

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

Optimización en la recuperación de un concentrado de plomo-plata aplicando diseño de experimentos en la Planta Concentradora Centenario de la Corporación CMCZ S.A.C.

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Leandro Oscar Hualverde Valer

 [0009-0001-7233-2106](https://orcid.org/0009-0001-7233-2106)

Asesor

MSc. Arturo Leoncio Lobato Flores

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

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Hualverde Valer [1]
Referencia/Reference	[1] L. Hualverde Valer, “ <i>Optimización en la recuperación de un concentrado de plomo-plata aplicando diseño de experimentos en la Planta Concentradora Centenario de la Corporación CMCZ S.A.C.</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Hualverde, 2024)
Referencia/Reference	Hualverde, L. (2024). <i>Optimización en la recuperación de un concentrado de plomo-plata aplicando diseño de experimentos en la Planta Concentradora Centenario de la Corporación CMCZ S.A.C.</i> [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Resumen

Este estudio de investigación experimental se realizó en la Planta Concentradora Centenario.

Para ello, empleamos el diseño experimental para evaluar y optimizar los parámetros que afectan el proceso de flotación del concentrado de plomo, logrando así reducir significativamente los costos de la investigación. En este estudio, utilizamos la primera etapa de eliminación, implementando un diseño factorial fraccionado con dos variables de respuesta: el porcentaje de recuperación de plomo y el porcentaje de recuperación de plata. Los factores o parámetros experimentales examinados en el proceso de flotación del concentrado de plomo incluyen sulfato de zinc (ZnSO_4), xantato isopropílico de sodio (Z-11), metabisulfito de sodio (NaHSO_3) y grado de liberación (% m-200). El objetivo es determinar el efecto y la importancia de cada uno de estos factores en la recuperación de plomo y plata, para luego seleccionar los dos factores más influyentes y proceder a la etapa de optimizar las recuperaciones de plomo y plata.

Detallando lo anteriormente mencionado, se determinarán los dos factores más importantes y, posteriormente, mediante la aplicación del diseño octogonal, se optimizará el objetivo de este estudio: aumentar la ley y recuperación de plomo y plata. Finalmente, este procedimiento experimental de optimización tendrá un impacto positivo en los costos de procesamiento, como la reducción en el consumo de reactivos, el menor uso de energía en los equipos y el aumento del valor de concentrado de plomo.

Palabras claves — Ley, recuperación, flotación, factores, optimización.

Abstract

This experimental research study was carried out at the Centenario Concentrator Plant. To this end, we use the experimental design to evaluate and optimize the parameters that affect the lead concentrate flotation process, thus significantly reducing research costs. In this study, we used the first stage of elimination, implementing a fractional factorial design with two response variables: the percentage of lead recovery and the percentage of silver recovery. The experimental factors or parameters examined in the lead concentrate flotation process include zinc sulfate (ZnSO_4), sodium isopropyl xanthate (Z-11), sodium metabisulfite (NaHSO_3) and degree of release (% m-200). The objective is to determine the effect and importance of each of these factors in the recovery of lead and silver, to then select the two most influential factors and proceed to the stage of optimizing the recoveries of lead and silver.

Detailing the aforementioned, the two most important factors will be determined and, subsequently, through the application of the octagonal design, the objective of this study will be optimized: increasing the grade and recovery of lead and silver. Finally, this experimental optimization procedure will have a positive impact on processing costs, such as reducing reagent consumption, lower energy use in equipment, and increasing the value of lead concentrate.

Keywords — Law, recovery, flotation, factors, optimization.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	2
1.1.1 Ubicación.....	2
1.1.2 Acceso.....	3
1.1.3 Recurso Hídrico	3
1.2 Descripción de la problemática.....	3
1.3 Objetivo del Estudio	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Antecedentes Investigativos.....	5
1.4.1 Antecedentes Referenciales	5
1.4.2 Hipótesis.....	7
1.4.3 Hipótesis Específicas	7
1.4.4 Justificación de la Investigación.....	7
1.4.5 Tipo de Investigación	7
1.4.6 Marco metodológico del diseño experimental	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	10
2.1 Marco Teórico.....	10
2.1.1 Etapa de Chancado	10
2.1.2 Etapa de molienda de minerales	13
2.1.3 Etapa de flotación de minerales.....	13
2.1.4 Etapa de espesamiento de concentrado y relaves.....	15
2.1.5 Filtración	16

2.2	Marco conceptual	16
2.2.1	Descripción del proceso	16
2.3	Teoría del diseño experimental	24
2.3.1	Experimento.....	24
2.3.2	Unidad experimental	24
2.3.3	Etapas en el diseño de experimentos	25
2.3.4	Arreglos ortogonales	27
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		28
3.1	Listado de equipos empleados en laboratorio metalúrgico	28
3.2	Cálculo del tiempo de molienda para un 60% malla -200.....	28
3.3	Consumo de reactivos por g/tn a nivel planta y dosificación de reactivos para las pruebas metalúrgicas	31
3.4	Planteamiento de las variables controlables para la formulación del diseño factorial fraccionado	31
3.5	Pruebas de molienda y flotación	33
3.6	Preparación de reactivos.....	34
3.7	Prueba de molienda y de flotación acorde al diseño factorial fraccionado	34
3.7.1	Prueba de flotación # 1 por diseño factorial fraccionado:	36
3.7.2	Prueba de flotación # 2 por diseño factorial fraccionado:	36
3.7.3	Prueba de flotación # 3 por diseño factorial fraccionado:	37
3.7.4	Prueba de flotación # 4 por diseño factorial fraccionado:	38
3.7.5	Prueba de flotación # 5 por diseño factorial fraccionado:	38
3.7.6	Prueba de flotación # 6 por diseño factorial fraccionado:.....	39
3.7.7	Prueba de flotación # 7 por diseño factorial fraccionado:	40
3.7.8	Prueba de flotación # 8 por diseño factorial fraccionado:	40
3.7.9	Prueba de flotación # 9 por diseño factorial fraccionado:	41
3.7.10	Prueba de flotación # 10 por diseño factorial fraccionado:.....	42
3.7.11	Prueba de flotación # 11 por diseño factorial fraccionado:	42

3.8	Balance metalúrgico de las pruebas de flotación por diseño factorial fraccionado.	43
3.9	Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación obtenido por el diseño factorial fraccionado.	46
3.10	Análisis de recuperación plomo	47
3.11	Análisis de recuperación de plata	51
3.12	Diseño octogonal para optimizar el aumento de la recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.....	55
3.12.1	Prueba de flotación #1 por diseño octogonal:	56
3.12.2	Prueba de flotación #2 por diseño octogonal:	56
3.12.3	Prueba de flotación #3 por diseño octogonal:	57
3.12.4	Prueba de flotación #4 por diseño octogonal:	58
3.12.5	Prueba de flotación #5 por diseño octogonal:	58
3.12.6	Prueba de flotación #6 por diseño octogonal:	59
3.12.7	Prueba de flotación #7 por diseño octogonal:	60
3.12.8	Prueba de flotación #8 por diseño octogonal:	60
3.12.9	Prueba de flotación #9 por diseño octogonal:	61
3.12.10	Prueba flotación #10 por diseño octogonal:	62
3.12.11	Prueba de flotación #11 por diseño octogonal:.....	62
3.12.12	Prueba de flotación #12 por diseño octogonal:.....	63
3.12.13	Prueba de flotación #13 por diseño octogonal:.....	64
3.13	Balance metalúrgico de las pruebas de flotación por diseño octogonal.....	64
3.14	Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación obtenidas por diseño octogonal.	69
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....		70
4.1	Análisis de la recuperación de Pb aplicando el diseño octogonal	70
4.2	Análisis de la recuperación de plata aplicando el diseño octogonal	76

4.3	Optimización del consumo de Z-11 y el Grado de liberación para obtener la máxima recuperación de plomo y plata	81
4.4	Prueba de flotación optimizada	82
4.5	Balance metalúrgico de la prueba de flotación optimizada	83
4.6	Discusión de resultados	83
	Conclusiones	85
	Recomendaciones	86
	Referencias Bibliográficas	87

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Primera manera de trayecto físico	3
Tabla 2: Segunda manera de trayecto físico.....	3
Tabla 3: Cuadro de datos de los diferentes tiempos de molienda.....	30
Tabla 4: Tiempo de molienda para el 60% malla -200	30
Tabla 5: Consumo promedio de reactivos en proceso del mineral de plomo y plata.....	31
Tabla 6: Consumo promedio de reactivos en laboratorio metalúrgico del proceso en planta	31
Tabla 7: Valores mínimo, promedio y máximo de los factores por diseño factorial fraccionado	31
Tabla 8: Dosificaciones de reactivos de las pruebas metalúrgicas por diseño factorial fraccionado.....	33
Tabla 9: Leyes de cabeza de plomo y plata del mineral en estudio.....	33
Tabla 10: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #1	36
Tabla 11: Pesos y leyes de la prueba de flotación #1	36
Tabla 12: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #2	36
Tabla 13: Pesos y leyes de la prueba de flotación #2	37
Tabla 14: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #3	37
Tabla 15: Pesos y leyes de la prueba de flotación #3.....	37
Tabla 16: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #4	38
Tabla 17: Pesos y leyes de la prueba de flotación #4	38
Tabla 18: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #5	38
Tabla 19: Pesos y leyes de la prueba de flotación #5.....	39
Tabla 20: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #6	39
Tabla 21: Pesos y leyes de la prueba de flotación #6	39
Tabla 22: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #7	40
Tabla 23: Pesos y leyes de la prueba de flotación #7	40
Tabla 24: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #8	40
Tabla 25: Pesos y leyes de la prueba de flotación #8	41

Tabla 26: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #9	41
Tabla 27: Pesos y leyes de la prueba de flotación #9	41
Tabla 28: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #10	42
Tabla 29: Pesos y leyes de la prueba de flotación #10	42
Tabla 30: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #11	42
Tabla 31: Pesos y leyes de la prueba de flotación #11	43
Tabla 32: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #1	43
Tabla 33: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #2	43
Tabla 34: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #3	44
Tabla 35: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #4	44
Tabla 36: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #5	44
Tabla 37: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #6	45
Tabla 38: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #7	45
Tabla 39: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #8	45
Tabla 40: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #9	45
Tabla 41: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #10	46
Tabla 42: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #11	46
Tabla 43: Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación.....	46
Tabla 44: Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plomo.....	47
Tabla 45: Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plata.....	51
Tabla 46: Valores mínimo, promedio y máximo de los factores por diseño octogonal.....	55
Tabla 47: Dosificaciones de reactivos de las pruebas metalúrgicas por diseño octogonal	55
Tabla 48: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #1 por diseño octogonal	56
Tabla 49: Pesos y leyes de la prueba de flotación #1 por diseño octogonal.....	56
Tabla 50: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #2 por diseño octogonal	56
Tabla 51: Pesos y leyes de la prueba de flotación #2 por diseño octogonal.....	57
Tabla 52: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #3 por diseño octogonal	57
Tabla 53: Pesos y leyes de la prueba de flotación #3 por diseño octogonal.....	57

Tabla 54: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #4 por diseño octogonal	58
Tabla 55: Pesos y leyes de la prueba de flotación #4 por diseño octogonal	58
Tabla 56: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #5 por diseño octogonal	58
Tabla 57: Pesos y leyes de la prueba de flotación #5 por diseño octogonal	59
Tabla 58: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #6 por diseño octogonal	59
Tabla 59: Pesos y leyes de la prueba de flotación #6 por diseño octogonal	59
Tabla 60: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #7 por diseño octogonal	60
Tabla 61: Pesos y leyes de la prueba de flotación #7 por diseño octogonal	60
Tabla 62: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #8 por diseño octogonal	60
Tabla 63: Pesos y leyes de la prueba de flotación #8 por diseño octogonal	61
Tabla 64: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #9 por diseño octogonal	61
Tabla 65: Pesos y leyes de la prueba de flotación #9 por diseño octogonal	61
Tabla 66: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #10 por diseño octogonal	62
Tabla 67: Pesos y leyes de la prueba de flotación #10 por diseño octogonal	62
Tabla 68: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #11 por diseño octogonal	62
Tabla 69: Pesos y leyes de la prueba de flotación #11 por diseño octogonal	63
Tabla 70: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #12 por diseño octogonal	63
Tabla 71: Pesos y leyes de la prueba de flotación #12 por diseño octogonal	63
Tabla 72: Consumo de reactivos en la prueba de flotación #13 por diseño octogonal	64
Tabla 73: Pesos y leyes de la prueba de flotación #13 por diseño octogonal	64
Tabla 74: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #1 por diseño octogonal	64
Tabla 75: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #2 por diseño octogonal	65
Tabla 76: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #3 por diseño octogonal	65
Tabla 77: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #4 por diseño octogonal	65
Tabla 78: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #5 por diseño octogonal	66
Tabla 79: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #6 por diseño octogonal	66
Tabla 80: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #7 por diseño octogonal	66
Tabla 81: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #8 por diseño octogonal	67

Tabla 82: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #9 por diseño octogonal	67
Tabla 83: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #10 por diseño octogonal	67
Tabla 84: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #11 por diseño octogonal	68
Tabla 85: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #12 por diseño octogonal	68
Tabla 86: Balance metalúrgico de la prueba de flotación #13 por diseño octogonal	68
Tabla 87: Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación por diseño octogonal.	69
Tabla 88: Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plomo por diseño octogonal.....	70
Tabla 89: Resumen del modelo R2 de la recuperación de plomo por diseño octogonal..	70
Tabla 90: Análisis de varianza de la recuperación de plomo por diseño octogonal	71
Tabla 91: Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plata por diseño octogonal.....	76
Tabla 92: Resumen del modelo R2 de recuperación de plata por diseño octogonal	76
Tabla 93: Análisis de varianza de la recuperación de plata por diseño octogonal	77
Tabla 94: Consumo de reactivos en la prueba de flotación optimizada.....	83
Tabla 95: Pesos y leyes de la prueba de flotación optimizada	83
Tabla 96: Balance metalúrgico de la prueba de flotación optimizada	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Vista Satelital-Planta Concentradora Centenario-Huaral-Lima	2
Figura 2: Pozas de almacenamiento de agua fresca	3
Figura 3: Trituradora de mandíbula de la planta concentradora centenario.....	11
Figura 4: Trituradora cónica de la planta concentradora centenario	12
Figura 5: Trituradora de rodillos de la planta concentradora centenario	12
Figura 6: Almacenamiento de minerales polimetálicos.....	16
Figura 7: Poza de almacenamiento de agua recirculada.....	17
Figura 8: Plataforma de la tolva de gruesos.....	17
Figura 9: Vista general del área de chancado de planta concentradora centenario	18
Figura 10: Trituradora cónica de la planta concentradora centenario.....	19
Figura 11: Vista general del área de molienda de la planta concentradora centenario	19
Figura 12: Cajón de descarga de pulpa de los molinos de la planta concentradora centenario.....	20
Figura 13: Vista general del circuito de flotación de plomo de la planta concentradora centenario.....	21
Figura 14: Vista general del circuito de flotación de cobre de la planta concentradora centenario.....	21
Figura 15: Vista general del circuito de flotación de zinc de la planta concentradora centenario.....	22
Figura 16: Vista general de la relavera de la planta concentradora centenario	22
Figura 17: Vista general del área de filtrado de concentrados de la planta concentradora centenario.....	23
Figura 18: Loza de almacenamiento de concentrados	23
Figura 19: Molino de bolas del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.....	29
Figura 20: Diagrama de la curva de molienda.....	30

Figura 21: Molino de bolas del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.....	34
Figura 22: Burbujas de concentrado de plomo en la flotación	35
Figura 23: Acopio del concentrado de plomo en la planta concentrado centenario.....	35
Figura 24: Diagrama de Pareto para la recuperación de plomo por diseño factorial fraccionado	48
Figura 25: Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plomo por diseño factorial fraccionado	49
Figura 26: Diagrama de Pareto para la recuperación de plata por diseño factorial fraccionado	52
Figura 27: Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plata por diseño factorial fraccionado.....	53
Figura 28: Diagrama de Pareto de la recuperación de plomo por diseño octogonal.....	72
Figura 29: Grafica de efectos principales para la recuperación de plomo por diseño octogonal	73
Figura 30: Grafica de contorno para la recuperación de plomo vs grado de liberación y Z- 11 por diseño octogonal.....	74
Figura 31: Gráfica de superficie de la recuperación de plomo vs grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal	75
Figura 32: Diagrama de Pareto de la recuperación de plata por diseño octogonal	78
Figura 33: Grafica de efectos principales para la recuperación de plata por diseño octogonal.....	79
Figura 34: Grafica de contorno para la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal	80
Figura 35: Grafica de superficie de la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal.....	81
Figura 36: Valores óptimos de consumo de Z-11 y porcentaje de grado de liberación para la máxima recuperación de plomo y plata.....	82

Introducción

La Planta Concentradora Centenario, ubicada en la provincia de Huaral, es una empresa que proporciona servicios de procesamiento de minerales a terceros mediante el método de flotación. En la actualidad, su capacidad de procesamiento es de 350 toneladas por día.

Actualmente, en la Planta Concentradora se está procesando un mineral de plomo con contenido de plata, proveniente de la zona de Huaraz-Ancash. En la cancha de almacenamiento de mineral de la planta, hay 36,000 toneladas de este mineral, que se procesarán en un período de 4 meses durante la primera campaña. Se tiene proyectado procesar un total de 5 campañas de este tipo de mineral.

En aquel tiempo, yo ocupaba el puesto de jefe de guardia y tomé la iniciativa de realizar un estudio del concentrado de plomo para mejorar las leyes y recuperaciones de plomo y plata. Dado que el valor del concentrado se relaciona directamente con estos elementos, demostrar que es posible aumentar la ley y la recuperación de plomo y plata incrementaría su valor del concentrado, con el objetivo final de aumentar las ganancias para la empresa a la que se le brinda el servicio.

Inicié el estudio realizando un correcto muestreo del mineral en la cancha, del cual obtuve 101 kilos. Estos 101 kilos fueron llevados al laboratorio metalúrgico, donde los procesé a través de la chancadora de quijada hasta alcanzar una malla de -10 en un 100%. Seguidamente, realicé un homogeneizado y cuarteo adecuado de los 101 kilos a malla -10 para obtener 1000 gramos de mineral. Estos 1000 gramos se homogenizaron y cuartearon para obtener cinco muestras de 200 gramos cada una. Estas cinco muestras se llevaron a la pulverizadora durante 1 minuto y luego al laboratorio químico para analizar las leyes de cabeza de plomo y plata, obteniendo como promedio los siguientes resultados: plomo 6.49% y plata 3.65 oz/tn.

Mediante la aplicación práctica del correcto homogeneizado y cuarteo, los 100 kilos restantes que quedaron a malla -10 se dividieron en 100 muestras de 1 kilo cada una, que

se almacenaron en bolsas individuales. Estas muestras se utilizarán posteriormente para las pruebas de molienda y pruebas metalúrgicas, aplicando el diseño experimental para evaluar el aumento de la ley y la recuperación de plomo y plata de acuerdo a los factores utilizados en el procesamiento en operaciones planta.

Durante el transcurso del estudio, la Planta Concentradora ya estaba procesando el mineral, obteniendo en el concentrado de plomo las siguientes leyes: plomo 51.3% y plata 27.45 oz/tn. Estos resultados servirían como base para el objetivo del estudio, que era aumentar la ley y la recuperación de plomo y plata evaluando los factores que influyen en dichos parámetros en el concentrado. Dado que se proyectaba procesar cuatro campañas adicionales de un total de 36,000 toneladas de mineral (Urbina, 2022).

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

De acuerdo a los estudios actuales, el proceso de optimización en la extracción de minerales no se ha explorado completamente. Debido a la complejidad heterogénea de los minerales a procesar, estos tienden a tener un mayor contenido de metal en comparación con los minerales de otros países mineros. Por ello, es necesaria una investigación continua para optimizar los parámetros, lo que implica la adopción de tecnología avanzada de procesamiento.

La optimización del procesamiento de minerales basada en el diseño experimental consiste en una planificación racional de los experimentos para obtener la máxima información con el mínimo de experimentos necesarios. Estos métodos de optimización utilizan modelos estadísticos que pueden reducir de manera efectiva y significativa el costo de la investigación.

En el procesamiento de minerales, a través de las diferentes maneras de estudio de los procesos como la flotación, lixiviación, separación magnética u otros, nuestro objetivo es determinar las condiciones de operación que permiten la extracción de minerales con leyes de alta calidad. Esto incluye obtener polvos finos de cobre, plomo, zinc, plata, oro u otros metales. En estos casos, el problema de optimización es extremadamente complejo, ya que se deben considerar numerosas variables debido al diverso origen y composición del material a procesar.

Existen variedades de métodos de optimización, siendo uno de los más aceptados en diversas ramas de la ciencia y la ingeniería el método experimental de superficie de respuesta, desarrollado originalmente por Box y Wilson y posteriormente perfeccionado por Hunter et al. La aplicación de la superficie de respuesta implica ajustar un modelo matemático del proceso para así encontrar las condiciones óptimas de operación. Este método proporciona una perspectiva diferente para la interpretación y análisis de los resultados experimentales, permitiendo una optimización más precisa y eficiente del proceso de extracción de minerales (Urbina, 2022).

1.1 Generalidades

La Planta Concentradora Centenario está ubicado en el centro poblado Huacho Chico, en la provincia de Huaral, con sus oficinas centrales situadas en el Callao. Esta planta es administrada por la Corporación CMCZ S.A.C donde el Sr. Cesar Wilfredo Cavero tiene el cargo de gerente general. Esta empresa cuenta con una planta de procesamiento de minerales polimetálicos, un laboratorio químico y un laboratorio metalúrgico. Desde estas instalaciones, prestan servicios de procesamiento de minerales polimetálicos a terceros que traen su mineral y se les entrega el producto ya sea en concentrado de cobre, plomo o zinc.

Dicha planta fue fundada el 29 de mayo de 2017 pero inicio sus labores continuas en el año 2020 y está considerada dentro de la pequeña minería ya que tiene una capacidad actual de procesamiento de 350 toneladas por día. En la actualidad se dedica principalmente al beneficio de los minerales polimetálicos empleando la flotación selectiva y su respectivo análisis químico de leyes de cabeza, concentrados y relave

Los terceros trasladan el mineral que se va a procesar de diferentes labores del Perú, entre estos productores tenemos a Gloree, Copemina, Ares, Baema, etc.

1.1.1 Ubicación

La Planta Concentradora Centenario se ubica en el centro poblado Huacho Chico, en la provincia de Huaral perteneciente a Lima, a un nivel de altitud de 200 msnm.

Figura 1

Vista Satelital-Planta Concentradora Centenario-Huaral-Lima.



Nota: Fuente tomada de Google Maps.

1.1.2 Acceso

Tabla 1

Primera manera de trayecto físico.

Centro de Lima-Terminal Zbuss	10 km	25 minutos
Terminal Zbuss-Provincia de Huaral	75 km	95 minutos
Provincia de Huaral-Huacho Chico (Planta Concentradora Centenario)	15 km	30 minutos

Nota: Adaptado de (Urbina, 2022).

Tabla 2

Segunda manera de trayecto físico.

Centro de Lima-Terminal Zbuss	10 km	25 minutos
Terminal Zbuss-Desvió a Huacho Chico (óvalo río seco)	105 km	115 minutos
Desvió a Huacho Chico (óvalo río seco)-Huacho Chico (Planta Concentradora Centenario)	15 km	30 minutos

Nota: Adaptado de (Urbina, 2022).

1.1.3 Recurso Hídrico

La Planta Concentradora Centenario cuenta con dos reservorios de agua, que son alimentados por una reserva de agua proveniente del río. Esta reserva de agua está ubicada en el centro poblado Huacho Chico, y el suministro de agua fresca a los reservorios se llenan mediante bombas de agua.

Estas reservas de agua fresca están constituidas por dos reservorios. El reservorio N°1 tiene un volumen de 725 m³ y el reservorio N°2 tiene un volumen de 1150 m³, que en uso continuo de proceso dura para 4 días aproximadamente (Urbina, 2022).

Figura 2

Pozas de almacenamiento de agua fresca.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

1.2 Descripción de la problemática

En la Planta Concentradora Centenario los minerales provienen de diferentes partes del Perú como Ancash, Huaraz, Ica, etc. La mayoría de estos minerales son de

pequeños mineros artesanales que siempre están en la búsqueda de pequeñas plantas de procesamiento para tratar sus minerales. Estos minerales en su mayoría se conforman mineralógicamente de:

- Chalcopirita: Se denomina por la siguiente nomenclatura CuFeS_2 y está conformado por el 34.62% de cobre (Cu), 30.43% de Hierro (Fe) y 34.94% de Azufre (S). En sus características principales esta su gravedad específica de 4.2 y una dureza en la escala de Morse de 3.75.
- Esfalerita: Se denomina por la siguiente nomenclatura ZnS y está conformado por el 67% de Zinc (Zn) y 33% de azufre (S). En sus características principales esta su gravedad específica de 4 y una dureza en la escala de Morse de 3.79.
- Galena: Se denomina por la siguiente nomenclatura PbS y está conformado por el 86.6% de Plomo (Pb) y 13.14% de Azufre (S). En sus características principales esta su gravedad específica de 7.5 y una dureza en la escala de Morse de 2.5.

Existen parámetros claves en el procesamiento de minerales que son denominados KPI's críticos, entre ellos tenemos:

- El alto Work Index que puede presentar el mineral a procesar, ocasionado desgastes prematuros en las chancadoras y mayor tiempo de utilización de los equipos de chancado.
- Escases de stock de repuestos de los equipos en general.
- Gran tamaño del mineral que se procesara.
- Fallas continuas en los equipos de planta por falta de un adecuado mantenimiento preventivo.
- Por la granulometría no adecuada a molienda ocasionando los desgastes de los forros internos de los molinos.
- Recuperación de plomo.
- Recuperación de plata.
- Dosificación de reactivos.

Por lo tanto, analizamos los factores o parámetros cruciales del proceso de flotación del concentrado de plomo, que incluyen: consumo de sulfato de zinc (g/tn), consumo de xantato isopropílico de sodio (g/tn), consumo de metabisulfito de sodio (g/tn) y grado de liberación (%). Al optimizar estas variables, se puede lograr una mejor calidad de plomo y una mayor recuperación de este metal. Además, se busca mejorar tanto la calidad como la recuperación de plata (Castro, 2005).

1.3 Objetivo del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Analizar los factores que afectan el proceso de flotación del concentrado de plomo e identificar las variables más importantes con el objetivo de optimizar la dosificación de reactivos, mejorando así la calidad y la recuperación de plomo y plata.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar el grado de influencia de los factores (sulfato de zinc, xantato isopropílico de sodio, bisulfito de sodio y grado de liberación) en el proceso de flotación de plomo.
- Determinar el grado de influencia de los factores (sulfato de zinc, xantato isopropílico de sodio, bisulfito de sodio y grado de liberación) en el proceso de flotación de la plata.
- Cálculo del incremento en el porcentaje de recuperación de plomo y plata basada en los resultados del diseño factorial fraccionado obteniendo un aumento en el porcentaje de recuperación de plomo y plata basado en los resultados obtenidos durante la etapa de optimización mediante la aplicación del diseño octogonal.

1.4 Antecedentes Investigativos

1.4.1 Antecedentes Referenciales

En la actualidad, el sector de concentrados polimetálicos enfrenta desafíos significativos debido a las fluctuaciones en los costos del mercado internacional. Es crucial optimizar los procesos para mantener la competitividad reduciendo costos y gastos de procesamiento.

Por lo tanto, los estudios de pruebas de flotación son fundamentales, y la experiencia juega un papel crucial para limitar el número de variables y determinar el nivel de análisis necesario para estas variables.

El número de variables que influyen en los resultados metalúrgicos durante la flotación es extenso y puede agruparse en tres categorías:

- Las variables relacionadas con el mineral de alimentación a la etapa de molienda incluyen el pH de la pulpa, el tamaño de partícula del mineral, la densidad del overflow y las características microscópicas del mineral chancado.
- El tiempo de molienda y la dosificación de reactivos son dos variables críticas en el proceso.
- En la etapa de flotación, las variables importantes incluyen la altura del colchón de espuma, la dimensión de las burbujas, la forma geométrica de las celdas de flotación y la dosificación de reactivos de flotación.

De ahora en adelante, considerando las variables del estudio y evaluando su impacto en el proceso de flotación, realizaremos pruebas de investigación utilizando el diseño experimental para obtener la máxima información. Emplearemos métodos estadísticos para analizar el efecto de cada variable, lo cual nos permitirá explicar y resolver los problemas metalúrgicos, incluyendo la mejora en la calidad y recuperación de plomo y plata (Urbina, 2022).

Con las referencias de anteriores trabajos de optimización aplicando diseños de experimentos evaluando los factores que se involucren en el proceso de flotación del concentrado de plomo para así dar la mejor solución a las bajas recuperaciones de plomo y plata en el concentrado de plomo logrando reducir de manera significativa los costos de investigación.

Primeramente, emplearemos la etapa de eliminación haciendo uso de un diseño factorial fraccionado con dos variables de respuesta que son la recuperación de plomo y la segunda que es la recuperación de plata. Los factores que estudiaremos son el sulfato de zinc, xantato isopropílico de sodio, metabisulfito de sodio y grado de liberación para

determinar el grado de significancia que tiene cada uno de estos en la recuperación de plomo y plata, para luego elegir los dos mas influyentes que lo ejecutaremos en la etapa de optimización.

Aplicando el diseño octogonal optimizamos los factores más influyentes logrando aumentar la recuperación de plomo y plata teniendo por finalidad un impacto positivo en los costos de procesamiento en planta donde están incluidos el menor consumo de reactivos, menor energía utilizada de los equipos y el concentrado de plomo tendrá mayor valor económico en su comercialización (Cubas, 2023).

1.4.2 Hipótesis

“Si optimizamos los parámetros o factores más influyentes en el proceso de flotación del plomo, podremos mejorar tanto la calidad como la recuperación del plomo y de la plata”.

1.4.3 Hipótesis Específicas

- Asegurar la máxima recuperación de plomo con una calidad comercial adecuada del plomo.
- Asegurar la máxima recuperación de plata con una calidad comercial adecuada de la plata.
- Alcanzar la optimización para aumentar los ingresos por la venta de cada tonelada de concentrado de plomo.

1.4.4 Justificación de la Investigación

Este trabajo de investigación se llevó a cabo con el fin de abordar problemas operativos comunes en empresas mineras que procesan minerales polimetálicos. Estos problemas afectan la recuperación de minerales valiosos en el concentrado de plomo.

1.4.5 Tipo de Investigación

Este estudio representa una investigación pionera en la industria minera, que vincula datos obtenidos experimentalmente.

1.4.6 Marco metodológico del diseño experimental

1.4.6.1 Operación de las Variables. Para la etapa de descarte de datos, se utilizará la técnica del diseño factorial fraccionado, mientras que para la etapa de optimización se aplicará el diseño octogonal. Estos dos métodos se aplicarán a través de la información brindada por el software estadístico Minitab para evaluar, interpretar y optimizar los factores o variables.

Para llevar a cabo este estudio se analizarán las siguientes variables o factores:

- Variables o factores controlables (X_i): Consumo de sulfato de zinc (g/tn), consumo de xantato isopropílico de sodio (g/tn), consumo de metabisulfito de sodio (g/tn) y grado de liberación (%).
- Variables o factores dependiente (Y_i): Ley de plomo en el concentrado de plomo, recuperación de plomo en el concentrado de plomo, ley de plata en el concentrado de plomo y recuperación de plata en el concentrado de plomo.
- Variables o factores intervinientes no controlables (U_i): Gradp de acidez o alcalinidad de la pulpa y work index del mineral.

1.4.6.2 Población y muestra. El mineral que se está procesando en la planta presenta el siguiente comportamiento mineralógico:

- Mena: Galena con contenido de plata.
- Ganga: Insolubles, cuarzo y pirita.

Del mineral de plomo que es un sulfuro primario en forma de galena, mediante el proceso de flotación, se obtiene concentrado de plomo que contiene plata.

1.4.6.3 Técnicas de análisis de datos. Se emplearon estrategias estadísticas para ajustar los datos e identificar patrones que revelan variables asociadas con el proceso. Para este fin, se utilizó un diseño factorial fraccionado para evaluar la importancia de los factores controlables, y un diseño octogonal para la optimización.

Mediante todo el estudio, análisis e interpretación de los datos estadísticos obtendremos:

- Los efectos de la significancia de las variables controlables se analizaron utilizando el diagrama de Pareto, gráficos de efectos principales con sus respectivas interacciones.
- Análisis de varianza y el modelo matemático que gobierna a las dosificaciones.
- Grafica de contorno y grafica de superficie.
- Parámetros óptimos en la etapa de optimización.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Etapas de Chancado*

En la conminución de minerales, el chancado es la primera etapa mecánica del proceso cuyo objetivo principal es liberar minerales valiosos del mineral a procesar.

Normalmente es una operación en seco y se realiza sustancialmente en dos o tres etapas. Los bloques de mineral extraídos directamente del tajo, ya sea de una mina subterránea o a cielo abierto, tienen un tamaño aproximado de 120 centímetros de diámetro, que se reduce a 18 centímetros en la etapa de chancado primario utilizando máquinas diseñadas para manipular estos minerales de alta dureza.

Tiene como objetivo principal:

- La separación o liberación de los minerales valiosos de la ganga que se da antes de la fase de concentración.

En la industria minera, tanto en pequeña, mediana como gran escala, se utilizan diversos equipos de trituración, clasificados principalmente según el tamaño de alimentación del mineral, entre ellas tenemos:

2.1.1.1 Chancadoras Primarias. El objetivo principal de una chancadora primaria es reducir el material a un tamaño adecuado para su transporte mediante una faja transportadora. En la mayoría de las instalaciones de chancado, se utiliza una chancadora de mandíbula para el chancado primario. En plantas con capacidades muy altas, típicas en la minería, pero menos comunes en la producción de agregados, se prefiere utilizar una chancadora giratorio primario. Cuando el material a procesar es fácil de triturar y no es muy abrasivo, una chancadora de impacto puede ser la mejor selección. Una de las características más importantes de una chancadora primaria es su capacidad para aceptar material de alimentación sin obstrucciones. Por supuesto, una chancadora primaria de gran tamaño es más costoso que uno más pequeño, por lo que los cálculos de costo de inversión se comparan con los costos totales de las etapas primarias, que incluyen limpieza, voladura

y perforación en la superficie de la mina. En muchos casos, los camiones de volteo transportan la roca hasta una chancadora primario estacionario, lo cual puede resultar costoso debido a la amortización, el combustible, los neumáticos y el mantenimiento de los vehículos que tienen una alta demanda. Por eso, en las operaciones modernas de trituración de minerales, a menudo la solución más económica es utilizar chancadoras móviles que puedan desplazarse cerca de la pared.

Figura 3

Trituradora de mandíbula de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.1.1.2 Chancadoras Secundarias. El objetivo del chancado intermedio por medio de chancadoras secundarias es generar diversos productos de tamaño grueso, como material preparado para el chancado final. En términos generales, los objetivos del chancado secundario, terciario y cuaternario son lograr la máxima reducción de tamaño con el menor costo posible. Las rocas llegan hasta un tamaño de producto de aproximadamente 2" a 3". En esta etapa de chancado, las chancadoras de cono son frecuentemente utilizados debido a su alta capacidad y bajos costos operacionales.

Figura 4

Trituradora cónica de la planta concentradora centenario



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.1.1.3 Chancadoras Terciarias. Después del chancado secundario, se utilizan equipos que toman como alimentación el producto de esa etapa. El producto de estos equipos varía significativamente entre 1/2 y 1/8 de pulgada. Los equipos que generalmente se usan en esta etapa están las chancadoras de rodillos.

Figura 5

Trituradora de rodillos de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de manual de operaciones Tecsup-Marcobre.

Por lo tanto, el proceso de chancado se considera fundamental en cualquier operación metalúrgica. Además, la mayor parte del consumo energético en estas operaciones se concentra en la reducción del tamaño de los materiales provenientes de la mina, durante los procesos de conminución (Currie, 1984).

2.1.2 Etapa de molienda de minerales

Este es el siguiente paso mecánico en el proceso posterior al chancado, donde el tamaño de las partículas de los minerales entrantes se reduce aún más hasta alcanzar aproximadamente entre 65 y 175 micrones, lo que permite liberar la mayoría de los minerales a procesar. Las partículas ya liberadas pueden recuperarse mediante procesos de concentración como la flotación o la lixiviación.

El proceso se realiza utilizando grandes equipos rotativos o molinos cilíndricos y consta de dos tipos diferentes de molienda: molienda convencional y molienda no convencional. Durante esta etapa, se agrega una gran cantidad de agua al material mineralizado para formar una pulpa, junto con los reactivos necesarios para el proceso de flotación.

En el procesamiento de minerales, el tamaño óptimo de liberación se determina generalmente mediante consideraciones técnicas y económicas. Cuanto más finamente se muele el mineral, mayor es el costo de molienda. Hasta cierto punto, una molienda más fina mejora la recuperación de valores, pero una molienda excesiva puede provocar pérdidas del mineral valioso. Por lo tanto, la molienda óptima se alcanza cuando el tamaño del producto en el proceso de molienda ofrece los mayores beneficios en términos de consumo de energía y de índices metalúrgicos máximos (Currie, 1984).

2.1.3 Etapa de flotación de minerales

La etapa de flotación de minerales es un proceso fisicoquímico donde se concentran minerales finamente molidos a un tamaño de malla -200 al 60%. Este proceso incluye el tratamiento químico del mineral molido para establecer las condiciones óptimas, permitiendo que las partículas de minerales valiosos se adhieran a las burbujas de aire en la celda de flotación.

Factores que intervienen en la flotación:

En resumen, en esta etapa intervienen cuatro variables o factores esenciales, las cuales tenemos:

La pulpa de mineral

Es una mezcla heterogénea de minerales que ha sido previamente molida y es el componente principal en el proceso de flotación porque contiene todos los elementos constituyentes de los minerales. Esta pulpa debe cumplir con ciertas condiciones, lo que significa que el mineral debe estar finamente molido a un tamaño de partículas no mayor a 300 micras y no menor a 55 micras. Dentro de este rango de tamaños de partículas, se pueden recuperar de manera efectiva las valiosas partículas de sulfuro, aunque esto depende de la estructura mineralógica específica del tipo de mineral.

Si la pulpa está compuesta por partículas gruesas debido a la ineficiencia en la etapa de molienda, estas partículas tienden a precipitarse en la parte inferior de las celdas de flotación. Este problema operativo, conocido como arenamiento de las celdas de flotación, puede causar atascos en las tuberías, paradas inesperadas del impulsor y potencialmente dañar los motores de las celdas.

En caso contrario, si la pulpa está compuesta por partículas muy finas, estas tenderán a flotar en forma de lamas en las celdas de flotación. Este problema operativo, conocido como lameado de las celdas de flotación, reduce la eficiencia de recuperación, ya que las partículas de minerales valiosos en forma de lamas se pierden en el relave.

El aire en las celdas de flotación

El aire es un factor esencial en la formación de burbujas necesarias en la celda de flotación, ya que contribuye a la agitación de la pulpa. La espuma resultante tiene la función de elevar o hacer flotar los elementos valiosos hacia la superficie de la pulpa en cada tanque o circuito de flotación.

Los reactivos químicos

Los reactivos son en su totalidad productos químicos empleados para recuperar sulfuros valiosos, deprimir el progreso de sulfuros insolubles. Al agregar reactivos, se

puede seleccionar y procesar los elementos valiosos en los concentrados correspondientes.

Para tener el panorama claro de las funciones específicas de cada reactivo, se pueden clasificar en tres grupos: agentes espumantes, colectores y modificadores. En adelante, se profundizará en los reactivos químicos utilizados en la preparación de este trabajo de investigación.

Concluyendo, en la etapa de flotación, los reactivos de flotación permiten que los elementos valiosos que deseamos recuperar se adhieran a las burbujas, generando su flotabilidad.

La Agitación

El factor de agitación de la pulpa del mineral facilita la formación de burbujas de aire necesarias para la flotación de minerales y contribuye a crear una mezcla homogénea dentro de la celda de flotación. Además, la agitación previene que los sólidos de la pulpa se sedimenten en el fondo de la celda de flotación (Azañero, 2015).

2.1.4 Etapa de espesamiento de concentrado y relaves

En la etapa de espesamiento se define para la sedimentación de partículas sólidas suspendidas en un líquido bajo la influencia de la gravedad. En el procesamiento de minerales polimetálicos, los espesadores se utilizan frecuentemente para concentrar o sedimentar desechos y recuperar agua del proceso, así como muchos concentrados antes de la filtración. Estos dispositivos, denominados espesadores, forman parte de un circuito de decantación a contracorriente (CCD) y son los más empleados. También pueden servir como capacidad de almacenamiento para la mezcla y deshidratación intermedia de productos de flotación mineral.

De manera global, todos los espesadores operan basándose en el principio de gravedad para la precipitación de sólidos. La cantidad de floculante utilizada está relacionada con las propiedades de la pulpa a espesar. A veces, una parte de la pulpa se asienta, formando una línea de separación definida. Los principales factores que influyen en la velocidad de sedimentación son la dilución inicial de la alimentación, el tamaño y la

forma de las partículas, la densidad de las partículas y la viscosidad de la mezcla (Fuenzalida, 2017).

2.1.5 Filtración

El proceso de filtración es un proceso mecánico que consiste en extraer líquidos de la pulpa para separar sus sólidos y/o recuperar líquidos valiosos en una concentración suficiente para su procesamiento, transporte, disposición final o reciclaje. Hay varios tipos de filtros, entre los más destacados se encuentran el filtro prensa, el filtro de tambor y el filtro de vacío, filtro de discos, etc. (Hinostroza, 2021).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Descripción del proceso

La Planta Concentradora Centenario ofrece servicios de procesamiento de minerales polimetálicos mediante flotación. Con una capacidad máxima de tratamiento de 320 toneladas por día, la planta procesa principalmente sulfuros de cobre, plomo y zinc. El concentrado de cobre suele estar asociado con oro y plata, mientras que el concentrado de plomo y zinc está vinculado a la plata. Los minerales a procesar provienen de diversas regiones del país, como Cerro de Pasco, Casma, Huarmey, Trujillo y Huaraz, y se almacenan en la cancha de mineral en espera de su procesamiento.

Figura 6

Almacenamiento de minerales polimetálicos.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

La fuente de que nos abastece de agua proviene del agua del río, que se almacena en dos reservorios conocidos como reservorios de agua fresca. Además, disponemos de dos reservorios adicionales que contienen el agua utilizada en el proceso, denominados reservorios de agua recirculada.

Figura 7

Poza de almacenamiento de agua recirculada.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.2.1.1 Etapa de Chancado. Esta etapa incluye un chancado primario y un chancado secundario. El material mineral almacenado en la cancha se transporta en camión y se descarga sobre una criba estática de 8.2", que a su vez alimenta una tolva de gruesos con una capacidad de 125 toneladas.

Figura 8

Plataforma de la tolva de gruesos.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

Cuando la tolva de gruesos alcanza su capacidad máxima, se procede al chancado primario. Esta etapa utiliza una chancadora de quijada de 16"x25", que se alimenta con el mineral fresco de la tolva de gruesos a través de una zaranda estacionaria con abertura de 5/8".

Figura 9

Vista general del área de chancado de planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

El producto de la etapa de chancado primario se clasifica mediante una zaranda vibratoria con una abertura de 1/4". El material que pasa por la zaranda (undersize) alimenta una tolva de finos con una capacidad de 135 toneladas. El material que no pasa por la zaranda (oversize) se dirige a una chancadora cónica de 3', considerada para el chancado secundario.

Figura 10

Trituradora cónica de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.2.1.2 Etapa de molienda y clasificación por hidrociclones. Está constituida por tres molinos de bolas, el primer molino de 5'x 5', el segundo molino de 5'x 6' y el tercer molino que es de remolienda de 6'x 8'.

Figura 11

Vista general del área de molienda de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

Desde la tolva de almacenamiento de finos sirve de alimenta al molino 5'x 5' y molino de 6'x 8' a través de dos fajas transportadoras. Estos molinos tienen una descarga de pulpa que es enviada a un cajón de un metro cubico de capacidad. A este cajón se le agrega agua con la finalidad de bajar la densidad y esta carga diluida es bombeada al ciclón D-10 el cual clasifica la carga en finos y gruesos. La carga fina se le conoce como descarga del overflow el cual alimenta al circuito de flotación y la carga gruesa como underflow el cual retorna al molino de remolienda.

Figura 12

Cajón de descarga de pulpa de los molinos de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.2.1.3 Etapa de Flotación de minerales polimetálicos. Está conformada por el circuito de flotación de plomo, circuito de cobre y circuito de zinc.

Circuito de flotación de plomo

Se compone por una celda WS 6.5'x 7.5', una celda WS 7.5'x 8.5' y un banco de celdas 44"x 44".

Figura 13

Vista general del circuito de flotación de plomo de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

La alimentación para este circuito proviene del overflow del hidrociclón y pasa a las celdas WS para su flotación y para limpieza ingresa al banquito de celdas. Toda la flotación de plomo se realiza en un PH de 7.5 a 9.5.

Circuito de flotación de cobre

Se compone por una celda WS 6.5'x 7.5', un banco de celdas 33.2"x 33.2", un banco de celdas 28.5"x 28.5" y finalmente un banco de celdas 33.5"x 35.5". La flotación de cobre se trabaja en un PH de 7 a 10.5.

Figura 14

Vista general del circuito de flotación de cobre de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

Circuito de flotación de zinc

Se compone por una celda WS 7.5'x 8.5', dos celdas WS 6.5'x 7.5' y un banco de celdas 35"x 41.5".

Figura 15

Vista general del circuito de flotación de zinc de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

El alimento de este circuito es el relave proveniente de la flotación de cobre o de plomo. En el alimento se agrega cal para llegar a un PH 12 y también sulfato de cobre para activar las partículas de zinc y pueda flotar. Lo que no flota de este circuito se considera el relave final del proceso que es enviado a la presa de relaves mediante bombeo.

Figura 16

Vista general de la relavera de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.2.1.4 Etapa de Filtrado. Se compone de un disco de filtros 6x4 donde se alimenta del concentrado de cobre o plomo que viene de la flotación. Se basa principalmente en separar el líquido del sólido, para obtener el concentrado con un porcentaje de humedad menor al 10%.

Figura 17

Vista general del área de filtrado de concentrados de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.2.1.5 Etapa de recojo de concentrado. Todo el concentrado que se acumula de la descarga de los filtros se almacena en la cancha de almacenamiento de concentrados para luego proceder a despacharlos a sus respectivos dueños (Urbina, 2022).

Figura 18

Loza de almacenamiento de concentrados.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

2.3 Teoría del diseño experimental

El diseño experimental aplica el método científico para comprender un proceso a través de experimentos cuidadosamente planificados. Este enfoque integra técnicas estadísticas y de ingeniería con el objetivo de analizar situaciones complejas o difíciles.

El objetivo del diseño experimental es investigar cómo las variables controlables afectan las variables de respuesta.

Los factores controlables se dividen en dos categorías: cualitativos (como equipos, tipos de material, trabajadores, formas de contorno, depreciación de equipos, etc.) y cuantitativos (como pH, temperaturas, consumo de reactivos, tiempo de secado, variación de presiones, porcentaje de sólidos, etc.). El propósito es analizar cómo cada variable controlable influye en las variables de respuesta (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

2.3.1 Experimento

Un experimento se define como la modificación o variación de las condiciones operativas de un sistema o proceso para medir el impacto de estos cambios en una o más características clave de un producto o resultado. Los experimentos nos permiten mejorar nuestra comprensión de un sistema o proceso. Por ejemplo, un proceso químico puede probarse a diferentes temperaturas y presiones, y los cambios observados en el rendimiento o la eficiencia del proceso pueden medirse. El análisis de los efectos o datos resultantes conducirá a una mejor comprensión del proceso químico, lo que permitirá una ejecución más eficiente del mismo.

2.3.2 Unidad experimental

Las unidades experimentales son piezas o muestras utilizadas para obtener los valores que mejor representen los resultados de un experimento o prueba. En cualquier aplicación del diseño experimental, es crucial entender cuidadosamente la definición de unidad experimental, ya que se refiere a una pieza o muestra de una sustancia, o un conjunto de piezas producidas, que dependerán del proceso en estudio. Por ejemplo, si se quisieran explorar alternativas para reducir el porcentaje de piezas defectuosas en una

producción masiva, no sería confiable usar una sola pieza como unidad experimental, ya que los defectos se observarían solo en esa única condición experimental. Una unidad experimental, en este caso, sería un cierto número de piezas producidas bajo las mismas condiciones experimentales. El objetivo es analizar cuántas de esas piezas están dañadas o necesitan ser reemplazadas, y cuántas están en buenas condiciones.

2.3.3 Etapas en el diseño de experimentos

Una de las características esenciales de la planificación experimental es la recomendación de cuáles pruebas experimentales deben llevarse a cabo y cuántas veces deben repetirse para obtener la mayor cantidad de información al menor costo. Un diseño creado a través de varios procesos, considerando la repetición posterior, se denomina matriz de diseño o simplemente diseño.

Cabe resaltar que, para llevar a cabo un estudio experimental exitoso, es necesario realizar varios experimentos en determinadas etapas. En resumen, se puede afirmar que la etapa más crucial y que demanda más tiempo es la planificación. Las distintas fases del desarrollo experimental se detallarán de manera continua y resumida para proporcionar una visión global que resulte de su desarrollo y aplicación completos.

2.3.3.1 Planeamiento y realización.

Comprender y definir cuál es la pregunta de investigación.

En esta etapa de diseño, se tiene que elaborar un estudio para saber si es viable con el fin de comprender y definir el problema de investigación. Es crucial entender la importancia de este problema y, en caso de que sea un problema, determinar su gravedad o severidad.

Seleccionar las variables de respuesta a analizar en cada punto del diseño experimental para verificar que su determinación sea precisa y confiable.

La selección de estas variables es fundamental porque reflejan los resultados de las pruebas realizadas. Por lo tanto, es esencial elegir aquellas variables que mejor representen el problema o que sean muy específicas del objeto de estudio. Además, debemos asegurarnos de que las mediciones de las variables resultantes sean altamente

confiables. Esto implica garantizar que el método de medición utilizado proporcione resultados precisos y exactos en las pruebas realizadas, manteniendo ciertos porcentajes de precisión y exactitud.

Decida qué factores o variables probar en función de su importancia para la variable de respuesta.

Esto no implica que el experimentador deba conocer de antemano qué factores influyen en las variables de respuesta, ya que ese es precisamente el objetivo del experimento. Sin embargo, es crucial que utilice toda la información disponible para incluir las variables más relevantes consideradas en el estudio.

Elija los niveles de cada factor y el diseño experimental que mejor se adapte a esos factores y al propósito del experimento.

Aquí es fundamental determinar cuántas réplicas de cada experimento se llevarán a cabo, considerando el costo, el tiempo necesario para completarlo y la precisión del experimento.

Planificar y organizar el trabajo piloto.

Por otro lado, una vez que se tenga una base previamente desarrollada para elegir un diseño, se debe planificar y organizar todos los detalles del experimento. Esto incluye la cantidad de personas involucradas, cómo se llevará a cabo el trabajo experimental, la secuencia de las pruebas, los recursos necesarios, y cualquier otro detalle logístico que asegure la ejecución eficiente y efectiva del experimento.

Realizar trabajos piloto.

Finalmente, se debe seguir el plan descrito en el paso anterior. Si se descubre un nuevo incidente, es importante revisar a quién se debe informar y qué acciones tomar en función del nuevo incidente. Esto asegura que cualquier imprevisto sea gestionado adecuadamente y que el experimento continúe según lo planeado.

2.3.3.2 Análisis. Lo más importante a recordar en esta etapa es que los resultados de un experimento representan una interpretación de una muestra, no de una población. Por lo tanto, es necesario utilizar métodos estadísticos inferenciales para

determinar si las diferencias observadas son lo suficientemente significativas como para confirmar una diferencia general. El método estadístico principal en el que se basa el análisis experimental es el análisis de varianza, conocido como ANOVA por sus siglas en inglés.

2.3.3.3 Interpretación. En esta etapa, basándose en un análisis estadístico formal, se debe investigar con más detalle lo que sucedió en el experimento. Esto incluye desde probar las conjeturas iniciales con resultados experimentales hasta explorar y observar nuevos estudios. Los resultados obtenidos durante el proceso permiten verificar los nuevos conocimientos adquiridos, confirmar las hipótesis y seleccionar el mejor método o tratamiento, siempre respaldado por pruebas estadísticas.

2.3.3.4 Control y conclusiones. Al resumir nuestro estudio experimental, es recomendable sugerir las medidas que se tomarán para garantizar los resultados del estudio y preservar los mejores datos obtenidos (Gutiérrez Pulido Humberto, 2008). Esto incluye la documentación exhaustiva de los procedimientos utilizados, la validación de los resultados mediante análisis repetidos y la implementación de sistemas de almacenamiento y manejo de datos que aseguren su integridad y accesibilidad a largo plazo. Además, es crucial establecer protocolos claros para la revisión y actualización periódica de los datos, así como para la comunicación de los hallazgos a todas las partes interesadas.

2.3.4 Arreglos ortogonales

El arreglo ortogonal es el diseño sugerido por el llamado Taguchi. Como recomienda Taguchi este diseño posee la propiedad de ortogonalidad.

Taguchi también recomienda enumerar en la primera columna los factores que se consideran más difíciles de cambiar de una prueba a otra. Al final, Taguchi no propuso realizar el experimento de forma aleatoria, como se hace en el diseño clásico, sino que destacó las dificultades prácticas y las deficiencias de esta elección (Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Listado de equipos empleados en laboratorio metalúrgico

- Chancadora de quijada de 4"x 5.5".
- 02 Picetas de ½ litro, 1 litro, 1 ½ litro y 2 litros.
- jeringas de 1 cm³.
- Lonas.
- 01 balanza digital de dos dígitos.
- 01 pulverizador de discos.
- Reactivos para flotación.
- 01 celda de flotación Denver.
- 01 molino de bolas.
- 05 plateadores de pulpa.
- vasos precipitados.
- 20 bandejas de acero inoxidable.
- 01 horno industrial para secado de muestras.

3.2 Cálculo del tiempo de molienda para un 60% malla -200

Para calcular el tiempo de molienda y determinar su efectividad en pasar el mineral a través de una malla -200, puedes seguir este procedimiento experimental:

Preparación de muestras:

- Muestra 1: 1 kg de mineral sin moler.
- Muestra 2: 1 kg de mineral molido por 5 minutos.
- Muestra 3: 1 kg de mineral molido por 10 minutos.
- Muestra 4: 1 kg de mineral molido por 15 minutos.

Procedimiento de molienda:

- Muestra 1: No se muele, pasa directamente por la malla -200 para obtener una referencia del tamaño original.
- Muestra 2: Muele el mineral durante 5 minutos y pasa por la malla -200.

- Muestra 3: Muele el mineral durante 10 minutos y pasa por la malla -200.
- Muestra 4: Muele el mineral durante 15 minutos y pasa por la malla -200.

Medición y análisis:

- Para cada muestra, pesa el material que logra pasar a través de la malla -200.
- Registra el peso del material retenido por la malla y el peso del material que pasa a través de la malla.
- Calcula el porcentaje de material que pasa por la malla -200 para cada tiempo de molienda.

Cálculo del tiempo de molienda:

- El porcentaje de material que pasa a través de la malla -200 se puede usar para determinar la eficiencia de la molienda en función del tiempo.
- Comparar los resultados de cada muestra para evaluar cómo el tiempo de molienda afecta la capacidad de pasar por la malla -200.

Conclusión

El tiempo de molienda tiene un impacto directo en la capacidad del mineral para pasar a través de la malla -200. A medida que aumenta el tiempo de molienda, se incrementa el porcentaje de mineral que pasa por la malla, mejorando la eficiencia del proceso. Sin embargo, es importante equilibrar el tiempo de molienda con el costo y la energía requerida para asegurar una operación eficiente y económica.

Figura 19

Molino de bolas del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.

En resumen, tenemos 4 tiempos con el debido % malla -200, el cual se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3

Cuadro de datos de los diferentes tiempos de molienda.

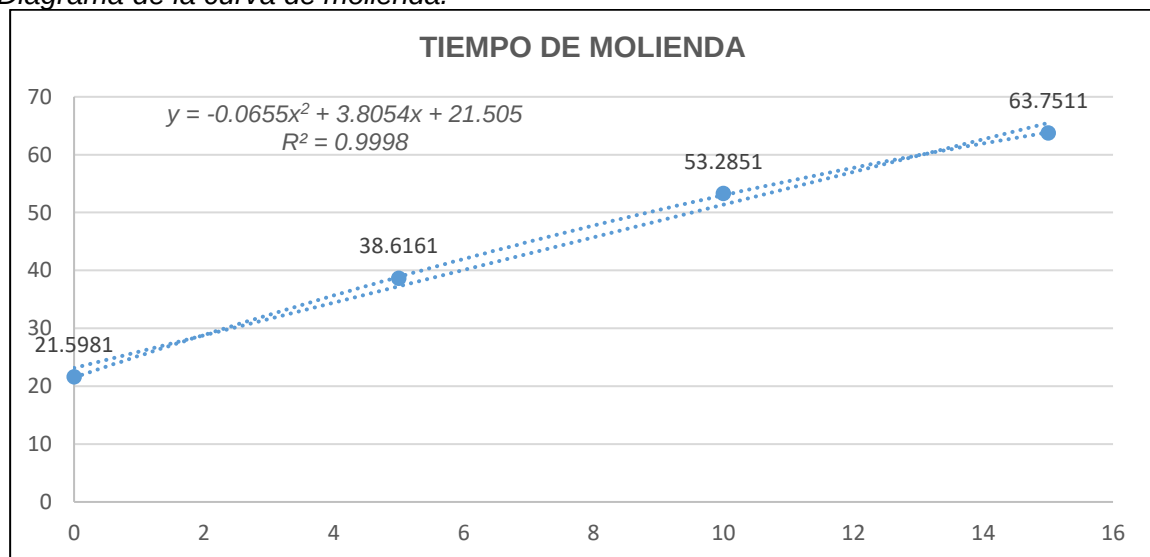
Tiempo	Peso malla +200(gr)	Peso malla -200(gr)	%malla -200
0	784.019	215.981	21.5981
5	613.839	386.161	38.6161
10	467.149	532.851	53.2851
15	362.489	637.511	63.7511

Nota: Fuente elaboración propia.

Una vez teniendo los resultados se procede a graficar la curva de molienda.

Figura 20

Diagrama de la curva de molienda.



Nota: Fuente elaboración propia.

Una vez graficada la curva de molienda, hallamos la ecuación de la curva y el R^2 :

Ecuación de la curva:

$$Y = -0.0655(X_2) + 3.8054(X) + 21.505$$

$$R^2 = 0.9998$$

Finalmente, para tener un 60% malla -200 se tiene un tiempo de:

Tabla 4

Tiempo de moliendabilidad para el 60% malla -200.

Tiempo	%malla -200
13.045 minutos	60

Nota: Fuente elaboración propia.

3.3 Consumo de reactivos por g/tn a nivel planta y dosificación de reactivos para las pruebas metalúrgicas

Considerando el consumo de reactivos en proceso, transformaremos este consumo a nivel laboratorio y realizaremos las pruebas metalúrgicas.

Tabla 5

Consumo promedio de reactivos en proceso del mineral de plomo y plata.

Consumo de reactivos (g/tn)		
ZnSO ₄ al 10%	Z-11 al 10%	NaHSO ₃ al 10%
85	115	25

Nota: Fuente tomada de datos experimentales del proceso en planta.

Tabla 6

Consumo promedio de reactivos en laboratorio metalúrgico del proceso en planta.

Consumo de reactivos (cc/kg)		
ZnSO ₄ al 10%	Z-11 al 10%	NaHSO ₃ al 10%
0.85	1.15	0.25

Nota: Fuente tomada de datos experimentales del proceso en planta.

3.4 Planteamiento de las variables controlables para la formulación del diseño factorial fraccionado

En la siguiente tabla, se muestra el rango de los factores en unidades reales. La prueba central refleja aproximadamente el valor histórico de las variables en la operación de la planta. La amplitud del rango es equidistante al punto central, abarcando los valores máximos y mínimos posibles.

Tabla 7

Valores mínimo, promedio y máximo de los factores por diseño factorial fraccionado.

VARIABLES	-1	0	1	UNIDAD
ZnSO ₄	75	85	95	g/tn
Z-11	110	115	120	g/tn
NaHSO ₃	20	25	30	g/tn
Grado de Liberación	50	60	70	%m-200

Nota: Fuente elaboración propia.

Factor X1 (ZnSO₄):

El sulfato de zinc es un reactivo de flotación que deprime las partículas de zinc en el mineral de plomo. Se sabe comercialmente que, si tenemos un concentrado de plomo

que contiene zinc, este concentrado se penaliza. Por lo tanto, el uso de este reactivo ayuda que el concentrado salga limpio de partículas de zinc. De acuerdo al consumo del proceso se tiene un valor central de 85 g/tn, un valor máximo de 95 g/tn y por último un valor mínimo de 75 g/tn.

Factor X2 (Z-11):

El xantato isopropílico de sodio, adecuadamente denominado, es un reactivo colector utilizado para la recuperación de minerales valiosos como cobre, plomo y zinc, con una mayor efectividad en los minerales de cobre. De acuerdo al consumo del proceso se tiene un valor central de 115 g/tn, un valor máximo de 120 g/tn y por último un valor mínimo de 110 g/tn.

Factor X3 (NaHSO₃):

El bisulfito de sodio es un reactivo depresor de minerales de fierro, zinc preparado a concentraciones adecuadas. Cuando se prepara a concentraciones altas deprime a los minerales de plomo. De acuerdo al consumo del proceso se tiene un valor central de 25 g/tn, un valor máximo de 30 g/tn y por último un valor mínimo de 20 g/tn.

Factor X4 (Grado de liberación):

Es el tamaño de partícula en el cual se encuentra libre las partículas valiosas de plomo y plata para recuperarlo por medio de flotación. Lo estudiaremos en conjunto con la curva de moliendabilidad que nos da para un 50% de malla -200 un tiempo de 8.830 minutos, para un 60% de malla -200 un tiempo de 13.045 minutos, y finalmente para un 70% de malla -200 un tiempo de 18.878 minutos.

Tabla 8

Dosificaciones de reactivos de las pruebas metalúrgicas por diseño factorial fraccionado.

N° Pruebas	PLANTILLA CODIFICADA				PLANTILLA DECODIFICADA			
	ZnSO ₄ (X1)	Z-11 (X2)	NaHSO ₃ (X3)	%m-200 (X4)	ZnSO ₄ (g/Tn)	Z-11 (g/Tn)	NaHSO ₃ (g/tn)	% m-200
1	-1	-1	-1	-1	75	110	20	50
2	1	-1	-1	1	95	110	20	70
3	-1	1	-1	1	75	120	20	70
4	1	1	-1	-1	95	120	20	50
5	-1	-1	1	1	75	110	30	70
6	1	-1	1	-1	95	110	30	50
7	-1	1	1	-1	75	120	30	50
8	1	1	1	1	95	120	30	70
9	0	0	0	0	85	115	25	60
10	0	0	0	0	85	115	25	60
11	0	0	0	0	85	115	25	60

Nota: Adaptado de (Cubas, 2023).

Una vez establecidos los valores mínimos y máximos de cada factor controlable, los introduciremos en el software para la aplicación del diseño factorial fraccionado. Este diseño nos proporcionará 8 pruebas metalúrgicas con diferentes valores de dosificación, además de 3 pruebas metalúrgicas adicionales con las dosificaciones iniciales, conocidas comúnmente como pruebas centrales. El objetivo de aplicar este diseño factorial fraccionado es identificar cuáles son las variables a considerar para el aumento de la recuperación-calidad de plomo y plata.

3.5 Pruebas de molienda y flotación

Teniendo 11 bolsas de mineral, cada una de 1 kg y con una ley de:

Tabla 9

Leyes de cabeza de plomo y plata del mineral en estudio.

	Pb	Ag
	%	oz/tc
Ley de cabeza	6.49	3.65

Nota: Fuente elaboración propia.

Estas 11 bolsas de 1 kg cada una se utilizarán para realizar las pruebas de flotación en el laboratorio metalúrgico, siguiendo las dosificaciones proporcionadas.

La preparación de reactivos se detallará a continuación que se usará en la realización de las pruebas metalúrgicas.

3.6 Preparación de reactivos

- Sulfato de zinc (ZnSO_4) al 10%: Utilizamos una fiola de 100 ml y echamos 10 gramos de sulfato de zinc, se procede a echar un poco de agua para diluir el sólido para finalmente enrasarlo con agua entre la tangente del menisco y de esta manera se obtiene el sulfato de zinc preparado al 10% de concentración.
- Xantato isopropilico de sodio (Z-11) al 10%: Utilizamos una fiola de 100 ml y echamos 10 gramos de xantato isopropilico de sodio, se procede a echar un poco de agua para diluir el sólido para finalmente enrasarlo con agua entre la tangente del menisco y de esta manera se obtiene el xantato isopropilico de sodio preparado al 10% de concentración.
- Bisulfito de sodio (NaHSO_3) al 10%: Utilizamos una fiola de 100 ml y echamos 10 gramos de bisulfito de sodio, se procede a echar un poco de agua para diluir el sólido para finalmente enrasarlo con agua entre la tangente del menisco y de esta manera se obtiene el bisulfito de sodio preparado al 10% de concentración.

3.7 Prueba de molienda y de flotación acorde al diseño factorial fraccionado

- Se usará el molino de bolas.

Figura 21

Molino de bolas del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.

- Estas pruebas de laboratorio se realizaron considerando un mineral de plomo.

Figura 22

Burbujas de concentrado de plomo en la flotación.



Nota: Fuente tomada de laboratorio metalúrgico de la planta concentradora centenario.

- Se flota el plomo teniendo como producto concentrado de plomo y lo que no llega a flotar es considerado relave, que son llevados a un horno para su secado correspondiente.

Figura 23

Acopio del concentrado de plomo en la planta concentradora centenario.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

- Teniendo seco el concentrado y relave, estos se envían al laboratorio químico para el análisis de sus leyes.

Los resultados de las pruebas metalúrgicas aplicando el diseño factorial fraccionado se detallarán a continuación:

3.7.1 Prueba de flotación # 1 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 10

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #1.

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.75 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.2 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 11

Pesos y leyes de la prueba de flotación #1.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	18.37	1	1	49.65	33.72
2da bandeja	34.36	2	3	46.45	22.79
3era bandeja	36.21	2	5	44.24	19.37
4ta bandeja	51.87	3	8	33.67	15.98
5ta bandeja	859.19			0.85	0.86

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.2 Prueba de flotación # 2 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 12

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #2.

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.95 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.2 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 13*Pesos y leyes de la prueba de flotación #2.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.23	1	1	51.32	35.29
2da bandeja	32.12	2	3	47.23	24.98
3era bandeja	34.29	2	5	46.67	21.28
4ta bandeja	50.18	3	8	35.48	15.87
5ta bandeja	866.18			0.82	0.84

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.3 Prueba de flotación # 3 por diseño factorial fraccionado:**Tabla 14***Consumo de reactivos en la prueba de flotación #3.*

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.75 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.2 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 15*Pesos y leyes de la prueba de flotación #3.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.21	1	1	62.54	42.21
2da bandeja	28.25	2	3	54.67	33.21
3era bandeja	29.93	2	5	52.23	27.12
4ta bandeja	43.00	3	8	47.41	21.11
5ta bandeja	881.61			0.32	0.34

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.4 Prueba de flotación # 4 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 16

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #4.

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.95 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.2 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 17

Pesos y leyes de la prueba de flotación #4.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo		Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	19.43	1	1	55.76	38.54
2da bandeja	32.65	2	3	48.87	24.21
3era bandeja	34.31	2	5	44.21	21.36
4ta bandeja	45.19	3	8	39.95	18.96
5ta bandeja	868.42			0.57	0.61

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.5 Prueba de flotación # 5 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 18

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #5.

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.75 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.3 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 19*Pesos y leyes de la prueba de flotación #5.*

FLOTACIÓN					
	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
Bandejas					
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.83	1	1	53.94	40.12
2da bandeja	32.97	2	3	47.21	23.66
3era bandeja	34.19	2	5	46.73	23.19
4ta bandeja	44.18	3	8	41.71	19.31
5ta bandeja	870.83			0.61	0.59

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.6 Prueba de flotación # 6 por diseño factorial fraccionado:**Tabla 20***Consumo de reactivos en la prueba de flotación #6.*

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.95 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.3 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 21*Pesos y leyes de la prueba de flotación #6.*

FLOTACIÓN					
	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
Bandejas					
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	18.89	1	1	51.27	34.64
2da bandeja	35.23	2	3	44.64	22.91
3era bandeja	36.84	2	5	44.17	20.1
4ta bandeja	52.19	3	8	32.95	15.47
5ta bandeja	856.85			0.71	0.77

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.7 Prueba de flotación # 7 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 22

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #7.

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.75 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.3 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 23

Pesos y leyes de la prueba de flotación #7.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	19.54	1	1	56.34	39.23
2da bandeja	32.48	2	3	48.01	24.02
3era bandeja	34.97	2	5	44.85	21.18
4ta bandeja	44.79	3	8	40.12	19.04
5ta bandeja	868.22			0.55	0.6

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.8 Prueba de flotación # 8 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 24

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #8.

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.95 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.3 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 25*Pesos y leyes de la prueba de flotación #8.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.56	1	1	63.96	43.12
2da bandeja	28.72	2	3	53.11	32.81
3era bandeja	30.26	2	5	51.89	26.89
4ta bandeja	45.24	3	8	45.09	20.24
5ta bandeja	878.22			0.26	0.27

Nota: Fuente elaboración propia.**3.7.9 Prueba de flotación # 9 por diseño factorial fraccionado:****Tabla 26***Consumo de reactivos en la prueba de flotación #9.*

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.**Tabla 27***Pesos y leyes de la prueba de flotación #9.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.95	1	1	61.28	40.12
2da bandeja	26.98	2	3	55.82	27.01
3era bandeja	29.01	2	5	52.11	24.59
4ta bandeja	42.38	3	8	41.23	19.37
5ta bandeja	884.68			0.79	0.81

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.10 Prueba de flotación # 10 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 28

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #10.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 29

Pesos y leyes de la prueba de flotación #10.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.92	1	1	61.29	40.27
2da bandeja	26.79	2	3	55.25	27.08
3era bandeja	29.21	2	5	52.18	24.29
4ta bandeja	42.16	3	8	41.56	19.62
5ta bandeja	884.92			0.8	0.81

Nota: Fuente elaboración propia.

3.7.11 Prueba de flotación # 11 por diseño factorial fraccionado:

Tabla 30

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #11.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 31*Pesos y leyes de la prueba de flotación #11.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.29	1	1	61.25	40.33
2da bandeja	26.88	2	3	55.04	27.12
3era bandeja	29.35	2	5	53.01	24.32
4ta bandeja	42.40	3	8	42.12	19.21
5ta bandeja	885.08			0.78	0.82

Nota: Fuente elaboración propia.

3.8 Balance metalúrgico de las pruebas de flotación por diseño factorial fraccionado.

Tabla 32*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #1.*

Prueba Metalúrgica N°1								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	140.81	0.00014081	14.08	41.59	20.83	88.91	79.88	7.10
Relave	859.19	0.00085919	85.92	0.85	0.86	11.09	20.12	
Cabeza Calculada				6.59	3.67			

Nota: Fuente elaboración propia.**Tabla 33***Balance metalúrgico de la prueba de flotación #2.*

Prueba Metalúrgica N°2								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	133.82	0.00013382	13.38	43.21	21.94	89.06	80.14	7.47
Relave	866.18	0.00086618	86.62	0.82	0.84	10.94	19.86	
Cabeza Calculada				6.49	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 34*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #3.*

Prueba Metalúrgica N°3								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	118.39	0.00011839	11.84	52.56	28.58	95.66	91.86	8.45
Relave	881.61	0.00088161	88.16	0.32	0.34	4.34	8.14	
Cabeza Calculada				6.50	3.68			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 35*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #4.*

Prueba Metalúrgica N°4								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	131.58	0.00013158	13.16	45.61	23.78	92.38	85.52	7.60
Relave	868.42	0.00086842	86.84	0.57	0.61	7.62	14.48	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 36*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #5.*

Prueba Metalúrgica N°5								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	129.17	0.00012917	12.92	46.13	24.32	91.81	85.94	7.74
Relave	870.83	0.00087083	87.08	0.61	0.59	8.19	14.06	
Cabeza Calculada				6.49	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 37*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #6.*

Prueba Metalúrgica N°6								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	143.15	0.00014315	14.32	41.13	21.02	90.63	82.02	6.99
Relave	856.85	0.00085685	85.69	0.71	0.77	9.37	17.98	
Cabeza Calculada				6.50	3.67			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 38*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #7.*

Prueba Metalúrgica N°7								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	131.78	0.00013178	13.18	45.72	23.83	92.66	85.77	7.59
Relave	868.22	0.00086822	86.82	0.55	0.60	7.34	14.23	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 39*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #8.*

Prueba Metalúrgica N°8								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	121.78	0.00012178	12.18	51.39	28.16	96.48	93.53	8.21
Relave	878.22	0.00087822	87.82	0.26	0.27	3.52	6.47	
Cabeza Calculada				6.49	3.67			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 40*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #9.*

Prueba Metalúrgica N°9								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	115.32	0.00011532	11.53	50.33	25.52	89.25	80.42	8.67
Relave	884.68	0.00088468	88.47	0.79	0.81	10.75	19.58	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 41*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #10.*

Prueba Metalúrgica N°10								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	115.08	0.00011508	11.51	50.34	25.58	89.11	80.42	8.69
Relave	884.92	0.00088492	88.49	0.80	0.81	10.89	19.58	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 42*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #11.*

Prueba Metalúrgica N°11								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	114.92	0.00011492	11.49	50.63	25.36	89.39	80.06	8.70
Relave	885.08	0.00088508	88.51	0.78	0.82	10.61	19.94	
Cabeza Calculada				6.51	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

3.9 Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación obtenido por el diseño factorial fraccionado.

Tabla 43*Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación.*

PLANTILLA DECODIFICADA					Rec. de Pb	Rec. de Ag
N°	ZnSO ₄ (g/tn)	Z-11 (g/tn)	NaHSO ₃ (g/tn)	Grado de liberación (%)	%	%
1	75	110	20	50	88.9124947	79.87557448
2	95	110	20	70	89.05974433	80.14239624
3	75	120	20	70	95.66292221	91.86308274
4	95	120	20	50	92.38017851	85.52114666
5	75	110	30	70	91.81489802	85.9435239
6	95	110	30	50	90.63538118	82.01811629
7	75	120	30	50	92.6570801	85.77124718
8	95	120	30	70	96.48000257	93.53185857
9	85	115	25	60	89.25212597	80.41893577
10	85	115	25	60	89.11111888	80.41740047
11	85	115	25	60	89.39426592	80.06151005

Nota: Fuente elaboración propia.

Con los resultados de los balances metalúrgicos, se analiza la recuperación de plomo y la recuperación de plata en el concentrado de plomo con el fin de determinar cuáles son los factores más significativos. Para estos resultados, se utilizarán métodos estadísticos inferenciales, conocidos como análisis de varianza (ANOVA).

3.10 Análisis de recuperación plomo

Coeficientes codificados

Tabla 44

Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plomo.

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		92.2003	0.0501	1842.02	0.000	
ZnSO ₄	-0.1230	-0.0615	0.0501	-1.23	0.344	1.00
Z-11	4.1894	2.0947	0.0501	41.85	0.001	1.00
NaHSO ₃	1.3930	0.6965	0.0501	13.92	0.005	1.00
GRADO DE LIBERACIÓN	2.1081	1.0541	0.0501	21.06	0.002	1.00
ZnSO ₄ *Z-11	0.3931	0.1966	0.0501	3.93	0.059	1.00
ZnSO ₄ *NaHSO ₃	1.4447	0.7224	0.0501	14.43	0.005	1.00
ZnSO ₄ *GRADO DE LIBERACIÓN	-0.8460	-0.4230	0.0501	-8.45	0.014	1.00
Pt Ctral		-2.9478	0.0958	-30.76	0.001	1.00

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

Esta tabla proporciona, en términos numéricos, los efectos que cada uno de los factores controlables tiene sobre el factor de respuesta, que es el porcentaje de recuperación de plomo. Si el efecto es "POSITIVO", la gráfica de efectos principales tendrá una pendiente positiva. Si el efecto es "NEGATIVO", la gráfica tendrá una pendiente negativa. Si el efecto es "CERO", la pendiente de la gráfica de efectos principales será cero.

Sin embargo, estos valores de los efectos de las variables controlables no aseguran si dichos factores son significativos o no para el factor de respuesta.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Rec. Pb (\%)} = & 82.3 - 0.566 * (\text{ZnSO}_4) + 0.0848 * (\text{Z-11}) - 1.0887 * (\text{NaHSO}_3) \\ & + 0.4650 * (\text{Grado de liberación}) + 0.00393 * (\text{ZnSO}_4) * (\text{Z-11}) \\ & + 0.01445 * (\text{ZnSO}_4) * (\text{NaHSO}_3 * \text{NaHSO}_3) - 0.004230 * (\text{ZnSO}_4) \\ & * (\text{Grado de liberación}) - 2.9478 * (\text{Pt. Central}) \end{aligned}$$

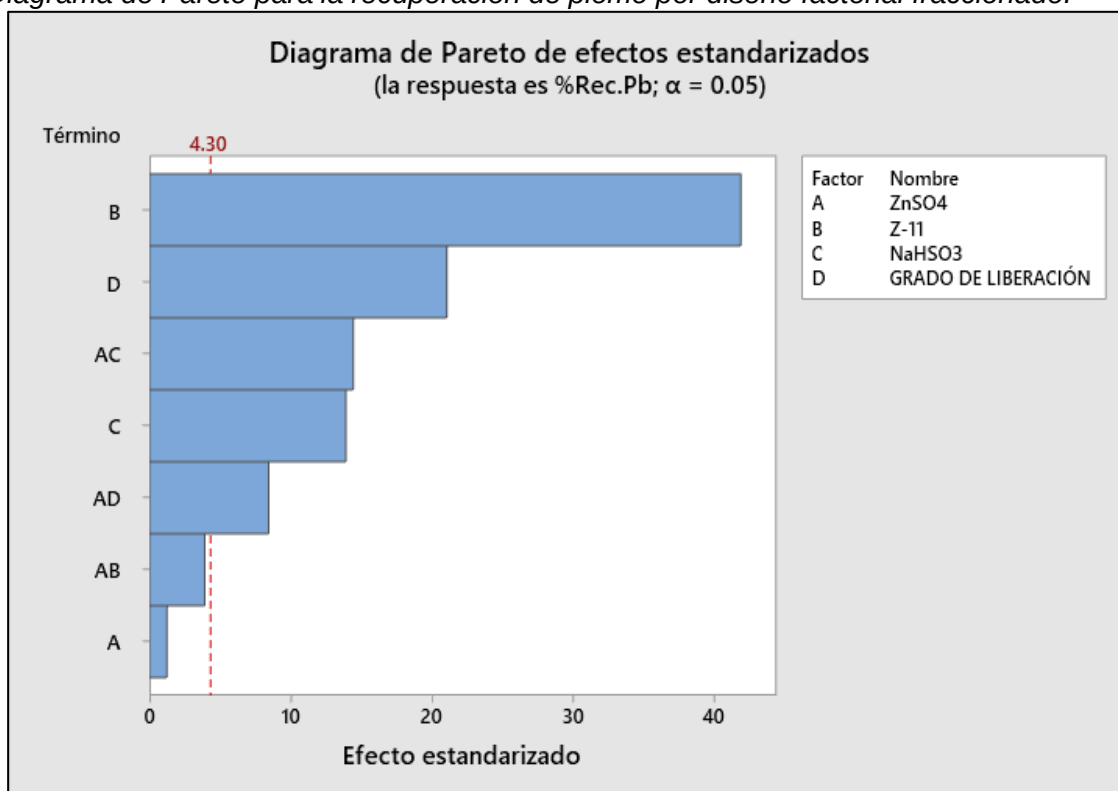
Análisis e interpretación:

La ecuación de orden lineal nos permite determinar los coeficientes de cada uno de los factores y sus interacciones entre las variables. Esto es crucial para poder estimar la recuperación deseada de plomo ajustando la dosificación de los reactivos (ZnSO_4 , xantato Z-11, NaHSO_3 y grado de liberación). Esta metodología evita la realización de pruebas metalúrgicas al azar, lo cual puede incrementar los costos de consumo de reactivos, energía, mano de obra y tiempo.

Diagrama de Pareto de los efectos para el % de recuperación de plomo

Figura 24

Diagrama de Pareto para la recuperación de plomo por diseño factorial fraccionado.



Nota: Fuente elaboración propia.

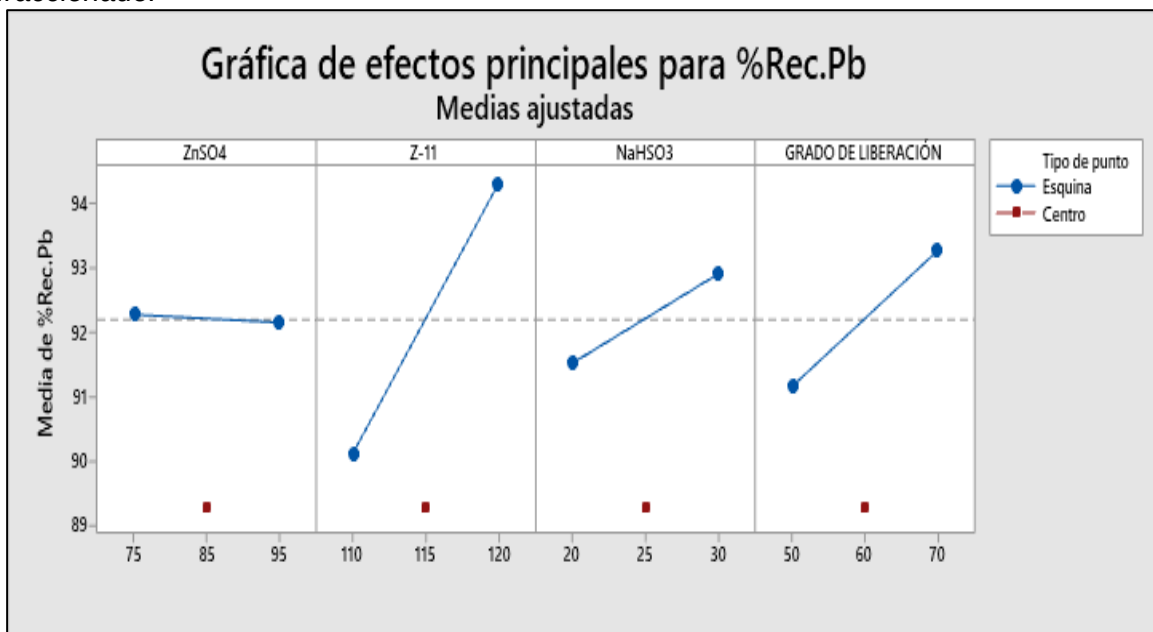
Análisis e interpretación:

El diagrama de Pareto es esencial para determinar la significancia de los factores controlables en la variable de respuesta (% de recuperación de plomo). Los factores evaluados incluyen A (ZnSO_4), B (xantato Z-11), C (NaHSO_3) y D (grado de liberación). La línea roja en el diagrama indica el umbral de significancia (4.30). Los factores que superan este valor son significativos, mientras que los que no lo superan no lo son para este estudio. De este modo, podemos concluir que el factor B (consumo de Z-11) y el factor D (grado de liberación) son los dos más significativos para la recuperación de plomo.

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plomo

Figura 25

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plomo por diseño factorial fraccionado.



Nota: Fuente tomada de planta concentradora centenario.

Análisis e interpretación:

Podemos decir que:

- Si el factor controlable tiene una pendiente positiva pronunciada, se considera significativo para el aumento de la recuperación de plomo.

- Si el factor controlable tiene una pendiente positiva, pero no pronunciada, se considera significativo para el aumento de la recuperación de plomo, aunque en menor proporción.
- Si el factor controlable tiene una pendiente negativa pronunciada, se considera significativo para la reducción de la recuperación de plomo.
- Si el factor controlable tiene una pendiente negativa pero no pronunciada, se considera significativo para la reducción de la recuperación de plomo, aunque en menor proporción.
- Si el factor controlable tiene una pendiente cero, se considera que dicho factor no tiene ningún efecto sobre la recuperación de plomo.

Análisis de las pendientes de cada factor controlable:

- Para el ZnSO_4 , se observa que a una dosificación de 75 g/tn se obtiene una recuperación de plomo de aproximadamente 92.2%, mientras que a una dosificación de 95 g/tn, la recuperación de plomo es aproximadamente 92.1%. Podemos concluir que un mayor consumo de ZnSO_4 mantiene el porcentaje de recuperación de plomo casi constante.
- Para el xantato Z-11, se observa que a una dosificación de 110 g/tn se obtiene una recuperación de plomo de aproximadamente 90.1%, mientras que a una dosificación de 120 g/tn, la recuperación de plomo es aproximadamente 94.3%. Podemos concluir que un mayor consumo de xantato Z-11 aumenta el porcentaje de recuperación de plomo.
- Para el NaHSO_3 , se observa que a una dosificación de 20 g/tn se obtiene una recuperación de plomo de aproximadamente 91.5%, mientras que a una dosificación de 30 g/tn, la recuperación de plomo es aproximadamente 92.9%. Podemos concluir que un mayor consumo de NaHSO_3 aumenta el porcentaje de recuperación de plomo.
- Para el grado de liberación, se observa que a un valor de 50%, la recuperación de plomo es aproximadamente 91.1%, mientras que a un valor de 70%, la

recuperación de plomo es aproximadamente 93.2%. Podemos concluir que, a mayor grado de liberación, el porcentaje de recuperación de plomo tiende a aumentar.

Por lo tanto, en conclusión, para obtener un aumento en la recuperación de plomo, el factor más significativo es el consumo de xantato Z-11, seguido por el grado de liberación y, finalmente, el consumo de NaHSO_3 . El consumo de ZnSO_4 no es significativo, ya que no se refleja en el aumento de la recuperación de plomo.

3.11 Análisis de recuperación de plata

Coeficientes codificados

Tabla 45

Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plata.

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		85.5834	0.0728	1175.55	0.000	
ZnSO_4	-0.5600	-0.2800	0.0728	-3.85	0.061	1.00
Z-11	7.1769	3.5885	0.0728	49.29	0.000	1.00
NaHSO_3	2.4656	1.2328	0.0728	16.93	0.003	1.00
GRADO DE LIBERACIÓN	4.5737	2.2868	0.0728	31.41	0.001	1.00
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{Z-11}$	1.2693	0.6347	0.0728	8.72	0.013	1.00
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{NaHSO}_3$	2.4776	1.2388	0.0728	17.02	0.003	1.00
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{GRADO DE LIBERACIÓN}$	-1.5062	-0.7531	0.0728	-10.34	0.009	1.00
Pt Ctrial		-5.284	0.139	-37.90	0.001	1.00

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

Esta tabla proporciona, en términos numéricos, los efectos que cada uno de los factores controlables tiene sobre el factor de respuesta, que es el porcentaje de recuperación de plata. Si el efecto es "POSITIVO", la gráfica de efectos principales tendrá una pendiente positiva. Si el efecto es "NEGATIVO", la gráfica tendrá una pendiente negativa. Si el efecto es "CERO", la pendiente de la gráfica de efectos principales será cero.

Sin embargo, estos valores de los efectos de las variables controlables no aseguran si dichos factores son significativos o no para el factor de respuesta.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{Rec. Ag (\%)} = 123.9 - 1.655*(\text{ZnSO}_4) - 0.361*(\text{Z-11}) - 1.859*(\text{NaHSO}_3) + 0.8688*(\text{Grado de liberación}) + 0.01269*(\text{ZnSO}_4) * (\text{Z-11}) + 0.02478*(\text{ZnSO}_4) * (\text{NaHSO}_3) - 0.007531*(\text{ZnSO}_4) * (\text{Grado de liberación}) - 5.284*(\text{Pt. central})$$

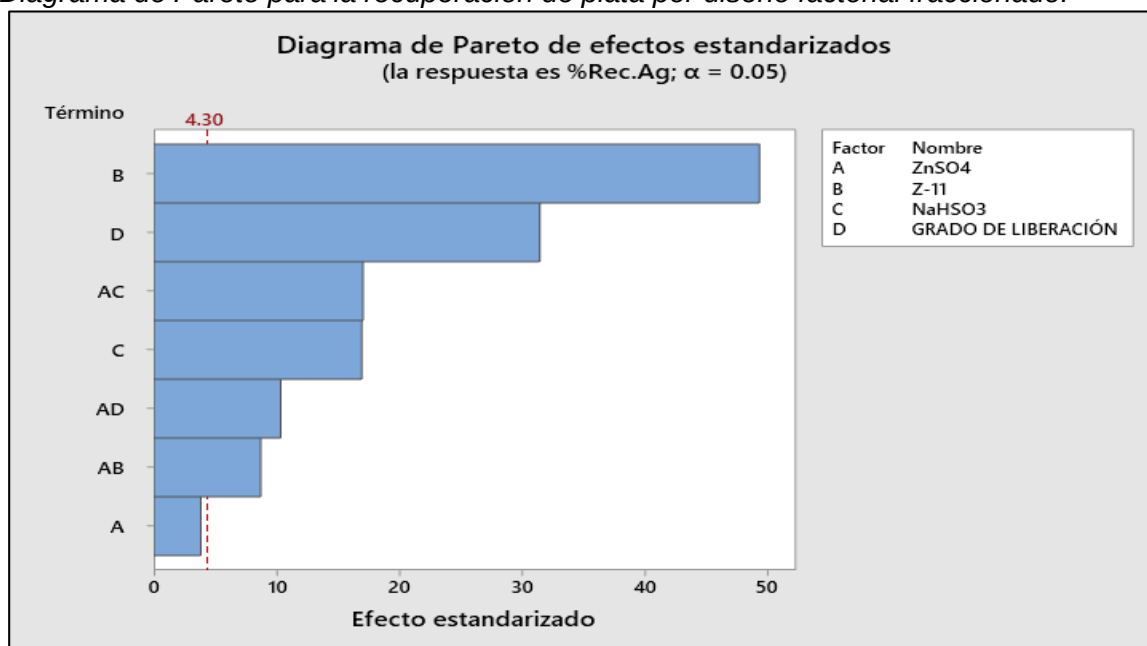
Análisis e interpretación:

La ecuación de orden lineal nos permite determinar los coeficientes de cada uno de los factores y sus interacciones entre las variables. Esto es crucial para poder estimar la recuperación deseada de plata ajustando la dosificación de los reactivos (ZnSO_4 , xantato Z-11, NaHSO_3 y grado de liberación). Esta metodología evita la realización de pruebas metalúrgicas al azar, lo cual puede incrementar los costos de consumo de reactivos, energía, mano de obra y tiempo.

Diagrama de Pareto de los efectos para el % de recuperación de plata

Figura 26

Diagrama de Pareto para la recuperación de plata por diseño factorial fraccionado.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

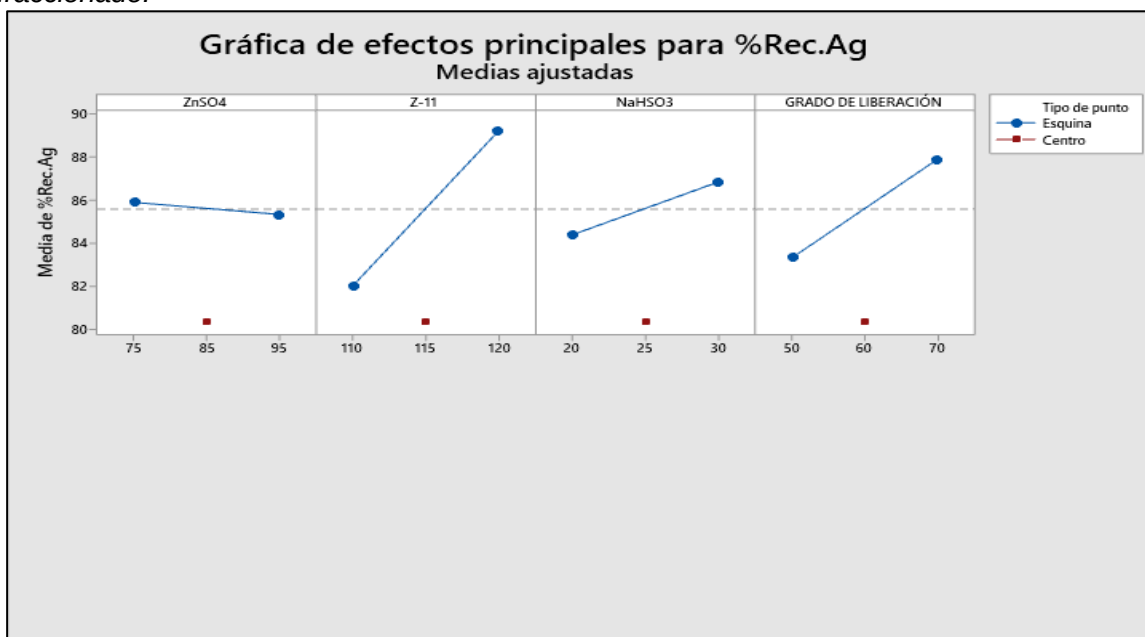
El diagrama de Pareto es esencial para determinar la significancia de los factores controlables en la variable de respuesta (% de recuperación de plata). Los factores evaluados incluyen A (ZnSO_4), B (xantato Z-11), C (NaHSO_3) y D (grado de liberación). La

línea roja en el diagrama indica el umbral de significancia (4.30). Los factores que superan este valor son significativos, mientras que los que no lo superan no lo son para este estudio. De este modo, podemos concluir que el factor B (consumo de Z-11) y el factor D (grado de liberación) son los dos más significativos para la recuperación de plata.

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plata

Figura 27

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plata por diseño factorial fraccionado.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

Podemos decir que:

- Si el factor controlable tiene una pendiente positiva pronunciada, se considera significativo para el aumento de la recuperación de plata.
- Si el factor controlable tiene una pendiente positiva, pero no pronunciada, se considera significativo para el aumento de la recuperación de plata, aunque en menor proporción.
- Si el factor controlable tiene una pendiente negativa pronunciada, se considera significativo para la reducción de la recuperación de plata.

- Si el factor controlable tiene una pendiente negativa pero no pronunciada, se considera significativo para la reducción de la recuperación de plata, aunque en menor proporción.
- Si el factor controlable tiene una pendiente cero, se considera que dicho factor no tiene ningún efecto sobre la recuperación de plata.

Análisis de las pendientes de cada factor controlable:

- Para el ZnSO_4 , se observa que a una dosificación de 75 g/tn se obtiene una recuperación de plata de aproximadamente 85.8%, mientras que a una dosificación de 95 g/tn, la recuperación de plata es aproximadamente 85.3%. Podemos concluir que un mayor consumo de ZnSO_4 disminuye el porcentaje de recuperación de plata, pero no de manera significativa.
- Para el xantato Z-11, se observa que a una dosificación de 110 g/tn se obtiene una recuperación de plata de aproximadamente 81.9%, mientras que a una dosificación de 120 g/tn, la recuperación de plata es aproximadamente 89.1%. Podemos concluir que un mayor consumo de xantato Z-11 aumenta el porcentaje de recuperación de plata.
- Para el NaHSO_3 , se observa que a una dosificación de 20 g/tn se obtiene una recuperación de plata de aproximadamente 84.3%, mientras que a una dosificación de 30 g/tn, la recuperación de plata es aproximadamente 86.8%. Podemos concluir que un mayor consumo de NaHSO_3 aumenta el porcentaje de recuperación de plata.
- Para el grado de liberación, se observa que a un valor de 50%, la recuperación de plata es aproximadamente 83.3%, mientras que a un valor de 70%, la recuperación de plata es aproximadamente 87.8%. Podemos concluir que, a mayor grado de liberación, el porcentaje de recuperación de plata tiende a aumentar.

Por lo tanto, en conclusión, para obtener un aumento en la recuperación de plata, el factor más significativo es el consumo de xantato Z-11, seguido por el grado de liberación y, finalmente, el consumo de NaHSO_3 en menor proporción. El consumo de ZnSO_4 no es

significativo, ya que no se refleja en el aumento de la recuperación de plata.

3.12 Diseño octogonal para optimizar el aumento de la recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.

En la Tabla 46 se detalla el rango de valores de los factores. Se considera que la prueba central representa el valor promedio de los factores en el proceso de la planta. La amplitud del rango es equidistante al punto central y representa los valores máximos y mínimos de los factores controlables.

Tabla 46

Valores mínimo, promedio y máximo de los factores por diseño octogonal.

VARIABLES	-1	0	1	Und
Z-11 (X2)	110	115	120	g/Tn
Grado de liberación (X4)	50	60	70	%

Nota: Fuente elaboración propia.

Establecidos los factores a estudiar con los valores mínimos y máximos, se ingresarán estos datos en el software para generar 13 pruebas metalúrgicas nuevas que se realizarán a nivel de laboratorio.

Tabla 47

Dosificaciones de reactivos de las pruebas metalúrgicas por diseño octogonal.

N°	PLANTILLA CODIFICADA		PLANTILLA DECODIFICADA	
	X1	X2	Z-11 (g/Tn)	Grado de liberación (%)
1	-1	-1	110	50
2	1	-1	120	50
3	-1	1	110	70
4	1	1	120	70
5	-1.41421	0	107.9289322	60
6	1.41421	0	122.0710678	60
7	0	-1.41421	115	45.85786438
8	0	1.41421	115	74.14213562
9	0	0	115	60
10	0	0	115	60
11	0	0	115	60
12	0	0	115	60
13	0	0	115	60

Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados de las pruebas metalúrgicas, de acuerdo con las dosificaciones determinadas por el diseño octogonal, son:

3.12.1 Prueba de flotación #1 por diseño octogonal:

Tabla 48

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #1 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 49

Pesos y leyes de la prueba de flotación #1 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	18.46	1	1	50.34	34.12
2da bandeja	33.19	2	3	46.31	23.06
3era bandeja	35.08	2	5	43.96	19.35
4ta bandeja	51.31	3	8	33.47	16.03
5ta bandeja	861.96			0.89	0.87

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.2 Prueba de flotación #2 por diseño octogonal:

Tabla 50

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #2 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	8.83 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 51*Pesos y leyes de la prueba de flotación #2 por diseño octogonal.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	19.75	1	1	56.01	38.42
2da bandeja	32.16	2	3	48.48	24.64
3era bandeja	34.65	2	5	44.73	20.79
4ta bandeja	44.97	3	8	39.41	19.03
5ta bandeja	868.47			0.58	0.6

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.3 Prueba de flotación #3 por diseño octogonal:**Tabla 52***Consumo de reactivos en la prueba de flotación #3 por diseño octogonal.*

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.1 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 53*Pesos y leyes de la prueba de flotación #3 por diseño octogonal.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.94	1	1	54.1	41.03
2da bandeja	32.71	2	3	47.32	24.08
3era bandeja	34.76	2	5	45.74	22.45
4ta bandeja	44.06	3	8	42.03	19.47
5ta bandeja	870.53			0.61	0.57

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.4 Prueba de flotación #4 por diseño octogonal:

Tabla 54

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #4 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	18.878 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.2 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 55

Pesos y leyes de la prueba de flotación #4 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.24	1	1	63.03	42.33
2da bandeja	28.31	2	3	54.41	33.15
3era bandeja	29.84	2	5	52.33	27.03
4ta bandeja	43.03	3	8	47.66	21.06
5ta bandeja	881.58			0.3	0.32

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.5 Prueba de flotación #5 por diseño octogonal:

Tabla 56

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #5 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.079 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 57*Pesos y leyes de la prueba de flotación #5 por diseño octogonal.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.42	1	1	59.74	38.46
2da bandeja	27.12	2	3	51.42	27.41
3era bandeja	26.49	2	5	50.31	25.14
4ta bandeja	45.74	3	8	31.15	18.22
5ta bandeja	884.23			1.54	0.89

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.6 Prueba de flotación #6 por diseño octogonal:**Tabla 58***Consumo de reactivos en la prueba de flotación #6 por diseño octogonal.*

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.220 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 59*Pesos y leyes de la prueba de flotación #6 por diseño octogonal.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	18.45	1	1	68.41	39.41
2da bandeja	29.05	2	3	54.12	31.52
3era bandeja	31.15	2	5	50.47	30.59
4ta bandeja	40.12	3	8	44.74	19.45
5ta bandeja	881.24			0.32	0.32

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.7 Prueba de flotación #7 por diseño octogonal:

Tabla 60

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #7 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	7.32 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 61

Pesos y leyes de la prueba de flotación #7 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	17.21	1	1	58.46	28.45
2da bandeja	29.48	2	3	51.12	21.12
3era bandeja	29.36	2	5	52.64	18.69
4ta bandeja	41.02	3	8	43.41	15.12
5ta bandeja	882.93			0.72	1.56

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.8 Prueba de flotación #8 por diseño octogonal:

Tabla 62

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #8 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	22.70 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 63

Pesos y leyes de la prueba de flotación #8 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	19.20	1	1	61.11	35.63
2da bandeja	32.13	2	3	48.41	27.15
3era bandeja	35.03	2	5	47.12	26.11
4ta bandeja	48.12	3	8	38.15	18.22
5ta bandeja	865.52			0.33	0.36

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.9 Prueba de flotación #9 por diseño octogonal:

Tabla 64

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #9 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 65

Pesos y leyes de la prueba de flotación #9 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.41	1	1	61.35	41.2
2da bandeja	26.45	2	3	55.23	27.43
3era bandeja	28.45	2	5	53.21	24.51
4ta bandeja	42.61	3	8	42.14	19.75
5ta bandeja	886.08			0.79	0.82

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.10 Prueba flotación #10 por diseño octogonal:

Tabla 66

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #10 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 67

Pesos y leyes de la prueba de flotación #10 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.43	1	1	61.42	40.79
2da bandeja	26.38	2	3	55.41	27.43
3era bandeja	28.51	2	5	53.33	24.67
4ta bandeja	42.49	3	8	42.24	19.21
5ta bandeja	886.19			0.79	0.82

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.11 Prueba de flotación #11 por diseño octogonal:

Tabla 68

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #11 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 69

Pesos y leyes de la prueba de flotación #11 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.52	1	1	61.39	40.81
2da bandeja	26.41	2	3	55.47	27.36
3era bandeja	28.34	2	5	53.49	24.6
4ta bandeja	42.71	3	8	42.09	19.33
5ta bandeja	886.02			0.78	0.81

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.12 Prueba de flotación #12 por diseño octogonal:

Tabla 70

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #12 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
	Aerophine 3418	1 gota
Flotación	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 71

Pesos y leyes de la prueba de flotación #12 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.38	1	1	61.74	40.87
2da bandeja	26.64	2	3	55.62	27.33
3era bandeja	28.47	2	5	53.01	24.58
4ta bandeja	42.78	3	8	42.07	19.41
5ta bandeja	885.73			0.78	0.8

Nota: Fuente elaboración propia.

3.12.13 Prueba de flotación #13 por diseño octogonal:

Tabla 72

Consumo de reactivos en la prueba de flotación #13 por diseño octogonal.

Molienda	Tiempo de Molienda	13.045 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.15 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 73

Pesos y leyes de la prueba de flotación #13 por diseño octogonal.

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	16.41	1	1	61.48	40.67
2da bandeja	26.49	2	3	55.49	27.45
3era bandeja	28.74	2	5	53.64	24.74
4ta bandeja	42.59	3	8	42.03	19.29
5ta bandeja	885.77			0.78	0.8

Nota: Fuente elaboración propia.

3.13 Balance metalúrgico de las pruebas de flotación por diseño octogonal.

Tabla 74

Balance metalúrgico de la prueba de flotación #1 por diseño octogonal.

Prueba Metalúrgica N°1								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	138.04	0.00013804	13.80	41.48	20.98	88.19	79.43	7.24
Relave	861.96	0.00086196	86.20	0.89	0.87	11.81	20.57	
Cabeza Calculada				6.49	3.65			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 75*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #2 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°2								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb %	Ag oz/tc	Pb	Ag	
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	131.53	0.00013153	13.15	45.52	23.78	92.24	85.72	7.60
Relave	868.47	0.00086847	86.85	0.58	0.60	7.76	14.28	
Cabeza Calculada				6.49	3.65			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 76*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #3 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°3								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb %	Ag oz/tc	Pb	Ag	
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	129.47	0.00012947	12.95	46.04	24.42	91.82	86.43	7.72
Relave	870.53	0.00087053	87.05	0.61	0.57	8.18	13.57	
Cabeza Calculada				6.49	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 77*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #4 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°4								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb %	Ag oz/tc	Pb	Ag	
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	118.42	0.00011842	11.84	52.69	28.55	95.93	92.30	8.44
Relave	881.58	0.00088158	88.16	0.30	0.32	4.07	7.70	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 78*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #5 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°5								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	115.77	0.00011577	11.58	44.34	24.83	79.03	78.51	8.64
Relave	884.23	0.00088423	88.42	1.54	0.89	20.97	21.49	
Cabeza Calculada				6.49	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 79*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #6 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°6								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	118.77	0.00011877	11.88	52.21	28.42	95.65	92.29	8.42
Relave	881.23	0.00088123	88.12	0.32	0.32	4.35	7.71	
Cabeza Calculada				6.48	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 80*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #7 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°7								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	117.07	0.00011707	11.71	49.88	19.49	90.18	62.36	8.54
Relave	882.93	0.00088293	88.29	0.72	1.56	9.82	37.64	
Cabeza Calculada				6.48	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 81*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #8 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°8								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	134.48	0.00013448	13.45	46.22	24.89	95.61	91.48	7.44
Relave	865.52	0.00086552	86.55	0.33	0.36	4.39	8.52	
Cabeza Calculada				6.50	3.66			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 82*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #9 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°9								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	113.92	0.00011392	11.39	50.71	25.81	89.19	80.19	8.78
Relave	886.08	0.00088608	88.61	0.79	0.82	10.81	19.81	
Cabeza Calculada				6.48	3.67			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 83*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #10 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°10								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	113.81	0.00011381	11.38	50.84	25.60	89.21	80.04	8.79
Relave	886.19	0.00088619	88.62	0.79	0.82	10.79	19.96	
Cabeza Calculada				6.49	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 84*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #11 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°11								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	113.98	0.00011398	11.40	50.82	25.61	89.34	80.27	8.77
Relave	886.02	0.00088602	88.60	0.78	0.81	10.66	19.73	
Cabeza Calculada				6.48	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 85*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #12 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°12								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	114.27	0.00011427	11.43	50.77	25.62	89.36	80.51	8.75
Relave	885.73	0.00088573	88.57	0.78	0.80	10.64	19.49	
Cabeza Calculada				6.49	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 86*Balance metalúrgico de la prueba de flotación #13 por diseño octogonal.*

Prueba Metalúrgica N°13								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	114.23	0.00011423	11.42	50.87	25.62	89.37	80.51	8.75
Relave	885.77	0.00088577	88.58	0.78	0.80	10.63	19.49	
Cabeza Calculada				6.50	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

3.14 Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación obtenidas por diseño octogonal.

Tabla 87

Recuperación de plomo y plata de las pruebas de flotación por diseño octogonal.

Pruebas	PLANTILLA DECODIFICADA		Rec. de Pb	Rec. de Ag
Nº	Z-11 (g/tn)	Grado de liberación (%)	%	%
1	110	50	88.18489491	79.43447587
2	120	50	92.2400566	85.71772357
3	110	70	86.4356993	86.4356993
4	120	70	95.9335436	92.29880018
5	107.9289322	60	79.03335263	78.50515346
6	122.0710678	60	95.65035972	85.69972579
7	115	45.85786438	90.18210992	62.35224672
8	115	74.14213562	95.60632073	91.48527499
9	115	60	89.19247817	80.18614431
10	115	60	89.20638837	80.03656285
11	115	60	89.34118117	80.26835216
12	115	60	89.35951369	80.51337499
13	115	60	89.37303057	80.50977049

Nota: Fuente elaboración propia.

Teniendo los resultados de los balances metalúrgicos, procederemos a analizar la recuperación de plomo y plata. El objetivo es optimizar la dosificación del xantato isopropílico de sodio (Z-11) y el grado de liberación para mejorar los resultados.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de la recuperación de Pb aplicando el diseño octogonal

Coefficientes codificados

Tabla 88

Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plomo por diseño octogonal.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	89.295	0.700	127.48	0.000	
Z-11	4.632	0.554	8.36	0.000	1.00
GRADO DE LIBERACIÓN	1.202	0.554	2.17	0.067	1.00
Z-11*Z-11	-0.831	0.594	-1.40	0.204	1.02
GRADO DE LIBERACIÓN*GRADO DE LIBERACIÓN	1.945	0.594	3.28	0.014	1.02
Z-11*GRADO DE LIBERACIÓN	1.361	0.783	1.74	0.126	1.00

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

En la Tabla 88 es fundamental interpretar el valor T (valor T-Student) de los factores controlables. Es importante saber que el programa ya tiene predeterminado el T-Student para este diseño octogonal, cuyo valor es de 2.365 con un intervalo de confianza del 95%. Este valor se puede reconocer visualmente en la gráfica de Pareto. Decimos:

- Si el valor T de un factor es mayor que 2.365, entonces este factor es significativo con un 95% de confianza (xantato Z-11, interacción de grado de liberación*grado de liberación).
- Si el valor T de un factor es menor que 2.365, entonces este factor no es significativo con un 95% de confianza (grado de liberación, interacción Z-11*Z-11, interacción Z-11*grado de liberación).

Resumen del modelo R²

Tabla 89

Resumen del modelo R² de la recuperación de plomo por diseño octogonal.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.56625	92.92%	87.86%	49.69%

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

Se debe analizar el valor de R-cuadrado, que en nuestro estudio es del 92.92%. Esto significa que los factores controlables explican el 92.92% de la variabilidad en los resultados obtenidos para la recuperación de plomo.

Análisis de varianza

Tabla 90

Análisis de varianza de la recuperación de plomo por diseño octogonal.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	225.224	45.045	18.36	0.001
Lineal	2	183.172	91.586	37.33	0.000
Z-11	1	171.616	171.616	69.96	0.000
GRADO DE LIBERACIÓN	1	11.557	11.557	4.71	0.067
Cuadrado	2	34.646	17.323	7.06	0.021
Z-11*Z-11	1	4.806	4.806	1.96	0.204
GRADO DE LIBERACIÓN*GRADO DE LIBERACIÓN	1	26.316	26.316	10.73	0.014
Interacción de 2 factores	1	7.406	7.406	3.02	0.126
Z-11*GRADO DE LIBERACIÓN	1	7.406	7.406	3.02	0.126
Error	7	17.172	2.453		
Falta de ajuste	3	17.141	5.714	743.37	0.000
Error puro	4	0.031	0.008		
Total	12	242.396			

Nota: Fuente elaboración propia.

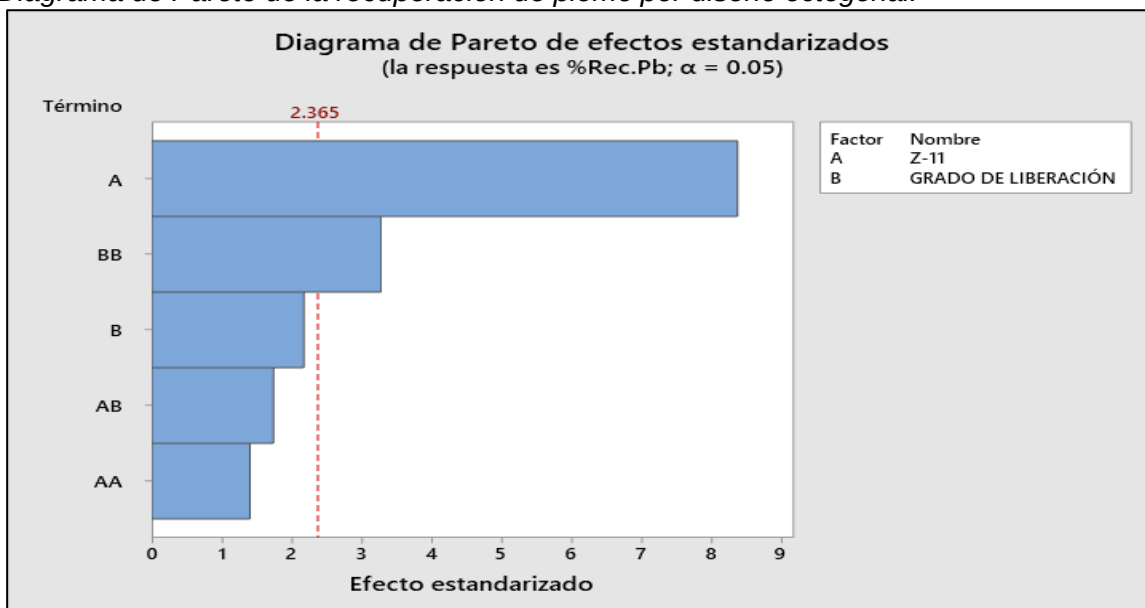
Análisis e interpretación:

En el análisis de esta tabla de análisis de varianza, utilizamos el valor de p lineal para empíricamente determinar la significancia de las variables controlables en este estudio. Un valor de p muy cercano a cero indica que la variable es influyente o significativa. En este estudio, el valor de p para xantato Z-11 y grado de liberación es de 0.000 y 0.067, respectivamente, lo cual confirma que ambas variables controlables son significativas.

Diagrama de Pareto de los efectos de la recuperación de plomo por Diseño Octogonal

Figura 28

Diagrama de Pareto de la recuperación de plomo por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

En el diagrama de Pareto se verifica la significancia y no significancia de las variables controlables en relación con la variable respuesta. En este estudio, el factor A representa el xantato Z-11 y el factor B el grado de liberación. La línea de color rojo en el diagrama indica los efectos de cada variable y establece un umbral que determina si una variable controlable es significativa o no frente a la variable respuesta, que en nuestro caso es el porcentaje de recuperación de plomo. Según el diagrama, podemos concluir que el factor A (Z-11) y el factor B*B (interacción grado de liberación*grado de liberación) son factores con significancia para la recuperación de plomo.

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plomo

Figura 29

Grafica de efectos principales para la recuperación de plomo por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

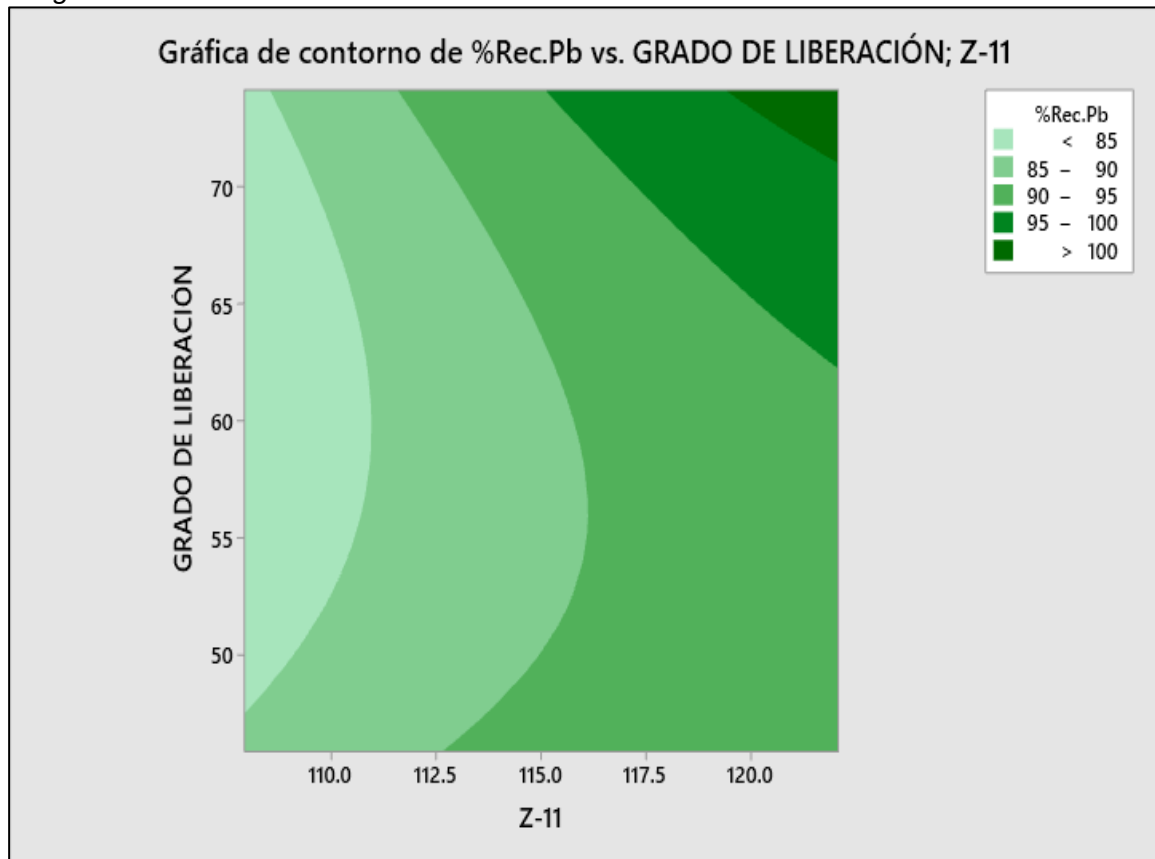
Podemos concluir:

- Para el Z-11, se observa un comportamiento semi parabólico. Con un consumo que varía de 107 g/tn a 123 g/tn, aproximadamente, se ve un aumento en el porcentaje de recuperación de plomo. Concluimos que a mayor consumo de Z-11, la recuperación de plomo tiende a incrementar.
- En el grado de liberación, se observa un comportamiento parabólico. Con un 40% de malla de grado de liberación, se obtiene una recuperación de plomo del 91.7%. A medida que el grado de liberación aumenta aproximadamente al 58%, la recuperación de plomo disminuye hasta un 89.3% aproximadamente. Sin embargo, si el grado de liberación continúa aumentando más allá del 58%, la recuperación de plomo aumenta a valores superiores del 91.7%. Concluimos que existe un valor óptimo de grado de liberación para maximizar la recuperación de plomo.

Gráfica de contorno de la recuperación de plomo vs. Grado de liberación y Z-11

Figura 30

Grafica de contorno para la recuperación de plomo vs grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

La gráfica está segmentada en distintas zonas de color verde, cada una con intensidades variadas. En los ejes de la gráfica se encuentran las variables que afectan significativamente la recuperación de plomo. A la derecha de la gráfica se representa la recuperación de plomo en relación con las intensidades de estas variables.

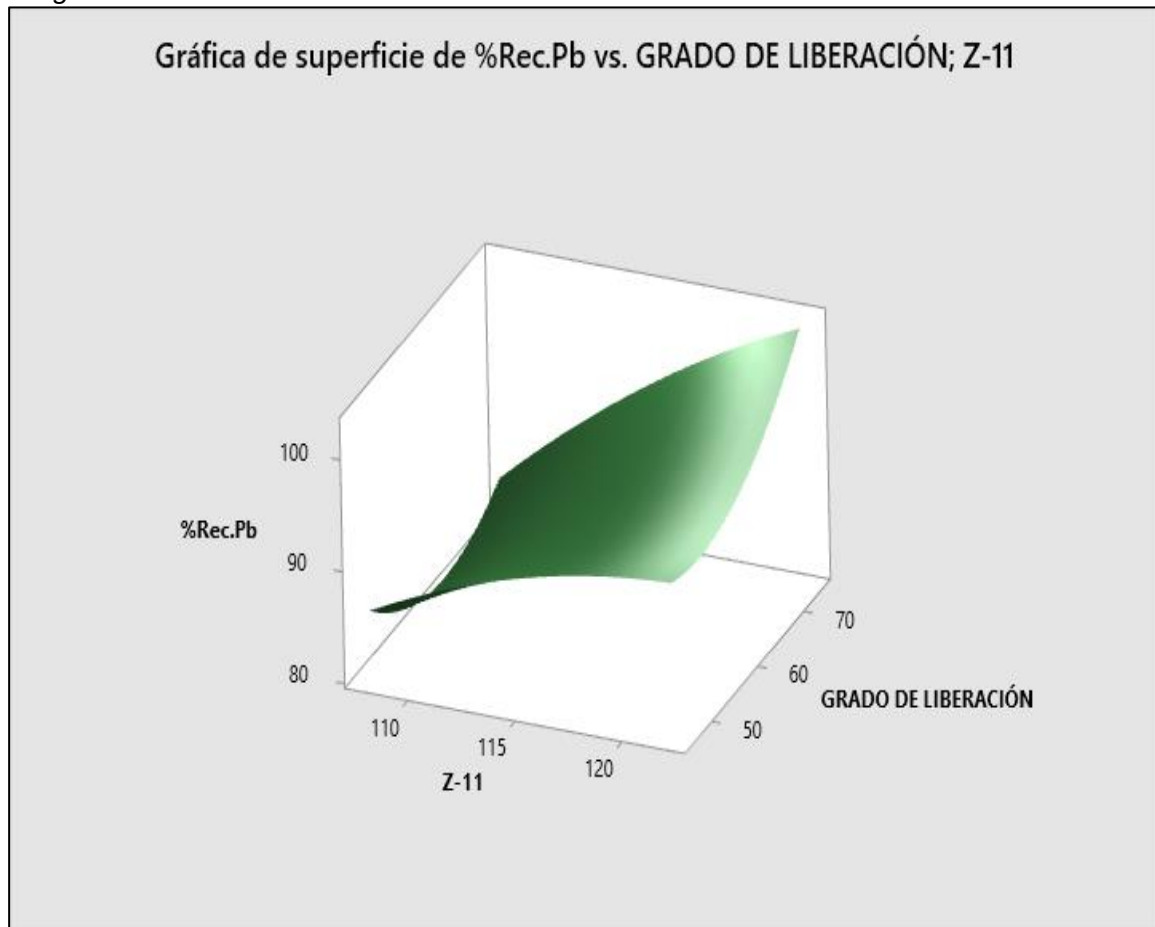
Se procede a examinar de acuerdo a lo siguiente:

- La región de tono verde más intenso indica que se alcanza la máxima recuperación de plomo, superando el 95%. Esta máxima recuperación se observa aproximadamente entre un 63.5% y un 75% de grado de liberación, así como entre 115.5 g/tn y 122.5 g/tn de consumo de xantato Z-11.

Gráfica de superficie de la recuperación de plomo vs grado de liberación y Z-11

Figura 31

Gráfica de superficie de la recuperación de plomo vs grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

La gráfica de superficie muestra en tres dimensiones la relación entre la recuperación de plomo, el consumo de xantato Z-11 y el porcentaje de grado de liberación.

Se observa que a medida que se incrementa el consumo de xantato Z-11, la recuperación de plomo aumenta.

A medida que aumenta el porcentaje de grado de liberación, la recuperación de plomo disminuye hasta alcanzar un valor mínimo. Posteriormente, si se sigue aumentando el porcentaje de grado de liberación, la recuperación de plomo comenzará a incrementar, adoptando así una forma parabólica.

4.2 Análisis de la recuperación de plata aplicando el diseño octogonal

Coeficientes codificados

Tabla 91

Resultados de los coeficientes codificados de la recuperación de plata por diseño octogonal.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	80.30	2.26	35.46	0.000	
Z-11	2.79	1.79	1.56	0.163	1.00
GRADO DE LIBERACIÓN	6.85	1.79	3.82	0.007	1.00
Z-11*Z-11	2.52	1.92	1.31	0.232	1.02
GRADO DE LIBERACIÓN*GRADO DE LIBERACIÓN	-0.08	1.92	-0.04	0.969	1.02
Z-11*GRADO DE LIBERACIÓN	-0.11	2.53	-0.04	0.968	1.00

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

En la Tabla 91 es fundamental interpretar el valor T (valor T-Student) de los factores controlables. Es importante saber que el programa ya tiene predeterminado el T-Student para este diseño octogonal, cuyo valor es de 2.365 con un intervalo de confianza del 95%. Este valor se puede reconocer visualmente en la gráfica de Pareto. Decimos:

- Si el valor T de un factor es mayor que 2.365, entonces este factor es significativo con un 95% de confianza (grado de liberación).
- Si el valor T de un factor es menor que 2.365, entonces este factor no es significativo con un 95% de confianza (xantato Z-11, interacción Z-11*Z-11, interacción grado de liberación*grado de liberación e interacción Z-11*grado de liberación).

Resumen del modelo R²

Tabla 92

Resumen del modelo R² de recuperación de plata por diseño octogonal.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad.(pred)
5.06380	72.89%	53.53%	0.00%

Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

En nuestro estudio el R² del 72.89%, es decir que los factores controlables explican el 72.89% de la variabilidad en los resultados obtenidos para la recuperación de plata.

Análisis de varianza

Tabla 93

Análisis de varianza de la recuperación de plata por diseño octogonal.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	482.628	96.526	3.76	0.057
Lineal	2	437.420	218.710	8.53	0.013
Z-11	1	62.278	62.278	2.43	0.163
GRADO DE LIBERACIÓN	1	375.142	375.142	14.63	0.007
Cuadrado	2	45.164	22.582	0.88	0.456
Z-11*Z-11	1	44.004	44.004	1.72	0.232
GRADO DE LIBERACIÓN*GRADO DE LIBERACIÓN	1	0.041	0.041	0.00	0.969
Interacción de 2 factores	1	0.044	0.044	0.00	0.968
Z-11*GRADO DE LIBERACIÓN	1	0.044	0.044	0.00	0.968
Error	7	179.494	25.642		
Falta de ajuste	3	179.321	59.774	1383.20	0.000
Error puro	4	0.173	0.043		
Total	12	662.122			

Nota: Fuente elaboración propia.

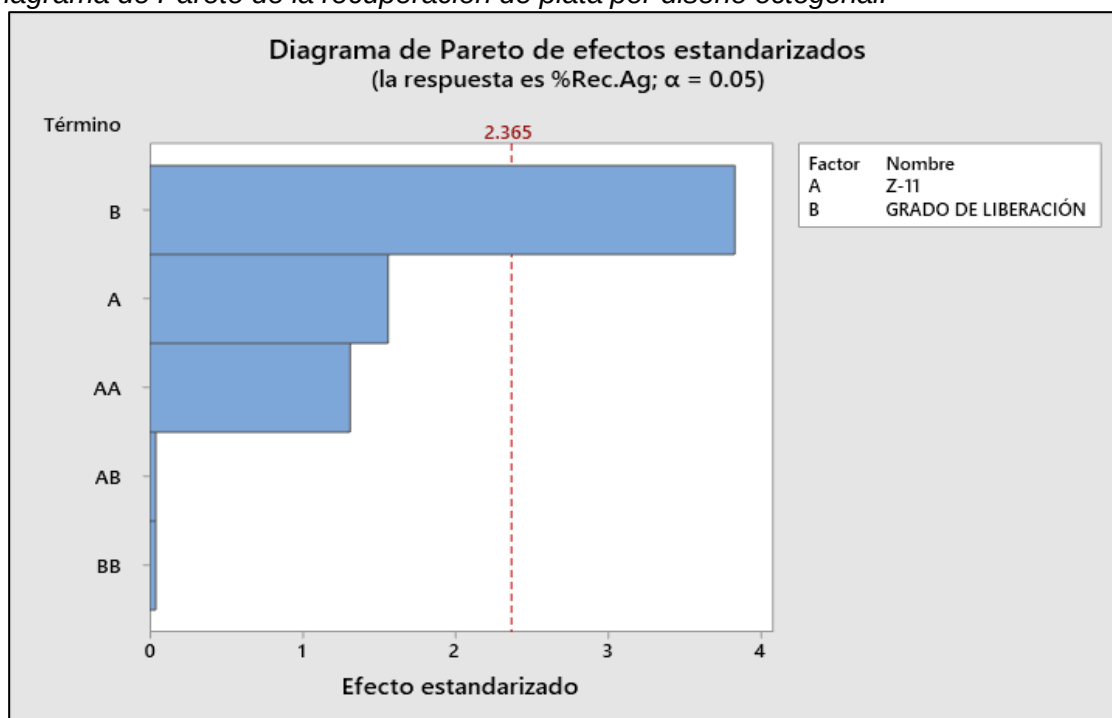
Análisis e interpretación:

En el análisis de esta tabla de análisis de varianza, utilizamos el valor de p lineal para empíricamente determinar la significancia de las variables controlables en este estudio. Un valor de p muy cercano a cero indica que la variable es influyente o significativa. En este estudio, el valor de p para xantato Z-11 y grado de liberación es de 0.163 y 0.007, respectivamente, lo cual confirma que ambas variables controlables son significativas.

Diagrama de Pareto de los efectos de la recuperación de plata por Diseño Octogonal

Figura 32

Diagrama de Pareto de la recuperación de plata por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

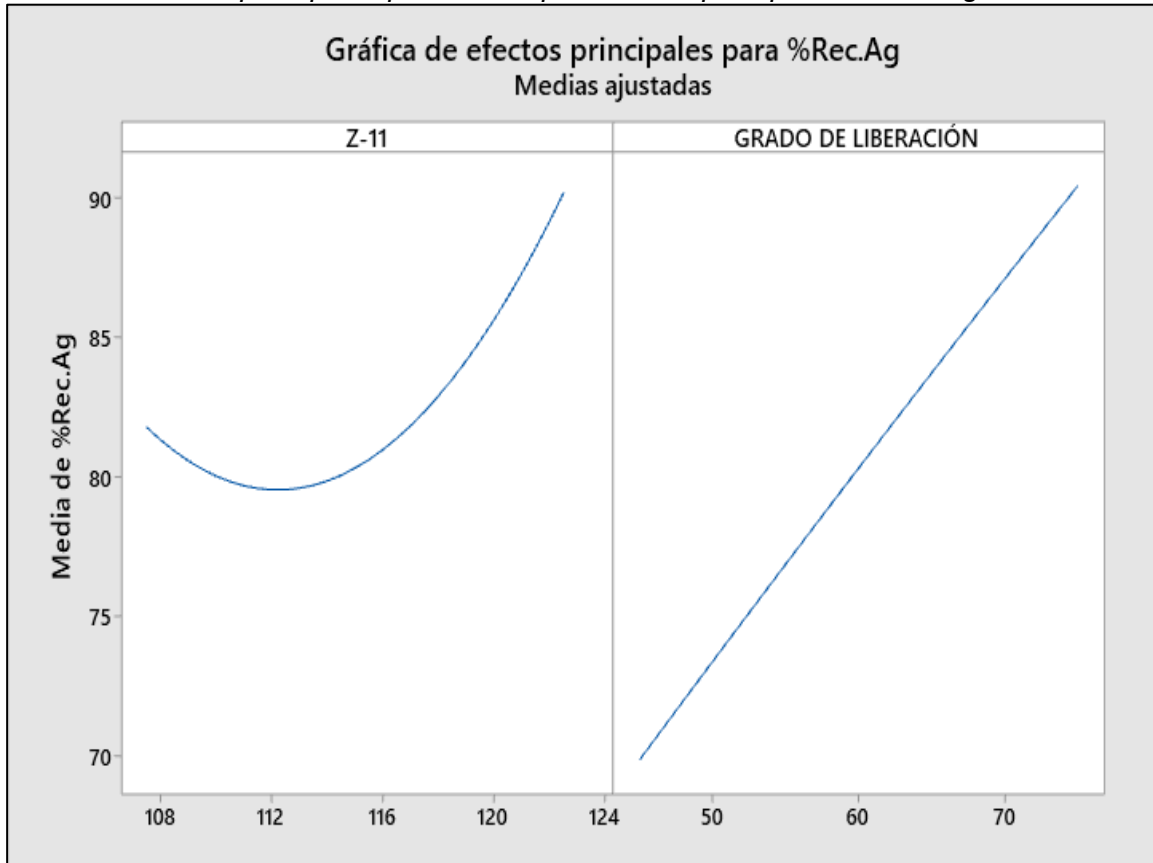
Análisis e interpretación:

En el diagrama de Pareto se verifica la significancia y no significancia de las variables controlables en relación con la variable respuesta. En este estudio, el factor A representa el xantato Z-11 y el factor B el grado de liberación. La línea de color rojo en el diagrama indica los efectos de cada variable y establece un umbral que determina si una variable controlable es significativa o no frente a la variable respuesta, que en nuestro caso es el porcentaje de recuperación de plata. Según el diagrama, podemos concluir que el factor B (grado de liberación) es el factor con más significancia para la recuperación de plata.

Gráfica de los efectos principales para la recuperación de plata

Figura 33

Gráfica de efectos principales para la recuperación de plata por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

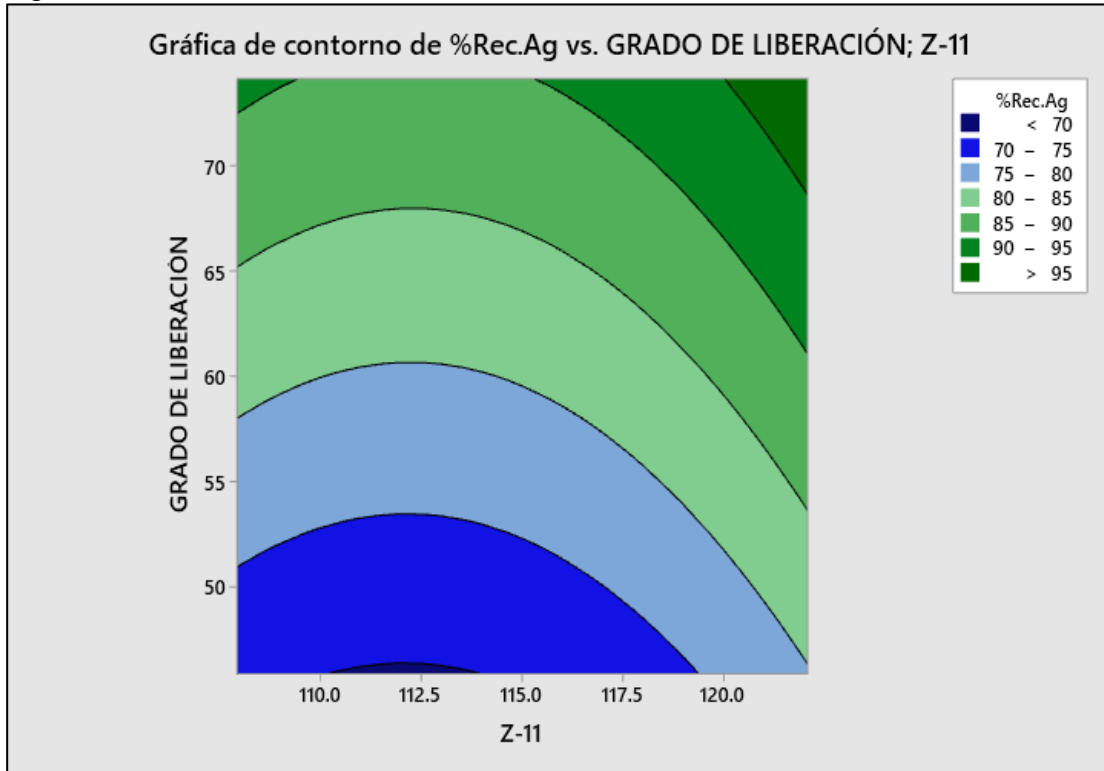
Podemos concluir:

- Para el Z-11, se observa un comportamiento parabólico. Con un consumo de 107 g/tn a 112 g/tn se ve una disminución de la recuperación de plata, llegando a un mínimo de aproximadamente 79.5%. Sin embargo, si el consumo de Z-11 continúa aumentando por encima de 112 g/tn, la recuperación de plata aumenta a valores superiores del 79.5%.
- Para el grado de liberación, con un porcentaje que varía de 45% a 75% aproximadamente, se ve un aumento en el porcentaje de recuperación de plata. Concluimos que, a mayor grado de liberación, la recuperación de plata tiende a aumentar.

Gráfica de contorno de la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11

Figura 34

Grafica de contorno para la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

La gráfica está dividida en zonas de color verde, de mayor a menor intensidad, y zonas de color azul, de menor a mayor intensidad. Sin embargo, no le daremos importancia a la zona de color azul porque la recuperación de plata es muy baja para este estudio. En los ejes se ubican las variables significativas para la recuperación de plata, y en la parte derecha se muestra la recuperación de plata junto con las intensidades de las zonas.

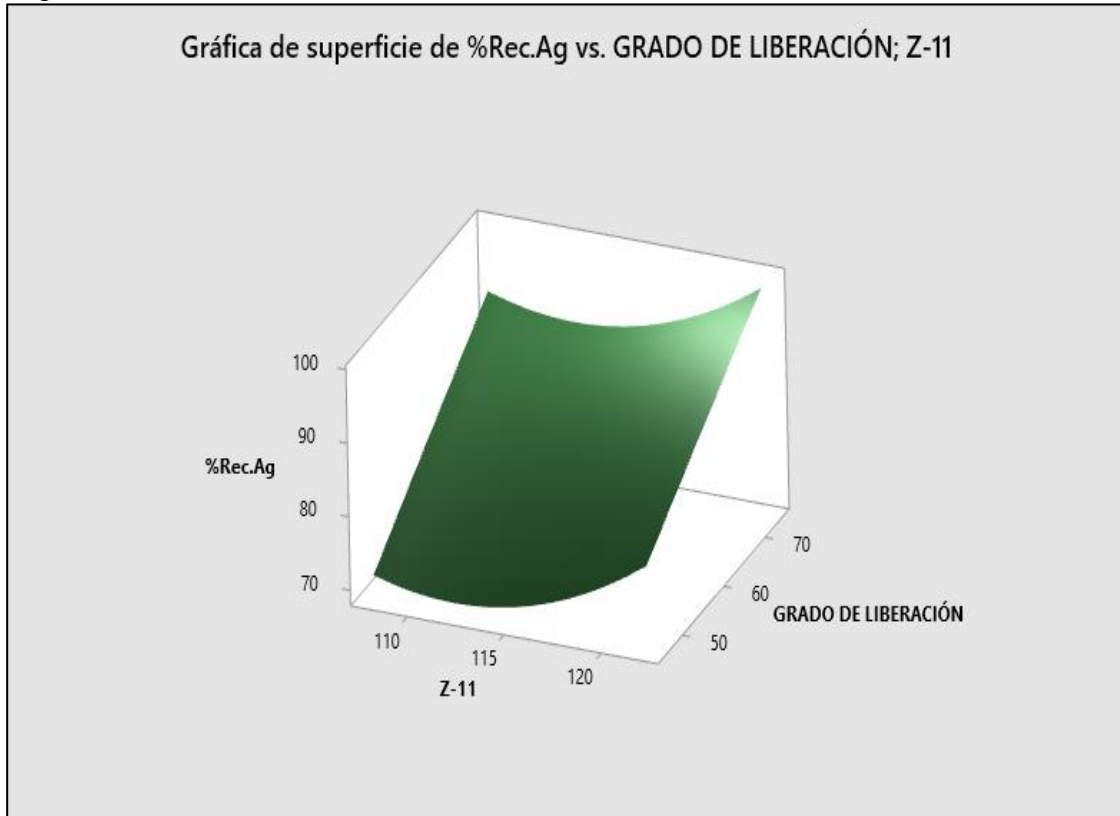
Se procede a examinar de acuerdo a lo siguiente:

- La región de tono verde más intenso indica que se alcanza la máxima recuperación de plata, superando el 95%. Esta máxima recuperación se observa aproximadamente entre un 69% y un 75% de grado de liberación, así como entre 120.5 g/tn y 122.5 g/tn de consumo de xantato Z-11.

Gráfica de superficie de la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11

Figura 35

Grafica de superficie de la recuperación de plata vs. Grado de liberación y Z-11 por diseño octogonal.



Nota: Fuente elaboración propia.

Análisis e interpretación:

La gráfica de superficie muestra en tres dimensiones la relación entre la recuperación de plata, el consumo de xantato Z-11 y el porcentaje de grado de liberación.

Se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de grado de liberación, la recuperación de plata aumenta.

A medida que aumenta el consumo de xantato Z-11, la recuperación de plata disminuye hasta alcanzar un valor mínimo. Posteriormente, si se sigue aumentando el consumo de xantato Z-11, la recuperación de plata comenzará a incrementar, adoptando así una forma parabólica.

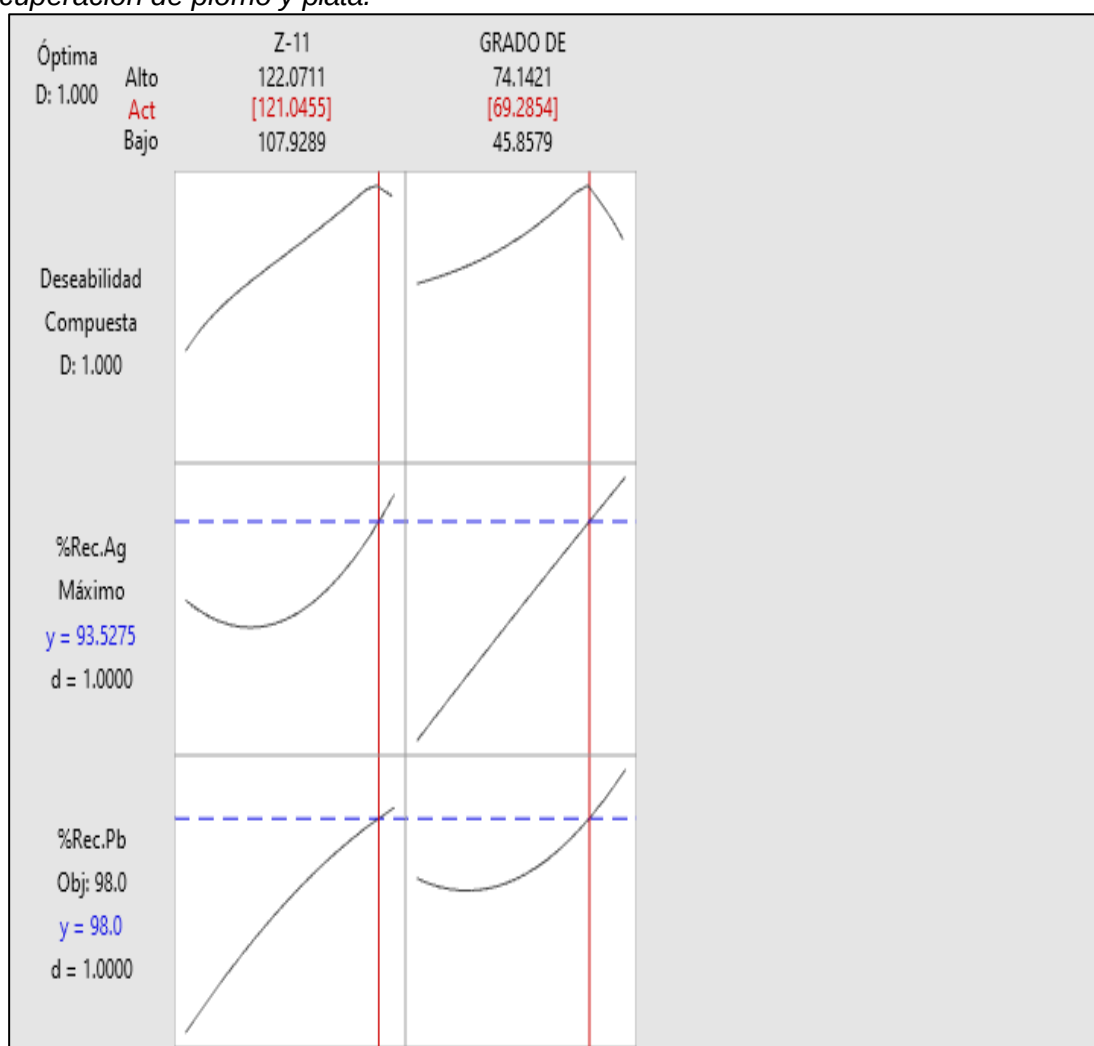
4.3 Optimización del consumo de Z-11 y el Grado de liberación para obtener la máxima recuperación de plomo y plata

Para determinar el consumo óptimo de Z-11 y el porcentaje de grado de liberación,

utilizaremos el software para obtener estos valores con el fin de lograr la máxima recuperación de plomo y plata. En la Figura 36, se observará que el consumo óptimo de xantato Z-11 es de 121.04 g/tn y el porcentaje óptimo de grado de liberación es de 69.28%, lo que permitirá alcanzar la máxima recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.

Figura 36

Valores óptimos de consumo de Z-11 y porcentaje de grado de liberación para la máxima recuperación de plomo y plata.



Nota: Fuente elaboración propia.

4.4 Prueba de flotación optimizada

Tabla 94*Consumo de reactivos en la prueba de flotación optimizada.*

Molienda	Tiempo de Molienda	18.35 minutos
	Peso del mineral	1000 gramos
	Agua	500 cc
	ZnSO ₄ (10%)	0.85 cc
	NaHSO ₃ (10%)	0.25 cc
Flotación	Aerophine 3418	1 gota
	Espumante MIBC	2 gotas
	Cal	2 gramos/pH=7.5
	Z-11 (10%)	1.21045 cc

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 95*Pesos y leyes de la prueba de flotación optimizada.*

FLOTACIÓN					
Bandejas	Peso	Tiempo	Tiempo acumulado	Pb	Ag
	g	min	min	%	oz/tc
1era bandeja	19.63	1	1	60.36	39.12
2da bandeja	33.12	2	3	49.63	28.41
3era bandeja	34.15	2	5	48.26	27.16
4ta bandeja	43.63	3	8	43.13	17.63
5ta bandeja	869.47			0.15	0.265

Nota: Fuente elaboración propia.

4.5 Balance metalúrgico de la prueba de flotación optimizada**Tabla 96***Balance metalúrgico de la prueba de flotación optimizada.*

Prueba Metalúrgica Optimizada								
Componentes	Peso(g)	Peso (TMS)	Peso (%)	Leyes		Recuperación		Ratio
				Pb	Ag	Pb	Ag	
				%	oz/tc			
Alimentación	1000.00	0.001	100.00	6.49	3.65	100.00	100.00	
Conc.Pb	130.53	0.00013053	13.05	48.71	26.09	97.99	93.66	7.66
Relave	869.47	0.00086947	86.95	0.15	0.27	2.01	6.34	
Cabeza Calculada				6.49	3.64			

Nota: Fuente elaboración propia.

4.6 Discusión de resultados

- Durante el desarrollo de las pruebas metalúrgicas, conforme al diseño octogonal realizado en el laboratorio, se obtuvieron diferentes dosificaciones de consumo de xantato Z-11 y porcentajes de grado de liberación. Como resultado, se observaron diversas tasas de recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.

Posteriormente, estos resultados fueron analizados para determinar la significancia de las variables controlables y así identificar la recuperación óptima de plomo y plata.

- De acuerdo con los resultados obtenidos del porcentaje de recuperación de plomo y plata, se realizaron análisis estadísticos que produjeron diversas tablas y gráficas. Estas herramientas permitieron una interpretación adecuada de T-Student, R^2 , análisis de varianza, ecuación de regresión, diagrama de Pareto, gráfica de los efectos principales, gráfica de contorno y gráfica de superficie. Este análisis estadístico nos permitió identificar qué variables son significativas para la recuperación de plomo y plata optimizando el consumo de xantato Z-11 y el porcentaje de grado de liberación durante el proceso.
- Mediante el análisis T-Student se comprobó que el consumo de xantato Z-11 y el porcentaje de grado de liberación son dos factores controlables significativos para el aumento de la recuperación de plomo y plata.
- El diagrama de Pareto, junto con las gráficas de efectos principales, de contorno y de superficie, proporciona una verificación visual de que los factores controlables estudiados tienen una influencia directa y significativa en la recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.
- Conociendo la significancia de las variables controlables, se procedió a la optimización, obteniendo los valores óptimos de las dosificaciones de xantato Z-11 y el porcentaje de grado de liberación. Esto resultó en un 98% de recuperación de plomo y un 93.52% de recuperación de plata.

Conclusiones

Según la prueba de moliendabilidad realizada en el laboratorio metalúrgico, se determinó que el tiempo necesario para lograr un porcentaje de malla -200 es de 13.045 minutos.

De acuerdo con la aplicación del diseño factorial fraccionado, de los cuatro factores controlables estudiados, solo dos son significativos para el aumento de la recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo: el consumo de xantato Z-11 y el grado de liberación.

El diseño factorial fraccionado demuestra que los factores del consumo de xantato Z-11 y el grado de liberación son significativos para la recuperación de plomo y plata en el concentrado de plomo.

A través del diseño octogonal, se realizaron una serie de pruebas metalúrgicas para encontrar el consumo óptimo de xantato Z-11 y el grado de liberación. Se determinó que el consumo óptimo es de 121.04 g/tn de xantato Z-11 y un 69.28% de grado de liberación, logrando una recuperación de plomo del 98% y una recuperación de plata del 93.52%.

Se realizó la prueba metalúrgica optimizada utilizando los datos del consumo de xantato Z-11 y grado de liberación, obteniendo como resultado una recuperación real de plomo de 97.99% y una recuperación de plata de 93.66%, ambos en el concentrado de plomo.

La ley de oro en el concentrado de plomo se mantuvo en valores estables, demostrando así que los factores controlables en estudio no tienen influencia en dicha ley; por ello no se muestra en los balances metalúrgicos.

Recomendaciones

Se recomienda que, para la realización de las pruebas metalúrgicas, se disponga de instrumentos adecuados y en perfecto estado, tales como el molino, las celdas de flotación, flujómetro, bandejas limpias para recibir el concentrado y reactivos de flotación de buena calidad.

Se recomienda realizar un diseño hexagonal para comparar los resultados con el diseño octogonal realizado en este estudio, con el fin de determinar cuál diseño es más económico y que proporciona mejores resultados.

Se recomienda realizar un análisis químico de las leyes de zinc, arsénico, fierro, cloro y antimonio, ya que estos elementos pueden ser contaminantes para el concentrado de plomo. Esto es importante para evitar penalizaciones, en caso de que se detecten valores superiores a lo permitido de estos contaminantes.

Se recomienda realizar una valoración del concentrado de plomo tanto antes como después de ser optimizado. Esto permitirá determinar cuánto ha aumentado el valor del concentrado de plomo tras el proceso de optimización. La finalidad del procesamiento de minerales es maximizar el valor del concentrado de plomo ya sea aumentando la ley o la recuperación, para su venta al mejor precio posible en el mercado.

Referencias Bibliográficas

- Ayala Mina, J., & Pardo Mercado, R. (1995). *Optimización por diseños experimentales con aplicaciones en ingeniería*. Lima, Perú.
- Azañero, A. (2015). *Flotación y concentración de minerales*. (A. A. Ortiz, Ed.) Lima, Perú: Colecciones Jóvic.
- Castro, J. (2005). *Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la compañía minera "Yauliyacu" S.A. mediante diseño experimentales [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio Institucional, Lima, Perú.
- Cubas, R. (2023). *Optimización de un concentrado de cobre aplicando diseño de experimentos para el incremento de la ley de oro y cobre*. Repositorio Institucional. https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/27173/1/cubas_rr.pdf
- Currie, J. (1984). *Operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Perú: Traducido por Ms.Sc. Juan Chia Aquije.
- Fuenzalida, N. (2017). *Estudio y evaluación del sistema de espesadores de relave de la división andina mediante herramientas de sistema computacional [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]*. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/147104/Estudio-y-evaluacion-del-sistema-de-espesadores-de-relave-de-la-Division-Andina-mediante-herramientas.pdf?sequence=1>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Guanajuato, México: McGraw-Hill.
- Hinostroza, R. D. (2021). *Implementación de filtro prensa para concentrados de minerales en la minera Perú Sol-Planta de beneficio San Martín [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]*. Repositorio Institucional, Cerro de Pasco, Perú. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2391/1/T026_70750024_T.pdf

Urbina, G. J. (2022). *Aplicación de diseño de experimentos en un concentrado bulk cobre-plomo con contenido de oro para la reducción del desplazamiento de zinc en la planta concentradora centenario* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional, Lima, Perú.
https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/24539/1/urbina_rg.pdf