

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Aplicación de diseño de experimentos en la cinética de
lixiviación de mineral de cobre en bateas**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Walter Junnior Arce Quinteros

 [0009-0005-2087-8894](https://orcid.org/0009-0005-2087-8894)

Asesor

M.Sc. Arturo Leoncio Lobato Flores

 [0000-0002-3890-9338](https://orcid.org/0000-0002-3890-9338)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Arce Quinteros [1]
Referencia/Reference	[1] W. Arce Quinteros, “ <i>Aplicación de diseño de experimentos en la cinética de lixiviación de mineral de cobre en bateas</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Arce, 2024)
Referencia/Reference	Arce, W. (2024). <i>Aplicación de diseño de experimentos en la cinética de lixiviación de mineral de cobre en bateas</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Dedicado a mis amados padres Wualter Horacio Arce Flores
y a mi madre Liliam Elizabeth Quinteros Yanac
por su soporte, cariño, amor y comprensión
a lo largo de toda mi existencia*

Resumen

El presente trabajo de investigación se ha realizado en la Planta de Óxidos de una mina del Sur, el cual tiene por objetivo la evaluación metalúrgica de los parámetros que intervienen en el proceso de lixiviación de minerales de Óxido de Cu, para poder solucionar los problemas y evaluar los factores que afectan al proceso de lixiviación de cobre en bateas y determinar las variables más significativas para optimizar los parámetros de operación con la finalidad de reducir el consumo de ácido sulfúrico, obtener una la máxima ley PLS HG de rebose y disminuir los sólidos en este mismo rebose para no afectar al área de SX.

Para tal efecto recurriremos al soporte de los diseños experimentales en Minitab para evaluar y optimizar los parámetros que influyen en el proceso de lixiviación de Cu en bateas para que en forma eficaz y apreciable poder reducir los costos de investigación en la evaluación de parámetros del proceso de lixiviación, una vez optimizado nuestros parámetros usaremos el modelo del núcleo sin reaccionar predecir la fracción de roca oxidada que se va consumiendo en una cantidad determinada de horas.

En esta evaluación, tomamos una primera etapa de descarte, para lo cual usamos el diseño factorial fraccionado, con dos variables de respuesta: la primera variable es la recuperación de cobre en PLS HG y la segunda variable es el Split P(80) del HPGR; con cuatro factores experimentales(parámetros) que intervienen en la lixiviación de cobre en bateas: flujo de inundación Raff HG, ratio de ácido(g/l) a la batea, con ello determinar el comportamiento y los efectos de los parámetros en el proceso de lixiviación del Cu en bateas para luego determinar los parámetros más significativos que entraran a la etapa de optimización.

Una vez que determinamos los parámetros más significativos nos apoyaremos de la aplicación del diseño octogonal para optimizar de manera eficiente la granulometría de alimentación para las condiciones y parámetros en operación ya que en la actualidad vienen siendo un problema recurrente en nuestra operación, el cual al ser llevado a planta

traerá una mejor práctica que sin lugar a duda beneficiará el proceso de lixiviación de Cu en bateas.

Palabras claves — Lixiviación, liberación, ácido, rebose.

Abstract

The present research work has been carried out in the Oxide Plant of a mine in the South, which aims at the metallurgical evaluation of the parameters involved in the leaching process of Cu Oxide minerals, in order to solve the problems and evaluate the factors that affect the copper leaching process in pans and determine the most significant variables to optimize the operating parameters in order to reduce the consumption of sulfuric acid, obtain the maximum PLS HG overflow grade and reduce the solids in this same overflow so as not to affect the SX area.

For this purpose, we will resort to the support of experimental designs in Minitab to evaluate and optimize the parameters that influence the Cu leaching process in pans so that we can effectively and appreciably reduce research costs in the evaluation of parameters of the leaching process. leaching, once our parameters have been optimized we will use the unreacted core model to predict the fraction of oxidized rock that is consumed in a given number of hours.

In this evaluation, we take a first stage of discarding, for which we use the fractional factorial design, with two response variables: the first variable is the recovery of copper in PLS HG and the second variable is the Split P(80) of the HPGR ; with four experimental factors (parameters) that intervene in the leaching of copper in pans: Raff HG flood flow, acid ratio (g/l) to the pan, thereby determining the behavior and effects of the parameters in the process of leaching of Cu in pans to then determine the most significant parameters that will enter the optimization stage.

Keywords — Leaching, release, acid, overflow.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iv
Abstract	vi
Introducción	xv
Capítulo I. Parte instructoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Ubicación	1
1.1.2 Acceso	3
1.1.3 Geología regional y clima	3
1.1.4 Recurso hídrico	4
1.2 Descripción de la problemática	5
1.3 Objetivos del estudio	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Antecedentes investigativos	6
1.4.1 Antecedentes referenciales	6
1.4.2 Hipótesis	7
1.4.3 Hipótesis específicas	8
1.4.4 Justificación de la investigación	8
1.4.5 Tipo de investigación	8
1.4.6 Marco metodológico del diseño experimental	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Chancado	11
2.1.2 Tambor de Pretratamiento	13
2.1.3 Lixiviación en bateas	14
2.1.4 Subáreas de la Lixiviación	15

2.1.5	Descarga de Bateas.....	16
2.1.6	Clarificación.....	16
2.2	Marco conceptual.....	17
2.2.1	Descripción del proceso.....	17
2.2.2	Parte teórica del análisis de datos por Minitab versión 22.....	32
2.2.3	Clasificación y selección de los Diseños Experimentales.....	39
2.2.4	Diseño Factorial Fraccionado 2k-p.....	41
2.2.5	Diseño Factorial 2k-1.....	42
2.2.6	Arreglos Ortogonales.....	42
2.2.7	Cinética de Lixiviación:.....	48
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		54
3.1	Equipos utilizados.....	54
3.2	Distribución Mineralógica de cobre.....	54
3.3	Consumo de H ₂ SO ₄ y dosificación en lixiviación de cobre.....	56
3.4	Planteamiento de las variables controlables para la formulación del Diseño Factorial Fraccionado.....	56
3.4.1	Variable X1 (Grado de Liberación):.....	56
3.4.2	Variable X2 (H ₂ SO ₄):.....	56
3.4.3	Variable X3 (P80):.....	57
3.4.4	Variable X4 (Flujo de inundación):.....	57
3.5	Planteamiento por Diseño factorial fraccionado Ley de rebose (g/l) PLS HG de Cu y Consumo de ácido (g/l) en bateas.....	57
3.5.1	Análisis a la ley de rebose PLS HG.....	61
3.5.2	Análisis a dosificación de ácido a una batea de lixiviación.....	67
3.6	Planteamiento de las variables controlables en la formulación del diseño octogonal para optimizar la reducción del del consumo de Ácido en Bateas en el proceso hidrometalúrgico de Lixiviación.....	73
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....		89

4.1	Análisis del consumo de Ácido en Bateas(g/l) aplicando el diseño octogonal.....	89
4.2	Optimización del parámetro P80 (mm), Grado de liberación (%) para obtener el mínimo consumo de Ácido en bateas (g/l).....	97
4.3	Prueba hidrometalúrgica optimizada	98
4.4	Discusión de resultados	98
	Conclusiones	100
	Recomendaciones	101
	Referencias bibliográficas	102
	Anexos	103

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Puntos de diseño o tratamientos	36
Tabla 2: Clasificación de diseños experimentales	40
Tabla 3: Efecto en los factoriales 2^k	41
Tabla 4: Factores de control y de ruido en la producción de PLS HG (Cu)	42
Tabla 5: Diseños ortogonales robustos, internos y externos	43
Tabla 6: Arreglo ortogonal L4.....	44
Tabla 7: Arreglo ortogonal L9.....	45
Tabla 8: Arreglo ortogonal L8.....	45
Tabla 9: Arreglo ortogonal L12.....	46
Tabla 10: Arreglo ortogonal L18.....	46
Tabla 11: Arreglo ortogonal L16.....	47
Tabla 12: Consumo de ácido sulfúrico y parámetros operativos	56
Tabla 13: Rango de las variables controlables para el Diseño Factorial Fraccionado	56
Tabla 14: Plantilla de Diseño Factorial Fraccionado	60
Tabla 15: Analisis ley de rebose	60
Tabla 16: Resultados del diseño factorial fraccionado con la plantilla decodificada Ley de rebose PLS HG (g/l) de cobre y consumo de ácido por batea (g/l)	61
Tabla 17: Coeficientes codificados para PLS HG.....	62
Tabla 18: Coeficientes codificados de Ácido a batea (g/l)	67
Tabla 19: Rango de las variables controlables para la optimización de reducción del consumo de Ácido en Bateas(g/l) de Lixiviación.....	74
Tabla 20: Plantilla Diseño Octogonal reducción del consumo de Ácido en Bateas(g/l) ...	74
Tabla 21: Analisis químico de ácido.....	75
Tabla 22: Plantilla decodificada por el diseño octogonal del consumo de ácido en bateas (g/l).....	76
Tabla 23: Cinética de lixiviación del cobre	82

Tabla 24: Coeficientes codificados consumo de ácido en bateas (g/l) por diseño octogonal.....	90
Tabla 25: Resumen del modelo consumo de Ácido en bateas (g/l) en el proceso hidrometalúrgico de lixiviación por Diseño Octogonal.....	91
Tabla 26: Análisis de Varianza del consumo de Ácido en bateas (g/l) por Diseño Octogonal.....	91
Tabla 27: Resultados optimizados	98

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Vista Panorámica de una mina del Sur del Perú	2
Figura 2: Planta de óxidos una mina del Sur del Perú.....	2
Figura 3: Vista paisaje desierto.....	4
Figura 4: Poza Raff HG y Raff LG para inundación de bateas de Lixiviación.	4
Figura 5: Máquina trituradora de Mandíbula	11
Figura 6: Máquina Trituradora Giratoria	12
Figura 7: Máquina Trituradora Cónica.....	12
Figura 8: Trituradora de Rodillos.....	13
Figura 9: Tambor de Pretratamiento	14
Figura 10: Rebose de lixiviación alto grado.....	15
Figura 11: Tambor de Pretratamiento Planta de Óxidos	18
Figura 12: Carga de bateas planta óxidos.....	20
Figura 13: Descarga de bateas de lixiviación.....	23
Figura 14: Carga de ripios en camiones	28
Figura 15: Esquema de variables de entrada y salida del diseño experimental.....	34
Figura 16: Esquema de tipos de factores en el diseño robusto	43
Figura 17: Esquema del núcleo sin reaccionar.....	49
Figura 18: Modelo de núcleo sin reaccionar para control difusional	49
Figura 19: Modelo del Núcleo sin reaccionar para el Control por reacción Química.....	52
Figura 20: Distribución global de la cabeza de los Óxidos de cobre.....	54
Figura 21: Distribución Crisocola y Atacamita	54
Figura 22: Partículas de Crisocola – Atacamita.....	55
Figura 23: Control granulométrico.....	55
Figura 24: Barra de opciones de Minitab.....	58
Figura 25: Crear diseño factorial en Minitab.....	58
Figura 26: Diseño factorial Fracción de $\frac{1}{2}$, Minitab	58

Figura 27: Ventana Crear diseño factorial: Factores	59
Figura 28: Ventana Crear diseño factorial: Opciones	59
Figura 29: Ventana de Análisis del Diseño Factorial para PLS HG	62
Figura 30: Diagrama de Pareto de los efectos para PLS HG	63
Figura 31: Gráfica de los efectos principales para PLS HG (g/l)	64
Figura 32: Gráfica contorno para la ley de rebose PLS HG de Cu vs H ₂ SO ₄ ; Grado de liberación	65
Figura 33: Gráfica de superficie PLS HG (g/l)vs.H ₂ SO (kg/ton);Grado de liberación (%)..	66
Figura 34: Ventana de análisis de diseño factorial de Ácido a batea de Lixiviación (g/l) .	67
Figura 35: Diagrama de Pareto de los efectos de Ácido a batea (g/l).....	69
Figura 36: Gráfica de efectos principales Ácido a batea (g/l)	70
Figura 37: Gráfica de contorno Ácido a batea (g/l) vs. H ₂ SO ₄ , Grado de liberación	71
Figura 38: Gráfica de superficie Ácido a batea (g/l) vs. H ₂ SO ₄ , Grado de liberación.....	72
Figura 39: DOE de superficie de respuesta el diseño central compuesto (diseño octogonal)	74
Figura 40: Distribución mineralógica de óxidos de cobre	76
Figura 41: Proporción en volumen crisocola, Atacamita.....	77
Figura 42: Proporción mineralógica crisocola, Atacamita.....	77
Figura 43: % grado de liberación y P80	78
Figura 44: Control granulométrico.....	78
Figura 45: Registro fotográfico rebose PLS HG, ley 14.92g Cu/l.....	79
Figura 46: Registro fotográfico rebose PLS HG, 15.32g Cu/l	79
Figura 47: Registro fotográfico PLS HG 13.03g Cu/l	80
Figura 48: Registro fotográfico PLS HG ley 13.56g Cu/l	80
Figura 49: Histograma de los primeros reboses PLS HG de las 15 Bateas de Lixiviación .	81
Figura 50: PH de rebose circuito PLS LG y circuito PLS HG.....	81
Figura 51: Cinética de lixiviación de Cu en función del tiempo (h).....	82
Figura 52: Cinética de lixiviación para diferentes dosificaciones	82

Figura 53: Ratio de consumo en función del tiempo	83
Figura 54: Razón entre el consumo de ácido de mineral y cobre disuelto.....	83
Figura 55: Razón de consumo en función de la concentración de ácido.....	84
Figura 56: Control difusional del NSR	85
Figura 57: Ajuste del control difusional del NSR	85
Figura 58: Ajuste de consumo de ácido	87
Figura 59: Ventana de análisis de diseño de superficie de respuesta consumo de Ácido en Bateas(g/l).....	89
Figura 60: Diagrama de Pareto de efectos del consumo de Ácido en bateas (g/l)	93
Figura 61: Gráfica de los efectos principales del consumo de Ácido en bateas (g/l)	94
Figura 62: Gráfica de contorno consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm); Grado de liberación (%)	95
Figura 63: Gráfica de superficie de consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm); Grado de liberación (%)	96
Figura 64: Ventana de Optimizador de respuesta del consumo de Ácido en bateas (g/l)	97
Figura 65: Ventana de parámetros optimizados del P80 (mm) y grado de liberación (%)	98

Introducción

En la actualidad, no se ha explorado completamente el proceso de optimización en la hidrometalurgia para la extracción de minerales de óxidos de cobre. Esto se debe a la complejidad variada de los minerales tratados, las altas concentraciones de óxidos presentes en una mina relativamente nueva en comparación con depósitos de baja ley en otros países. Es crucial investigar y ajustar los parámetros de funcionamiento para mejorar la eficiencia técnica.

La optimización en la hidrometalurgia para la extracción de minerales de óxidos de cobre se basa en el diseño experimental, que implica la planificación estratégica de experimentos para obtener la mayor cantidad de información con la menor cantidad de pruebas necesarias. Estos enfoques estadísticos no sólo reducen eficientemente los costos de investigación, sino que también son fundamentales para el sector minero-metalúrgico.

Cuando trabajamos en la hidrometalurgia para extraer minerales de óxidos de cobre y estudiamos cómo se comporta el mineral en procesos como la lixiviación, nuestro objetivo es establecer las condiciones operativas que permitan obtener una alta concentración de cobre en la solución PLS HG (g/l), con un contenido bajo de sólidos. Después, esta solución se utiliza en el proceso de extracción por solvente para purificar el cobre, y finalmente en la etapa de electro obtención se obtienen cátodos de cobre de alta pureza.

En estos casos, nos enfrentamos a un desafío de optimización bastante complejo debido a la naturaleza heterogénea del material original y su composición, así como a los diferentes métodos de procesamiento de minerales que incluyen diversos parámetros de operación. Esto implica tener en cuenta un gran número de variables para asegurar la eficiencia de operación. En diversos campos de la ciencia y la ingeniería, se está popularizando un método de optimización conocido como el método de superficie de respuesta del diseño de experimentos. Este enfoque implica la creación de un modelo

matemático que se ajusta al proceso en estudio, con el fin de identificar las condiciones óptimas. Este método proporciona una nueva perspectiva para interpretar y analizar los resultados del experimento.

Capítulo I. Parte inductoria del trabajo

1.1 Generalidades.

La mina del sur se trata de una mina de cobre a cielo abierto que tiene una duración estimada de 16 años. Durante este período, se extraerá mineral que luego será procesado, logrando una producción promedio de 149.000 toneladas de concentrado de cobre por año (promedio durante toda la vida útil de la mina) y 58.000 toneladas de cobre por año.

La planta de óxidos de cobre en una mina del sur es un proyecto minero de clase mundial que inició sus operaciones el 2020.

La planta de óxidos procesa 30 000 toneladas por día de mineral esto alimentado por mineral del tajo abierto ubicado en la misma mina del sur, donde las etapas a procesar son chancado, lixiviación, clarificación, extracción por solvente y electro obtención cuyo producto final son los cátodos de cobre de 99.998% de pureza.

El proceso de nuestros minerales de óxidos es en las bateas más grandes del mundo, donde el proceso de recuperación del cobre se realiza en un período de 144 horas. El producto final se comercializa con socios estratégicos para garantizar su venta y beneficio por parte de la mina del sur.

En la gestión del Proyecto Mina Justa, consideramos de suma importancia la protección del medio ambiente. Nos aseguramos de cumplir estrictamente con todas las leyes y regulaciones ambientales aplicables al sector minero, así como con los compromisos ambientales que hemos asumido. Además, llevamos a cabo nuestras operaciones según los procedimientos internos establecidos en nuestro Manual del Sistema de Gestión Ambiental (SGA). De esta manera, evaluamos continuamente nuestra efectividad en la protección del entorno natural.

1.1.1 Ubicación

La planta de procesamiento de óxidos está situada en el distrito de San Juan de Marcona, provincia de Nasca, departamento de Ica, a una altitud de 800 metros sobre el nivel del mar. La topografía de la zona es principalmente plana y ondulada, con presencia

de material altamente salino y afloramientos rocosos dispersos. Esto minimiza el riesgo de desprendimiento de material por acción del viento, y hasta ahora no se ha identificado ningún riesgo significativo de procesos erosivos en la zona

Figura 1

Vista Panorámica de una mina del Sur del Perú



Fuente: Google Maps

Figura 2

Planta de óxidos una mina del Sur del Perú



Fuente: Elaboración propia

1.1.2 Acceso

Vía terrestre-1era opción:

Lima-Campamento	530 km	8 horas
Campamento-Planta de óxidos	1 km	7 minutos

Vía terrestre-2da opción:

Lima-Nazca	481 km	7 horas
Nazca-Campamento	50 km	1 hora

1.1.3 Geología regional y clima

La geología regional se caracteriza por los depósitos de cobre denominados Mina Justa y Manto Magnetita. La geología del área de estudio se caracteriza por la presencia de abundante diseminación de magnetita, andesitas, y areniscas de la formación Cerritos; así como sedimentos marinos no consolidado de arena de la formación Cuaternario Aluvial. Además, se observan rocas sedimentarias del Terciario procedentes de la formación Pisco, rocas intrusivas de la formación Andesita tunga, y finalmente areniscas y areniscas bioclásticas de las Terrazas marinas.

Cuenta con una población de 15 933 habitantes de acuerdo con el último censo realizado en octubre del 2017. San Juan de Marcona es conocida como Capital del hierro y Cuna del Pingüino de Humboldt y debe su reputación por ser una localidad minera y portuaria, además de ser la única productora de mineral de hierro en el Perú.

El clima del área por estar ubicada al sur de la capital del Perú, durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 10 °C a 24 °C y rara vez baja a menos de 9 °C o sube a más de 25 °C y con vientos llegando su velocidad media anual es 4.6 m/s. Cuenta con una humedad media anual del 74.8%.

Figura 3

Vista paisaje desierto.



Fuente: Elaboración propia

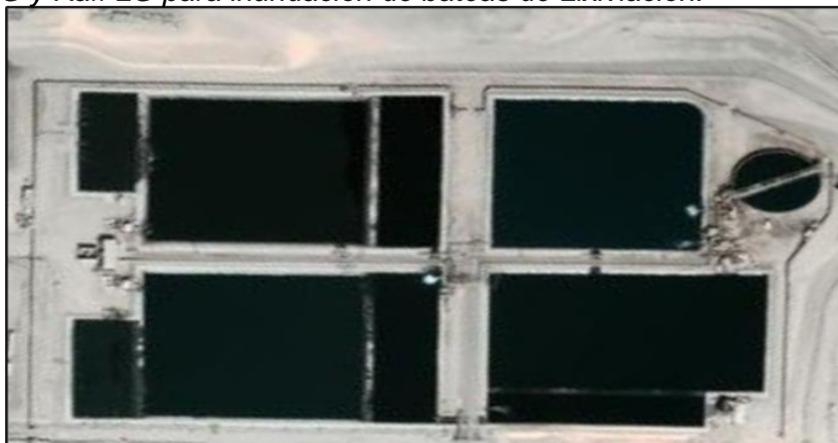
1.1.4 Recurso hídrico

En la Planta de óxidos contamos con dos pozas de Refino, una Refino HG (alto grado) y otra Refino LG (bajo grado), los cuales se llenan parcialmente de los refinados que recirculan del proceso de extracción por solventes, la capacidad total del 100% es llenada con agua de mar para ambas pozas bombeadas desde el mar de Marcona, el cual también abastece al tambor de pretratamiento.

La primera poza posee un volumen de 20 000 m³ y la segunda poza posee un volumen de 20 000 m³, las cuales entran al proceso de lixiviación HG y LG dinámicamente.

Figura 4

Poza Raff HG y Raff LG para inundación de bateas de Lixiviación.



Fuente: Elaboración propia

1.2 Descripción de la problemática

El mineral que procesa y requiere la Planta de óxidos, son obtenidos de un blending de los polígonos Oxi de la mina a tajo abierto; éstos deben presentar las siguientes características:

- Cobre total (CuT=0.65%)
- Cobre soluble en ácido (CuSAc=0.57%)
- Cobre soluble en cianuro (CuSCN=0.02%)
- Cobre residual (CuRes=0.06%)
- SG=1.91
- Carbono (C=0.51%)
- Hierro (Fe=6.23%)

La obtención de solución rica en cobre PLS HG (alto grado) y PLS LG (bajo grado) se desarrolla mediante la trituración, pretratamiento, inundación, dosificación de ácido sulfúrico del mineral oxidado de cobre.

Las dificultades del proceso de lixiviación en bateas se presentan principalmente en el mineral que viene de mina como también parámetros operaciones.

Los problemas que presenta la Planta de Óxidos son:

- Tamaño del producto Split P(80) producto del HPGR.
- Baja ley de cobre soluble.
- Alto contenido de carbonatos.
- Bajas recuperaciones de lixiviación (75%-77%).

Las posibles causas podrían ser:

- El tipo de mineral blending Oxi.
- Problemas operacionales.
- Dosificación de ácido.

Por lo cual evaluaremos los parámetros más importantes que intervienen en la lixiviación de Cu en bateas que son el producto granulométrico HPGR, dosificación de ácido sulfúrico a bateas de lixiviación (g/l), flujos de inundación de flujos Raff HG y Raff LG

al circuito de lixiviación, para optimizar dichas variables con la finalidad de aumentar la ley de rebose PLS HG de cobre, mayor calidad en los cátodos de cobre, reducción de consumo ácido sulfúrico.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluar los factores que afectan al proceso de lixiviación de cobre en bateas y determinar las variables más significativas para optimizar los parámetros de operación con la finalidad de reducir el consumo de ácido sulfúrico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer la influencia de las variables e interacciones (Flujo de inundación Raff HG, PH ácido, P80 HPGR, Ley de cabeza de mineral), en el proceso de lixiviación de cobre en bateas.
- Determinar los rangos óptimos de las variables más influyentes en el proceso de lixiviación de cobre en bateas.
- Obtener un mayor porcentaje de recuperación en la lixiviación de Cu en función de los resultados obtenidos en el diseño factorial fraccionado.
- Obtener un menor porcentaje de consumo de H₂SO₄ en función de los rangos óptimos obtenidos en la etapa de optimización por diseño octogonal.
- Relacionar las características mineralógicas del mineral con los problemas que se presentan en el proceso de lixiviación de cobre en bateas

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes referenciales

La tecnología de L-SX-EW se aplicó en el Perú en los años 1970's en Cerro Verde por la Empresa Minera del Perú, primero con una planta piloto de lixiviación en bateas (vats), SX y EW, luego se construyó lo que sería la primera planta industrial de esta naturaleza en Hispano América y la cuarta a nivel mundial.

La recuperación de cobre a partir de óxidos y sulfuros de baja ley (< 0.3%) ha recibido una gran cantidad de atención. El costo del tratamiento de este mineral usando

tecnología pirometalúrgica incluye trituración, molienda, flotación, fundición y refinación, es económicamente prohibitivo y la recuperación de cobre es generalmente baja.

La lixiviación de los minerales oxidados de cobre utilizando el ácido sulfúrico, se ha incrementado aceleradamente en los últimos años, debido principalmente al atractivo económico utilizando el método de lixiviación. Por lo expuesto el estudio de pruebas de lixiviación que se realizan es de gran importancia, así como la experiencia operacional es un factor importante para minimizar el número de variables y la extensión sobre cuáles de estas variables requieren ser analizadas con criterio técnico.

La cantidad de variables que afectan los resultados metalúrgicos en el proceso de lixiviación de Cu en bateas son diversos y se puede resumir clasificándolas en tres grupos:

- Material de alimentación a la HPGR (granulometría del mineral, Cobre natural soluble en ácido, características químicas y mineralógicas de la mena a tratar).
- Etapa de tambor de aglomeración. (dosificación de ácido sulfúrico, pH de acondicionamiento para la lixiviación de Cu en bateas).
- Proceso de lixiviación de cobre en bateas (bateas con inundación refino de alto grado, retro lavado de bateas, batea drenada, tiempo de lixiviación en cada etapa (lixiviación HG, lixiviación LG))

A partir de entonces, dadas las variables de investigación y evaluando su impacto en el proceso de lixiviación de cobre en bateas, realizaremos pruebas de investigación utilizando la técnica de los diseños experimentales con el propósito de obtener la máxima información, además de analizar el efecto de cada una de las variables en forma simultánea mediante técnicas estadísticas para interpretar y resolver algunos problemas metalúrgicos que se manifiestan tales como el consumo y dosificación de ácido sulfúrico en estudio así como el incremento de la ley de rebose y la recuperación del metal rojo.

1.4.2 Hipótesis

“Si optimizamos las variables influyentes en el proceso de lixiviación de cobre en bateas, mejoraremos la ley de rebose PLS HG, disminución de sólidos y como

consecuencia aumentaremos la recuperación de cobre, la calidad de la ley de cobre, la reducción de consumo de ácido sulfúrico”.

1.4.3 Hipótesis específicas

- Verificar que variables controlables son más significantes en la reducción del porcentaje de consumo de ácido sulfúrico.
- Verificar el mayor porcentaje de recuperación de Cu con una buena ley PLS HG de rebose en la batea de lixiviación con bajo contenido de sólidos.

1.4.4 Justificación de la investigación

El desarrollo del presente trabajo de investigación está orientado a solucionar un problema operacional, ya que existiendo una única Planta en el mundo en lixiviar óxidos de cobre con bateas de las más grandes dimensiones, requiere para su mejor operación ajustar sus parámetros de operación como su Split P(80), ratios de dosificación de ácidos, flujos de inundación de refinó y drenajes para una posterior descarga de ripios el cual brindará un mejor tiempo en la disponibilidad de una batea nueva para que entre al proceso y aprovecharla para la producción de cátodos de cobre.

1.4.5 Tipo de investigación

Es una investigación innovadora que correlacionará datos extraídos experimentalmente a fin de aplicarlo a nivel industrial.

1.4.6 Marco metodológico del diseño experimental

1.4.6.1 Operacionalización de Variables. Para el tratamiento de los datos se aplicará la técnica del diseño factorial fraccionado y el diseño octogonal a fin de procesar e identificar la influencia de las variables en estudio.

En el análisis de los datos se aplicará el software Minitab 22, a fin de evaluar, interpretar y optimizar las variables en estudio.

A fin de desarrollar el presente trabajo de investigación se han estudiado las siguientes variables:

Variables controlables (Xi)

- Split P(80) HPGR (mm).

- Adición de ácido sulfúrico a batea de lixiviación (g/l).

Variable dependiente (Yi)

- Porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación de Cu en bateas.
- Flujo de inundaciones Raff HG y Raff LG.

Variables intervinientes no controlables (Ui)

- pH
- Ácido a cada batea (g/l)

1.4.6.2 Población y muestra. El mineral de la minería del sur, presenta la siguiente característica mineralógica:

- Mena: Atacamita y Crisocola con contenido de oro despreciable.
- Ganga: Carbonatos.

De dicho mineral por el proceso de lixiviación de cobre en bateas se obtiene dos soluciones cargadas de cobre, PLS HG (alto grado) y PLS LG (bajo grado).

1.4.6.3 Técnicas de Recolección de Datos. Se utilizarán técnicas de muestreo para obtener una muestra que sea representativa y permita evaluar las variables que afectan el proceso de lixiviación de cobre en las bateas. El objetivo es optimizar el proceso y desarrollar un modelo matemático preciso.

1.4.6.4 Técnicas de Análisis de Datos. Vamos a emplear un enfoque estadístico para analizar los datos y desarrollar un modelo que identifique las variables clave que afectan el proceso. Inicialmente, utilizamos un diseño factorial fraccionado para determinar la importancia de las variables controlables, y luego aplicamos un diseño octogonal en la etapa de optimización.

Para el análisis y la interpretación de datos, se empleará la versión más reciente del software Minitab 2022. Este software permitirá analizar

- Los efectos e interacciones de las variables controlables mediante el diagrama de Pareto y gráficos de efectos principales.
- Análisis de varianza.
- Desarrollo de un modelo matemático

- Creación de gráficos de contorno
- Creación de gráfica de superficie.
- Determinación de los parámetros óptimos
- Análisis gráfico de los efectos principales y las isolíneas que se correlacionan en el plano y espacio de los factores, en relación con el %Grado de liberación, P80 (mm), ácido sulfúrico a bateas, flujo de inundación, Ley de rebose PLS HG y sólidos de rebose.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Chancado

El chancado de minerales es la fase inicial y mecánica del proceso de conminución. Su objetivo principal es liberar los minerales valiosos de la ganga antes de la lixiviación. Esto se logra mediante el área superficial específica de las partículas y produciendo partículas minerales u otros materiales con tamaños y formas específicas definidas.

El chancado es una operación física que generalmente se realiza en condiciones secas, aunque en algunos casos puede haber un ligero porcentaje de humedad, alrededor del 3%. Este proceso se lleva a cabo en dos o tres etapas. Los fragmentos de mineral directamente extraídos de la mina pueden ser muy grandes, alcanzando hasta 160 cm de diámetro, y se reducen a aproximadamente 20 cm en máquinas de trituración primaria altamente robustas.

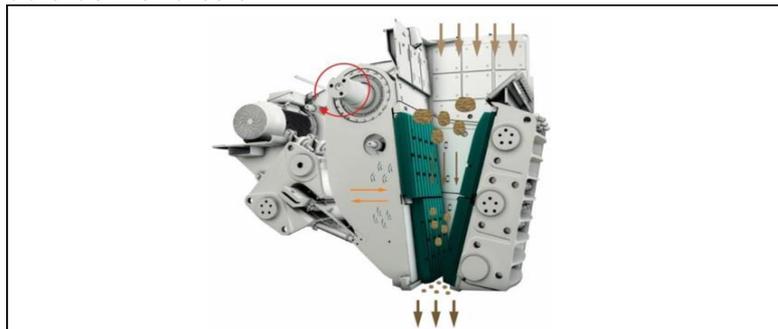
A escala industrial se suele utilizar diferentes tipos de equipos de trituración y se clasifican de acuerdo con la etapa en que se utilizan y el tamaño del material tratado.

2.1.1.1 Trituradoras primarias. Trituran y fragmentan rocas grandes hasta obtener un producto que varía entre 8 y 6 pulgadas. Utilizamos dos tipos de equipos de trituración para este proceso

- Trituradora de mandíbula
- Trituradoras giratorias.

Figura 5

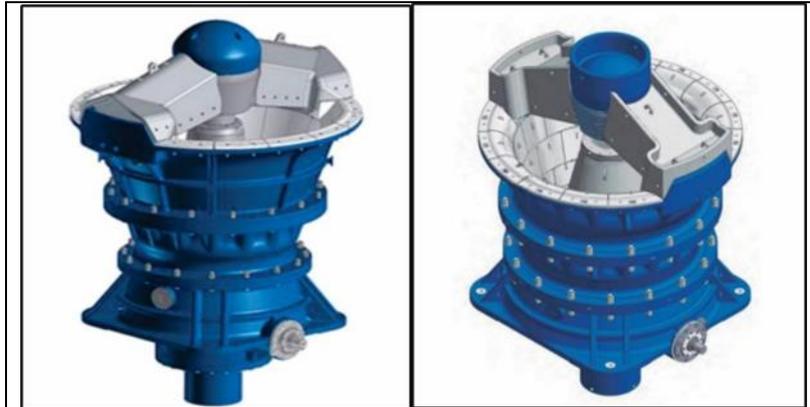
Máquina trituradora de Mandíbula



Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Máquina Trituradora Giratoria



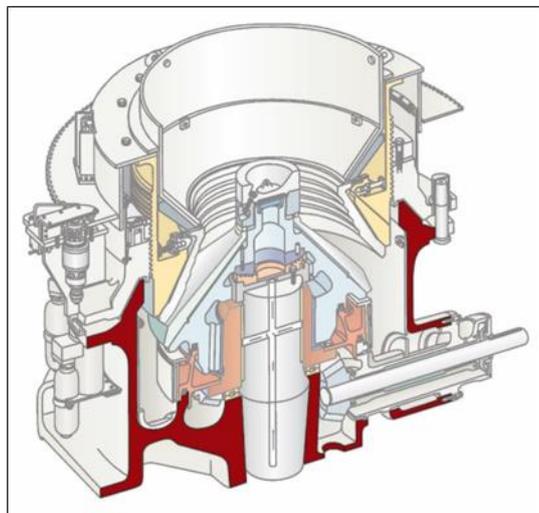
Fuente: Elaboración propia

2.1.1.2 Trituradoras Secundarias. Trituran y fragmentan el mineral recibido del producto de la trituración primaria hasta reducirlos a tamaños de 3 a 2 pulgadas; entre estas máquinas tenemos:

Trituradoras cónicas.

Figura 7

Máquina Trituradora Cónica



Fuente: Elaboración propia

2.1.1.3 Trituradoras Terciarias. Trituran y fragmentan el producto de la trituración o chancado secundario de 35 a 7 mm aproximadamente, esto de acuerdo a operación, entre éstas tenemos:

Trituradoras de rodillos.

Figura 8

Trituradora de Rodillos



Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, el proceso de conminución en toda operación minero metalúrgico resulta ser una etapa vital en las operaciones para preparar y liberar el mineral de interés económico. Y es de conocimiento que, tanto en los procesos de chancado y molienda, se consume la mayor cantidad de energía en la operación para lograr el tamaño deseado de mineral.

2.1.2 Tambor de Pretratamiento

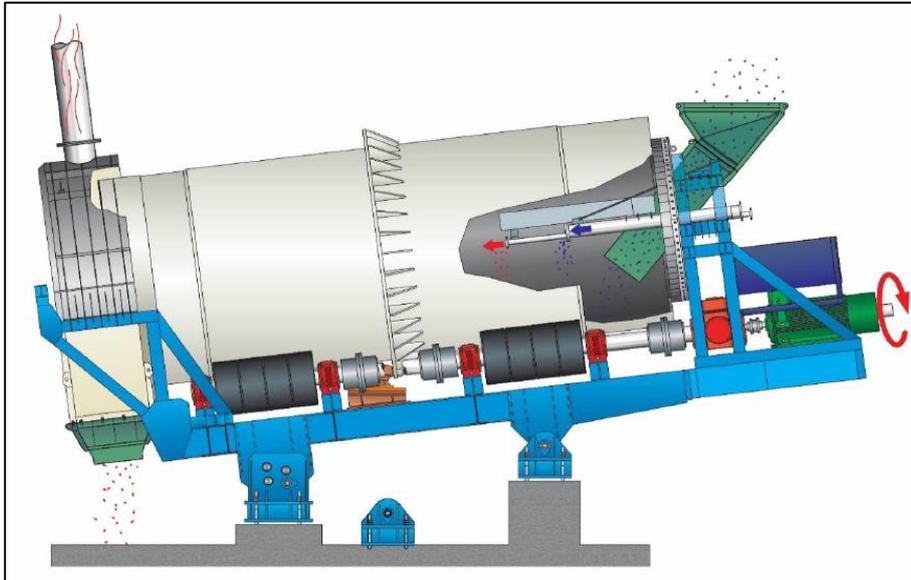
Es un cilindro metálico de dimensiones 3.5mØ x 9L y capacidad de 2,045 t/h, revestido interiormente con neopreno o goma antiácida provisto de levantadores para lograr una más efectiva acción de rodado de la carga. Al tambor de pre-tratamiento ingresa el mineral producto de las etapas de conminución acompañado de PLS y refino con contenido de sólidos; y algo más al interior del tambor, se adiciona ácido sulfúrico concentrado.

Este mineral fino de bajo tamaño (U/S) de las zarandas terciarias con una ley de cobre total de 0.67%(diseño), proveniente del área de Chancado Terciario, es transportado al sistema de aglomeración.

Adicionalmente, también ingresa al tambor aglomerador el flujo de descarga (underflow) del clarificador en forma intermitente y controlada. Una vez que el mineral es pretratado en el tambor, es descargado por un sistema de fajas transportadoras para cargar las bateas

Figura 9

Tambor de Pretratamiento



Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Lixiviación en bateas.

La Lixiviación en bateas conocido también como sistema de lixiviación por percolación, consiste en la utilización de contenedores de concreto con forma de paralelepípedo, que han sido forrados con material resistente al ácido, en donde se deposita el mineral previamente chancado y pre-tratado para posteriormente realizar una primera inundación con refino de alto grado (HG) durante 5 horas. Cada batea posee un fondo falso de madera, cubierto con una tela filtrante que permite la recirculación en sentido ascendente o descendente de la solución, de modo que favorecer la dilución del mineral, para así recuperar el cobre en una solución enriquecida denominada PLS para una posterior purificación en la Planta de Extracción por Solventes.

El proceso de lixiviación en bateas se lleva a cabo en lixiviación de alto grado (HG) y lixiviación de bajo grado (LG).

2.1.3.1 Lixiviación de alto grado (HG). Es desarrollada para el mineral fresco y con mayores concentraciones de cobre en solución para 4 bateas en operación nominal, esta condición es variable de 3 o 5 bateas y dependerá de las condiciones de operación del momento.

Figura 10

Rebose de lixiviación alto grado



Fuente: Elaboración propia

2.1.3.2 Lixiviación de bajo grado (LG). Es aplicada para el mineral más antiguo (con mayor tiempo permanencia) y con menor concentración de cobre en solución para 8 bateas en operación nominal, esta condición es variable de 9 o 7 bateas y dependerá de las condiciones de operación del momento.

2.1.4 Subáreas de la Lixiviación.

2.1.4.1 Poza PLS HG. Colecta la solución PLS de la etapa de lixiviación de alto grado.

2.1.4.2 Poza PLS LG. Colecta la solución PLS de la etapa de lixiviación de bajo grado.

2.1.4.3 Poza de refino HG. Colecta la solución acuosa de la etapa de Extracción en serie (E2) de SX

2.1.4.4 Posa de refino LG. Colecta la solución acuosa de la etapa de Extracción paralela (EP) de SX.

2.1.5 Descarga de Bateas.

Al completar el ciclo de lixiviación, la batea que contiene el mineral lixiviado con mayor tiempo de permanencia procede a drenar la solución restante, para luego iniciar la remoción de los desechos de mineral lixiviado conocido como ripios con un 11% de humedad.

El drenado de cada batea es de 5 horas luego del ciclo de lixiviación para lograr recuperar la solución sobrante del mineral lixiviado, además la batea actúa como un filtro para el material fino producto de la lixiviación, captándolos al realizar la limpieza completa de las plataformas de madera, lugar donde se acumulan la mayor cantidad de finos debido a una baja velocidad del fluido por esta zona, para ser derivados a través de una canaletas dispuesta cada tres bateas (Total: 5 canaletas instaladas) fluyendo hacia su respectiva bomba sumidero y enviar los finos colectados hacia un tanque agitador de 100m³, que eventualmente recibe los derrame del tambor de pre-tratamiento; el tanque está ubicado cerca al clarificador y las pozas de refino, el sistema provee para los lodos generados de la limpieza, retornar a las bateas que se encuentran drenando o enviarlo al clarificador PLS

Los ripios son descargados de las bateas mediante el agarre automático de las almejas que descienden y se elevan por acción de la grúa de descarga de batea, extrayendo los ripios a razón de 839 t/h hacia las tolvas de cada grúa de descarga de batea.

2.1.6 Clarificación.

La clarificación tiene como objetivo disminuir el contenido de sólidos en suspensión del PLS de alto grado antes de enviar la solución al sistema de extracción por solvente. El contenido promedio de sólidos en suspensión de la solución antes de ingresar al clarificador es de 500 a 1,000ppm, posterior a la clarificación esta se disminuye a 25 ppm con la adición de floculante.

La solución cargada de alto grado (PLS-HG) colectada en la poza PLS-HG es enviada hacia el clarificador de PLS a razón de 904m³/h a través del tanque de cebado mediante dos bombas, la solución antes de ingresar al clarificador es colectado en un cajón

alimentador, favoreciendo el contacto y mezcla con el floculante diluido, fluye hacia el feedwell e ingresar al clarificador, incrementándose la velocidad de sedimentación de los sólidos suspendidos por efecto de la formación de flóculo.

En el clarificador se efectúa la separación de los sólidos suspendidos contenidos en la solución PLS, producida por decantación de los flóculos y efecto de la gravedad, originando dos productos; la parte líquida clarificada que rebosa (overflow) y fluye hacia el tanque (TK-303) para luego enviarla mediante la bomba de PLS del clarificador (PU-333) a la planta de SX, en caso el tanque rebose, el flujo retorna a la poza de PLS de alto grado (PD-301), mientras que el segundo producto son los sólidos sedimentados en la parte inferior del clarificador (underflow) que son descargados mediante la bomba (PU-332) hacia el tambor aglomerador a razón de 4.2m³/h, si la densidad es mayor a 15% de sólidos o en caso de emergencia es derivado hacia la poza de refino de alto grado (PD-303) y si el porcentaje de sólidos es menor a 15%, el underflow es recirculado hacia la caja de alimentación del clarificador

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Descripción del proceso

La Mina del Sur, está conformada por la planta de óxidos la cual procesa minerales de óxidos de cobre por medio de la lixiviación en bateas con ácido sulfúrico y agua de mar. Cuenta con una capacidad de tratamiento de 30 000 T/d. Los minerales de óxidos de cobre procesados son atacamita y crisocola principalmente, se obtiene solución rica en cobre PLS HG (alto grado) y PLS LG (bajo grado)

El proceso de lixiviación utiliza mineral triturado al 100% pasando 8mm para optimizar la recuperación de cobre. El consumo de ácido generalmente aumenta con una mayor proporción de finos. La planta de óxidos tiene un circuito de trituración de tres etapas con rodillos trituradores de alta presión (HPGR) en la tercera etapa, en lugar del circuito de trituración de cono más convencional de cuatro etapas.

El diagrama de flujo de óxido requiere que el mineral se triture a < 8 mm para lograr una recuperación de cobre y un consumo de ácido óptimos. Existía la preocupación de que

la producción de finos (material de menos de 150 μm) afectaría negativamente el consumo de ácido.

2.2.1.1 Sección de chancado. El chancado de óxidos está constituido por dos etapas: chancado secundario y una etapa terciaria de molienda con un equipo HPGR. El mineral del Stockpile es extraído por dos Apronfeeders y transportado por una faja transportadora hasta su descarga en las zarandas secundarias vibratorias abertura de 6.75" la cual la clasifica y obtiene como productos un oversize que recircula hacia la chancadora secundaria y un Undersize que alimenta a la etapa terciaria.

El mineral de la etapa terciaria es molido por un HPGR y el producto es entregado hacia una faja que la transporta que alimenta el edificio de zarandas terciarias cuyo oversize es recirculado y el oversize es extraído por los Feeders terciarios hacia la etapa de aglomeración o de Tambor de pretratamiento.

2.2.1.2 Sección de pretratamiento. El proceso de aglomeración tiene por objetivo preparar el mineral fino proveniente del chancado terciario, en un tambor aglomerador, para asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución, permitiendo la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

Figura 11

Tambor de Pretratamiento Planta de Óxidos



Fuente: Elaboración propia

El mineral triturado con una granulometría menor a 8mm procedente del circuito de chancado terciario es transferido de la faja transportadora (CV-311) al tambor de pretratamiento (SB-301) a razón de 1,612t/h con una humedad de 3%, este flujo es controlado desde el área de chancado a través de los alimentadores que recuperan el mineral del stockpile El tonelaje es medido con una balanza (WT-303) que está instalada en línea sobre la faja y con panel visible localmente para el control del operador.

El tambor está equipado con un variador de velocidad, para permitir al operador cambiar la velocidad de rotación y optimizar el proceso de pretratamiento, tiene instalado una termocupla ubicado en el chute de descarga (CH-372) para indicar la temperatura del mineral tratado, proporcionando un respaldo para el control de ratio de consumo de ácido, definiéndose que una temperatura alta indica que la adición de ácido es demasiado alta y viceversa.

El tambor de pretratamiento de Ø3.5m y de largo 9m, tiene una capacidad de tratamiento de 2,045t/h según diseño y es accionado por un motor de 355kW, además presenta un forro de cerámico hexagonal sobre una base con forro de neopreno de 20mm de espesor, posee un botón de parada de emergencia, para detener el equipo ante cualquier mal funcionamiento, además de detener el tambor también logra la detención de los flujos que ingresan al tambor, cuando reinician la operación, el tambor cuenta con una luz intermitente y señales de advertencia de arranque

La adición de ácido sulfúrico al tambor aglomerador tiene directa relación con el contenido de carbonato del mineral, la dosis promedio de ácido sulfúrico es de 15Kg/t de mineral. El proceso de aglomeración implica la adición de ácido sulfúrico concentrado a razón de 13m³/h en el tambor de pretratamiento a presión constante desde la bomba (PU-374) que pertenece al área de preparación de reactivos. El tambor provisto de levantadores, incluye tuberías perforadas para el suministro de agua de mar, la cual es agregada al inicio para el humedecimiento del mineral, mediante la rotación del tambor la mezcla de las partículas húmedas es homogénea en torno a sí mismas. Durante la

operación, la adición de agua de mar es reemplazada por el refino procedente de la planta de extracción por solventes a un flujo controlado, según las condiciones del proceso.

2.2.1.3 Sección de carga de bateas de lixiviación. La etapa de carga de bateas consiste en recibir el mineral pretratado del tambor aglomerador y transportarlo por un sistema de fajas de transportadoras hacia las bateas de lixiviación, transfiriendo la carga de mineral pre-tratado en la batea programada para dar inicio al ciclo de lixiviación

Figura 12

Carga de bateas planta óxidos



Fuente: Elaboración propia

El mineral pre-tratado en la etapa de aglomeración es enviado hacia las bateas de lixiviación (VT-301 a 315) por un sistema de transporte de mineral pre-tratado, compuesto de 3 fajas transportadoras (CV-312/313/314) instaladas en serie, dos distribuidores y un pórtico móviles que facilita la descarga en diferentes puntos a lo largo de la posición de cada batea.

Las fajas transportadoras (CV-312/313/314) son accionados por unidades de velocidad variable, las velocidades son configuradas manualmente en el MCC, durante su accionamiento son activadas automáticamente las sirenas que están instaladas en la cabeza, en el pórtico móvil y en la cola de la faja transportadora (CV-313), para advertir al personal del arranque y movimiento de la faja. faja transportadora N° 1 (CV-312).

El mineral pretratado, es descargado del tambor de aglomeración (SB-301) por medio del chute de descarga (CH-372) a razón de 1,612t/h (nominal), en la faja

transportadora N°1 (CV-312) de alimentación a bateas, la cual descarga en la faja N°2 (CV-313) de alimentación a bateas.

La faja (CV-312) transporta el mineral pre-tratado a una velocidad de 2.8m/s, es accionada por un motor de 75kW de velocidad variable, tiene una capacidad de diseño de 2,045t/h y un ancho de 1,200mm, transfiere el mineral a través del chute (CH-373) a la faja transportadora N°2 (CV-313).

La faja transportadora N°2 transfiere el mineral pre-tratado mediante distribuidor (TR-001) en la faja transportadora de distribución a batea (CV-314) a razón de 1,612t/h a través del chute de descarga (CH-374).

La faja (CV-313) transporta el mineral pre-tratado a una velocidad de 2.8m/s, es accionada por un motor de 350kW de velocidad variable, tiene una capacidad de diseño de 2,045t/h y un ancho de 1,200mm, durante la operación el producto de la limpieza y raspado de la faja transportadora es depositado en una pila de almacenamiento de raspado. El distribuidor está diseñado para que la faja logre elevarse e integrarse a una estructura distribuidora, logrando poder desplazarse a cualquier posición a lo largo de la faja.

El distribuidor está unido mecánicamente un pórtico movable que se desliza por rieles con un movimiento transversal a la batea, facilitando cualquier posición longitudinal y reubicación en cualquier batea disponible, esto es logrado por un controlador ligado a un indicador de posición, el cual posiciona el pórtico una vez identificada la batea disponible para cargar con mineral pre tratado y determinar la cantidad necesaria de mineral para agregar a cada batea.

El circuito permite también que el operador tenga el control manual de la posición del distribuidor desde el pórtico de la faja; si la faja (CV-313) se detiene intempestivamente, también se detendrán la faja transportadora (CV-312) aguas arriba incluido el tambor de aglomeración (SB-301).

La faja de distribución (CV-314) descarga el mineral pretratado mediante el distribuidor alimentador (TR-002) en la batea preparada de acuerdo al ciclo de lixiviación.

La velocidad de desplazamiento del distribuidor permite formar capas de 70 centímetros de altura.

La faja de distribución es accionada por un motor de 75kW, posee una unidad de velocidad variable y cuenta con una capacidad de transporte de 2,045t/h según diseño a una velocidad de 2.8m/s, el chute de descarga del distribuidor (CH-375) tiene instalado un sensor de posición que indica su última ubicación, durante su arranque la sirena instalada en la faja es encendida automáticamente para advertir al personal de un arranque inminente. El posicionamiento del distribuidor (TR-002) sobre las bateas es controlado automáticamente para optimizar la carga de las bateas. El operador puede controlar esta operación si fuese necesario, principalmente para garantizar la cantidad y una distribución uniforme del mineral sobre cada batea.

Un indicador de nivel se desliza junto con el distribuidor para monitorear el nivel de llenado del mineral desde la superficie de las bateas, emite una alarma de nivel alto para que el operador del área controle manualmente el carguío de la operación y en caso el nivel de llenado es demasiado alto, el distribuidor se detiene inmediatamente.

El pórtico con el distribuidor generalmente se mueve cada 5m a lo largo de las bateas instaladas. El primer desplazamiento desde el borde de una batea es de 2.5m, una vez ubicado el distribuidor (TR-002), la faja (CV-314) es puesta en movimiento y el mineral es depositado en la batea seleccionada de un lado a otro, luego de un determinado tiempo el puente se mueve 5m, este ciclo de llenado se repite a lo largo de los 42m longitudinales para cada batea instalada, a continuación, el pórtico invierte la dirección y retorna al inicio, considerando que la primera travesía es de 2.5m desde el final de la batea. Este proceso se repite automáticamente hasta que la batea quede casi llena, al final el llenado de cada batea es controlado por el operador.

Una vez culminado la carga de la batea, se procede a inundarla con PLS (Pregnant Leach Solution) recirculado y ácido sulfúrico y dejarlo por un tiempo de 10 horas aproximadamente, mientras tanto se mueve el distribuidor a la siguiente batea para evitar derrames.

Por condiciones de operación el operador puede detener la faja (CV-313) y reiniciar la descarga del mineral de la faja (CV-314) y cargar una de las bateas, una vez reubicada el distribuidor (TR-002).

El operador puede programar la detención de la faja y la carga de la batea, facilitando el tiempo para la aglomeración del mineral y la transferencia de mineral a las bateas, evitando paradas intempestivas del área de chancado.

2.2.1.4 Sección descarga de bateas de lixiviación. La etapa de descarga de bateas consiste en la remoción de los rípios de cada batea de lixiviación, desde su drenaje y recuperación con las almejas 1 y 2, trasladando el rípio con un porcentaje de humedad óptimo para su transporte a través de un sistema de fajas que se encuentra instalado en el área y descargar de forma continua en los camiones de rípio para su descargarlo en el área de almacenamiento de rípios.

Figura 13

Descarga de bateas de lixiviación.



Fuente: Elaboración propia

La descarga de las bateas inicia al completar el ciclo de lixiviación, acondicionando los desechos de mineral lixiviado (rípio) y así facilitar su manipulación, para ello se apertura la válvula de drenado de la batea que contiene al mineral con mayor tiempo de permanencia en el ciclo de lixiviación, permitiendo el drenado de una solución con bajo

contenido de cobre (0.13g/L) a razón de 277m³/h, el drenado puede tomar 5 horas sin embargo durante la descarga de ripios las válvulas de drenado se mantienen abiertas durante 12 horas completas, permitiendo el drenado de la solución restante de la batea, el tiempo de apertura de la válvula de drenado dependerá de la humedad reportada de los ripios descargados en la faja (CV-315) por el indicador de humedad que se encuentra instalado en la faja. El tiempo requerido de drenado garantiza el manejo de los ripios en el sistema de fajas transportadoras del área de descarga de bateas (CV-315/317/318/320/321).

En el área se tiene instalada una canaleta por cada 3 bateas de lixiviación, que captan el drenado de las bateas, así como el producto de la limpieza de los finos acumulados en la plataforma de madera de la batea, fluyen hacia el sumidero del área.

La baja velocidad del flujo de PLS (Pregnant Leach Solution) en la plataforma de la batea, provoca que con el tiempo vayan acumulándose gran porcentaje de finos, durante el ciclo de lixiviación.

El sumidero, una vez que haya colectado el drenado de las bateas envía el flujo hacia el tanque agitador de 100m³ de capacidad, que también colecta de forma discontinua los derrames o fugas del tambor de aglomeración (SB-301).

El tanque agitador, ubicado a un costado de la poza de PLS de bajo grado, envía la solución colectada hacia las bateas de lixiviación LG (VT-301 a 315) o según sea la condición de operación, deriva el flujo al Clarificador PLS (CL-301)

La descarga de batea es controlada de forma automatizada, para ello se cuenta con dos grúas pórtico (CN-301/302) móviles, cada una equipada con una almeja (XM-311/312) que recuperan y descargan los ripios en las tolvas de ripios N°1 y N°2 (BN-311/312), que transfieren el ripio por medio de los alimentadores de faja (FE-315/316) hacia la faja transportadora de ripios (CV-315).

Los ripios son descargados en la faja de transferencia (CV-320), que descarga en la faja de transmisión (3232-CV-321), y por intermedio de esta los ripios son derivados a

cualquiera de las fajas transportadora de carga de rípios (CV-317/318) que descargan en los camiones de rípio.

La secuencia de descarga de los rípios permite operar a las dos grúas pórtico juntas, controlando su posicionamiento y sincronización, así como la velocidad horizontal y vertical de la almeja, y la velocidad de transporte de rípios de cada alimentador.

La operación de descarga considera 8 capas de rípios por cada batea drenada para facilitar la remoción con la almeja de cada grúa pórtico, de acuerdo al siguiente ciclo de descarga, que se repetirá a lo largo de cada batea designada para descarga.

La grúa pórtico (CN-301) inicia la descarga de la capa 01 (623m³) y la capa 02 (587m³) de la batea programada, mientras la grúa pórtico (CN-302) está removiendo las dos últimas capas de la batea anterior programada.

La grúa pórtico (CN-302) al culminar la descarga de la batea anterior programada, se ubica junto a la grúa pórtico (CN-301) para trabajar juntos en la descarga de la capa 3 (558m³ c/grúa), de la capa 4 (535m³ c/grúa), de la capa 5 (513m³ c/grúa) y de la capa 6 (493m³ c/grúa).

La grúa pórtico (CN-301), una vez completada la descarga de la capa 06 de la batea programada, se dirige a la siguiente batea programada e iniciar la descarga, mientras la grúa pórtico (CN-302) culmina la descarga de las dos últimas capas de la batea programada (Capas 7 y 8 suman 1,210m³).

Las almejas de las grúas pórtico descargan los rípios con un contenido de 11% de humedad hacia el alimentador tipo faja (FE-315/316) a razón de 839t/h cada uno, ambos alimentadores descargan los rípios en la cama de impacto de la faja transportadora (CV-315) obteniendo un flujo constante para garantizar un carguío continuo a los camiones de rípio.

2.2.1.5 Sistema de transporte de rípios. La faja transportadora (CV-315) es accionada por un motor de 370kW de velocidad variable, transporta los rípios a razón de 1,678t/h a una velocidad de 3.5m/s nominal, esta faja al tener un variador de velocidad

puede transportar tonelajes variados de ripio y evitar derrames a lo largo del desplazamiento.

Para el control y balance metalúrgico, la faja tiene instalado un muestreador (SA-302) y un medidor de humedad en tiempo real para controlar el drenado de las bateas y calcular el tonelaje seco de ripios descargados.

Los ripios son descargados en la faja transportadora (CV-320), accionada por un motor de 220kW, transporta los ripios a una velocidad establecida de 2.4m/s hacia la faja transportadora de transmisión de ripios (CV-321).

La faja de transmisión (CV-321) accionada por un motor eléctrico de 75kW, para este tipo de motor el sistema de control incluye:

- Control de arrancador directo con monitoreo de modo de operación, estado del motor, alarma de falla del arrancador.
- Botoneras de mando local (START/STOP) e indicación visual de estado en panel.
- Control Local/Remoto en MCC e indicación visual de estado.
- Comunicación con PCS y pantallas de operación en sala de control.
- Indicación sonora y/o visual de eventos y alarmas

La faja de transmisión de ripios posee un distribuidor, que facilita la descarga de los ripios transportados a través del chute de desvío de ripios (CH-352) sobre cualquiera de las fajas transportadoras de carga a camión de ripios (CV-317/318) dependiendo de las condiciones de operación.

Las fajas (CV-317/318) operan en modo alterno y sincronizado, porque en cualquier momento una de las fajas transportadora puede estar en modo carga (recibiendo ripios) mientras que la otra está en modo de descarga (carga de camión).

Cada faja transportadora de carga al camión de ripios es accionada por un motor eléctrico de 500kW con variador de velocidad, para este tipo de motor el sistema de control incluye:

- Control de variador de velocidad con monitoreo de modo de operación, estado del motor, alarma de falla del variador y estado del variador.

- Botoneras de mando local (START/STOP) e indicación visual de estado en panel.
- Comunicación con PCS y pantallas de operación en sala de control.
- Indicación sonora y/o visual de eventos y alarmas.

La ubicación del distribuidor es determinada por un controlador de posición, mediante una señal emitida por las balanzas (WT-304/306) de las fajas transportadoras (CV-317/318) que determinan si la faja transportadora está en modo carga.

El distribuidor alimenta de ripios a la faja (CV-317/318) hasta que, el camión de ripio haya alcanzado la capacidad total de su carga. La velocidad de la faja puede incrementarse automáticamente mientras transporta los ripios hasta 6600t/h durante la carga al camión de ripio, creando la disponibilidad de la faja antes de culminar el transporte y carguío del camión alterno, promoviendo el tiempo necesario para que el próximo camión se posicione. Ambas fajas transportadoras permiten una carga continua en los camiones

2.2.1.6 Carga de camiones. Los ripios transportados por la faja (CV-317/318) descargan a través del chute (CH-353/354) sobre la tolva del camión de ripio, la cual tiene una capacidad de 220t.

La zona de descarga de cada una de las fajas (CV-317/318) cuenta con un semáforo que permite controlar la carga a los camiones de ripio, el semáforo cuenta con 3 indicadores luminosos: una luz roja, una luz ámbar y una luz verde.

Los semáforos son controlados de dos modos: Carga o descarga de las fajas transportadoras (CV-317/318) mediante las balanzas (WT-304/306).

Solo una faja transportadora podrá cargar de ripios al camión (modo descarga) ya que la otra faja transportadora estará en modo carga, porque trabajan sincronizados. En la siguiente tabla se muestra la condición que representa cada luz.

Figura 14

Carga de ripios en camiones



Fuente: Elaboración propia

En cada zona de descarga, el semáforo cuenta con un interruptor de emergencia para detener la faja transportadora de carga al camión de ripio (CV-317/318) y con dos sensores de posicionamiento del camión, una que permite determinar la presencia del camión para dar inicio a la carga de ripios y otra para esperar en línea.

La zona de salida para cada una de las fajas, cuenta con otro semáforo que permite controlar la salida de los camiones, cada semáforo cuenta con 3 indicadores luminosos: una luz roja, una luz ámbar y una luz verde.

Estos semáforos dirigen a los operadores de los camiones durante el posicionamiento y la salida del camión. En la siguiente tabla se muestra la condición que representa cada luz.

2.2.1.7 Lixiviación en bateas. La descripción del proceso de lixiviación es desarrollada en un circuito de 15 bateas instaladas en serie y enumeradas de norte a sur, con un sistema de irrigación de reactivo de abajo hacia arriba, para condiciones normales.

La carga de mineral pre-tratado en la batea seleccionada es realizada por el distribuidor (TR-002), este distribuidor tiene la facilidad de desplazarse a lo largo de las 15 bateas instaladas, enumeradas y codificadas del VT-301 al VT 315, la última batea se encuentra ubicada más cerca de la reserva de mineral.

Las 15 bateas de lixiviación poseen las siguientes dimensiones: 41.6m de largo, 36m de ancho y 7m de alto, de las cuales 12 bateas están lixiviando el mineral pre-tratado, 1 batea está en pleno relleno de mineral pre-tratado, 1 batea se encuentra drenando luego de haber cumplido el ciclo de lixiviación y 01 batea está en preparación para el ciclo de lixiviación.

El ciclo de lixiviación tiene una duración de 144horas (nominal), considerando que el tiempo de lixiviación por cada batea es 12horas con una velocidad de irrigación nominal de 650-800L/m².h a 3.75kPa.

El proceso de lixiviación está dividido en 2 etapas:

- Etapa de Alto Grado (HG): Comprende la lixiviación del mineral cargado recientemente entre tres a cinco bateas, con una dosificación de 10g/L de ácido.
- Etapa de Bajo Grado (LG): Comprende la lixiviación del mineral con mayor tiempo de permanencia entre las 7 a 9 bateas restantes que están en operación, con una dosificación entre 6 a 10g/L de ácido.

La disposición del número de bateas para cada etapa de lixiviación puede variar según la configuración de operación como se muestra a continuación:

- Para 3 bateas en HG, se dispone de 9 bateas en LG.
- Para 5 bateas de HG, se dispone de 7 bateas en LG.

El ciclo de lixiviación se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Rellenado de mineral pre tratado o carga de la batea durante 10.9 a 12 horas (Si la batea es cargada antes de las 12 horas, se puede iniciar con el relleno de la siguiente batea disponible).
- Adición de refino a partir del 75% de carga de la batea por un tiempo de 2.8 horas de las 12horas que demora en cargar la batea, junto con el rebose de la canaleta del tanque de bombeo de la batea.
- Adición de ILS (Sobre flujo instantáneo) HG de la batea anterior por 03horas de las 12horas.
- Adición de ILS (Sobre flujo instantáneo) LG de la batea anterior durante 12horas.

- Adición de ILS (Sobre flujo instantáneo) HG de la lixiviación anterior por 07 horas más 12horas.
- Al término de las doce horas, se detiene el riego y se inicia el drenado de la batea hacia el pozo de refino HG.
- Al completarse el drenado de aproximadamente 5 horas, se eliminan los ripios con apoyo de las dos almejas.
- La batea se queda en modo de espera durante las últimas horas de las 12 horas del ciclo.

El ácido sulfúrico concentrado es suministrado en cada batea a razón de 1.8m³/h, desde un distribuidor que está conectado a la base de cada batea (Desde la VT-301 hasta VT-315), para proporcionar el nivel requerido de acidez y asegurar una lixiviación adecuada de cobre, sin que se filtre demasiado material de ganga.

La solución lixivante (ácido sulfúrico) fluye hacia arriba a través de un conjunto de maderas distribuidas en la base de las bateas, promoviendo un flujo uniforme por todo el mineral. La dosificación de ácido en cada línea es controlada mediante válvulas, desde la bomba de ácido para la etapa HG y otra para la etapa LG, considerar que la última batea no cuenta con la adición del lixivante, ya que su contenido es PLS (Pregnant leach solution).

La solución lixiviada rebosa desde cada batea a su canaleta respectivamente (LA-301/302/303/304/305/306/307/308/309/310/311/312/313/314/315), recorriendo la longitud de la tina para descargar en un tanque de bombeo (TK-301/302/303/304/305/306/307/308/309/310/311/312/313/314/315) asignado a cada batea.

Cada tanque tiene instalada una bomba ILS (PU-301/302/303/304/305/306/307/308/309/310/311/312/313/314/315) con accionamiento de velocidad variable que está conectada a un distribuidor provista de válvulas para re direccionar el flujo al distribuidor de admisión de la siguiente batea según lo requiera la etapa de lixiviación HG, LG o hacia los pozos correspondientes.

Las bombas ILS presentan en su línea de descarga una pequeña línea de derivación conectada a un cajón de muestreo ubicado sobre la canaleta. EL cajón contiene un medidor de pH para la medición de la acides en el ILS que ingresa a la siguiente batea, de este cajón el operador recolecta la muestra para realizar pruebas en laboratorio.

Los tanques de bombeo (TK-301/315) tienen un indicador de nivel instalado sobre la canaleta, el cual ayuda al controlar la velocidad de succión de cada bomba ILS (PU-301/315) para mantener el nivel en el tanque, caso contrario se activa la alarma y alerta al operador de un problema potencial o de la detención de la bomba, ocasionando el corte de flujo de adición de reactivo, sea por un excesivo rebose o por un nivel bajo del tanque., para cada etapa de lixiviación.

Los distribuidores de admisión de cada batea, poseen válvulas que permiten el ingreso de los siguientes flujos:

- La solución ILS de la batea anterior.
- La solución ILS de la batea anterior mediante bypass (desvío).
- La solución Refino HG.
- La solución Refino LG.

Los distribuidores de salida de cada batea poseen válvulas que permiten la salida de:

- La succión de la bomba ILS
- La solución ILS (a la válvula que corresponde a la batea siguiente y/o subsiguiente)
- La solución LG PLS
- La solución HG PLS

Las bateas del 1 al 15 se encuentran comunicadas una tras otra a través de las líneas bypass, las cuales favorecen la transferencia y derivación del ILS a través de los distribuidores, sin embargo el distribuidor de admisión de la batea 1 no presenta la válvula bypass y el distribuidor de salida de la batea 15 presenta dos válvulas una para recircular la solución y otro para hacer bypass del ILS a la batea 01, durante la etapa de lixiviación

solo es posible aperturar una válvula en el distribuidor de admisión y en el distribuidor de salida sola la bomba de succión y otra válvula pueden estar aperturadas.

El sistema de control del área permite identificar:

- La distribución de cada una de las bateas por etapa HG y LG.
- El bypass por la única batea que no está disponible.
- La batea que contiene el mineral más fresco.
- El tiempo de drenado adecuado para la última batea.
- El arranque y parada de las bombas ILS requeridas según el proceso.
- El déficit de adición del líquido lixivante y el rebose en la batea.
- El suministro de ácido

2.2.2 Parte teórica del análisis de datos por Minitab versión 22.

Es un enfoque científico que ayuda a los investigadores a comprender mejor un proceso ya determinar cómo las variables de entrada afectan una respuesta o variables de salida específicas. Las condiciones de cada variable de entrada influyen en los resultados de producción; Algunas tienen un impacto más significativo que otras. Además, estas variables interactúan entre sí, lo que significa que existe una interdependencia que puede modificarse

El diseño factorial tiene como objetivo analizar cómo diferentes factores afectan una o varias respuestas cuando todos los factores son de interés. Los factores controlables se clasifican en dos tipos: cualitativos, como maquinaria, tipos de materiales, operadores, la presencia o ausencia de una operación previa, formas geométricas, desgastes de máquinas, y cuantitativos, que abarcan variables como temperaturas, dosificaciones de reactivos, humedades, velocidades, presiones, porcentaje de sólidos, entre otros. El objetivo es entender cómo cada factor o combinación de factores influye en las variables de respuesta. Es esencial seleccionar al menos dos niveles para cada factor durante el proceso de prueba. Con un diseño factorial completo, se exploran de manera aleatoria todas las posibles combinaciones formadas por los niveles correspondientes de los factores bajo investigación

El diseño factorial o matriz de diseño consiste en un conjunto de puntos experimentales o tratamientos que se generan al considerar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Por ejemplo, si tenemos 2 factores con dos niveles cada uno, se forma un diseño factorial de $2 \times 2 = 2^2$, lo que representa cuatro combinaciones o tratamientos experimentales distintos. Si un factor tiene tres niveles y otro factor tiene dos niveles, se pueden diseñar $3 \times 2 = 3^2$ combinaciones para el diseño factorial.

Es importante notar que el nombre del diseño factorial indica el número total de tratamientos que lo componen. Además, para calcular el número total de corridas experimentales, se multiplica el número de tratamientos por el número de repeticiones. Cada repetición se lleva a cabo cada vez que se ejecuta el arreglo completo de combinaciones.

En términos generales y simplificados, los diseños factoriales de la familia 2^k incluyen k factores, cada uno con dos niveles. Por otro lado, los diseños factoriales de la familia 3^k comprenden k factores, donde cada factor tiene tres niveles.

2.2.2.1 Experimento. Es el ajuste o modificación de las condiciones operativas de un proceso con el fin de evaluar cómo estos cambios afectan una o varias propiedades principales del producto o resultado. El experimento busca ampliar la comprensión sobre el proceso. Por ejemplo, en la lixiviación de óxido de cobre, se pueden probar diferentes dosificaciones de ácido sulfúrico y ajustes de pH para observar cómo afectan la concentración de cobre en la solución PLS HG (g/l). Al analizar estos efectos y parámetros, se adquiere un conocimiento más profundo del proceso, lo que facilita mejorar el rendimiento deseado del resultado.

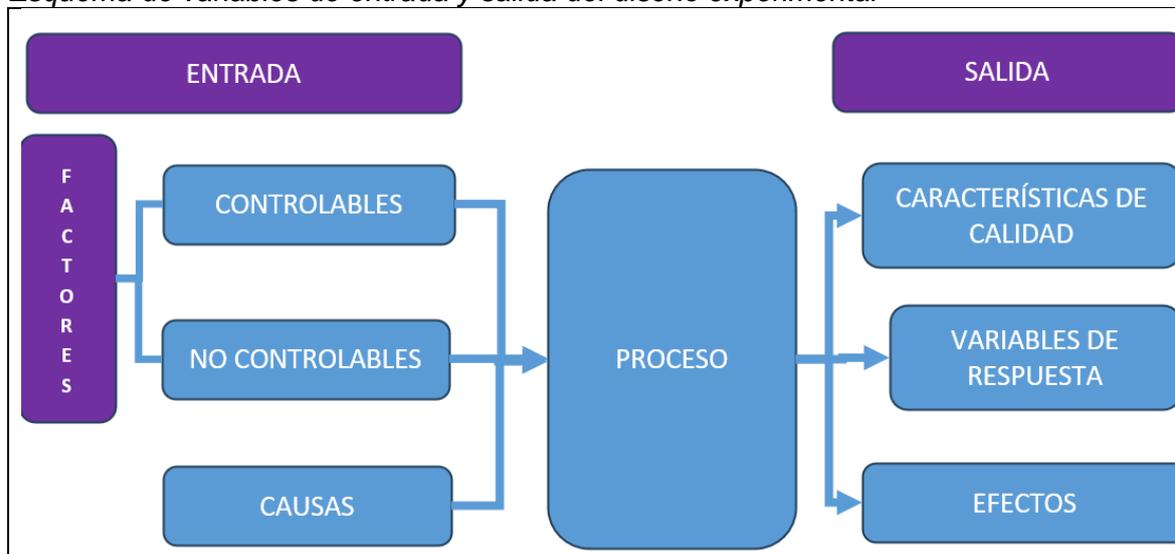
2.2.2.2 Unidad experimental. Es la entidad a la que se le aplican los tratamientos en el experimento. Puede ser un sujeto, una muestra, un lote de producción, entre otros, dependiendo del contexto del estudio.

2.2.2.3 Variables factores y niveles. En todo proceso, intervienen diversos tipos de variables o factores, y al planear un experimento pueden surgir incógnitas desconocidas.

Las variables de respuesta, también conocidas como variables dependientes, son esenciales para comprender los efectos o resultados de cada prueba experimental. Estas variables pueden ser aspectos críticos de la calidad de un producto o indicadores de rendimiento y eficiencia del proceso. En muchos estudios experimentales, el objetivo principal es optimizar estas variables de respuesta. Por lo general, estas variables se denotan con la letra Y_i .

Figura 15

Esquema de variables de entrada y salida del diseño experimental



Fuente: Elaboración propia

Nos debemos hacer las siguientes interrogantes:

¿Cuáles características de calidad se van a medir?

¿Cuáles factores controlables deben incluirse en el experimento?

¿Qué niveles debe utilizar cada factor?

¿Cuál diseño experimental es el adecuado?

Factores controlables.

Los factores controlables son como las cartas que el investigador puede jugar en un experimento. Son esas variables que pueden ajustarse o cambiar deliberadamente para ver cómo influyen en el resultado que buscamos entender. Por ejemplo, podríamos pensar en cosas como la temperatura, la velocidad, la presión o la cantidad de luz. Al manipular estas variables, podemos ver cómo afectan al resultado final, lo que nos ayuda a entender

mejor cómo funciona el fenómeno que estamos estudiando. Es como tener un conjunto de interruptores que podemos encender o apagar para ver qué efecto tienen en el resultado.

Factores no controlables.

Los factores no controlables son como los imprevistos que pueden surgir durante un experimento o en la ejecución normal de un proceso. Son esas variables que no podemos manipular a nuestro antojo, como el clima, el ánimo de los operadores, o la calidad de los materiales que recibimos de los proveedores. A veces, lo que inicialmente parece estar fuera de nuestro control puede volverse manejable con la ayuda de ciertas herramientas o tecnologías. Es como lidiar con las cartas que nos reparte el destino y encontrar formas creativas de jugarlas a nuestro favor.

Factores estudiados.

Los factores estudiados son como las piezas clave que examinamos en un experimento para entender cómo afectan a las variables que nos interesan. Estos factores pueden ser tanto controlables como no controlables, aunque a veces podemos encontrar formas de controlar incluso aquellos que inicialmente parecen estar fuera de nuestro alcance. Es esencial que cada factor que consideramos haya sido probado en al menos dos niveles para que podamos obtener una comprensión completa de su impacto. Cualquier factor, ya sea que podamos controlarlo o no, puede tener algún tipo de influencia en las variables que observamos, ya sea en su promedio o en su variabilidad. Al diseñar un experimento, debemos elegir cuidadosamente los factores que creemos que podrían tener algún efecto en las variables que nos interesan, basándonos en nuestro conocimiento del tema. Y parte del desafío del diseño experimental radica en encontrar formas de controlar esos factores durante el curso del experimento.

Niveles y tratamientos.

Los niveles y tratamientos en un diseño experimental se refieren a las distintas configuraciones que asignamos a cada factor o variable. Los niveles son los valores específicos que atribuimos a cada factor bajo estudio. Cuando combinamos los niveles de todos los factores, obtenemos lo que se denomina tratamiento o punto de diseño. Por

ejemplo, si estamos investigando cómo el P80 y % de grado de liberación afectan un proceso, y decidimos probar cada variable en dos niveles diferentes, cada combinación de niveles (P80 y % Grado de liberación) representa un tratamiento. En resumen, los tratamientos son las diversas situaciones que creamos en nuestro experimento para evaluar su impacto en la variable de respuesta. Es esencial ejecutar cada tratamiento de manera precisa para obtener los resultados correspondientes de la variable de respuesta.

Tabla 1

Puntos de diseño o tratamientos

Nivel de velocidad	Nivel de temperatura	Tratamiento	Y
1	1	1	
2	1	2	
1	2	3	?
2	2	4	

Fuente: Elaboración propia

Error aleatorio y error experimental.

El error aleatorio y el error experimental son como los obstáculos que pueden surgir durante un estudio experimental. El error aleatorio se refiere a la variabilidad en los resultados que no puede ser explicada por los factores que estamos estudiando. Puede incluir efectos insignificantes de variables no consideradas y la variabilidad natural en las mediciones. Por otro lado, el error experimental ocurre cuando cometemos errores durante el experimento que son significativos y pueden distorsionar los resultados, superando incluso al error aleatorio. Cuando este error es muy grande, se vuelve difícil o incluso imposible determinar qué efecto tienen realmente los factores que estamos estudiando en la variable respuesta.

Es crucial que, al diseñar un experimento, la variabilidad en los resultados provenga principalmente de los factores que estamos estudiando y no del error aleatorio. Además, es importante que este error sea aleatorio, es decir, que no esté sesgado hacia ninguna dirección particular. Si la mayor parte de la variabilidad en los resultados se debe a factores no considerados en el estudio, será difícil distinguir el verdadero efecto de los factores que

estamos investigando. Por eso es fundamental evitar cambios aleatorios en cualquier factor que pueda tener un impacto significativo en la variable respuesta.

2.2.2.4 Etapa en el diseño de experimentos. En el diseño de experimentos, una de las partes cruciales es determinar qué pruebas se llevarán a cabo y cuántas veces se repetirán, con el fin de obtener la máxima cantidad de información con el menor costo posible. La combinación de estos tratamientos y repeticiones forma lo que se conoce como matriz de diseño o simplemente diseño.

Para llevar a cabo un estudio experimental exitoso, es crucial seguir ciertas etapas. La más importante y que requiere más tiempo es la fase de planeación. A continuación, se resumen brevemente las diferentes etapas del diseño de experimentos, con el objetivo de tener una visión general de cómo se desarrolla y aplica adecuadamente este proceso.

Entender y delimitar cual es el problema de estudio.

Es crucial investigar a fondo durante la fase de planeación para comprender y definir claramente cuál es el problema que estamos estudiando. Esto nos ayuda a entender la importancia del problema y, en caso de que exista uno, nos permite determinar su alcance o magnitud.

Elegir las variables de resultado que se estudiarán en cada fase del diseño experimental para asegurar una determinación precisa y fiable.

Es esencial elegir cuidadosamente las variables de respuesta que se analizarán en cada punto del diseño experimental para asegurar una determinación precisa y fiable. Estas variables deben ser representativas del problema o del objeto de estudio y deben garantizar mediciones confiables. Esto significa que los métodos de medición utilizados deben ser precisos y exactos, asegurando que los resultados obtenidos sean confiables y consistentes.

Identificar los factores o variables que deben estudiarse según su influencia importante en la variable que nos interesa entender mejor.

Es importante identificar los factores o variables que deben ser estudiados en función de su influencia potencial en la variable respuesta. Aunque no se espera que la

persona a cargo de los experimentos conozca de antemano todos los factores que afectan a la variable respuesta, es crucial que utilice toda la información disponible para incluir aquellos que se consideren más relevantes. Esto implica tener en cuenta factores conocidos y cualquier información previa que pueda sugerir qué variables podrían tener una influencia significativa en los resultados del experimento.

Seleccionar los niveles de cada factor y el diseño experimental que mejor se ajuste a los factores y al propósito del experimento.

En este paso, se trata de seleccionar los niveles de cada factor y el diseño experimental más adecuado según las características de los factores y los objetivos del experimento. Se debe decidir cuántas repeticiones se llevarán a cabo para cada experimento considerando aspectos como los costos, el tiempo requerido y el nivel de precisión deseado. En resumen, es necesario encontrar un equilibrio entre estos factores para garantizar que el diseño experimental sea eficiente y produzca resultados confiables dentro de los recursos disponibles

Planificar y organizar el trabajo experimental a realizar.

En esta etapa, después de haber establecido el diseño experimental, es crucial planificar y organizar meticulosamente cada aspecto del trabajo experimental. Esto incluye determinar el número de personas necesarias para llevar a cabo el experimento, así como establecer los procedimientos operativos específicos que se seguirán. En resumen, se trata de coordinar todos los detalles necesarios para ejecutar el experimento de manera eficiente y efectiva.

Ejecutar el trabajo experimental.

En esta fase, se lleva a cabo el trabajo experimental siguiendo el plan establecido previamente. Si surgen imprevistos durante la ejecución, es importante comunicarlos al responsable designado y tomar las acciones necesarias para abordarlos adecuadamente. En resumen, consiste en seguir el plan con atención y estar preparado para adaptarse a cualquier eventualidad que pueda surgir durante el proceso experimental.

2.2.2.5 Análisis. En esta etapa, es esencial tener en cuenta que los resultados experimentales son representativos de muestras y no de toda la población. Por lo tanto, es necesario recurrir a métodos estadísticos inferenciales para determinar si las diferencias observadas son lo suficientemente significativas como para ser generalizadas a la población en su conjunto. La técnica estadística principal utilizada en el análisis de experimentos es el análisis de varianza, también conocido como ANOVA, por sus siglas en inglés.

2.2.2.6 Interpretación. En esta etapa, luego de realizar un análisis estadístico formal, es crucial examinar detenidamente lo que está ocurriendo en los experimentos. Esto implica verificar si las hipótesis iniciales se confirman con los resultados obtenidos, así como examinar cualquier nuevo conocimiento adquirido durante el proceso experimental. Se trata de validar las hipótesis planteadas y seleccionar el método o tratamiento más adecuado, todo ello respaldado por pruebas estadísticas sólidas.

2.2.2.7 Control y conclusiones. Al concluir nuestro estudio experimental, se recomienda considerar qué medidas implementar para asegurar los resultados del estudio y seleccionar los mejores datos obtenidos.

2.2.3 Clasificación y selección de los Diseños Experimentales

Hoy en día, tenemos a nuestra disposición una gran variedad de diseños experimentales para resolver distintos problemas o situaciones prácticas. Escoger el diseño adecuado no es una tarea sencilla, ya que hay varios aspectos clave a tener en cuenta.

Primero, es vital entender cuál es el objetivo del experimento. ¿Qué queremos lograr o descubrir? Después, debemos identificar cuántos factores vamos a estudiar y los diferentes niveles de cada uno. También es importante pensar en los resultados que queremos observar, así como en el costo, el tiempo y la precisión que esperamos obtener con el experimento.

Aunque estos cinco puntos están conectados entre sí, es importante mencionarlos por separado, ya que un cambio en cualquiera de ellos puede afectar la elección del diseño

experimental. Dependiendo de su objetivo, los diseños experimentales se pueden clasificar en diferentes tipos

Hay distintos tipos de diseños experimentales según el objetivo que se quiera alcanzar:

- Diseños para comparar dos o más tratamientos.
- Diseños para analizar cómo varios factores afectan las variables de respuesta.
- Diseños para encontrar el mejor punto de operación de un proceso.
- Diseños para optimizar una mezcla.
- Diseños para reducir la influencia de factores no controlables en el proceso.

En la siguiente tabla, se muestra cómo se clasifican estos diseños experimentales según su objetivo. Además, pueden subdividirse aún más dependiendo del número de factores, el tipo de resultados que se buscan y las restricciones específicas. También se mencionan ejemplos representativos de cada categoría.

Es importante destacar que los diseños factoriales completos y fraccionados se repiten en varias categorías porque son muy eficientes en muchas situaciones.

Tabla 2

Clasificación de diseños experimentales

Diseño completamente al azar		1. Diseño para comparar dos o más tratamientos
Diseño de bloques completos al azar		
Diseño de cuadros latino y grecolatino		
Diseños factoriales 2^k		2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta
Diseños factoriales 3^k		
Diseños factoriales 2^{k-p}		
Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p}	Diseños para el modelo de primer orden	3. Diseños para la optimización de procesos
Diseño de Plakett - Burman		
Diseños simplex		
Diseño de composición central	Diseños para el modelo de segundo orden	
Diseño de Box - Behnken		
Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p}		
Arreglos ortogonales (diseños factoriales)		4. Diseños robustos
Diseño con arreglos interno y externo		
Diseño simplex - reticular		5. Diseño de mezclas
Diseño simplex con centroide		
Diseño con restricciones		
Diseño axial		

Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Diseño Factorial Fraccionado 2k-p

Cuando hay muchos factores en un diseño factorial completo (del tipo 2^k), la cantidad de experimentos necesarios crece rápidamente, lo que puede resultar poco práctico. Por ejemplo, con 5 factores, se necesitarían 32 pruebas, y con 6 factores, serían 64 pruebas. Realizar tantos experimentos puede no ser viable, por lo que se recurren a diseños factoriales fraccionados para reducir el número de pruebas mientras se mantiene la información más relevante.

Los diseños factoriales fraccionados permiten enfocarse en la información más importante al reducir la cantidad de experimentos. Esto se logra identificando primero los efectos más significativos, luego las interacciones dobles, triples, y así sucesivamente.

En la Tabla 3 se muestra el número de efectos de interés en varios diseños factoriales completos del tipo 2^k . Se observa que en un diseño factorial completo básico como el 2^5 , hay 31 efectos, de los cuales solo 15 son realmente importantes, incluyendo los efectos principales y algunas interacciones dobles. Los efectos restantes, que implican interacciones de tres o más factores, se consideran menos relevantes.

La tabla también indica que, con menos de cinco factores, los efectos importantes superan a los insignificantes. En estos casos, fraccionar los diseños podría resultar en la pérdida de información clave. Sin embargo, cuando hay más de 5 factores, fraccionar los diseños puede ser una opción viable sin perder información esencial para el estudio.

Tabla 3

Efecto en los factoriales 2^k

Diseño 2^k	Total de efectos	Efectos no ignorables	Efectos ignorables
2^2	3	3	0
2^3	7	6	1
2^4	15	10	5
2^5	31	15	16
2^6	63	21	42
2^7	127	28	99

Fuente: Elaboración propia

Si el valor de los efectos es mayor o igual a 5, el diseño permitirá un mayor fraccionamiento.

En ese sentido importante tener en cuenta que al usar solo una parte del diseño factorial completo, hay consecuencias inevitables como:

- Habrá efectos que no se podrán estimar y se tendrá un menor grado de libertad para el error, lo que lleva a una inevitable pérdida de información. Se espera que la información perdida corresponda a interacciones de alto orden, para poder ignorarlas con un riesgo mínimo.
- Los efectos que se pueden estimar suelen estar con un sobrenombre. Esto significa que un efecto puede ser visto como el mismo que otro efecto, solo que con un nombre diferente. Al estimar uno de ellos, también se está estimando el otro automáticamente, por lo que estos efectos no se pueden separar.

2.2.5 Diseño Factorial 2k-1

La notación $2^{(k-1)}$ significa que estamos usando la mitad de un diseño factorial completo 2^k , donde k es mayor que 2, ya que $\frac{1}{2} * 2^k = 2^{(k-1)}$. No tendría sentido dividir un diseño factorial 2^2 , porque terminarías con muy pocos tratamientos, lo que haría imposible estimar cualquier efecto principal.

2.2.6 Arreglos Ortogonales

Los arreglos ortogonales de Taguchi se destacan por su característica de ortogonalidad, tal como indica su nombre.

Tabla 4

Factores de control y de ruido en la producción de PLS HG (Cu)

FACTORES DE CONTROL	FACTORES DE RUIDO
A: P80 (mm)	K: Ley de PLS HG
B: % Grado de liberación	L: %Sólidos de rebose PLS HG
C: Consumo de Ácido Sulfúrico	
D: Flujo de inundación	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

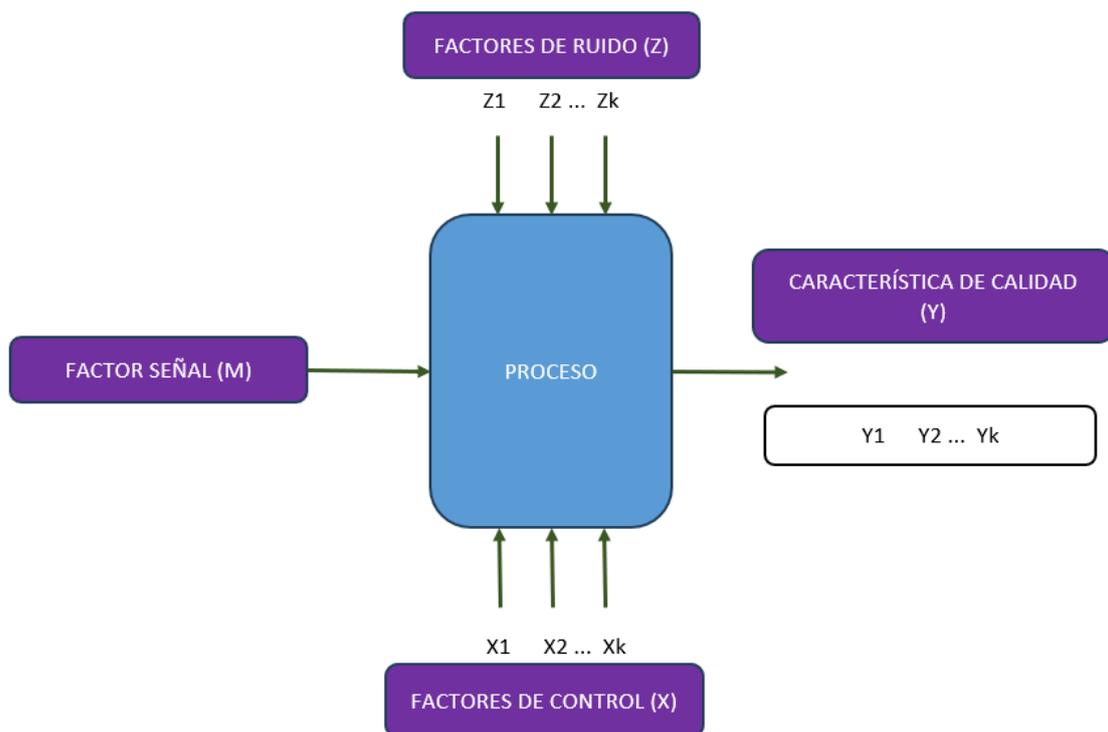
Diseños ortogonales robustos, internos y externos

Factores de ruido							MEDIA	Desviación estándar	Razón señal / Ruido				
Factores controlables													
A	B	C	D	E	F	G							
1	1	1	1	1	1	1	36	26	24	15	25.25	8.61	-18.71
1	1	1	2	2	2	2	32	62	24	32	37.5	16.76	-24.49
1	2	2	1	1	2	2	34	16	25	12	21.75	9.81	-19.83
1	2	2	2	2	1	1	10	30	26	32	24.5	9.98	-19.98
2	1	2	1	2	1	2	33	31	27	23	28.5	4.43	-12.93
2	1	2	2	1	2	1	34	48	26	39	36.75	9.21	-19.29
2	2	1	1	2	2	1	26	27	18	20	22.75	4.42	-12.92
2	2	1	2	1	1	2	28	40	21	32	30.25	7.93	-17.99

Fuente: Elaboración propia

Figura 16

Esquema de tipos de factores en el diseño robusto



Fuente: Elaboración propia

Dependiendo de cuántos factores se estudien en un caso de investigación, se pueden emplear diseños factoriales completos, fraccionados o mixtos. Por ejemplo, un arreglo ortogonal L8 implica realizar ocho experimentos, lo que permite estudiar desde dos hasta siete factores con dos niveles cada uno. Para estudiar siete factores, se usaría un

diseño factorial fraccionado como el 2^7 III-3, mientras que para dos factores se elegiría un factorial completo 2^2 con dos réplicas. Es crucial asignar los factores a columnas específicas del arreglo; por ejemplo, en un estudio de cuatro factores con un L8, se asignarían a las columnas 1, 2, 4 y 7 para obtener una fracción como 2^4 IV-1 utilizando el generador $I=ABCD$.

En el caso de un arreglo ortogonal L16, se pueden estudiar desde cuatro hasta quince factores. Si se estudian menos de cuatro factores, sería más apropiado usar un L8. Para estudiar cuatro factores en un L16, se asignarían a las columnas 1, 2, 4 y 8 para estimar las interacciones de manera separada. Si se estudian quince factores en un L16, equivaldría a una fracción como 2^{15} III-11. Es importante notar que a medida que aumenta el número de factores estudiados, los grados de libertad para estudiar las interacciones disminuyen, aunque Taguchi generalmente se centra en analizar los efectos principales de cada factor y no tanto en las interacciones.

En las tablas siguientes se presentan varios arreglos ortogonales que se utilizan frecuentemente, como L4, L8, L12, L16, L9 y L18. El subíndice Li indica el número de combinaciones de niveles en cada arreglo. Los arreglos L9 y L18 permiten que los factores tengan los niveles (1, 2, 3).

Tabla 6

Arreglo ortogonal L4

Arreglo L4 (Fracción 2^{3-1})			
N° de corridas	N° de columna		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1
2 factores: columnas 1 y 2			
3 factores: columnas 1, 2, 3			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7*Arreglo ortogonal L9*

Arreglo L9 (Fracción 3⁴-2)				
N° de corridas	N° de columna			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
2 factores: columnas 1 y 2				
3 factores: columnas 1, 2, 3				
4 factores: columnas 1, 2, 3, 4				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Arreglo ortogonal L8*

Arreglo L8 (Fracción 2⁷-4)							
N° de corridas	N° de columna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
2 factores: columnas 1 y 2							
3 factores: columnas 1, 2, 4							
4 factores: columnas 1, 2, 4, 7							
5 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6							
6 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6, 5							
7 factores: columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7							

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Arreglo ortogonal L12

Arreglo L12 (Plackett - Burman para k=11)											
N° de corridas	N° de columna										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1

Se asignan los "k" factores a las primeras "k" columnas, para (4<k<11)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Arreglo ortogonal L18

Arreglo L18 (2x3 ⁷ -5)								
N° de corridas	N° de columna							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	2	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

1 factor con dos niveles se asigna a la columna 1
Los factores con 3 niveles se asignan a las columnas 2,3,4,5,6,7,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

Arreglo ortogonal L16

Arreglo L16 (2¹⁵⁻¹¹)															
N° de corridas	N° de columna														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
4 factores: Columnas 1, 2, 4, 8															
5 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15															
6 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14															
7 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13															
8 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11															
9 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7															
10 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12															
11 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10															
12 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9															
13 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6															
14 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6, 5															
15 factores: Columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6, 5, 3															

Fuente: Elaboración propia

El diseño de experimentos de Taguchi recomienda asignar el factor más crítico, aquel que se anticipa tendrá cambios de nivel más difíciles entre pruebas, a la primera columna del diseño experimental. A diferencia del enfoque clásico que sugiere la aleatorización de los experimentos, Taguchi organiza los factores según su importancia práctica y las dificultades esperadas, estableciendo un orden secuencial para las columnas.

Vamos a explorar la relación entre el consumo de ácido sulfúrico, el flujo de inundación y la granulometría. Usaremos los resultados obtenidos en las pruebas para analizar y visualizar patrones de forma interactiva, crear un modelo predictivo, documentar nuestros descubrimientos y compartir los resultados obtenidos.

2.2.7 Cinética de Lixiviación:

2.2.6.1 Modelo del núcleo sin reaccionar. En el modelo original descrito por Levenspiel en 1986, la reacción se divide en cinco etapas que se pueden ver en la Figura.

Estas etapas son:

- El reactivo lixivante (como H⁺ y Fe⁺³) se mueve a través de la capa límite y llega a la superficie de la partícula.
- Luego, el reactivo lixivante penetra en el interior de la partícula, alcanzando la zona donde ocurre la reacción.
- Aquí es donde ocurre la magia: la reacción química tiene lugar y se generan los productos de la reacción.
- Los productos solubles de la reacción (Cu⁺² y Fe⁺²) comienzan a moverse desde el interior de la partícula hacia su superficie.
- Finalmente, estos productos solubles atraviesan la capa límite y se dispersan en la solución.

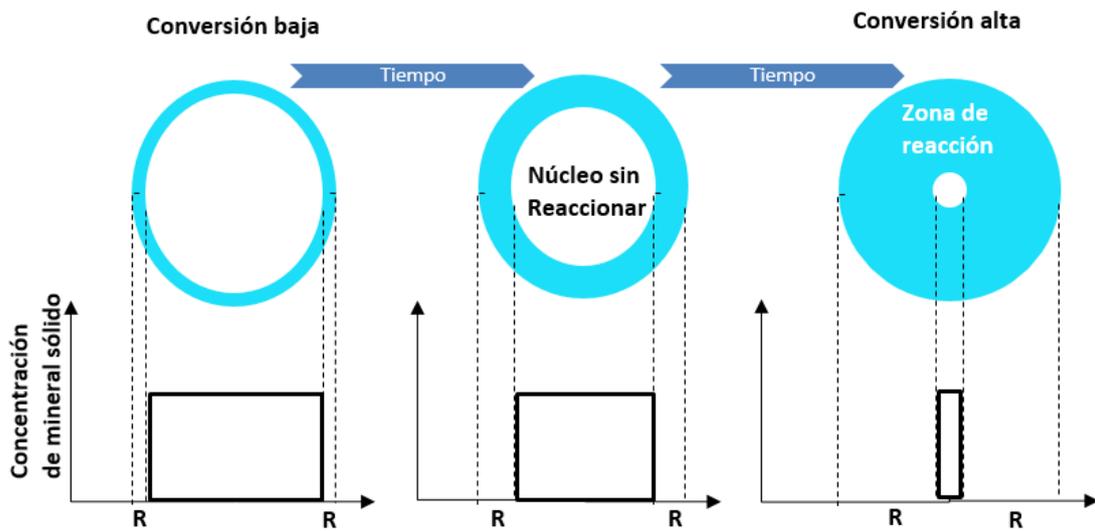
Al principio, la reacción comienza en la superficie externa de la partícula, creando una zona inicial de reacción que se mueve hacia dentro del sólido. A medida que la reacción continúa, se forma una región donde el material se ha transformado y otra donde aún no ha ocurrido la reacción completa. Esta última se reduce en tamaño conforme avanza el proceso de lixiviación del óxido de cobre.

$$-\frac{1}{4\pi r_o^2} \frac{dNA}{dt} = \frac{\sigma CB}{\frac{r_o(r_o - r_c)}{rc \cdot Deff} + \frac{r_o^2}{k \cdot rc^2}} \quad (1)$$

En la Ecuación 1 se puede ver cómo las resistencias en las distintas etapas juegan un papel crucial. Como estas resistencias son bastante diferentes entre sí, la etapa que tenga la mayor resistencia será la que controle la velocidad de la reacción.

Figura 17

Esquema del núcleo sin reaccionar

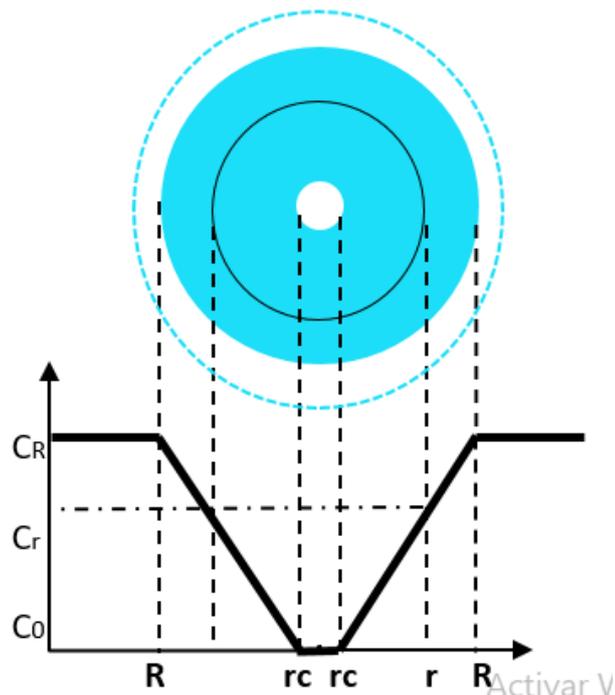


Elaboración propia

2.2.6.1.1 Control Difusional

Figura 18

Modelo de núcleo sin reaccionar para control difusional



Elaboración propia

Control difusional: $(1 - 3(1 - XB)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - XB))$ vs t

Demostración:

Para deducir la relación entre el radio del núcleo sin reaccionar y el tiempo de lixiviación, se sigue un análisis en dos etapas:

- Primero, se toma una partícula que ha reaccionado parcialmente y se escriben las ecuaciones para el flujo del reactivo.
- Luego, se aplica la relación encontrada en el primer paso a todos los valores de r_c , integrando desde r_0 (el valor inicial de r_c) hasta 0 (el valor final de r_c).

La velocidad de reacción, o la velocidad a la que se consume el agente lixivante, se determina por su velocidad molar de difusión. En una superficie genérica con un radio r , esta velocidad se expresa de la siguiente manera:

$$-\frac{dNB}{dt} = 4\pi r^2 QB; \quad (2)$$

Aplicando la ley de Fick

$$QB = D_{eff} \cdot \frac{dCB}{dr} |_{r=r}; \quad (3)$$

Combinando Ecuaciones 2 y 3 se tiene:

La Ecuación 4

$$-\frac{dNB}{dt} = 4\pi r^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{dCB}{dr} |_{r=r}; \quad (4)$$

Como el radio del núcleo sin reaccionar cambia muy lentamente en comparación con la velocidad a la que B se desplaza hacia la zona de reacción, se alcanza un estado casi estacionario donde el flujo de B se mantiene constante. Esto permite integrar a través de la zona reaccionada, desde r_0 hasta r_c .

$$-\frac{dNB}{dt} \int_{r_0}^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4\pi r^2 \cdot D_{eff} \cdot \int_{CBs=CB}^{CBc=0} dCB \quad (5)$$

Se obtiene:

$$-\frac{dNB}{dt} \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right] = 4\pi \cdot D_{eff} \cdot CB \rightarrow -\frac{dNB}{dt} = \frac{4\pi \cdot D_{eff} \cdot CB}{\left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right]} \quad (6)$$

Esta expresión muestra que la velocidad de reacción disminuye a medida que r_c se reduce, es decir, disminuye conforme avanza el proceso de lixiviación de la partícula.

En la segunda etapa del análisis, se considera cómo varía el tamaño del núcleo sin reaccionar con el tiempo. Para un tamaño determinado de r_c , se ha observado que el flujo de B puede considerarse constante. Sin embargo, a medida que el núcleo se reduce, la capa de sólido que B debe atravesar para reaccionar aumenta, lo que provoca una disminución en la velocidad de difusión de B.

Para resolver en función del tiempo, es necesario primero relacionar la velocidad de consumo de B con la variación del radio r_c . Si la partícula de mineral tiene un volumen V (m^3) y la densidad molar de a (la especie mineral que se lixivia) en esa partícula es ρ_A (moles / m^3), entonces el número total de moles en la partícula es:

$$NA = \rho \cdot V \quad (7)$$

Cuando se consume n dNB moles de B se cumple que:

$$-\sigma dNB = -NA = -\rho A dV = -\rho A d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right) = -4\pi\rho A r_c^2 dr_c \quad (8)$$

Por tanto, la variación del tamaño del núcleo asociada al consumo de reactivo dNB está dada por:

$$-\sigma dNB = -4\pi\rho A r_c^2 dr_c \quad (9)$$

Reemplazando:

$$-\rho A \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right] \cdot r_c^2 \cdot dr_c = \sigma \cdot Def f. CB \cdot dt \quad (10)$$

Integrando: Sale

$$-\rho A \int_{r_c=r_0}^{r_c} \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right] \cdot r_c^2 \cdot dr_c = b \cdot Def f. CB \cdot \int_0^t dt \quad (11)$$

Lo que da finalmente.

$$t = \frac{\rho A \cdot r_0^2}{6 \cdot b \cdot Def f. CB} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0} \right)^3 \right] \quad (12)$$

La relación entre r_c y r_0 se puede relacionar con el grado de conversión XA , que indica qué parte de A ha sido lixiviada, utilizando esta fórmula:

$$1 - X_A = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3 (\text{Volumen de núcleo sin reaccionar})}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_o^3 (\text{Volumen total de partícula})} = \left(\frac{r_c}{r_o}\right)^3 \quad (13)$$

Luego, reemplazando en la ecuación 13:

Se obtendrá la ecuación 2.14

$$t = \frac{\rho_A \cdot r_o^2}{6 \cdot \sigma \cdot C_B} \left[1 - 3 \cdot (1 - X_A)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - X_A) \right] \quad (14)$$

Si τ_D es el tiempo necesario para lixiviar todo el A presente, o sea para que $X_A = 1$, de la ecuación 14 se obtiene que:

$$\tau_D = \frac{\rho_A \cdot r_o^2}{6 \cdot \sigma \cdot \text{Def}f \cdot C_B} \quad (15)$$

Utilizando las ecuaciones 14 y 15

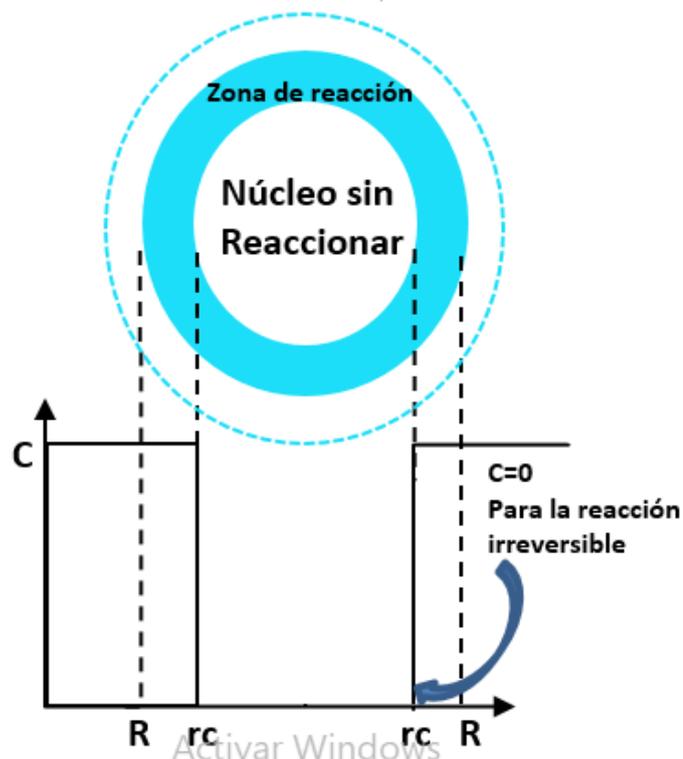
Se obtiene la ecuación 16:

$$\frac{t}{\tau_D} = \left[1 - 3 \cdot (1 - X_A)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - X_A) \right] \quad (16)$$

2.2.6.1.2 Control Reacción Química

Figura 19

Modelo del Núcleo sin reaccionar para el Control por reacción Química



Elaboración: Fuente propia

Control Reacción Química: $(1 - (1 - XB)^{\frac{1}{3}})$ vs t

Demostración:

En este caso, la velocidad de reacción depende directamente del tamaño de la superficie del núcleo que aún no ha reaccionado.

$$-\frac{dNA}{dt} = -\sigma \cdot \frac{dNB}{dt} = \sigma \cdot k \cdot CB \cdot (4 \cdot \pi \cdot rc^2) \quad (17)$$

Expresando nuevamente NA en base a la Ecuación 8:

$$-\sigma dNB = -NA = -\rho A dV = -\rho A d\left(\frac{4}{3}\pi rc^3\right) = -4\pi\rho Arc^2 drc \quad (18)$$

Utilizando las Ecuaciones 17 y 18; y dividiendo por el tiempo resultará:

$$-\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot rc^2}\right) 4\pi\rho Arc^2 \frac{drc}{dt} = -\rho A \frac{drc}{dt} = \sigma \cdot k \cdot CB \quad (19)$$

Integrando:

$$-\rho A \int_{r_0}^{rc} drc = \sigma \cdot k \cdot CB \cdot \int_0^t dt \rightarrow t = \frac{\rho A}{\sigma \cdot k \cdot CB} \cdot (r_0 - rc) \quad (20)$$

El tiempo τ_R para lixiviar toda la partícula ($rc = 0$) es:

$$\tau_R = \frac{\rho A \cdot r_0}{k \cdot CB \cdot \sigma} \quad (21)$$

Incorporando la expresión de τ_R en la Ecuación 20 y reordenando se tiene la ecuación 22

$$\frac{1}{\tau_R} = 1 - \frac{rc}{r_0} \quad (22)$$

Finalmente, reemplazando rc / r_0 de la Ecuación 13, se obtiene la ecuación 23

$$\frac{t}{\tau_R} = 1 - (1 - XA)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Equipos utilizados

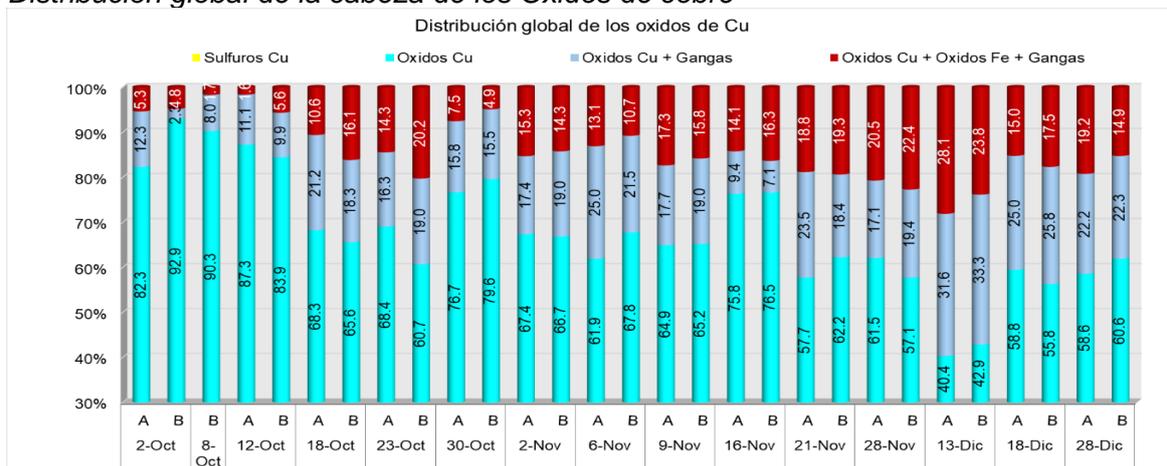
- Equipo de Molienda HPGR
- muestreador de mineral.
- Mini bateas de lixiviación
- ácido sulfúrico

3.2 Distribución Mineralógica de cobre.

La cabeza alimentada tiene una distribución mineralógica de cobre:

Figura 20

Distribución global de la cabeza de los Óxidos de cobre

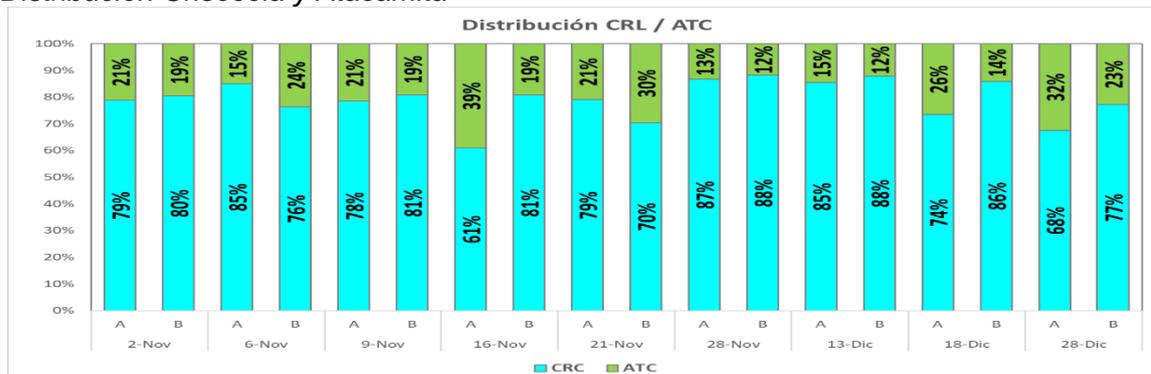


Elaboración propia.

La proporción de Óxidos verdes 72 % CRISOCOLA + 28 % ATACAMITA (Distribución en cabeza)

Figura 21

Distribución Crisocola y Atacamita

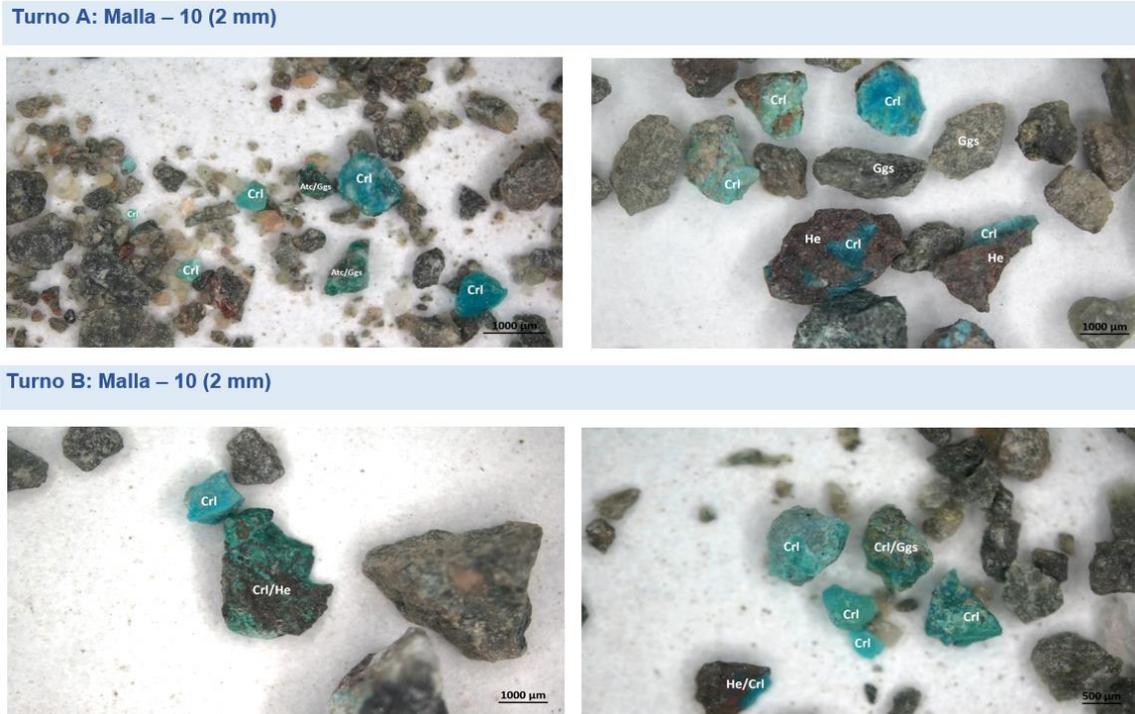


Elaboración propia.

Se observa partículas de Crisocola - Atacamita asociadas y/o encapsuladas a óxidos de hierro (hematita, goetita, magnetita)

Figura 22

Partículas de Crisocola – Atacamita

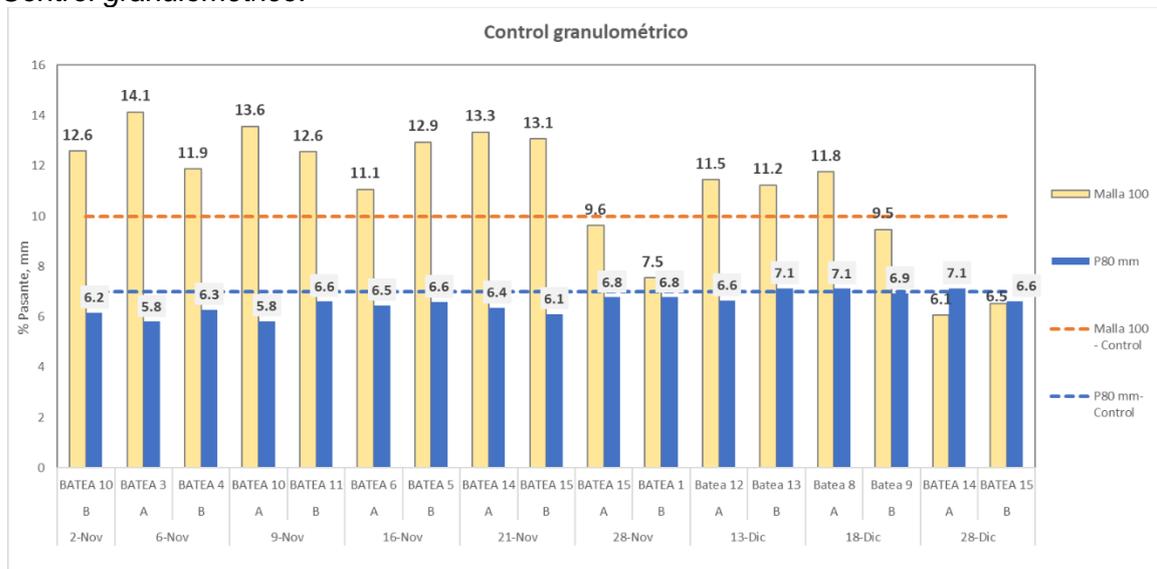


Elaboración propia.

Se tuvo en promedio P80= 6.4 mm y 6.3% pasante la malla 100 (reducción de finos).

Figura 23

Control granulométrico.



Elaboración propia.

3.3 Consumo de H₂SO₄ y dosificación en lixiviación de cobre.

El consumo de reactivos a escala industrial expresado en gramos por tonelada, en la lixiviación de óxidos de cobre es de alrededor 10g/l a 15g/l por batea de lixiviación.

Consumo de H₂SO₄ y parámetros operativos a nivel de Planta de procesos.

Tabla 12

Consumo de ácido sulfúrico y parámetros operativos

Consumo de reactivos (Kg/tn) y parámetros operativos			
H ₂ SO ₄ (kg/ton) al 98%	P80 (mm)	Grado de liberación (-M100) en %	Flujo inundación (m ³ /h)
30	6.8	20	350

Fuente: Elaboración propia

3.4 Planteamiento de las variables controlables para la formulación del Diseño Factorial Fraccionado

El valor central representa el valor histórico de nuestra planta de óxidos y el valor equidistante los valores que deseamos estudiar y analizar

Tabla 13

Rango de las variables controlables para el Diseño Factorial Fraccionado

VARIABLES	-1	0	1	Unidades
Grado de liberación (X1)	15	20	25	%m-100
H ₂ SO ₄ (X2)	28	30	32	kg/Ton
P80 (X3)	6.6	6.8	7	mm
Flujo de inundación (X4)	330	380	430	m ³ /h

Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Variable X1 (Grado de Liberación):

El grado de liberación en la lixiviación de óxidos de cobre es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la molienda HPGR es capaz de obtener partículas minerales “libres”.

3.4.2 Variable X2 (H₂SO₄):

Es un reactivo que se utiliza en la lixiviación de minerales de óxidos de cobre entre ellos crisocola y atacamita principalmente. En planta de óxidos el rango de prueba es de 28kg/Ton a 32kg/Ton que representan el mínimo y máximo al que podríamos llegar con el

fin de lograr una mejor lixiviación, aumentando la ley de reboses PLS HG de nuestras bateas de lixiviación.

3.4.3 Variable X3 (P80):

El P80 es el tamaño por el cual pasa el 80% de mineral. En Planta de óxidos es un parámetro que controlamos con el fin de asegurar una buena lixiviación, este control trae como consecuencia que en nuestras bateas no se genere apelmazamiento de mineral en caso el P80 posea valores menores a 5mm.

3.4.4 Variable X4 (Flujo de inundación):

El flujo de inundación es talvez uno de los controles tan importantes para asegurar la cinética de lixiviación, pues de esta depende que en el proceso de lixiviación no se genere canalizaciones o corto circuitos y por tanto su control adecuado nos asegura un excelente rebose PLS HG, en nuestra planta de óxidos iniciamos la inundación en el momento que en nuestra batea aseguremos un tonelaje de 12000 toneladas, a partir de ello procedemos a inundar con un flujo adecuado y constante que no nos genere cortos circuitos en lixiviación.

3.5 Planteamiento por Diseño factorial fraccionado Ley de rebose (g/l) PLS HG de Cu y Consumo de ácido (g/l) en bateas.

Ya planteado nuestros valores mínimos y máximos de cada variable controlable de nuestra operación, procedemos a llevar dichos valores al software Minitab versión 22 con el fin de obtener a través del diseño factorial fraccionado las 8 pruebas hidrometalúrgicas distintas que realizaremos experimentalmente para la obtención de la ley de rebose PLS HG (g/l) con la finalidad de visualizar que variables son significativas y no significativas en la ley de rebose PLS HG de cobre de nuestras bateas de lixiviación.

- Ingresamos al programa Minitab versión 22.
- Una vez estando en la hoja de trabajo, nos dirigimos con el cursor hacia la barra de opciones y buscamos la opción "Estadísticas".

Figura 24

Barra de opciones de Minitab

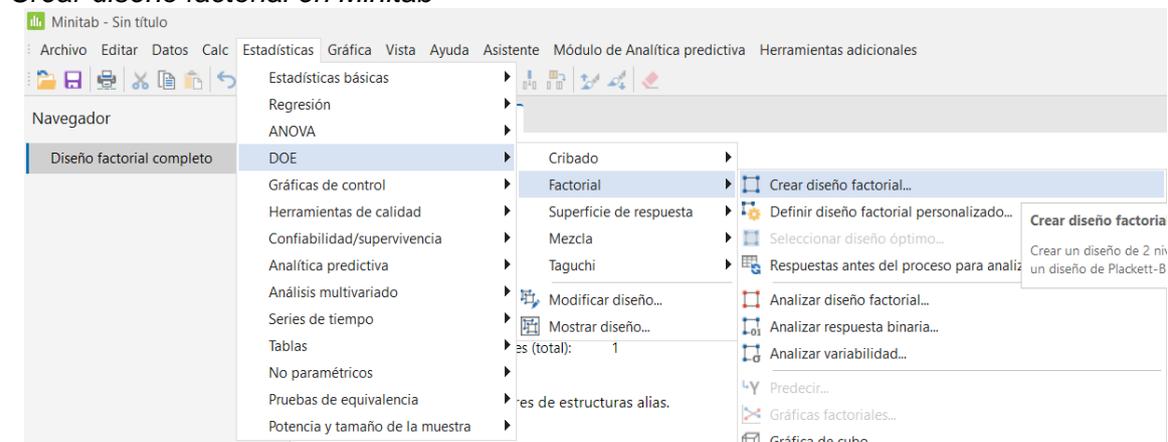


Fuente: Elaboración propia

Luego ejecutamos clic en la opción “Estadísticas”, dónde se desplegará varias opciones, inmediatamente ejecutamos la opción “DOE”, nos dirigimos a la opción “Factorial” y hacemos clic en la opción “Crear diseño factorial”.

Figura 25

Crear diseño factorial en Minitab

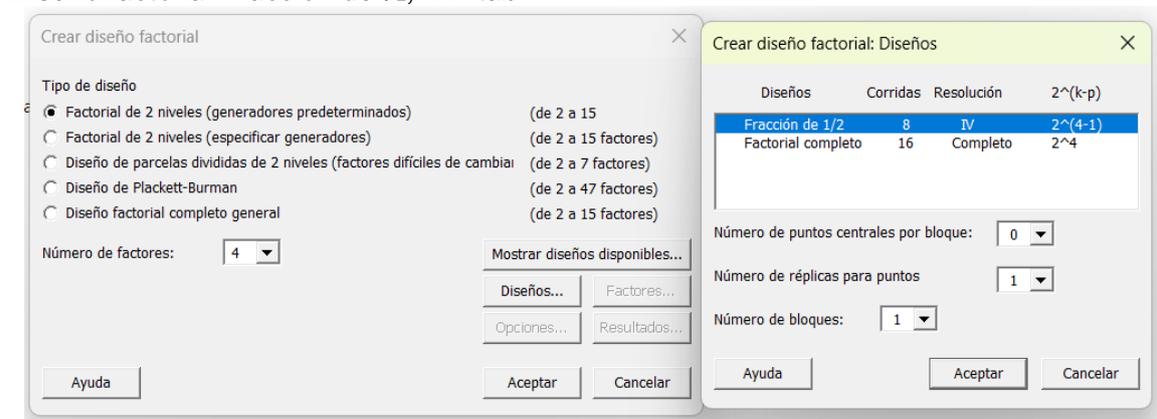


Fuente: Elaboración propia

En la ventana que despliega damos clic a “Factorial de 2 niveles (generadores predeterminados)”, colocamos en número de factores “4”, no dirigimos a Diseños y damos click a “Fracción de 1/2”

Figura 26

Diseño factorial Fracción de 1/2, Minitab



Fuente: Elaboración propia

Procedemos a nombrar nuestros factores o parámetros operacionales como Grado de liberación (%), H2SO4 (Kg/ton), P80 (mm), y flujo de inundación, damos clic en aceptar.

Figura 27

Ventana Crear diseño factorial: Factores

Factor	Nombre	Tipo	Bajo	Alto
A	Grado de libe	Numérico	15	25
B	H2SO4	Numérico	28	32
C	P80	Numérico	6.6	7
D	Flujo Inundac	Numérico	330	430

Fuente: Elaboración propia

Procedemos a ejecutar clic en “Opciones”, donde desactivaremos la pestaña de aleatorizar corridas, esto con el objetivo de tener ordenado nuestras corridas. Las otras opciones se mantienen igual. Finalmente, clic en “Aceptar”.

Figura 28

Ventana Crear diseño factorial: Opciones

Plegar diseño

No plegar

Plegar en todos los factores

Plegar sólo en el factor:

Fracción

Utilizar fracción principal

Utilizar fracción número:

Aleatorizar corridas

Base para el generador de datos aleatorios:

Almacenar diseño en hoja de trabajo

Fuente: Elaboración propia

En la ventana general de “Crear diseño factorial”, le damos clic en “Aceptar” y finalmente nuestro diseño factorial fraccionado estará creado con las 8 diferentes pruebas hidrometalúrgicas con diferentes controles que realizaremos en el laboratorio hidrometalúrgico.

Tabla 14

Plantilla de Diseño Factorial Fraccionado

N°	PLANTILLA CODIFICADA				PLANTILLA DECODIFICADA			
	Pruebas	X1	X2	X3	X4	Grado de liberación (%)	H2SO4 (kg/ton)	P80 (mm)
1	-1	-1	-1	-1	15	28	6.6	330
2	1	-1	-1	1	25	28	6.6	430
3	-1	1	-1	1	15	32	6.6	430
4	1	1	-1	-1	25	32	6.6	330
5	-1	-1	1	1	15	28	7.0	430
6	1	-1	1	-1	25	28	7.0	330
7	-1	1	1	-1	15	32	7.0	330
8	1	1	1	1	25	32	7.0	430

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

Análisis ley de rebose

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO							
PROCEDENCIA: ÓXIDOS							
ANÁLISIS LEY DE REBOSE						RESULTADOS	
NUMERO DE ORDEN DE TRABAJO	FECHA	DESCRIPCIÓN DE MUESTRA	HORA DE MUESTREO	HORA DE INGRESO	TURNOS	Cu (g/L)	FAT (g/L)
1	3/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.65	14.52
2	5/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.54	14.72
3	7/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.21	15.00
4	9/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.95	13.70
5	11/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.05	9.52
6	13/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.36	11.77
7	19/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.80	11.11
8	23/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	18.00	8.82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Resultados del diseño factorial fraccionado con la plantilla decodificada Ley de rebose PLS HG (g/l) de cobre y consumo de ácido por batea (g/l).

Pruebas	PLANTILLA DECODIFICA				PLS HG	Ácido a batea
	N°	Grado de liberación (%)	H2SO4 (kg/ton)	P80 (mm)	Flujo Inundación (m3/h)	g/l
1	15	28	6.6	330	16.65663	14.52
2	25	28	6.6	430	17.54298	14.72
3	15	32	6.6	430	17.21257	15.00
4	25	32	6.6	330	17.9545	13.70
5	15	28	7.0	430	16.05913	9.52
6	25	28	7.0	330	17.36887	11.77
7	15	32	7.0	330	16.80897	11.11
8	25	32	7.0	430	18	8.82

Fuente: Elaboración propia

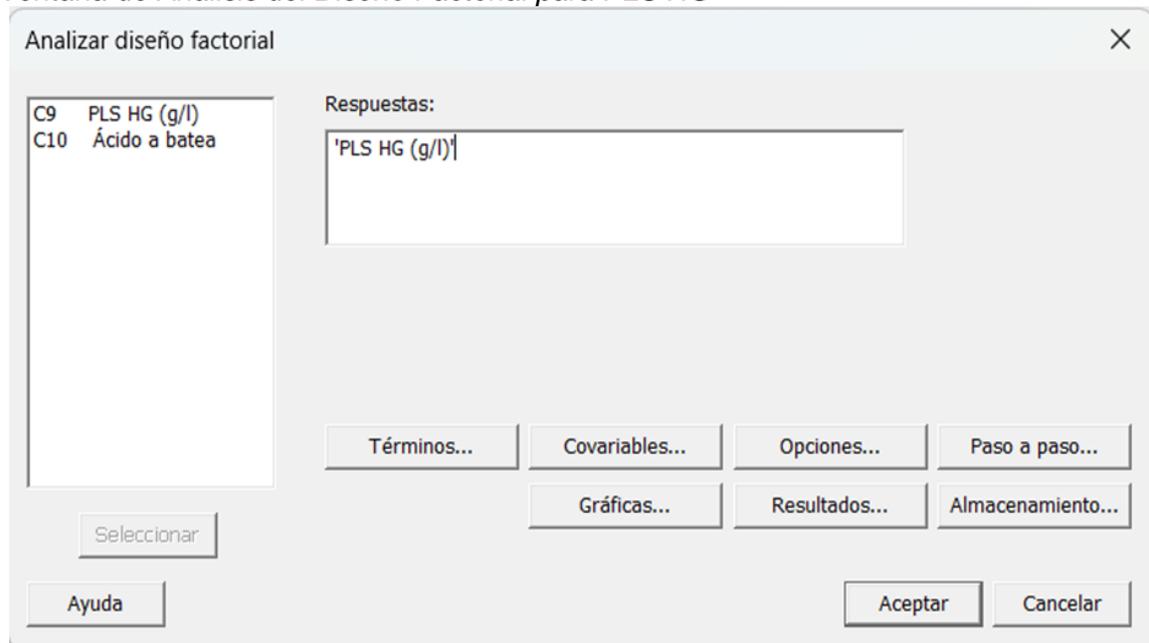
De los resultados analizaremos la ley de rebose PLS HG de cobre y la dosificación de ácido a la batea de lixiviación con el objetivo de encontrar las variables más significativas. El análisis de todos estos resultados experimentales nos basaremos en métodos estadísticos inferenciales, también llamado análisis de varianza o “ANOVA”.

3.5.1 Análisis a la ley de rebose PLS HG

Nos dirigimos a la opción “DOE” nuevamente, luego la opción “Factorial”, seguidamente seleccionemos “Analizar diseño factorial” en el cual aparecerá un cuadro donde seleccionamos la primera variable de respuesta que es el “%recuperación de cobre” y le damos en “Aceptar”.

Figura 29

Ventana de Análisis del Diseño Factorial para PLS HG



Fuente: Elaboración propia

Nos aparecerá la Regresión factorial del PLS HG versus el Grado de liberación, H2SO4 (kg/ton), P80(mm), flujo de inundación en el cual analizaremos lo siguiente:

Coefficientes codificados

Tabla 17

Coefficientes codificados para PLS HG

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		17.2	*	*	*	
Grado de liberación	1.0324	0.5162	*	*	*	1
H2SO4	0.5872	0.2936	*	*	*	1
P80	-0.2824	-0.1412	*	*	*	1
Flujo de inundación	0.006431	0.003215	*	*	*	1
Grado de liberación*H2SO4	-0.06579	-0.03289	*	*	*	1
Grado de liberación*P80	0.2181	0.1091	*	*	*	1
Grado de liberación*Flujo de inundación	0.10338	0.05169	*	*	*	1

Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Los valores de la tabla tienen valores positivos y negativos, lo que me indica esto es la pendiente que tiene cada valor, para la gráfica de efectos de igual manera diremos que según el valor, éste tendrá pendiente positiva o negativa

Respecto a los valores de los efectos de las variables controlables no me dicen si son significantes o no significantes para la variable respuesta (PLS HG).

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Ecuación : Ecuación de regresión en unidades no codificadas para PLS HG

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{PLS G (g/l)} = & 29.94 - 0.6183 \text{ Grado de liberación} + 0.2126 \text{ H2SO4} - 2.888 \text{ P80} \\
 & - 0.004071 \text{ Flujo de inundación} - 0.003289 \text{ Grado de liberación} \cdot \text{H2SO4} \\
 & + 0.1091 \text{ Grado de liberación} \cdot \text{P80} \\
 & + 0.000207 \text{ Grado de liberación} \cdot \text{Flujo de inundación}
 \end{aligned}$$

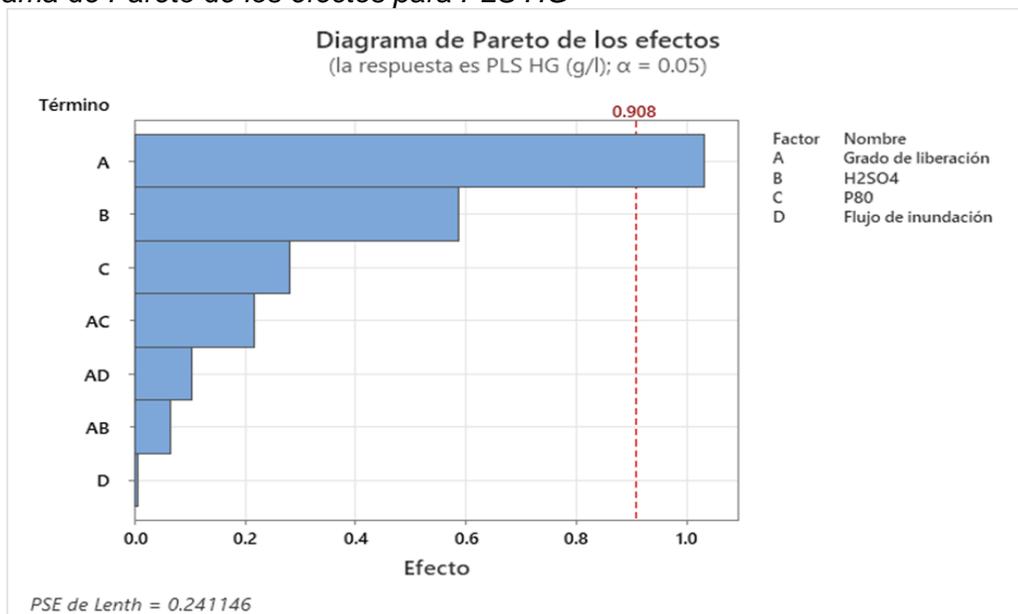
Análisis e interpretación:

Es una ecuación de orden lineal que nos da a conocer los coeficientes de cada una de las variables y de las combinaciones posibles, con el objetivo, de que, antes de realizar una prueba de lixiviación, simplemente ponemos los datos como H2SO4(kg/l), P80(mm), Flujo de inundación que son las variables controlables (Grado de liberación, H2SO4) que queremos usar y nos dará como resultado la ley de rebose PLS HG de cobre para no realizar dicha prueba de lixiviación innecesariamente, ya que esto implica costo en el consumo de reactivos, energía, análisis y tiempo.

Diagrama de Pareto de los efectos para la ley de rebose PLS HG de cobre

Figura 30

Diagrama de Pareto de los efectos para PLS HG



Fuente: Elaboración propia

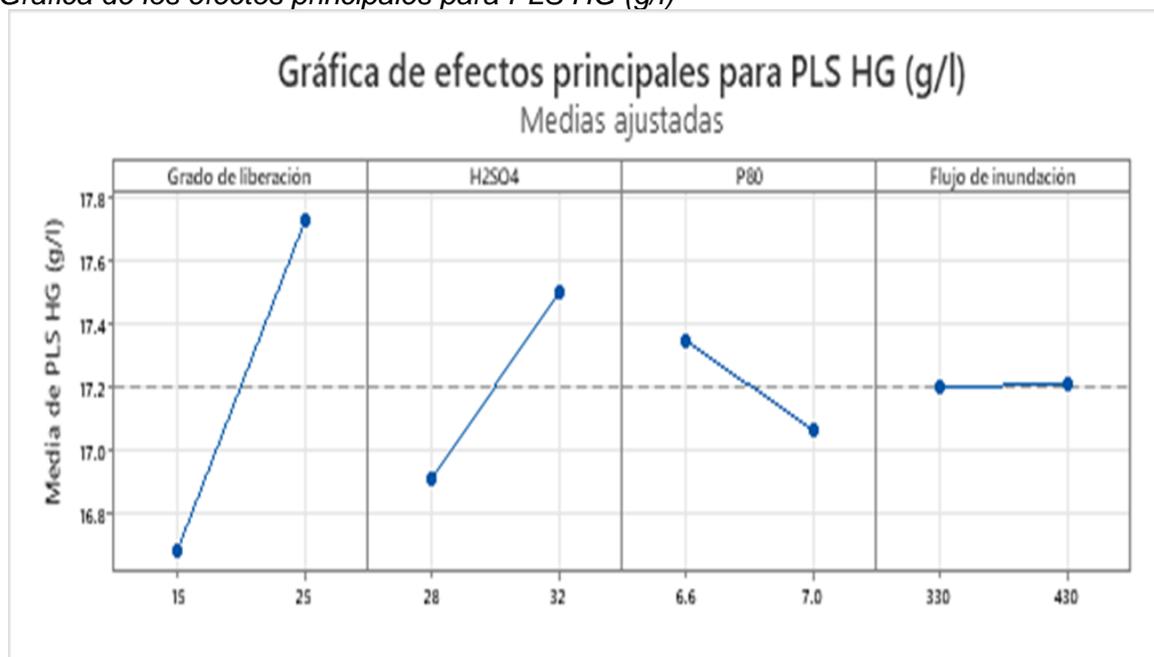
Análisis e interpretación:

El diagrama de Pareto es muy importante respecto a la significancia y no significancia de las variables controlables en la variable respuesta (PLS HG de Cu). Para nuestro caso tenemos que A es el Grado de liberación, B es H₂SO₄ (kg/ton), C es el P80 (mm) y D es el Flujo de inundación (m³/h). La línea punteada vertical de color rosa es un valor que muestra los efectos de cada una de las variables y que en función de ello nos indica como un límite para que una variable controlable sea significativa o no significativa frente a la variable respuesta que en nuestro caso es la ley de rebose PLS HG de cobre, entonces podemos concluir que el factor A (Grado de liberación) es significante frente a la variable respuesta (PLS HG de cobre).

Grafica de los efectos principales para el % de recuperación de cobre

Figura 31

Gráfica de los efectos principales para PLS HG (g/l)



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Podemos decir que:

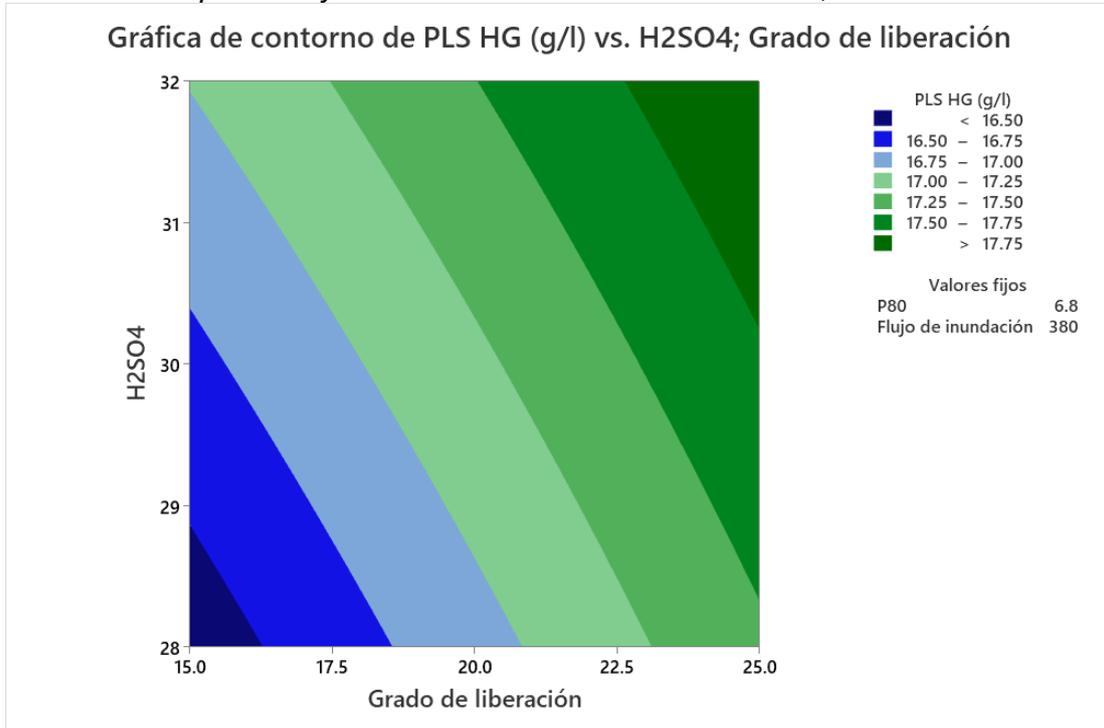
- Si una variable controlable tiene una pendiente positiva pronunciada, entonces será muy significativa en forma favorable para el aumento de la ley de rebose PLS HG de cobre.

- Si una variable controlable tiene una pendiente positiva pero no pronunciada, entonces también será significativa en forma favorable para el aumento de la ley de rebose PLS HG de cobre.
- Si una variable controlable tiene una pendiente negativa pronunciada, entonces también será muy significativa en forma favorable para la disminución de la ley de rebose PLS HG de cobre.
- Si una variable controlable tiene una pendiente negativa pero no pronunciada, entonces podemos decir que será significativa en forma favorable para la disminución del de la ley de rebose PLS HG de cobre.
- Si una variable controlable es de forma horizontal, entonces significa que dicha variable no tiene ningún efecto sobre de la ley de rebose PLS HG de cobre. a cualquier dosificación de ácido sulfúrico (g/l) a la batea de lixiviación que se le asigne.

Gráfica de contorno del PLS HG(g/l) vs H2SO4(kg/ton);Grado de liberación(%)

Figura 32

Gráfica contorno para la ley de rebose PLS HG de Cu vs H2SO4; Grado de liberación



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Esta gráfica está dividida por zonas de colores azules y verdes de menor a mayor intensidad y en los ejes solo de las variables significativas para la Ley de rebose PLS HG de cobre. En la parte derecha se observa la ley de rebose PLS HG de cobre de acuerdo con las intensidades de las zonas y que valores se mantienen fijos (P80 y Flujo de inundación).

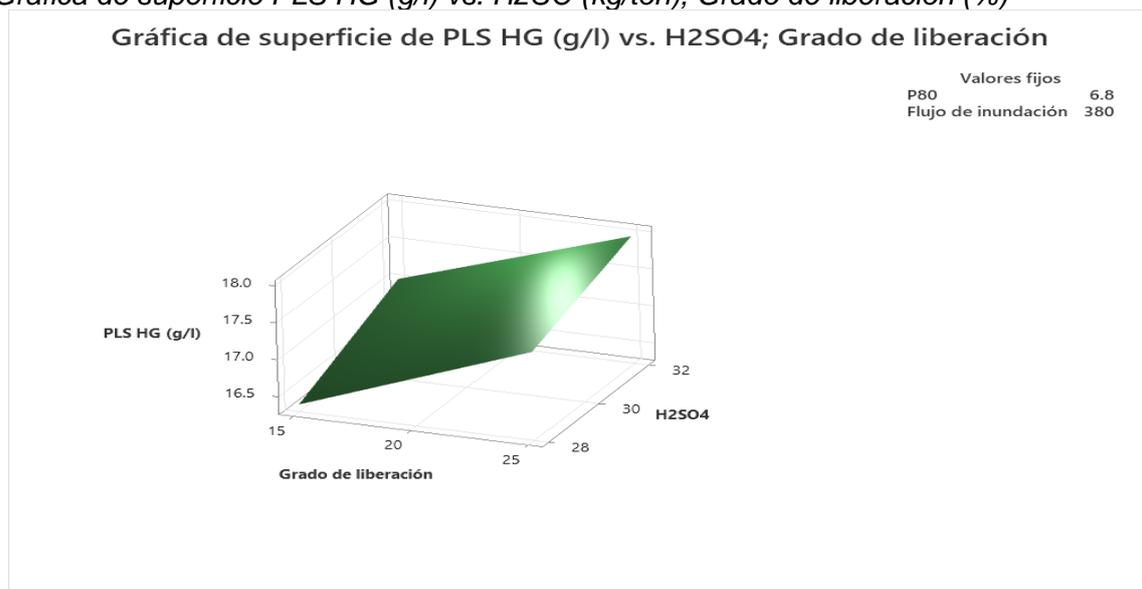
Esta grafica la analizamos de la siguiente manera:

- Las zonas de color azul menos intenso son de menor Ley de Rebose PLS HG de cobre que se puede llegar a obtener y las zonas de color verde más intenso son de mayor Ley de Rebose PLS HG de cobre que se puede llegar a obtener en una lixiviación.
- A medida que aumentamos el % de Grado de liberación y el consumo de H2SO4 Ley de Rebose PLS HG de cobre incrementa.

Gráfica de superficie PLS HG (g/l) de cobre vs. H2SO (kg/ton), Grado de liberación (%)

Figura 33

Gráfica de superficie PLS HG (g/l) vs. H2SO (kg/ton); Grado de liberación (%)



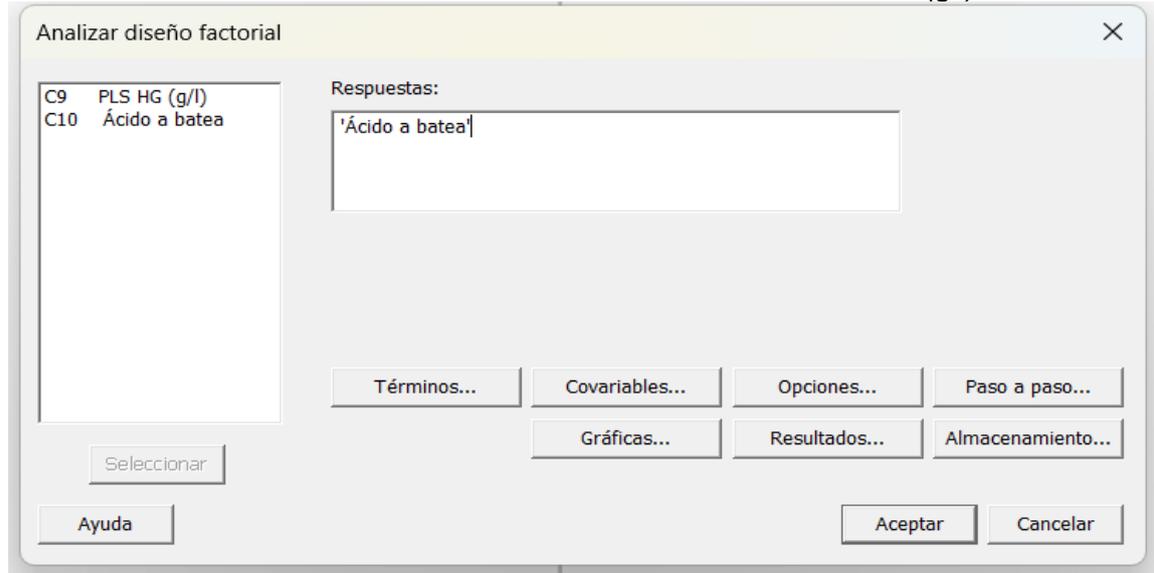
Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Análisis a dosificación de ácido a una batea de lixiviación.

En la pantalla de Minitab 22 seleccionamos “DOE”, luego la opción “Factorial”, luego hacemos click en “Analizar diseño factorial” en el cual aparecerá un cuadro donde seleccionamos la variable de respuesta que es el “Ácido a batea” y ejecutamos “Aceptar”.

Figura 34

Ventana de análisis de diseño factorial de Ácido a batea de Lixiviación (g/l)



Fuente: Elaboración propia

Inmediatamente Minitab 22 ejecutará la Regresión factorial de Ácido a batea de Lixiviación (g/l) versus el Grado de liberación (%); H₂SO₄; P80; Flujo de Inundación, en el cual analizaremos lo siguiente:

Coefficientes codificados

Tabla 18

Coefficientes codificados de Ácido a batea (g/l)

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		12.4	*	*	*	
Grado de liberación	-0.285	-0.1425	*	*	*	1
H ₂ SO ₄	-0.4804	-0.2402	*	*	*	1
P80	-4.179	-2.089	*	*	*	1
Flujo de inundación	-0.7584	-0.3792	*	*	*	1
Grado de liberación*H ₂ SO ₄	-1.5099	-0.7549	*	*	*	1
Grado de liberación*P80	0.2668	0.1334	*	*	*	1
Grado de liberación*Flujo de inundación	-0.2034	-0.1017	*	*	*	1

Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Los valores de la tabla tienen valores positivos y negativos, lo que me indica esto es la pendiente que tiene cada valor, para la gráfica de efectos de igual manera diremos que según el valor, éste tendrá pendiente positiva o negativa

Respecto a los valores de los efectos de las variables controlables no me dicen si son significantes o no significantes para la variable respuesta (Ácido a batea (g/l)).

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Ecuación 3.3: Ecuación de regresión en unidades no codificadas de Ácido a batea (g/l)

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Ácido a batea} = & 60.24 + 1.484 \text{ Grado de liberación} + 1.390 \text{ H}_2\text{SO}_4 - 13.11 \text{ P80} \\ & + 0.000553 \text{ Flujo de inundación} - 0.07549 \text{ Grado de liberación} * \text{H}_2\text{SO}_4 \\ & + 0.1334 \text{ Grado de liberación} * \text{P80} \\ & - 0.000407 \text{ Grado de liberación} * \text{Flujo de inundación} \end{aligned}$$

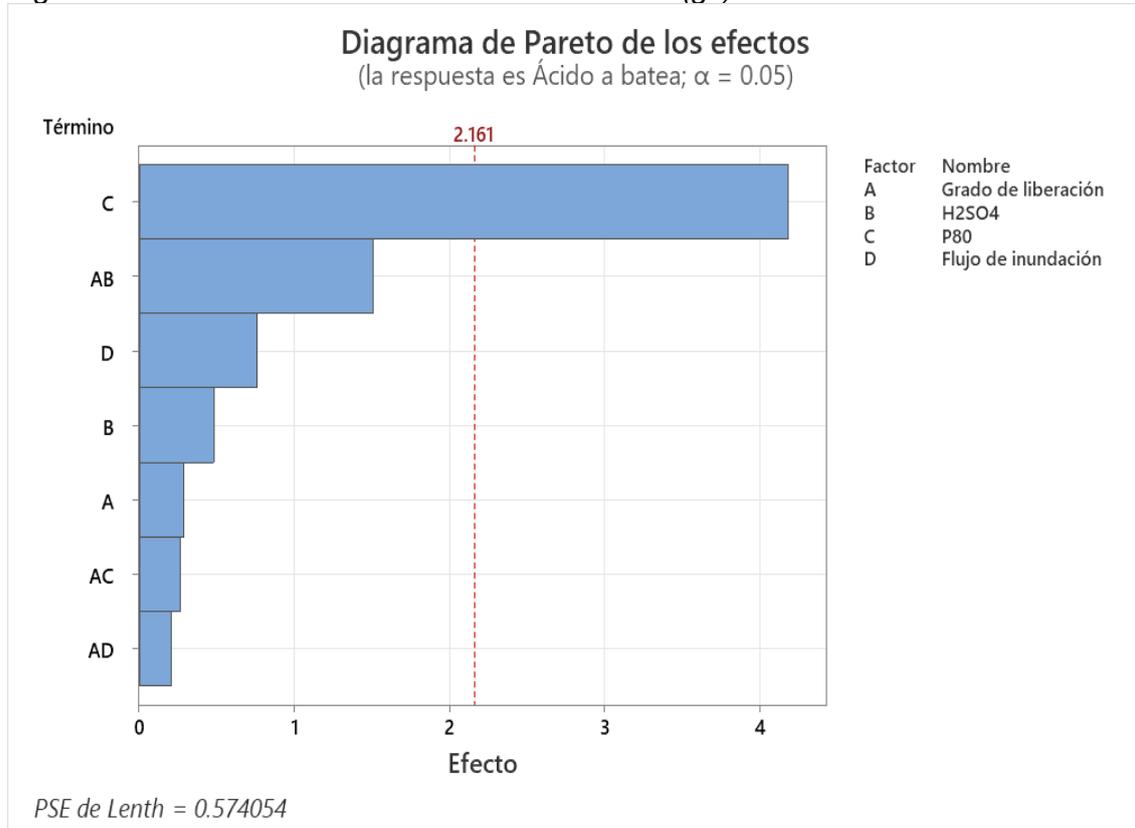
Análisis e interpretación:

Es una ecuación de orden lineal que nos da a conocer los coeficientes de cada una de las variables y de las combinaciones posibles, con el objetivo de que antes de realizar una prueba de lixiviación, simplemente ponemos los datos como H₂SO₄(kg/l), P80(mm), Flujo de inundación que son las variables controlables (Grado de liberación, H₂SO₄) que queremos usar y nos dará como resultado el consumo de Ácido en batea en (g/l) para no realizar dicha prueba de lixiviación innecesariamente, ya que esto implica costo en el consumo de energía, ácido, análisis y tiempo.

Diagrama de Pareto de los efectos de Ácido a batea (g/l)

Figura 35

Diagrama de Pareto de los efectos de Ácido a batea (g/l)



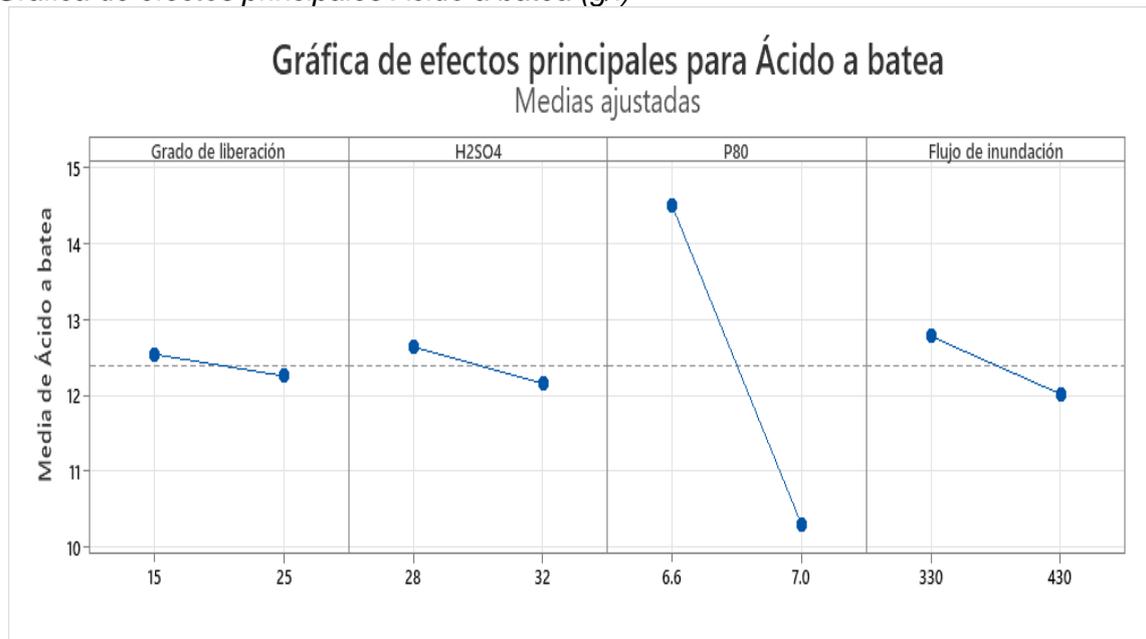
Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

El diagrama de Pareto es muy importante respecto a la significancia y no significancia de las variables controlables en la variable respuesta (Ácido a batea (g/l)). Para nuestro caso tenemos que A es el Grado de liberación, B es H2SO4 (kg/ton), C es el P80 (mm) y D es el Flujo de inundación (m³/h). La línea punteada vertical de color rosa es un valor que muestra los efectos de cada una de las variables y que en función de ello nos indica como un límite para que una variable controlable sea significativa o no significativa frente a la variable respuesta que en nuestro caso es el consumo de Ácido a batea de lixiviación (g/l), entonces podemos concluir que el factor C (P80) es significante frente a la variable respuesta (Ácido a batea (g/l)).

Figura 36

Gráfica de efectos principales Ácido a batea (g/l)



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

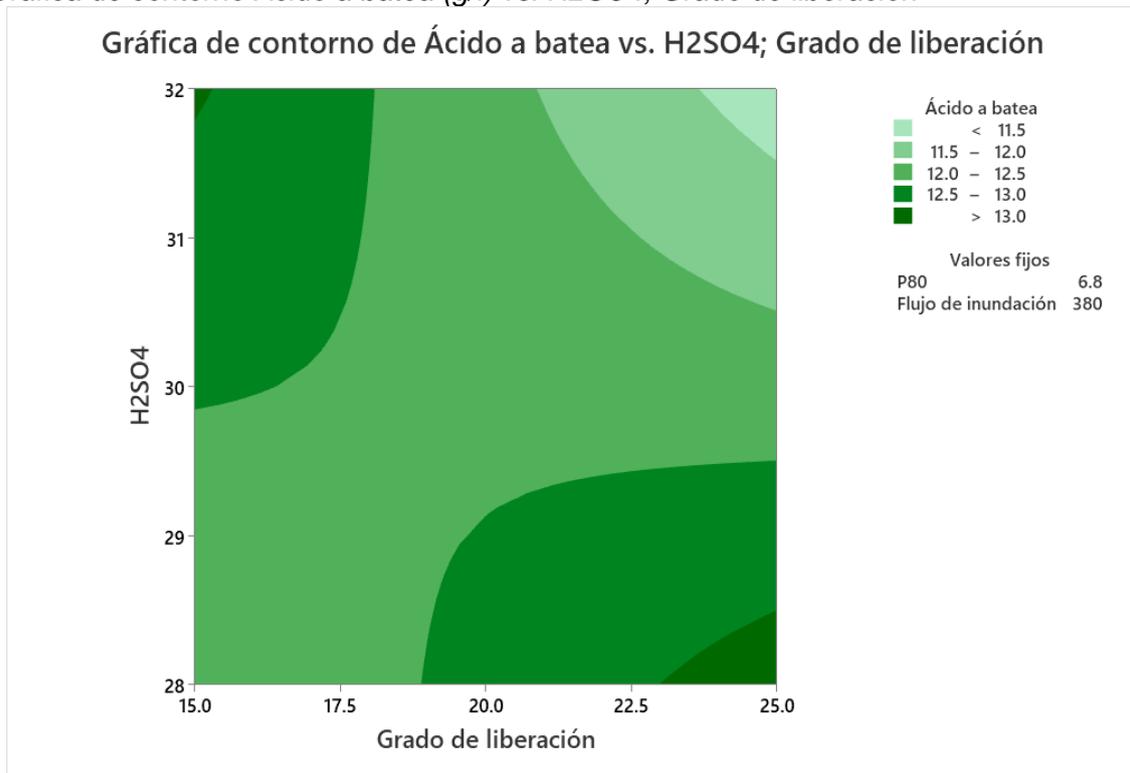
Podemos decir que:

- Si una variable controlable tiene una pendiente positiva pronunciada entonces será muy significativa en forma favorable para el aumento de Ácido a batea (g/l).
- Si una variable controlable tiene una pendiente positiva pero no pronunciada entonces también será significativa en forma favorable para el aumento de Ácido a batea (g/l).
- Si una variable controlable tiene una pendiente negativa pronunciada, entonces también será muy significativa en forma favorable para la disminución de Ácido a batea (g/l).
- Si una variable controlable tiene una pendiente negativa pero no pronunciada, entonces podemos decir que será significativa en forma favorable para la disminución de Ácido a batea (g/l).
- Si una variable controlable es de forma horizontal entonces significa que dicha variable no tiene ningún efecto sobre Ácido a batea (g/l).

Gráfica de contorno de Ácido a batea (g/l) vs H2SO4, %Grado de liberación

Figura 37

Gráfica de contorno Ácido a batea (g/l) vs. H₂SO₄, Grado de liberación



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Esta gráfica está dividida por zonas de color verde de menor a mayor intensidad y en los ejes solo de las variables significativas para el Ácido a batea (g/l). En la parte derecha se observa el consumo de Ácido a batea (g/l) de acuerdo con las intensidades de las zonas y que valores se mantienen fijos (P80 y Flujo de inundación).

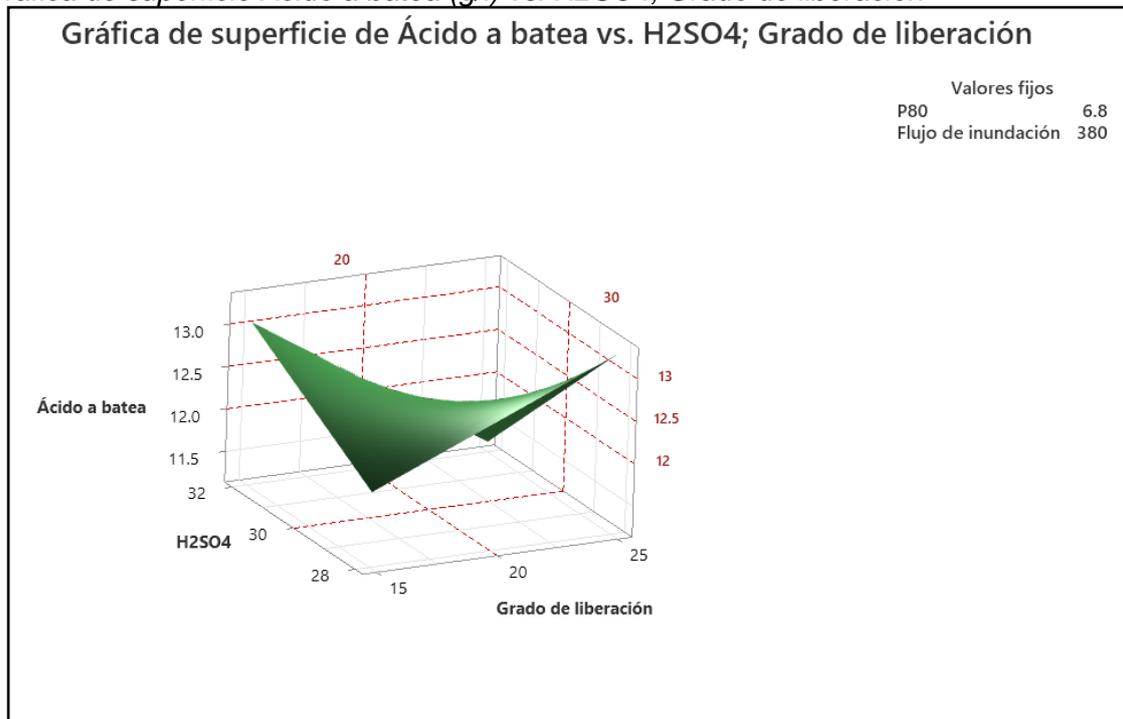
Esta grafica lo analizamos de la siguiente manera:

- Las zonas de color verde menos intenso son de menor consumo Ácido a batea (g/l) que se puede llegar a obtener y las zonas de color verde más intenso son de mayor consumo Ácido a batea (g/l) que se puede llegar a obtener en una lixiviación.
- A medida que aumentamos el % de Grado de liberación y el consumo de H₂SO₄ el consumo de Ácido a batea (g/l) aumenta.

Gráfica de superficie Ácido a batea (g/l) vs. H₂SO₄, Grado de liberación

Figura 38

Gráfica de superficie Ácido a batea (g/l) vs. H₂SO₄, Grado de liberación



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Esta gráfica nos da la información completa en tres dimensiones del Ácido a batea (g/l), H₂SO₄ (kg/ton), Grado de liberación (%), manteniendo fijos los valores de P80 (mm) y Flujo de Inundación (m³/h). A medida que aumentamos el consumo de H₂SO₄ disminuye el consumo de ácido a la batea de lixiviación y a medida que aumenta el grado de liberación (%) también disminuye el consumo de ácido a la batea de lixiviación. Todas estas tablas y graficas que hemos visualizado anteriormente son muy importantes ya que guardan relación y confirman de manera óptima cuales son las variables controlables más significantes y las no significantes disminuye el consumo de ácido a la batea de lixiviación, donde se concluye que el P80 (mm) es la variable controlable más “Significante” para la disminución del consumo de ácido a la batea de lixiviación.

Conclusiones y recomendaciones

- Para el aumento de la ley de Rebose PLS HG de la batea de lixiviación, las variables más significativas son las variables controlables: “Grado de liberación (%)”.

- Para la reducción de consumo de Ácido a batea (g/l), las variables más significativas son las variables controlables: “P80 (mm)”.
- Nuestro objetivo de este estudio es reducir el consumo de Ácido a batea de Lixiviación en el proceso Hidrometalúrgico de Lixiviación de cobre, y por otro lado quedo demostrado que el Flujo de inundación (m³/h) y el ratio de H₂SO₄ (kg/ton) de curado no son influyentes; por lo que los valores de dichas variables controlables para el caso Flujo de inundación (m³/h) lo mantendremos en su máximo valor y en el caso del H₂SO₄(kg/ton) se mantendrá en su valor de consumo obtenido en proceso de planta.
- Se recomienda realizar un diseño octogonal para optimizar la reducción del consumo de Ácido a batea de Lixiviación en el proceso Hidrometalúrgico de Lixiviación
- Al realizar el diseño octogonal para optimizar la reducción del consumo de Ácido a batea de Lixiviación en el proceso Hidrometalúrgico de Lixiviación se obtendrán 13 nuevas pruebas Hidrometalúrgicas de lixiviación a realizarse, manteniendo constantes el Flujo de Inundación(m³/h) y el consumo de H₂SO₄ (kg/ton), para el proceso hidrometalúrgico de lixiviación.

3.6 Planteamiento de las variables controlables en la formulación del diseño octogonal para optimizar la reducción del del consumo de Ácido en Bateas en el proceso hidrometalúrgico de Lixiviación.

La siguiente tabla muestra el rango de las variables en términos o unidades reales, se tiene en consideración que la prueba central representa aproximadamente el valor histórico de aplicación de las variables en la operación de planta de oxidación, la amplitud del rango es equidistante al punto central representando valores máximos y mínimos posibles de aplicar y necesarios de estudiar.

Tabla 19

Rango de las variables controlables para la optimización de reducción del consumo de Ácido en Bateas(g/l) de Lixiviación.

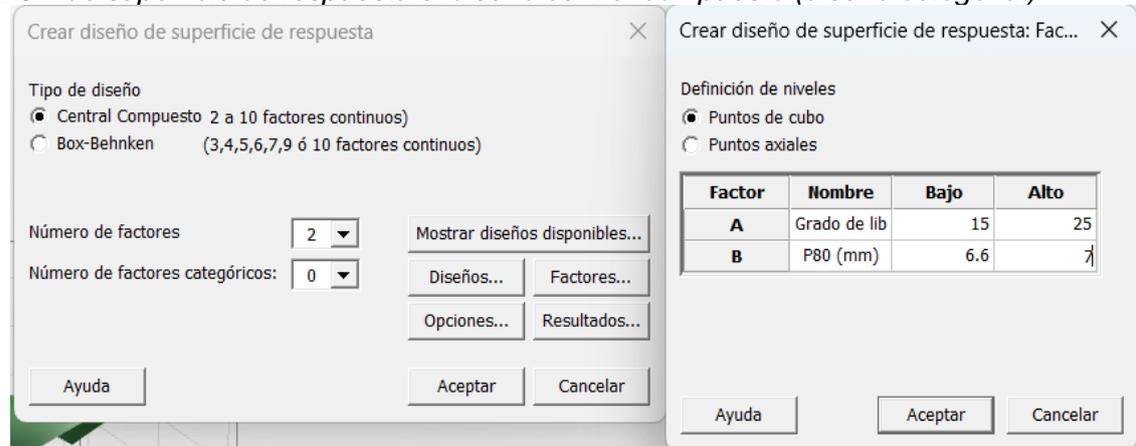
VARIABLES	-1	0	1
Grado de liberación (%)	15	20	25
P80 (mm)	6.6	6.8	7

Fuente: Elaboración propia

Estos datos se pondrán en el software Minitab 22 mediante el DOE de superficie de respuesta el diseño central compuesto (diseño octogonal); el cual nos proporcionara una serie de 13 nuevas pruebas hidrometalúrgicas del proceso de lixiviación para ejecutarlos.

Figura 39

DOE de superficie de respuesta el diseño central compuesto (diseño octogonal)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Plantilla Diseño Octogonal reducción del consumo de Ácido en Bateas(g/l)

N°	PLANTILLA CODIFICADA		PLANTILLA DECODIFICADA	
Pruebas	X1	X2	Grado de liberación (%)	P80 (mm)
1	-1	-1	15	6.6
2	1	-1	25	6.6
3	-1	1	15	7
4	1	1	25	7
5	-1.41421	0	12.92893219	6.8
6	1.41421	0	27.07106781	6.8
7	0	-1.41421	20	6.517157288
8	0	1.41421	20	7.082842712
9	0	0	20	6.8
10	0	0	20	6.8
11	0	0	20	6.8
12	0	0	20	6.8
13	0	0	20	6.8

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las pruebas hidrometalúrgicas de Lixiviación de óxidos de cobre del diseño octogonal se muestran a continuación

Tabla 21

Análisis químico de ácido

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO								
PROCEDENCIA: ÓXIDOS PUNTUALES (OXF)								
ANÁLISIS ÁCIDO								Resultados
Número de orden de trabajo	Fecha	Descripción de muestra	Hora de muestreo	Hora de ingreso	Turno	% Grado liberación	P80 (mm)	FAT (g/l)
1	2/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	15	6.6	15.37
2	3/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	25	6.6	10.52
3	7/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	165	7	15.69
4	8/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	25	7	12.76
5	9/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	12.92	6.8	13.23
6	14/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	27.07	6.8	8.94
7	16/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.51	12.89
8	18/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	7.08	13.00
9	24/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.50
10	25/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.72
11	26/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.52
12	1/04/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.38
13	2/04/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.31

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del estudio con el diseño octogonal y la plantilla decodificada revelan cómo cambia la cantidad de ácido utilizada en las bateas de lixiviación en función de diversas configuraciones experimentales.

Tabla 22

Plantilla decodificada por el diseño octogonal del consumo de ácido en bateas(g/l)

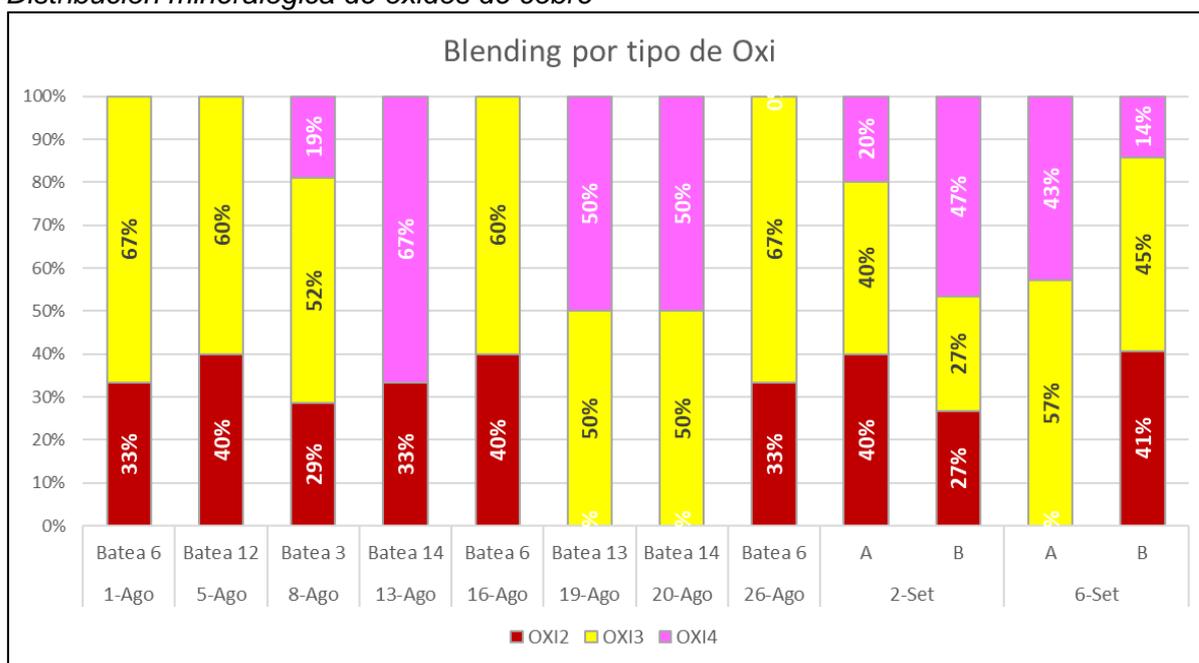
N°	PLANTILLA DECODIFICADA	Ácido en Bateas
Pruebas	Grado de liberación (%)	P80 (mm)
1	15	6.6
2	25	6.6
3	15	7
4	25	7
5	12.92893219	6.8
6	27.07106781	6.8
7	20	6.51715729
8	20	7.08284271
9	20	6.8
10	20	6.8
11	20	6.8
12	20	6.8
13	20	6.8

Fuente: Elaboración propia

De los resultados del balance metalúrgico analizaremos en el capítulo IV el consumo de Ácido en Bateas(g/l) con el objetivo de optimizar los valores del P80 (mm) y el Grado de Liberación (%)

Figura 40

Distribución mineralógica de óxidos de cobre

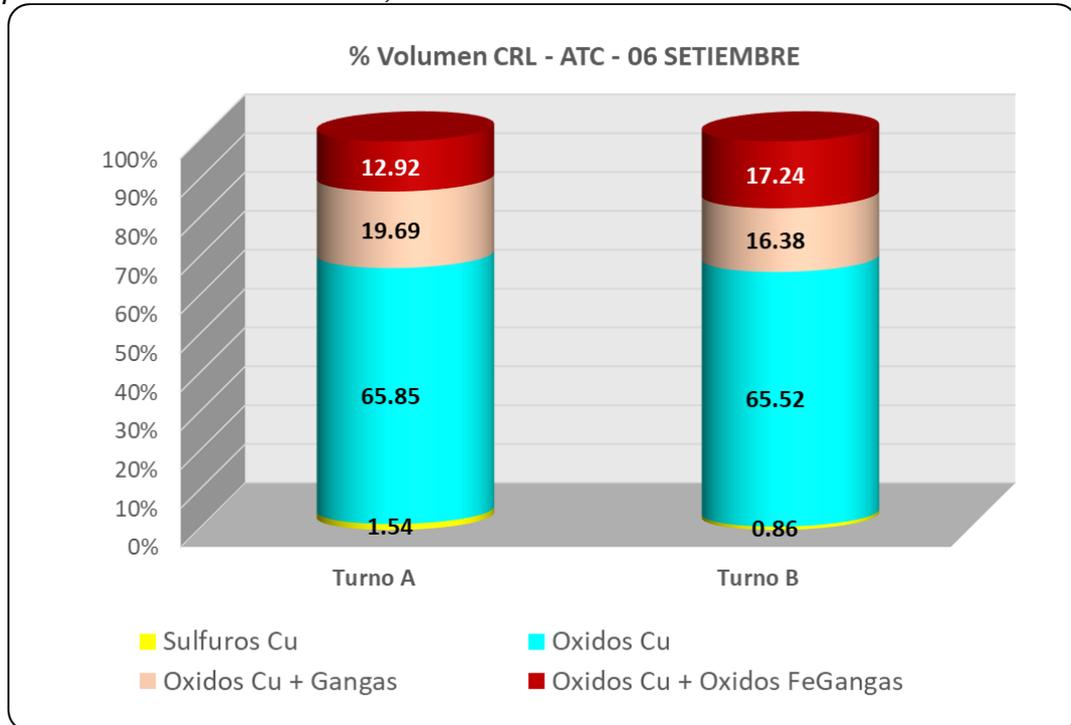


Fuente: Elaboración propia

Distribución mineralógica de cobre:

Figura 41

Proporción en volumen crisocola, Atacamita

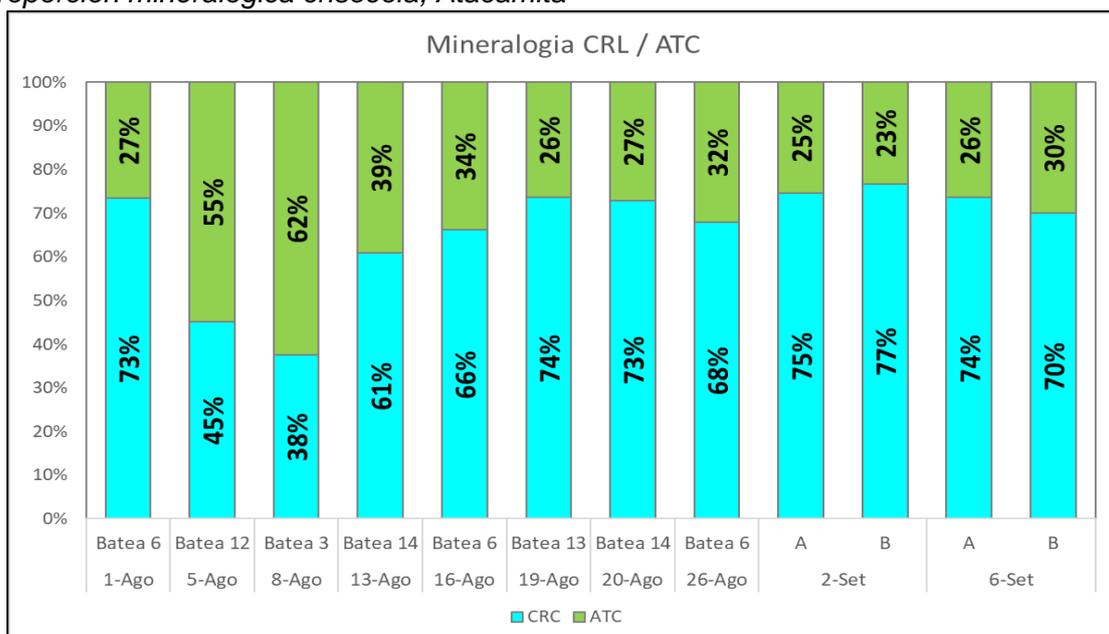


Fuente: Elaboración propia

Incremento de la proporción de 70 % CRL + 29 % ATC (Distribución de óxidos verdes en cabeza)

Figura 42

Proporción mineralógica crisocola, Atacamita



Fuente: Elaboración propia

Figura 43

% grado de liberación y P80

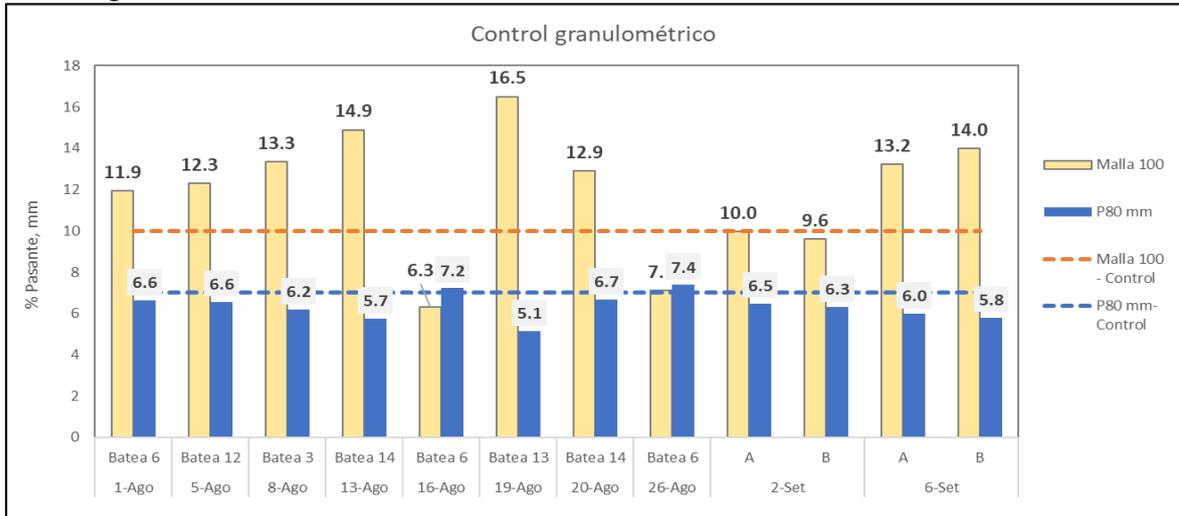


Fuente: Elaboración propia

Se tuvo un P80: 5.8 mm y 14.0% pasante la malla 100.

Figura 44

Control granulométrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 45

Registro fotográfico rebose PLS HG, ley 14.92g Cu/l



Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Registro fotográfico rebose PLS HG, 15.32g Cu/l



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

Registro fotográfico PLS HG 13.03g Cu/l



Fuente: Elaboración propia

Figura 48

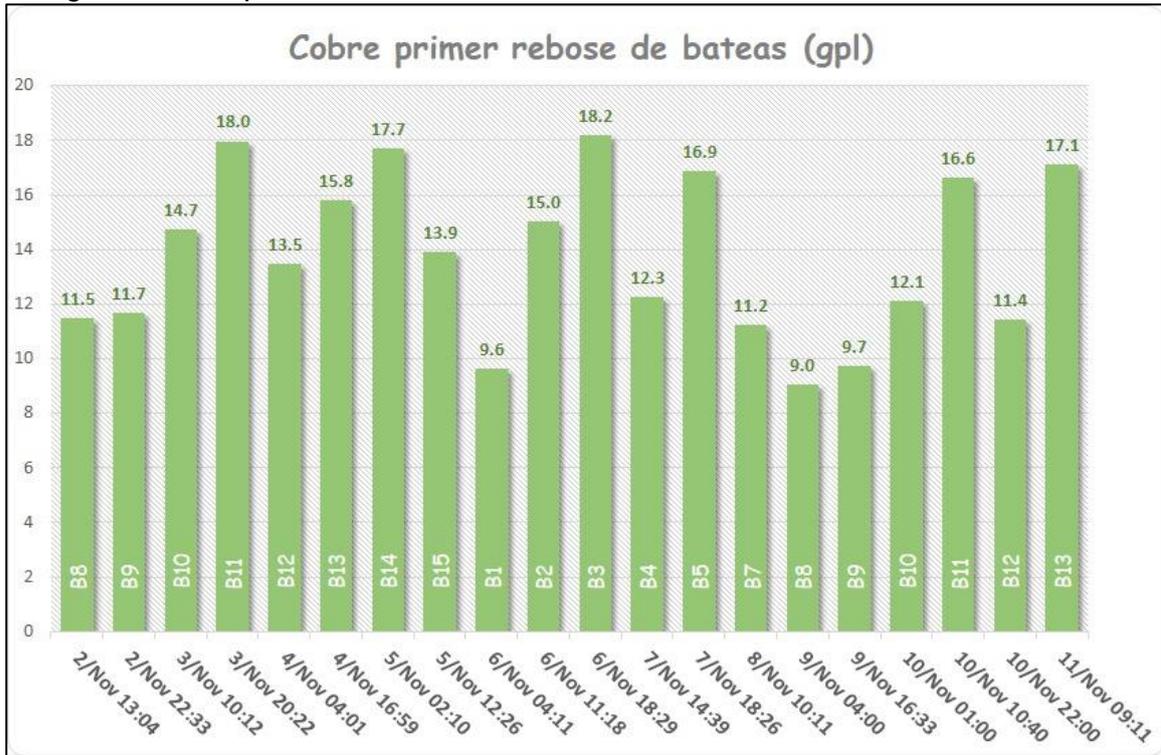
Registro fotográfico PLS HG ley 13.56g Cu/l



Fuente: Elaboración propia

Figura 49

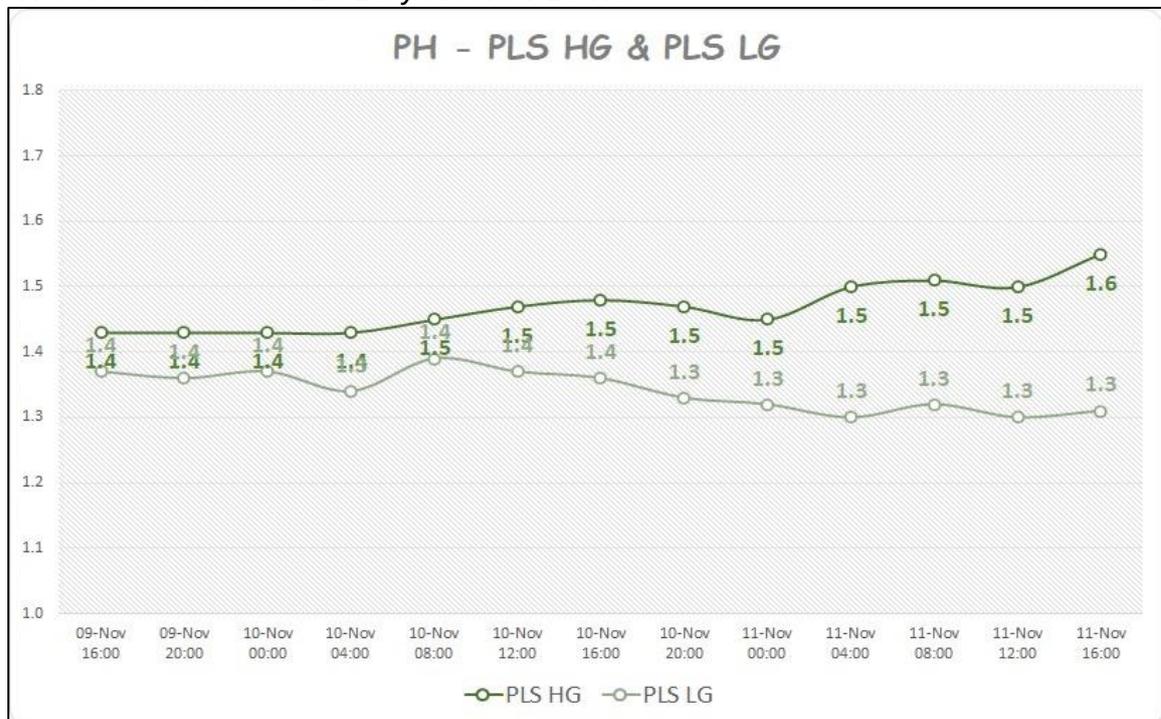
Histograma de los primeros reboses PLS HG de las 15 Bateas de Lixiviación



Fuente: Elaboración propia

Figura 50

PH de rebose circuito PLS LG y circuito PLS HG



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

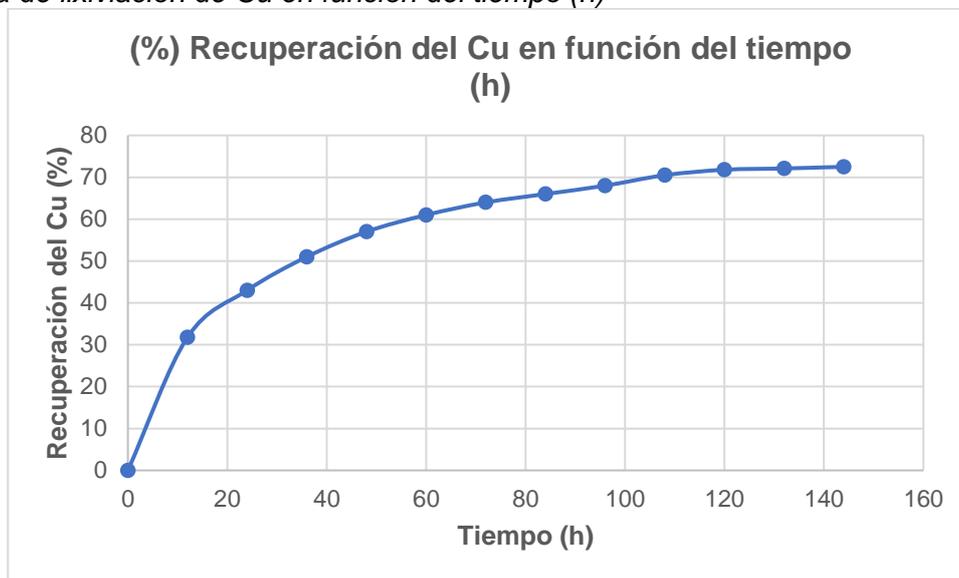
Cinética de Lixiviación del Cobre.

CICLO POR BATEA	TIEMPO (h)
Carguío de Batea	10.9
Cobertura de Solución (75% carga)	2.8
Lixiviación-2 etapas	144
Drenaje Bateas	5
Descarga Bateas	10.1
Preparación Bateas	11.4

Fuente: Elaboración propia

Figura 51

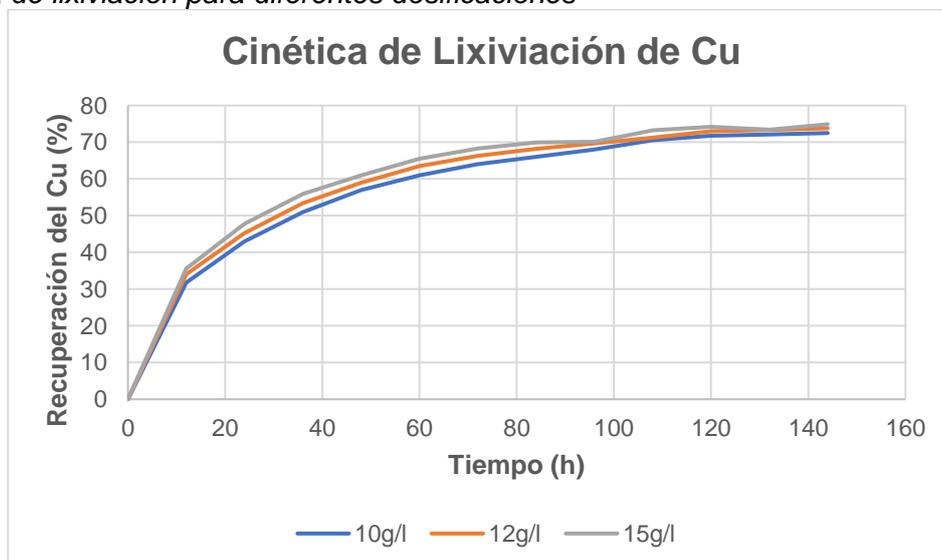
Cinética de lixiviación de Cu en función del tiempo (h)



Fuente: Elaboración propia

Figura 52

Cinética de lixiviación para diferentes dosificaciones

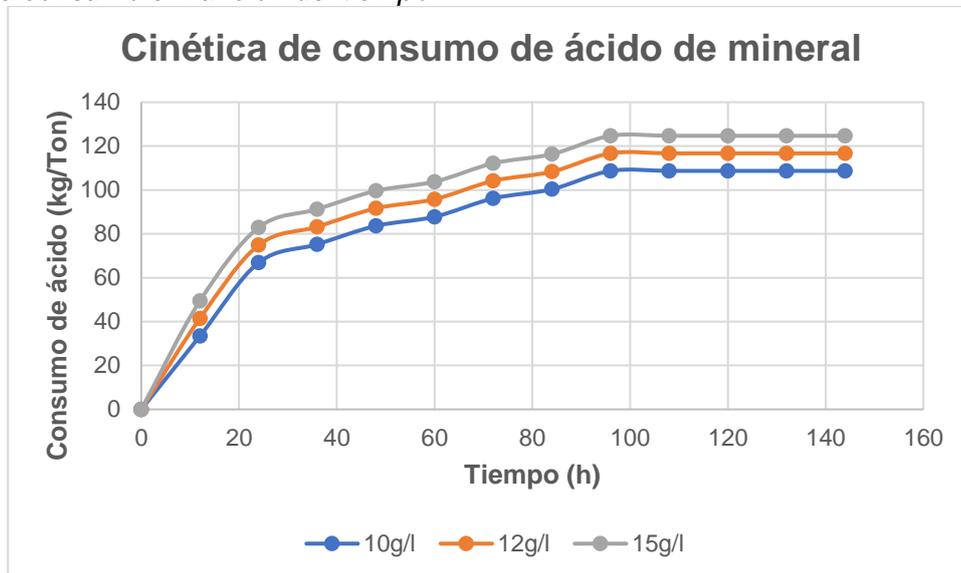


Fuente: Elaboración propia

De la figura presentada se puede apreciar que la cinética del cobre para 10g/l de concentración de ácido sulfúrico presenta una recuperación de 79%.

Figura 53

Ratio de consumo en función del tiempo

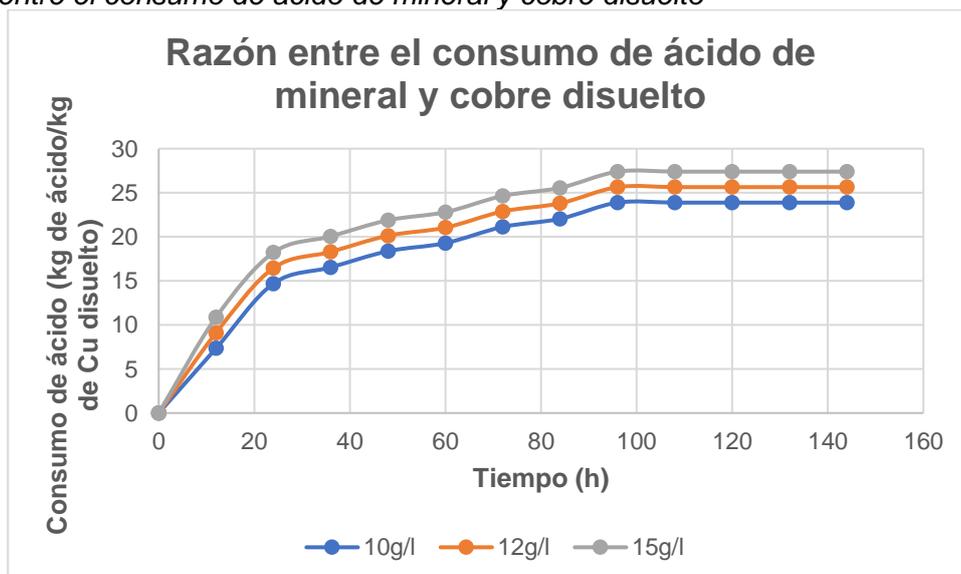


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura, la cinética de consumo de ácido del mineral entrega como resultado que mientras mayor es la concentración de solución lixiviante, mayor es el consumo de ácido.

Figura 54

Razón entre el consumo de ácido de mineral y cobre disuelto

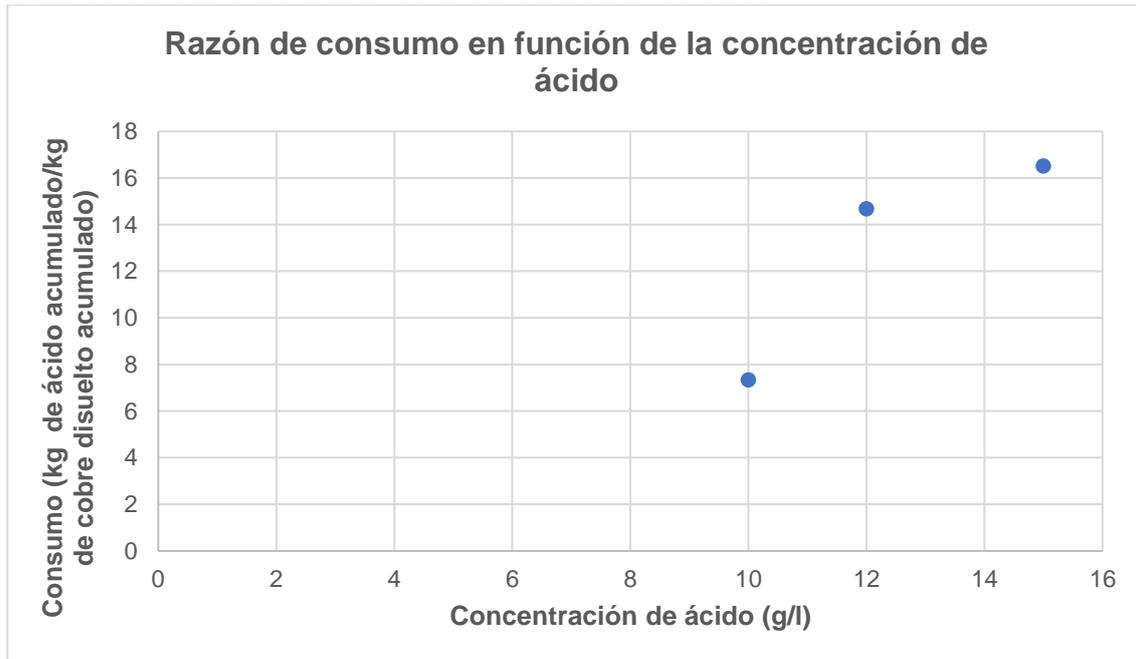


Fuente: Elaboración propia

En la figura, se puede observar que cuando la concentración de ácido en el mineral es superior a 10 gpl, el consumo aumenta en comparación con la cantidad de cobre disuelto en la solución muestra. Esto conlleva a un aumento en el costo de ácido por cada kilogramo de cobre producido.

Figura 55

Razón de consumo en función de la concentración de ácido



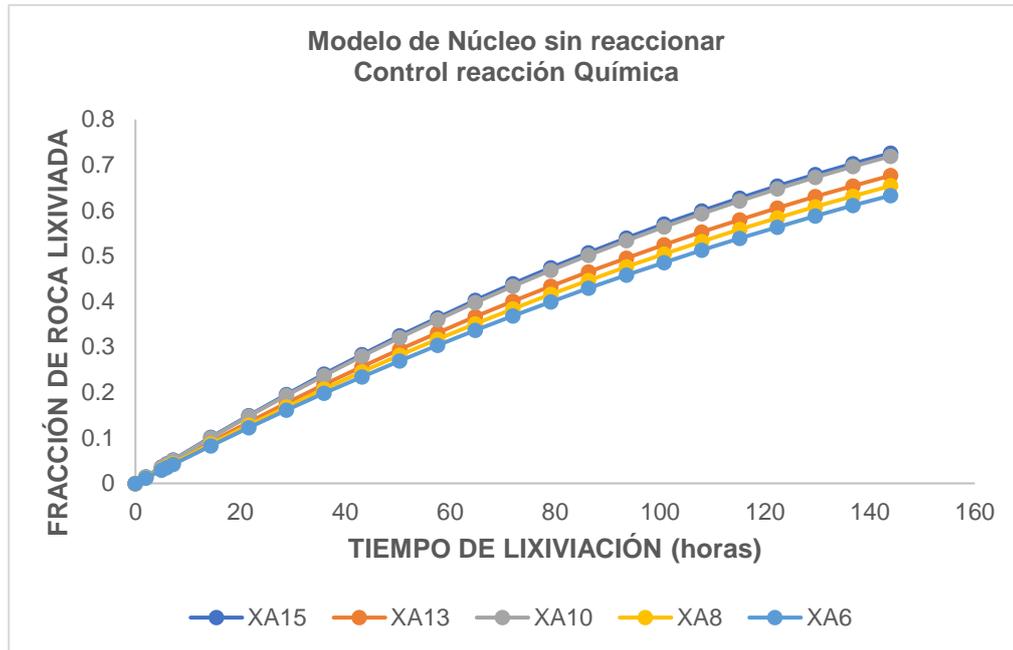
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa que a medida que aumenta la concentración de ácido en la solución de lixiviación, también aumenta el consumo acumulado de ácido del mineral y la cantidad de cobre disuelto acumulado. Sin embargo, después de alcanzar los 5 gramos por litro (gpl) de ácido, el consumo de ácido continúa incrementándose de manera constante sin que se mejore la recuperación de cobre.

Caracterización de la cinética de lixiviación de óxido cobre

Figura 56

Control difusional del NSR

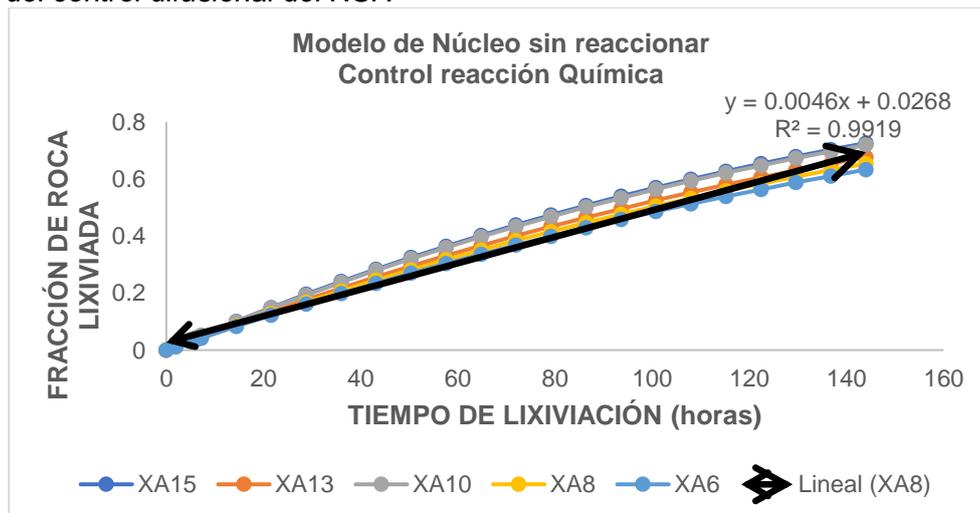


Fuente: Elaboración propia

Se eligen las curvas donde la concentración de ácido es igual o mayor a 6 (g/l), porque la figura indica que, a partir de este punto, la recuperación de cobre se mantiene estable.

Figura 57

Ajuste del control difusional del NSR



Fuente: Elaboración propia

En base a la Figura 57 describe cómo evoluciona el modelo del N.S.R. bajo control de difusión es la siguiente:

$$y = 0,0046x + 0,0268$$

Observándose que la pendiente de la curva de tendencia corresponde a $m = 0,0046$.

Con esto se despeja el tiempo total de lixiviación para este caso de estudio, correspondiente a partículas de diámetro promedio de 6 [mm]:

$$t/\tau = [1 - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x)]$$

$$\frac{t}{[1 - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x)]} = \tau$$

$$(1 [h])/0,0018 = 555,6 [h]$$

Utilizando la ecuación se puede calcular la constante k:

$$\tau = kD^2$$

$$k = \tau/D^2$$

$$k = 555,6 \frac{[h]}{((1,9)^2 [cm^2])}$$

$$k = 153,9 [h/cm^2]$$

Con esta constante k es posible calcular el tiempo total de lixiviación ($\tau [h]$) para cualquier diámetro de partícula (D [cm]) que se desee.

De esta forma calculamos τ para partículas con 6" de diámetro:

$$\tau (h) = kD^2(cm^2)$$

$$\tau = 153,9(15,24)^2$$

$$\tau = 144h$$

Caracterización de la cinética de consumo de ácido del mineral.

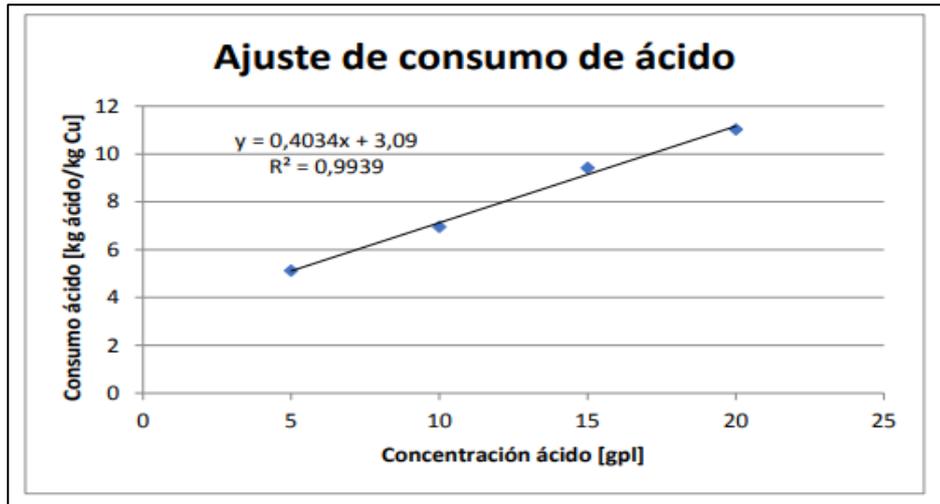
Como se puede observar de la figura, el consumo presenta un comportamiento lineal a partir de una concentración de 8 (g/l) en adelante, por lo que para realizar la caracterización matemática del consumo de ácido del mineral se pretende tomar los datos de dicha figura a partir de la concentración nombrada para poder obtener la ecuación que

describe este comportamiento lineal y así, extrapolar este consumo para cualquier concentración de ácido superior a los 8 (g/l).

A continuación, se presenta el ajuste realizado para las concentraciones a partir de 8 (g/l) presentadas anteriormente.

Figura 58

Ajuste de consumo de ácido



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura, se obtiene la ecuación que describe el comportamiento lineal del consumo de ácido del mineral en función de la concentración de ácido:

$$y = 0,4034 x + 3,09$$

Se recalca que esta ecuación se puede utilizar para concentraciones de ácido mayores o iguales a 8 (g/l), ya que para concentraciones menores el consumo no varía como se puede apreciar en la figura.

Condiciones y parámetros utilizados

La simulación realizada utiliza parámetros y variables que sirven como entradas para replicar en operación. Estos parámetros y variables pueden ser modificados para futuros análisis en función de las características de los óxidos de cobre y parámetros operativos.

Los parámetros usados son los siguientes:

- Para determinar el tiempo total de lixiviación de óxidos de minerales de cobre correspondiente al diámetro de la partícula a simular 6mm.
- Se empleó un tiempo de simulación de 6 días.
- Se estima que la humedad retenida en el mineral es del 12.5%.
- Los resultados del modelo son por unidad de área, por lo que el área de simulación es $A = 1 \text{ [m}^2\text{]}$.
- Se aplica una tasa de riego que se ajusta a $TR = 8Lh \cdot m^2$.
- La densidad superficial del mineral es $d = 1,7 \text{ tonm}^3$.
- La ley inicial de óxido cobre del mineral es del 0,76 %.
- La función de consumo de ácido es la siguiente: $y = 0,4034 x + 3,09$

Las variables de la simulación son las siguientes:

- Diámetro de partícula $D = 6\text{mm}$.
- Concentración de ácido: 8, 10 y 12 g/l.

Estas variables fueron escogidas debido a que son las consideradas más importantes de analizar con respecto al ritmo de producción de las bateas de lixiviación.

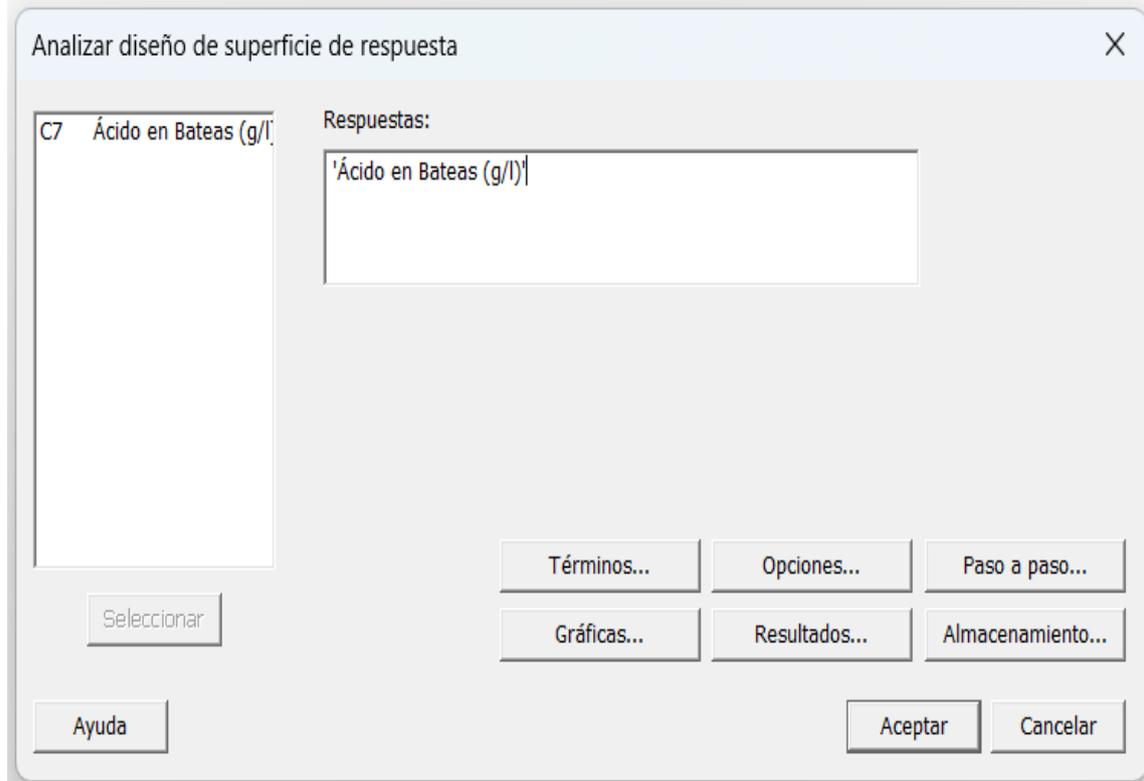
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis del consumo de Ácido en Bateas(g/l) aplicando el diseño octogonal

Nos dirigimos a la opción “DOE” nuevamente, luego la opción “Superficie de respuesta”, seguidamente seleccionemos “Analizar diseño de superficie de respuesta” en el cual aparecerá un cuadro donde seleccionamos variable de respuesta que es el “consumo de Ácido en Bateas(g/l)” y le damos en “Aceptar”.

Figura 59

Ventana de análisis de diseño de superficie de respuesta consumo de Ácido en Bateas(g/l)



Fuente: Elaboración propia

Nos aparecerá la Regresión de superficie de respuesta consumo de Ácido en Bateas (g/l) versus el P80 (mm); Grado de liberación (%), en el cual analizaremos lo siguiente:

Coefficientes codificados

Tabla 24*Coefficientes codificados consumo de ácido en bateas (g/l) por diseño octogonal*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	10.486	0.418	25.08	0	
Grado de liberación (%)	-1.731	0.331	-5.24	0.001	1
P80 (mm)	0.339	0.331	1.03	0.339	1
Grado de liberación (%)*Grado de liberación (%)	0.692	0.354	1.95	0.092	1.02
P80 (mm)*P80 (mm)	1.622	0.354	4.58	0.003	1.02
Grado de liberación (%)*P80 (mm)	0.48	0.467	1.03	0.339	1

Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Es fundamental entender cómo interpretar el valor T (valor T de Student) de las variables que podemos controlar en esta tabla. El software utiliza un valor T-Student predefinido de 2.365 para este diseño octogonal, con un intervalo de confianza del 95%. Estos detalles se presentarán de forma clara en la gráfica de Pareto que muestra los efectos estandarizados.

- El grado de liberación (%) muestra un valor T absoluto de 5.24, significativamente mayor que el valor T-Student predeterminado (0.97). Esto señala que es una variable controlable de gran importancia para el consumo de ácido en las bateas (g/l) durante el proceso de lixiviación hidrometalúrgica. Cuando el valor T es negativo, indica que esta variable ayuda a reducir el consumo de ácido. En contraste, un valor positivo indicaría que contribuiría a aumentar el consumo de ácido en dicho proceso.
- El valor absoluto del valor T para el P80 (mm) es 1.03, un poco superior al valor T-Student predeterminado (0.97). Esto significa que el P80 es una variable controlable clave para el consumo de ácido en las bateas (g/l). El hecho de que el valor T sea negativo indica que esta variable ayuda a disminuir el consumo de ácido sulfúrico (g/l) en el proceso.
- La interacción entre el Grado de liberación (%) y sí mismo tiene un valor T absoluto de 1.95, que es mayor que el valor T-Student predeterminado (0.97). Esto indica que esta interacción es una variable muy importante para el consumo de ácido

sulfúrico (g/l) en las bateas de lixiviación. El hecho de que el valor T sea negativo sugiere que esta interacción ayuda a disminuir el consumo de ácido sulfúrico en el proceso de lixiviación.

Resumen del modelo (R2)

Tabla 25

Resumen del modelo consumo de Ácido en bateas (g/l) en el proceso hidrometalúrgico de lixiviación por Diseño Octogonal

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.934848	88.20%	79.78%	17.17%

Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

En este punto lo que principalmente se debe tener en cuenta es el valor del R-cuadrado, que en nuestro estudio es de 88.20%; que nos dice que las variables controlables tienen una aceptación del 88.20% de acuerdo con los resultados obtenidos del consumo de Ácido en bateas en el proceso hidrometalúrgico de lixiviación. Un valor aceptable y alto para este estudio

Análisis de varianza

Tabla 26

Análisis de Varianza del consumo de Ácido en bateas (g/l) por Diseño Octogonal

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	45.746	9.1492	10.47	0.004
Lineal	2	24.8891	12.4446	14.24	0.003
Grado de liberación (%)	1	23.9673	23.9673	27.42	0.001
P80 (mm)	1	0.9218	0.9218	1.05	0.339
Cuadrado	2	19.9353	9.9676	11.41	0.006
Grado de liberación (%)*Grado de liberación (%)	1	3.3312	3.3312	3.81	0.092
P80 (mm)*P80 (mm)	1	18.3018	18.3018	20.94	0.003
Interacción de 2 factores	1	0.9216	0.9216	1.05	0.339
Grado de liberación (%)*P80 (mm)	1	0.9216	0.9216	1.05	0.339
Error	7	6.1176	0.8739		
Falta de ajuste	3	6.0193	2.0064	81.63	0
Error puro	4	0.0983	0.0246		
Total	12	51.8636			

Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

De acuerdo con la tabla de análisis de varianza es una corroboración de manera empírica para comprobar si son significantes las variables controlables de estudio y nos enfocaremos en el Valor p, que si es muy cercano a “cero” se dice que la variable es muy influyente o significativa.

Para nuestro estudio el Valor de p del Grado de liberación (%) y P80 (mm) tiene un valor de 0.001 y 0.339 respectivamente, con lo cual comprueba que las dos variables controlables son “Significantes”.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Ecuación 4.1: Ecuación de regresión en unidades no codificadas del consumo de Ácido en bateas (g/l) por Diseño Octogonal

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$\begin{aligned} \text{Ácido en Bateas (g/l)} = & 1957 - 4.72 \text{ Grado de liberación (\%)} - 559 \text{ P80 (mm)} \\ & + 0.0277 \text{ Grado de liberación (\%)*Grado de liberación (\%)} \\ & + 40.55 \text{ P80 (mm)*P80 (mm)} \\ & + 0.480 \text{ Grado de liberación (\%)*P80 (mm)} \end{aligned}$
--

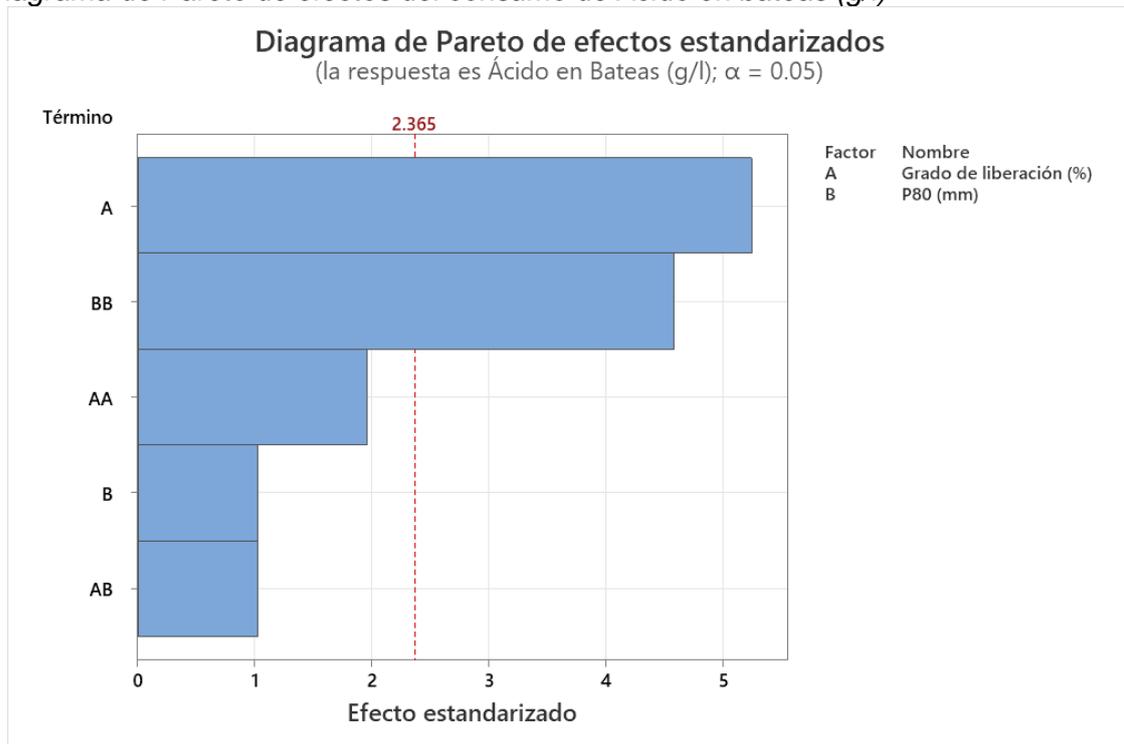
Análisis e interpretación:

En esta ecuación nos da a conocer los coeficientes de cada una de las variables y de las combinaciones posibles, con el objetivo, de que, si queremos realizar una prueba hidrometalúrgica con valores diferentes, lo ponemos en la ecuación y nos dará el consumo de Ácido en bateas (g/l) para no realizar dicha prueba de hidrometalúrgica innecesariamente, ya que involucra costo en el consumo de reactivos, energía, análisis y tiempo.

Diagrama de Pareto de los efectos del consumo de Ácido en bateas (g/l) por Diseño Octogonal

Figura 60

Diagrama de Pareto de efectos del consumo de Ácido en bateas (g/l)



Fuente: Elaboración propia

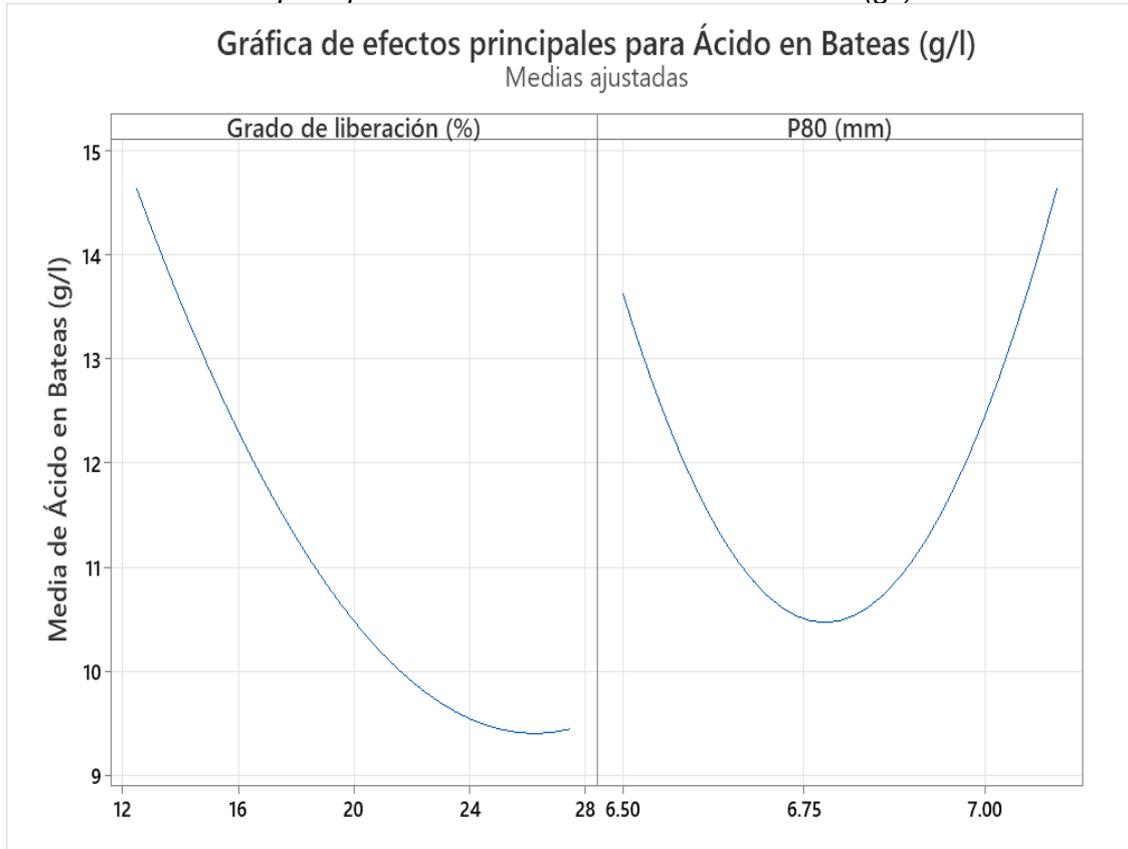
Análisis e interpretación:

Este diagrama de Pareto es muy importante para corroborar la significancia y no significancia de las variables controlables en la variable respuesta (consumo de Ácido en bateas (g/l)). En primera instancia tenemos que A es el Grado de liberación (%) y B es el P80 (mm). La línea vertical de color rosa es un valor que muestra los efectos de cada una de las variables y que en función de ello nos indica como un límite para que una variable controlable sea significativa o no significativa frente a la variable respuesta que en nuestro estudio es el consumo de Ácido en bateas (g/l), por lo tanto podemos concluir que el factor A(Grado de liberación (%)) y el factor B(P80 (mm)) son significantes frente a la variable respuesta (consumo de Ácido en bateas (g/l)). La variable interacción BB (P80 con P80) a pesar de que gráficamente es significativa no lo ponemos como significativa porque estamos estudiando las variables controlables significantes por separado y no sus interacciones.

Gráfica de los efectos principales para el consumo de Ácido en bateas (g/l)

Figura 61

Gráfica de los efectos principales del consumo de Ácido en bateas (g/l)



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

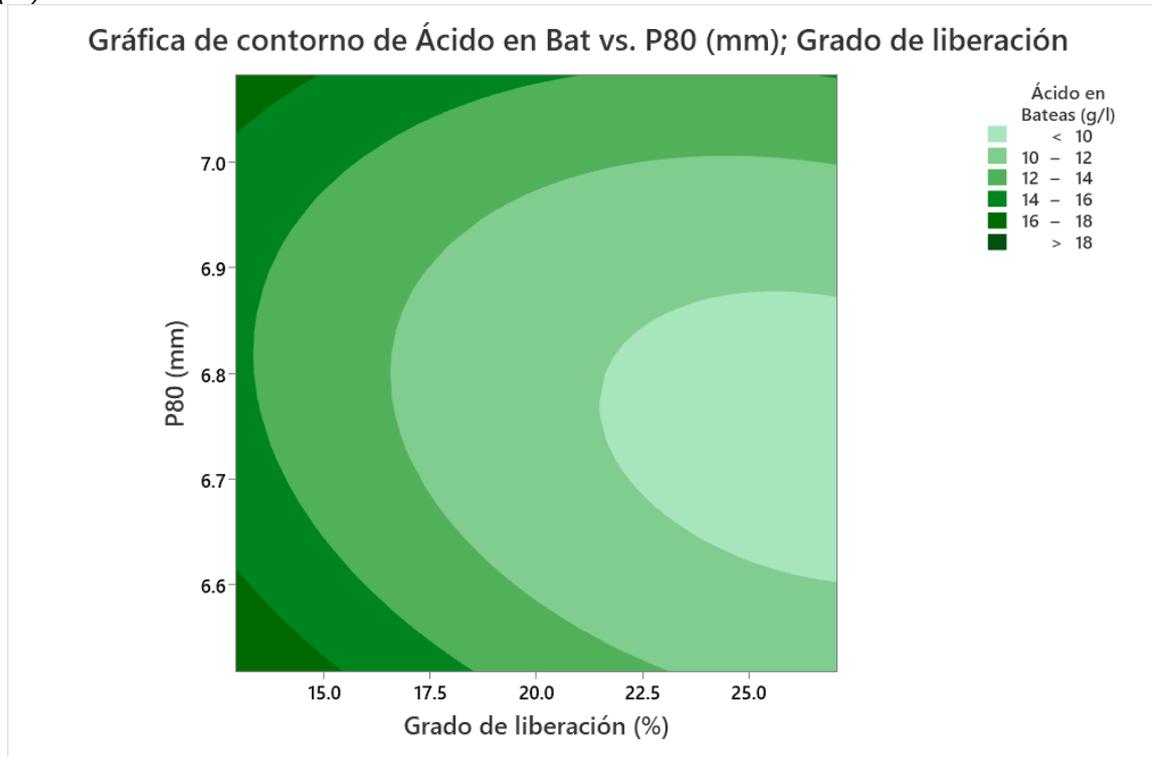
Podemos decir que:

- Para el Grado de Liberación (%) se observa que tiene un comportamiento parabólico que para una liberación de 16 a 25% aproximadamente disminuye el consumo de Ácido en bateas (g/l), pero a un grado de liberación menor a 16% se observa que aumenta el consumo de Ácido en bateas (g/l).
- Para el P80 (mm) se observa que para un valor de 6.80mm aproximadamente en consumo de ácido en batea en la mínima

Gráfica de contorno del consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm); Grado de liberación (%)

Figura 62

Gráfica de contorno consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm); Grado de liberación (%)



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

La gráfica muestra áreas verdes de diferentes tonalidades que representan rangos variados, desde más intensos hasta menos intensos. En los ejes se listan las variables clave que afectan el consumo de ácido en la batea de lixiviación, y en el lado derecho se representa el consumo de ácido en (g/l). La variación en la intensidad de los colores indica los distintos niveles de esta métrica particular.

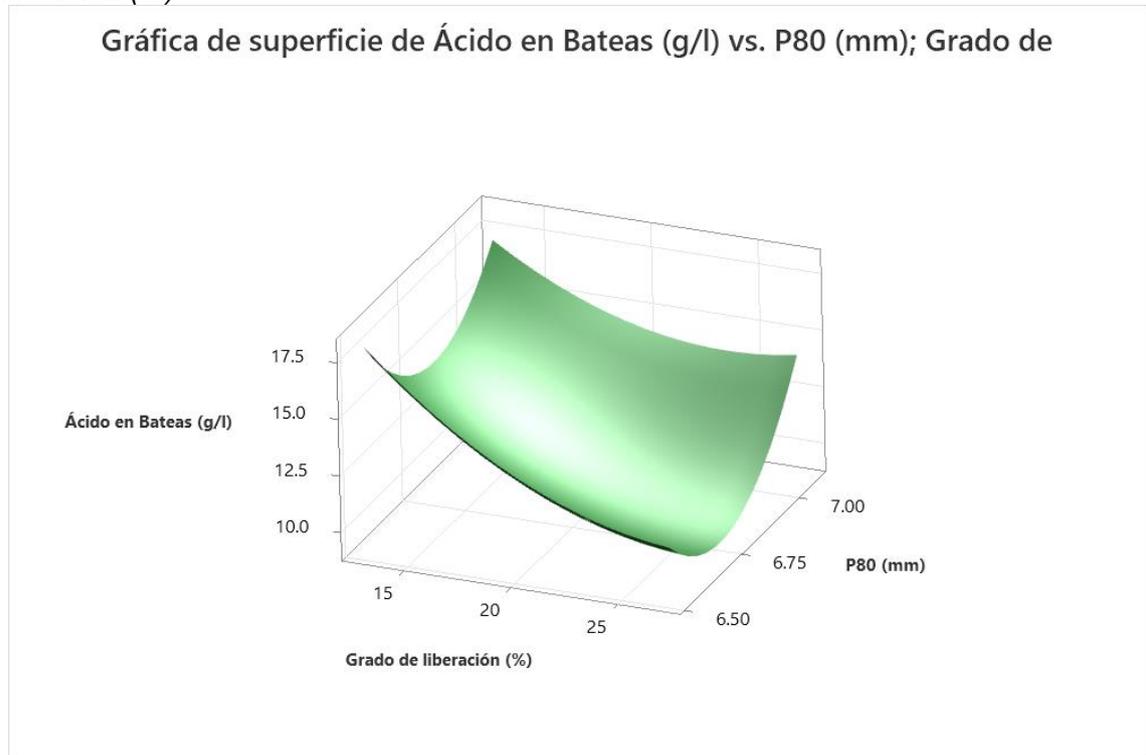
Esta grafica se analiza de la siguiente manera:

- La zona de color verde de mayor intensidad representa que hay un consumo de ácido a bateas mayor a 18g/l para ciertos parámetros de las variables significantes, a medida que la zona verde es menos intensa puede llegar a un consumo de ácido de 12g/l.

**Gráfica de superficie del consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm);
Grado de liberación (%)**

Figura 63

Gráfica de superficie de consumo de Ácido en bateas (g/l) vs. P80(mm); Grado de liberación (%)



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación:

Esta gráfica de superficie nos da la información completa en tres dimensiones del consumo de Ácido en bateas (g/l), P80 (mm) y el % de Grado de liberación en (%).

A medida que aumentamos el % del grado de liberación, disminuye el consumo de Ácido en bateas (g/l) y a medida que aumenta el P80 (mm) también disminuye el consumo de Ácido en bateas (g/l). Esta gráfica de superficie corrobora la interpretación obtenida en las gráficas de efectos principales para el consumo de Ácido en bateas (g/l)

Todas estas tablas y gráficas que hemos visualizado anteriormente son muy importantes ya que guardan relación y confirman de manera óptima de acuerdo con el diseño octogonal que las variables controlables “P80 (mm)” y “Grado de liberación (%)” son variables “Significantes” para la disminución o reducción del consumo de Ácido en bateas (g/l).

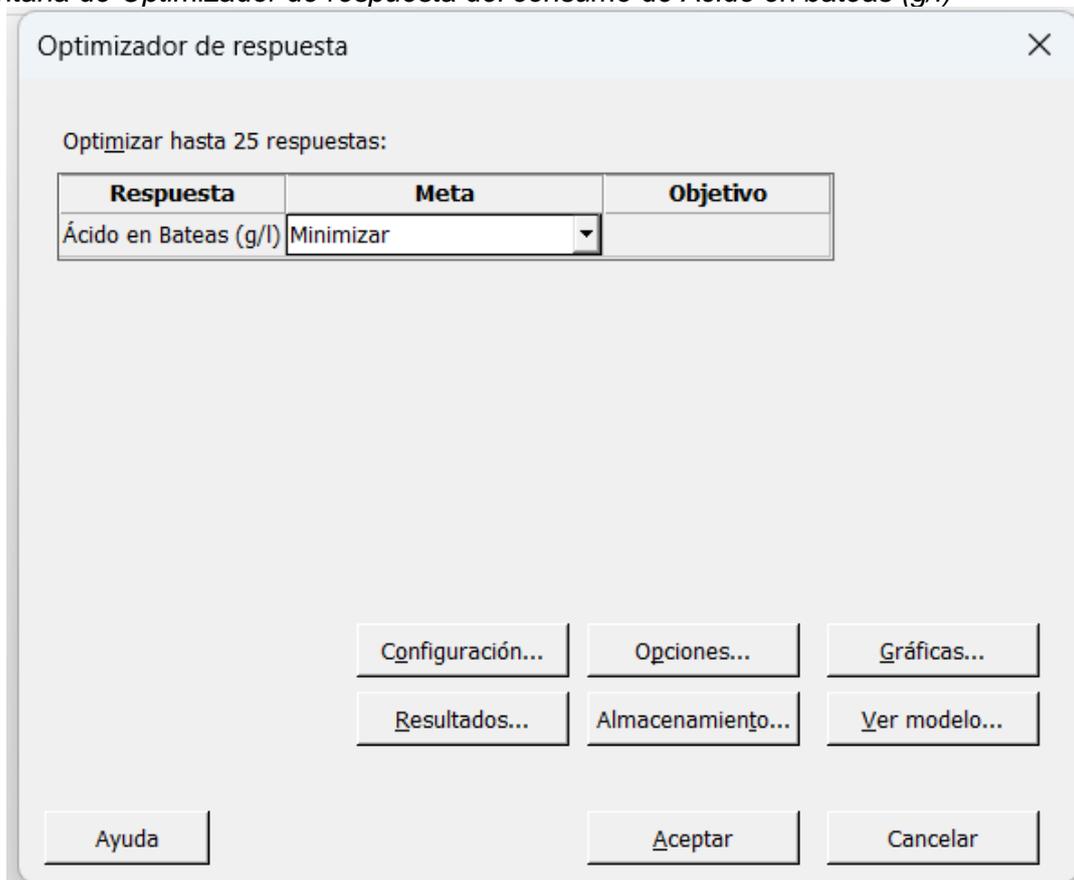
4.2 Optimización del parámetro P80 (mm), Grado de liberación (%) para obtener el mínimo consumo de Ácido en bateas (g/l)

Para optimizar nuestros parámetros operacionales nos dirigimos a DOE a “superficie de respuesta” y hacemos clic en “Optimizador de respuesta”, inmediatamente desplegará una ventana en el cual ejecutará la opción respuesta Ácido en bateas (g/l), elegimos como Meta minimizar ya que es de nuestro interés minimizar el consumo de ácido en bateas (g/l) queremos.

Elegimos la Meta de “Minimizar” que es nuestro objetivo principal de este estudio y clic en aceptar.

Figura 64

Ventana de Optimizador de respuesta del consumo de Ácido en bateas (g/l)



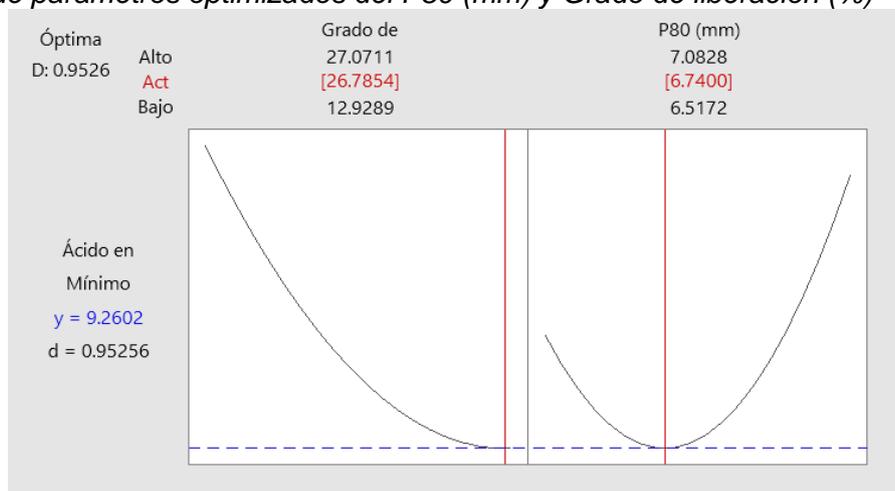
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se ejecutará una gráfica donde podemos apreciar el P80 (mm) óptimo de mineral (6.74 mm) y el Grado de liberación (26.78%) que tenemos que usar en

nuestra lixiviación de minerales óxidos de cobre para llegar a obtener un consumo de Ácido en bateas (g/l) de 9.2602 g/l.

Figura 65

Ventana de parámetros optimizados del P80 (mm) y Grado de liberación (%)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, una vez obtenida la optimización de los parámetros operacionales realizaremos una última prueba hidrometalúrgica con el consumo de ácido obtenido en (g/l) propuesto por el diseño octogonal y a su vez llevar la ley de rebose PLS HG al laboratorio para que nos de su ley de rebose.

4.3 Prueba hidrometalúrgica optimizada

Tabla 27

Resultados optimizados

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO									
PROCEDENCIA: ÓXIDOS PUNTUALES (OXF)									
ANÁLISIS ÁCIDO								Resultados	
Número de orden de trabajo	Fecha	Descripción de muestra	Hora de muestreo	Hora de ingreso	Turno	% Grado liberación	P80 (mm)	Cu (g/L)	FAT (g/L)
1	5/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	26.7	6.74	17.9	9.70

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Discusión de resultados

Durante el desarrollo de las pruebas Hidrometalúrgicas de Lixiviación de óxidos de cobre de acuerdo al diseño octogonal que se realizó en una mina del Sur peruano, se obtuvo diferentes valores de parámetros de P80 (mm) y Grado de liberación (%) para lo cual se llegó a tener como resultados una variedad del consumo de Ácido en bateas (g/l),

del cual posteriormente se analizó para determinar la significancia de estas variables controlables y así poder encontrar el óptimo deseable con la finalidad de lograr una mínima reducción del consumo de Ácido en bateas (g/l).

De acuerdo con los resultados obtenidos del consumo de Ácido en bateas (g/l), se obtiene mediante el análisis estadístico diferentes datos y graficas que nos permitirá tener hacer una interpretación adecuada como es el caso del valor del T-

Student, R², análisis de varianza, ecuación de regresión, diagrama de Pareto, grafica de los efectos principales, grafica de contorno y grafica de superficie. Todo esto antes mencionado tienen relación para poder demostrar que dichas variables controlables son significantes y a la vez optimizar en el proceso el consumo de dichos reactivos.

Mediante el T-Student se comprobó que el P80 (mm) y el Grado de liberación (%) son dos variables controlables muy significantes para la reducción del consumo de Ácido en bateas (g/l) con un alto porcentaje de aceptación de acuerdo con los resultados obtenidos en la parte experimental de las pruebas hidrometalúrgicas de lixiviación de óxidos de cobre realizadas.

El diagrama de Pareto, grafica de efectos, grafica de contorno y grafica de superficie nos da la información visual y corroborativa que las variables controlables en estudio influyen de manera muy directa y significativa en el consumo de Ácido en bateas (g/l).

Una vez teniendo y comprobando la significancia de las variables controlables, se llevó a cabo la optimización, obteniendo así los valores de nuestros parámetros de P80 (mm) y Grado de liberación (%) donde se observa que se lograra un consumo de Ácido en bateas (g/l) de 9.2602.

Conclusiones

Se obtiene de acuerdo con el diseño factorial fraccionado que, de las cuatro variables controlables en estudio, solo dos variables son significativas para la reducción del consumo de Ácido en bateas (g/l) en la lixiviación de óxidos de cobre que son el P80 (mm) y el Grado de liberación (%).

También se logra obtener de acuerdo con el diseño factorial fraccionado que la variable grado de liberación (%) es muy significativa para la ley de rebose PLS HG en una batea de lixiviación.

Mediante el diseño octagonal se llevó a cabo una serie de pruebas hidrometalúrgicas para encontrar el óptimo tamaño de mineral P80 (mm) óptimo de mineral (6.74 mm) y el Grado de liberación (26.78%) para el proceso hidrometalúrgico de lixiviación en bateas de lixiviación, con un consumo de Ácido en bateas (g/l) de 9.2602.

Se llevo a cabo la prueba hidrometalúrgica de lixiviación optimizada con los ajustes de P80(mm) y optimizando el grado de liberación (%) logrando obtener una ley de rebose PLS HG de 18g/l de cobre y un consumo de Ácido (g/l) de 10.

Haciendo una comparación de acuerdo con el consumo de ácido en una batea de lixiviación, se obtuvo antes de optimizar un consumo de ácido 15g/l y mediante optimización de diseño de experimentos un consumo de ácido de 10g/l.

Se logró también aumentar la ley de rebose PLS HG de Cu de 14.78g/l a 19.25g/l.

En la parte del costo de ácido sulfúrico por tonelada el consumo

Recomendaciones

Realizar un muestreo actualizado más representativo de la zona mineralizada

Realizar ensayos mineralógicos para conocer las especies presentes en el mineral

Realizar pruebas de lixiviación para las 15 bateas de Lixiviación y evaluar el proceso.

Realizar constantemente muestreos de los reboses PLS HG y llevarlos a análisis químico.

Realizar seguimiento exhaustivo a los parámetros de operación, P80, %Grado de liberación, ratio de ácido de curado, ácido libre (g/l)

Se recomienda realizar pruebas de diseño de experimentos cada vez que la ley de rebose cambie del óptimo alcanzado.

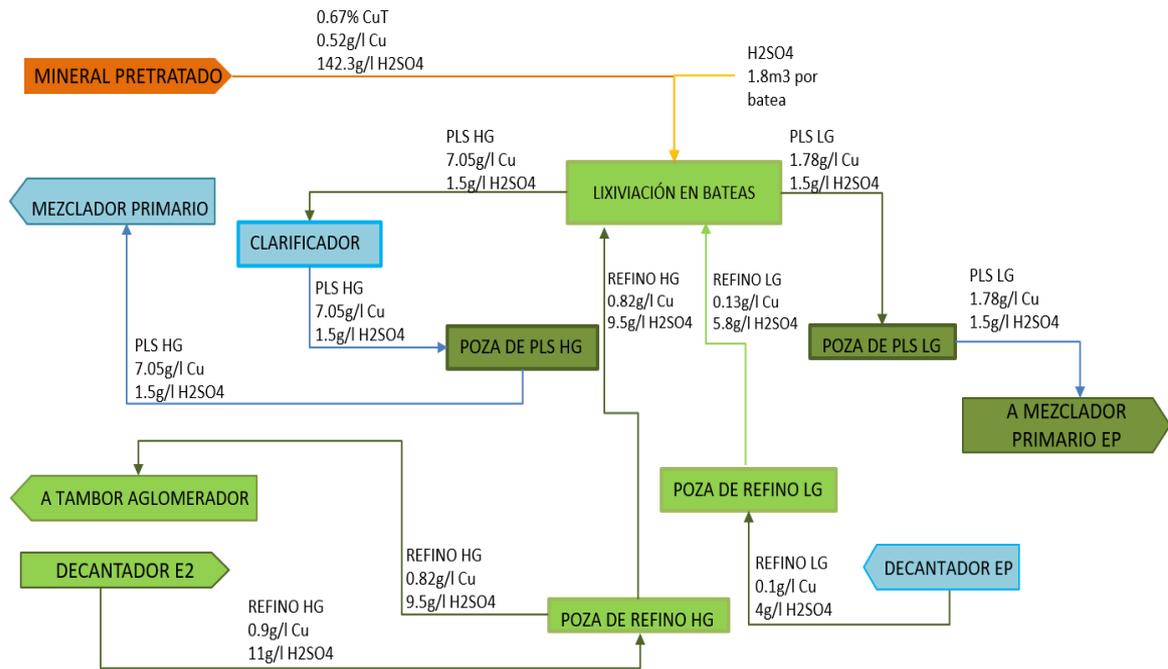
Referencias bibliográficas

- Ayala Mina Jorge y Pardo Mercado Richard (1995). *Optimización por diseños experimentales con aplicaciones en ingeniería*. Lima Perú.
- Dana Edwar S. y W.E. Ford (1981). *Tratado de mineralogía*. 8va edic., Edit. Continental S. A. México, D.F, pp. 571-577, 814.
- Gutiérrez Pulido Humberto y Román de la Vara Salazar (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. 2da edic. México, D.F.
- Kobashicawa, J. (2003). *Corrección de análisis granulométrico y químicos por multiplicadores de lagrange*. Lima Perú.
- Bengtsson, M, Evertsson, C.M., 2006, *Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers*. Minerals Engineering 19, 1479 - 1486
- Durney, T.E., Meloy, T.P., 1986, *Particle shape effects due to crushing method and size*. International Journal of Mineral Processing, 16, 109 - 123

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Diagrama de lixiviación de óxidos SX	1
Anexo 2: Ensayes prueba óxidos.....	2
Anexo 3: Ensayes prueba óxidos puntuales	2
Anexo 4: Ensayes prueba optimizada óxidos.....	2

Anexo 1: Diagrama de lixiviación de óxidos SX



Anexo 2: Ensayes prueba óxidos.

 BUREAU VERITAS		REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO					
PROCEDENCIA: ÓXIDOS							
ANÁLISIS LEY DE REBOSE						RESULTADOS	
NUMERO DE ORDEN DE TRABAJO	FECHA	DESCRIPCIÓN DE MUESTRA	HORA DE MUESTREO	HORA DE INGRESO	TURNO	Cu (g/L)	FAT (g/L)
1	3/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.65	14.52
2	5/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.54	14.72
3	7/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.21	15.00
4	9/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.95	13.70
5	11/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.05	9.52
6	13/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	17.36	11.77
7	19/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	16.80	11.11
8	23/02/2024	PLS LIX HG	08:00	08:55	A	18.00	8.82

Anexo 3: Ensayes prueba óxidos puntuales

 BUREAU VERITAS		REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO						
PROCEDENCIA: ÓXIDOS PUNTALES (OXP)								
ANÁLISIS ÁCIDO								RESULTADOS
NUMERO DE ORDEN DE TRABAJO	FECHA	DESCRIPCIÓN DE MUESTRA	HORA DE MUESTREO	HORA DE INGRESO	TURNO	% Grado liberación	P80 (mm)	FAT (g/L)
1	2/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	15	6.6	15.37
2	3/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	25	6.6	10.52
3	7/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	165	7	15.69
4	8/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	25	7	12.76
5	9/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	12.92	6.8	13.23
6	14/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	27.07	6.8	8.94
7	16/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.51	12.89
8	18/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	7.08	13.00
9	24/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.50
10	25/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.72
11	26/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.52
12	1/04/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.38
13	2/04/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	20	6.8	10.31

Anexo 4: Ensayes prueba optimizada óxidos

 BUREAU VERITAS		REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO QUÍMICO							
PROCEDENCIA: ÓXIDOS PUNTALES (OXP)									
ANÁLISIS ÁCIDO								RESULTADOS	
NUMERO DE ORDEN DE TRABAJO	FECHA	DESCRIPCIÓN DE MUESTRA	HORA DE MUESTREO	HORA DE INGRESO	TURNO	% Grado liberación	P80 (mm)	Cu (g/L)	FAT (g/L)
1	5/03/2024	1 kg óxido	08:00	08:55	A	26.7	6.74	17.9	9.70