancha y dejar enfriar. Filtrar el contenido en un vaso de 400 ml con papel filtro #42 y lavar bien el vaso con agua destilada. Al filtrado agregar 5 ml de persulfato de amonio al 10% y calentar hasta ebullición (hasta reducir el volumen a 50 ml).

Enfriar completamente y añadir 150 ml de solución extractiva (esta cantidad se debe al alto contenido de Fe que por lo general tiene la muestra) con probeta de 100 ml, añadir de a pocos por las paredes del vaso, ya que éste empieza a calentarse y puede

salpicar, asimismo se debe agitar constantemente para evitar que se formen dos fases. Hervir por 5 minutos, o en su caso dejar que ebulle para que siga reduciendo volumen.

Filtrar en caliente a través de un papel filtro #42 en un matraz de 500ml y lavar el residuo 2 veces de la siguiente manera: agregar agua destilada por las paredes de cada vaso y añadirle 30 ml de solución extractiva, poner a calentarlo hasta ebullición y luego lavar el filtro con toda la solución contenida en el vaso. El segundo enjuague, una vez vaciado el vaso, se lava con agua destilada por las paredes del vaso y calentarlo hasta la ebullición y luego lavar el filtro con toda el agua caliente. Lavar con agua destilada el filtro dos o tres veces.

Al filtrado, regular el pH hasta 5.5 con ácido acético y/o solución buffer pH 10. Agregar 0.5 g (2 cdtas) de tiourea (acomplejante del cobre) y 0.5 g (1 cda) de ácido ascórbico (para reducir el Fe y Mn), regular el pH a 5.3 con Ácido Acético 1:1 y/o solución buffer pH 10. Agregar 10 gotas de Naranja de Xylenol y titular con solución valorada de EDTA 0.05 M, hasta viraje completo desde rojo a color amarillo constante.

Anotar el gasto (mL EDTA) y calcular el Porcentaje de Zinc en la muestra.

$$\%Zn = \frac{M_{EDTA} * 6.537}{W_{muestra}} * V_{EDTA} * \left(\frac{V_{AFORO}}{V_{ALÍC}} \right)$$

Dónde:

M_{EDTA} = Molaridad del EDTA

V_{EDTA} = ml de gasto

$W_{muestra}$ = g de la muestra

V_{aforo} = Volumen aforo de la fiola (normalmente 200 mL)

$V_{alíc}$ = Volumen alícuota extraída de la fiola (normalmente 50 mL)

ANEXO 02
MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE SULFATO DE ZINC

El problema de investigación	Objetivos de la investigación	Variables	Dimensiones	Indicadores	Variables e indicadores	Metodología de investigación
Problema general: ¿Es posible optimizar el proceso de lixiviación en la producción del sulfato de zinc? Problemas específicos ¿Cuáles son los parámetros que influyen en el porcentaje de recuperación de zinc en el proceso de lixiviación del sulfato de zinc? ¿Es posible determinar el porcentaje de recuperación optimo del zinc en el proceso de lixiviación?	Objetivo general Optimizar el proceso de lixiviación para la producción del sulfato de zinc Objetivos específicos Determinar los parámetros que permitan optimizar el proceso de lixiviación del sulfato de zinc Determinar el porcentaje de recuperación optimo de zinc en el proceso de lixiviación	V1: Parámetros del proceso de lixiviación Permiten controlar el proceso de lixiviación para lograr la mayor recuperación V2: Porcentaje de recuperación de Zn Un mayor porcentaje indica una mayor extracción	V1F1 Temperatura de reacción V1F2 Relación sólido-líquido V2F1 Relación sólido-líquido	Temperatura óptima determinada en pruebas experimentales (°C) Relación sólido-líquido óptimo establecido en el estudio Porcentaje de recuperación de zinc alcanzado en condiciones optimas (%)	Parámetros de proceso Indicadores: -Temperatura de reaccion: °C óptimos según pruebas experimentales -Relación sólido-líquido: relación óptima determinada Recuperación de zinc Indicadores: -Porcentaje de zinc extraído de la solución.	Tipo de investigación: Aplicado analítico-transversal Nivel de investigación: Descriptiva Diseño de investigación: No experimental Método de investigación: Analítico

