Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTORES

Natalia Estefanía ADRIANZEN ANTONIO

Katherine Sugey VALDIVIEZO MALQUE

ASESOR

Mg. Raúl Germán PIZARRO CABRERA

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Adrianzen, N. & Valdiviezo, K. (2024). *Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Natalia Estefanía Adrianzen Antonio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75210920
URL de ORCID	
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Katherine Sugey Valdiviezo Malque
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73105616
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Raúl Germán Pizarro Cabrera
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25459442
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1001-816X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Leoncio Reyna Mariña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06020987
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Pedro José Romero y Otiniano

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	15612279
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Nexa Resources Cajamarquilla País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurigancho Calle: Carretera Central km 9.5 Desvío a Huachipa Latitud: -11.96906 Longitud: -76.88569
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2023 – Diciembre 2023
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado Evaluador de Sustentación de Tesis, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS**, el **Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO** (Miembro Revisor) y el **Ing. RAÚL GERMÁN PIZARRO CABRERA** (Asesor), habiendo presentado para el efecto la Tesis titulada:**"Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla"**, después de sustentar de manera presencial y **habiendo aprobado la Tesis** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Química**: VALDIVIEZO MALQUE KATHERINE SUGEY** para optar el Título Profesional de **INGENIERA QUÍMICA,** el Jurado Evaluador acuerda calificarla con la **NOTA** de:

.....DIECINUEVE..... 19.....
(LETRAS) (NÚMEROS)

Lima, 27 de junio de 2024

Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS
Presidente

Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO
Miembro

Ing. RAÚL GERMÁN PIZARRO CABRERA
Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la EPIQ.

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado Evaluador de Sustentación de Tesis, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS**, el **Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO** (Miembro Revisor) y el **Ing. RAÚL GERMÁN PIZARRO CABRERA** (Asesor), habiendo presentado para el efecto la Tesis titulada: **"Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla"**, después de sustentar de manera presencial y **habiendo aprobado la Tesis** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Química**: ADRIANZEN ANTONIO NATALIA ESTEFANÍA** para optar el Título Profesional de **INGENIERA QUÍMICA,** el Jurado Evaluador acuerda calificarla con la **NOTA** de:

.....DIECINUEVE..... 19
(LETRAS) (NÚMEROS)

Lima, 27 de junio de 2024

Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS
Presidente

Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO
Miembro

Ing. RAÚL GERMÁN PIZARRO CABRERA
Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la EPIQ.

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, RAÚL GERMÁN PIZARRO CABRERA en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000483-2024-D-FQIQ/UNMSM de la tesis cuyo título es "Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla", presentado por las bachilleres Natalia Estefanía Adrianzen Antonio y Katherine Sugey Valdiviezo Malque para optar el título Profesional de Ingeniera Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 7% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención el título correspondiente.

Lima, 18 de junio de 2024

Firma del Asesor: _____

Nombres y Apellidos del asesor: Raúl Germán Pizarro Cabrera

DNI: 25459442

Tabla de contenido

1. Introducción ... 3

1.1. Planteamiento del Problema ... 3

1.1.1. Realidad Problemática ... 3

1.1.2. Delimitación de la Problemática ... 4

1.2. Formulación del Problema ... 6

1.2.1. Pregunta de Investigación ... 6

1.2.2. Problemas Específicos ... 6

1.3. Justificación ... 7

1.4. Objetivos ... 8

1.4.1. Objetivo General ... 8

1.4.2. Objetivos Específicos ... 8

2. Marco Teórico ... 9

2.1. Antecedentes ... 9

2.2. Bases Teóricas ... 14

2.2.1. Proceso de Precipitación de Goethita (Vieille Montagne) ... 14

2.2.2. Proceso de Precipitación de Goethita (Nexa Resources) ... 16

2.2.3. Potencial de Oxidación-Reducción (ORP) ... 21

2.2.4. Análisis Granulométrico ... 22

2.2.4.1. Distribución de Tamaño de Partícula ... 24

2.2.4.1.1. Distribución de Gaudin – Schumann ... 24

3.2.4.2. Ejemplo de Estimación del P80 para una Calidad de Concentrado ... 26

2.2.4.3. Análisis por tamizado ... 29

2.2.5. Análisis de Regresión ... 31

2.2.5.1. Regresión Lineal ... 31

2.2.5.1.1. Recta de regresión ajustada. ... 32

2.2.5.1.2. Coeficiente de determinación ... 33

2.2.6. Covarianza de Dos Variables Aleatorias y Correlación ... 33

2.2.6.1. Coeficiente de Correlación Producto-Momento de Pearson ... 34

2.2.7. Prueba de Hipótesis ... 34

2.2.7.1. Prueba de Hipótesis con Coeficiente de Correlación ... 37

2.3. Marco Conceptual ... 38

3. Hipótesis y Variables 42
3.1. Hipótesis General 42
3.2. Hipótesis Específicas 42
3.3. Identificación de las Variables 43
3.3.1. Variables Independientes 43
3.3.2. Variables Dependientes 43
3.4. Operacionalización de las Variables 44
3.5. Matriz de Consistencia 45
4. Metodología 46
4.1. Tipo y Diseño de Investigación 46
4.2. Unidad de Análisis 46
4.3. Población de Estudio 46
4.4. Tamaño de Muestra 46
4.5. Selección de Muestra 46
4.5.1. Consideraciones para la Elección de Concentrados de Zinc 46
4.6. Técnicas de recolección de datos 48
4.7. Procedimiento experimental 49
4.7.1. Localización del punto de muestreo 49
4.7.2. Toma de muestra 49
4.7.3. Caracterización de la muestra 49
4.7.4. Procedimiento 50
4.7.4.1. Simulación de etapa de reducción ácida 50
4.7.4.2. Caracterización granulométrica de concentrados de zinc 50
5. Resultados y discusión 51
5.1. Resultados 51
5.1.1. Resultados de la eficiencia de reducción 55
5.1.2. Resultados del P80 56
5.1.3. Resultados del ORP 83
6.2. Discusión de resultados 92
6. Conclusiones 95
7. Recomendaciones 96
8. Referencias 97

9. Anexo 102
9.1. Eficiencia de reducción en Nexa Resources 102
9.2. Procedimiento experimental..... 103

Índice de tablas

Tabla 2-1: Diámetros nominales *23*
Tabla 2-2: Ejemplo de estimación del P80 para una calidad de concentrado *26*
Tabla 2-3: Comparación entre granulometría vía húmeda y vía seca *30*
Tabla 2-4: Errores en pruebas de hipótesis *35*
Tabla 2-5: Hipótesis alternativas de las pruebas estadísticas *37*
Tabla 3-1: Operacionalización de las variables *44*
Tabla 3-2: Matriz de consistencia *45*
Tabla 4-1: Recepción de concentrados en toneladas húmedas en los años 2021, 2022 y 2023 .. *47*
Tabla 4-2: Ley promedio de Zn (%) en concentrados de los años, 2022 y 2023 ..... *48*
Tabla 5-1: Resultados experimentales según calidades *51*
Tabla 5-2: Resultados experimentales de fierro total, ion ferroso, ion férrico y eficiencia de reducción *55*
Tabla 5-3: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *56*
Tabla 5-4: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *57*
Tabla 5-5: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *58*
Tabla 5-6: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *59*
Tabla 5-7: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *60*
Tabla 5-8: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *61*
Tabla 5-9: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *62*
Tabla 5-10: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *63*
Tabla 5-11: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *64*
Tabla 5-12: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *65*
Tabla 5-13: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *66*
Tabla 5-14: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *67*
Tabla 5-15: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *68*
Tabla 5-16: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann *69*

Tabla 5-17: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 70
Tabla 5-18: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 71
Tabla 5-19: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 72
Tabla 5-20: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 73
Tabla 5-21: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 74
Tabla 5-22: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 75
Tabla 5-23: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 76
Tabla 5-24: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 77
Tabla 5-25: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 78
Tabla 5-26: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 79
Tabla 5-27: Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 80
Tabla 5-28: Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 81
Tabla 5-29: Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann..... 82
Tabla 5-30: Resultados experimentales de ORP para calidad 1..... 83
Tabla 5-31: Resultados experimentales de ORP para calidad 2..... 84
Tabla 5-32: Resultados experimentales de ORP para calidad 3..... 85
Tabla 5-33: Resultados experimentales de ORP para calidad 4..... 86
Tabla 5-34: Resultados experimentales de ORP para calidad 5..... 87
Tabla 5-35: Resultados experimentales de ORP para calidad 6..... 88
Tabla 5-36: Resultados experimentales de ORP para calidad 7..... 89
Tabla 5-37: Resultados experimentales de ORP para calidad 8..... 90
Tabla 5-38: Resultados experimentales de ORP para calidad 9..... 91

Índice de figuras

Figura 2-1: Diagrama simplificado del proceso de goethita de Vielle-Montagne 16
Figura 2-2: Diagrama de flujo de la etapa de reducción ácida en la sección 40/10..... 19
Figura 2-3: Diagrama de flujo de la etapa de reducción ácida en la sección 40..... 20
Figura 2-4: Gráfica acumulativa en escala logarítmica (Gaudin-Schuhmann) 25
Figura 2-5: Logaritmo de apertura de la malla vs logaritmo de porcentaje de acumulado pasante 27
Figura 2-6: Datos (x,y) hipotéticos alrededor de la verdadera recta de regresión para un número de observaciones igual a 5 32
Figura 2-7: Tres diferentes tipos de pruebas estadísticas (α=0.05) 36
Figura 5-1: Cinética de ORP experimental promedio 52
Figura 5-2: Análisis de regresión entre la eficiencia de reducción y el P80..... 53
Figura 5-3: Análisis de regresión entre la eficiencia de reducción y ORP..... 54
Figura 5-4: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 1 56
Figura 5-5: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 1 57
Figura 5-6: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 1 58
Figura 5-7: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 2 59
Figura 5-8: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 2 60
Figura 5-9: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 2 61
Figura 5-10: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 3 62
Figura 5-11: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 3 63
Figura 5-12: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 3 64
Figura 5-13: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 4 65
Figura 5-14: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 4 66
Figura 5-15: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 4 67
Figura 5-16: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 5 68
Figura 5-17: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 5 69
Figura 5-18: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 5 70
Figura 5-19: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 6 71
Figura 5-20: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 6 72
Figura 5-21: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 6 73
Figura 5-22: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 7 74
Figura 5-23: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 7 75
Figura 5-24: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 7 76
Figura 5-25: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 8 77
Figura 5-26: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 8 78
Figura 5-27: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 8 79
Figura 5-28: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 9 80
Figura 5-29: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 9 81
Figura 5-30: Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 9 82
Figura 9-1: Eficiencia de reducción en la refinería Nexa Resources durante 2022-2023 102
Figura 9-2: Simulación de etapa de reducción ácida en laboratorio 103

AGRADECIMIENTO

A nuestra querida alma mater Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

A nuestro asesor de tesis, el Ing. Raúl German Pizarro Cabrera por el apoyo a nuestra investigación y por compartir sus conocimientos a lo largo de nuestra formación profesional.

A Nexa Resources Cajamarquilla por permitirnos realizar nuestras prácticas profesionales y concedernos el permiso de realizar nuestra investigación en sus instalaciones.

A Renzo Alvarado y Merly López, ingenieros de procesos del área de Hidrometalurgia, por sus enseñanzas durante nuestro periodo de prácticas, por su orientación y recomendaciones para la realización de nuestra investigación.

A Ericka Vargas y Eddy Condori, integrantes de la Gerencia de Tecnología, por su soporte y guía para realizar las pruebas en las instalaciones de planta piloto.

DEDICATORIA

A Dios por guiarme durante estos años. A mi familia, por su apoyo incondicional y por motivarme a seguir adelante a pesar de las adversidades que puedan presentarse.

Natalia A.

Con gratitud infinita a Dios, mi fuente de fortaleza y guía. A mi amada familia, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor inspiración y motivación. Este logro es una culminación de esfuerzos compartidos y sueños realizados. Gracias a los que formaron parte de esta historia.

Katherine V.

Resumen

El presente trabajo de estudio “Evaluación del poder reductor de concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla” abarca la problemática de la elección entre las diferentes calidades de concentrado de zinc recepcionadas por la refinería las cuales poseen diversas propiedades químicas y físicas que finalmente terminan impactando en la eficiencia de reducción del ion férrico. Es por ello que este trabajo tiene por objetivo evaluar la eficiencia de reducción del ion férrico de los concentrados de zinc que se emplean en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla.

Para tal fin, se simuló la etapa de reducción ácida en el laboratorio de planta piloto realizando pruebas por triplicado con 9 calidades de concentrados de zinc para las cuales se analizaron los elementos químicos de ion ferroso y fierro total, lo cual permitió estimar la concentración de ion férrico en las muestras líquidas antes y después de la reacción. Adicionalmente se midió el potencial de oxidación-reducción (ORP) durante las cuatro horas que duró la prueba y se caracterizó la granulometría de las calidades de concentrado empleados mediante el indicar P80.

Los resultados determinaron que las calidades 6 y 8 son las óptimas en el proceso de reducción ácida con eficiencias de 85.1% y 84.5% respectivamente. Además, el ΔORP en la reacción generada en la etapa de reducción ácida resultó negativo en un rango de -135mV a -66 mV, mientras que el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación resultó en un rango de 80µm a 143 µm.

Asimismo, se concluyó que la relación entre la eficiencia de reducción y el P80 se determinó bajo un modelo cuadrático con un R 2 de 87.60% mientras que para la eficiencia de reducción y el ΔORP se determinó una dependencia lineal negativa cuantificada por un coeficiente de correlación de Pearson de -0.91.

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Realidad Problemática

El hierro es el segundo metal más abundante en la litósfera y el cuarto más abundante en la corteza terrestre (Chen y Cabri, 1986). Por ello, como menciona Dutrizac (1987), no es inusual que este se encuentre en cantidades significativas en casi todos los minerales metalúrgicos y concentrados y, por lo tanto, en los diferentes procesos hidrometalúrgicos. Asimismo, sostiene que al ser este elemento una impureza en dichos procesos, se requiere eliminarlo, y una de las técnicas para ello es mediante su precipitación ya sea como hidróxido de hierro, jarosita, goethita o hematita.

Monhemius (2013) afirma que es en la industria del zinc donde se iniciaron la mayoría de los procesos de control del hierro que conocemos hoy en día. En ese sentido, menciona que el proceso desarrollado por Vieille-Montagne y empleado en la refinería de zinc de Métallurgie Hoboken-Overpelt's, describe cinco etapas mediante las cuales se lleva a cabo la precipitación de la goethita: lixiviación neutra, lixiviación ácida, reducción, neutralización e hidrólisis del hierro. En este proceso, la solución proveniente de la etapa de lixiviación ácida es sometida a una reducción de concentración de iones férricos mediante la adición de concentrado de zinc. Dutrizac (1987) sostiene que se requiere realizar esta reducción debido que el hierro precipita tan rápido como se oxida, por lo que cuando se presentan concentraciones elevadas de iones férrico, el hierro comienza a precipitar en forma de hidróxido férrico. Además, menciona que este compuesto posee malas propiedades de sedimentación y filtración, y tiende a incorporar cantidades significativas de la solución de proceso en su estructura.

1.1.2. Delimitación de la Problemática

En Perú, la única refinería de zinc se encuentra en Cajamarquilla, en el distrito de Lurigancho-Chosica y se encuentra bajo propiedad de Nexa Resources Cajamarquilla (Nexa CJM). Esta planta posee una capacidad nominal de producción de 344 400 toneladas anuales de zinc contenido (Nexa, 2023).

La refinería emplea las etapas de tostación, lixiviación, purificación, electrólisis y fusión y moldeo para la obtención de su producto principal. De acuerdo a lo mencionado por Cardoza (2019), dentro de la etapa de lixiviación, se tiene como objetivo "separar el hierro disuelto desde la solución de lixiviación como un residuo sólido insoluble (goethita) para disponer de una solución de sulfato de zinc factible de someterse a una mayor purificación como etapa previa a la electrodeposición" (p. 24). Para ello se contemplan siete etapas que permitirán alcanzar dicho objetivo.

El proceso de lixiviación empleado en Nexa CJM contempla algunas modificaciones al proceso planteado por Vieille-Montagne. Sin embargo, la subetapa de reducción ácida contempla el mismo objetivo a la etapa de reducción del proceso Vieille-Montagne.

En la etapa de reducción ácida el objetivo es reducir el ion férrico a ion ferroso contenido en las soluciones de una etapa anterior denominada lixiviación ácida caliente usando como agente reductor el concentrado de zinc (sulfuro de zinc), la cual es importante que ya un alto contenido de hierro férrico genera precipitaciones que incrementan la carga circulante de hierro y perjudica la separación sólido-líquido. El underflow de esta etapa pasa por filtración y genera el CPT (Concentrado Pre Tratado), el cual es recirculado a través de un blending para tostación.

La elección del concentrado adecuado como agente reductor es esencial para garantizar que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente y se logre una reducción óptima del hierro férrico.

Actualmente, Nexa CJM recibe diferentes calidades de concentrados que pueden emplearse en dicha etapa. Cada calidad de concentrado de zinc posee diferentes características químicas y físicas que pueden impactar en su desempeño como agente reductor. Debido a lo expuesto, es importante realizar una evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de todas estas calidades.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Pregunta de Investigación

¿Qué determina la evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de los concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación?
- ¿Cuál es el P80 de los concentrados de zinc empleados en la evaluación?
- ¿Existe dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación?
- ¿Existe dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación?

1.3. Justificación

Yue et al. (2016) afirman que “el potencial redox de soluciones ácidas sulfatadas de hierro es uno de los parámetros más importantes de los sistemas de lixiviación” (p. 334). Asimismo, realizar la medición del ORP de una solución permitirá determinar sus propiedades oxidantes o reductoras (Banhidi, 2007).

El presente trabajo plantea caracterizar los concentrados de Zinc que se emplean en la Refinería Cajamarquilla y cuantificar su poder reductor simulando a nivel piloto la etapa de reducción ácida, empleada en el área de Lixiviación. Con estos resultados, se podrá establecer una jerarquía del grupo de concentrados seleccionados para que el empleo de una determinada calidad pueda ser priorizada en dicha etapa, sin que esto implique algún riesgo operacional.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de reducción del ion férrico de los concentrados de zinc que se emplean en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida de los concentrados de zinc empleados en la evaluación.
- Determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleados en la evaluación.
- Determinar la existencia de dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.
- Determinar la existencia de dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

El sulfuro de zinc ha sido empleado en diversos procesos de lixiviación. Tal es el caso de la investigación titulada “Zinc recovery from sphalerite concentrate by direct oxidative leaching with ammonium, sodium and potassium persulphates”, en la cual Babu et al. (2002) exploran los efectos de varios factores en la tasa de disolución de zinc en la cual las condiciones óptimas para lograr una lixiviación del 95% de zinc a partir del concentrado de esfalerita fueron: tamaño de partícula del concentrado menor a 150 µm, temperatura de lixiviación de 333 K durante 5 horas, concentración de ácido sulfúrico del 5% (v/v), y una concentración de persulfato de amonio del 20% (w/v).

Asimismo, Perez y Dutrizac (1991) en “The effect of the iron content of sphalerite on its rate of dissolution in ferric sulphate and ferric chloride media” se enfocan en el proceso de lixiviación de muestras de esfalerita en soluciones ácidas utilizando dos tipos diferentes de soluciones: sulfato férrico y ácido sulfúrico, y cloruro férrico y ácido clorhídrico. En este estudio, emplearon un rango de tamaño de partícula específico entre 75 y 104 µm, de la cual se concluyó que cuanto mayor era la cantidad de hierro en la esfalerita y en la solución ácida, más rápido se disolvía la esfalerita. Esto sugiere que la lixiviación de la esfalerita estaba principalmente controlada por la transferencia de electrones en la superficie de la esfalerita y que esta relación se mantenía constante en el rango de tamaño de partícula estudiado (75-104 µm). También observaron que este comportamiento se aplicaba tanto al utilizar sulfato férrico como cloruro férrico como soluciones ácidas.

Dentro de los procesos de lixiviación, existen diferentes factores que pueden afectar la reacción que se lleva a cabo. Uno de ellos es el tamaño de partícula, partículas más finas tienen

una mayor superficie específica, lo que facilita una mayor interacción entre el mineral y la solución, acelerando la velocidad de reacción en la lixiviación. En contraste, partículas más grandes pueden tener una lixiviación más lenta debido a su menor superficie de contacto. Esta premisa la sustentan Suni et al. (1989) en su investigación "Modelling the leaching kinetics of a sphalerite concentrate size distribution inferric chloride solution" en la que se centran en la modelización de la cinética de lixiviación de una distribución de tamaño de concentrado de esfalerita en solución de cloruro férrico. Se desarrolló un modelo matemático que tuvo éxito al predecir la velocidad de disolución para esfaleritas con tamaños de partículas similares, que estaban en el rango de 45-106 µm. Sin embargo, cuando se aplicó este modelo a esfaleritas con tamaños de partículas más variados, en el rango de 14.3-250 µm, no obtuvieron resultados precisos, los resultados del modelo en este caso mostraron una extracción de menos del 90%. Para mejorar la precisión, se ajustó el modelo para tener en cuenta esta variabilidad en el tamaño de las partículas, logrando así una mejor concordancia con los resultados experimentales.

Por otro lado, un impacto en la reacción de lixiviación, es la presencia de impurezas o la formación de capas superficiales. En un estudio realizado por Crundwell y Verbaan (1987) en su investigación "Kinetics and mechanisms of the non-oxidative dissolution of sphalerite (zinc sulphide)" se llevó a cabo pruebas de lixiviación con ácido sulfúrico concentrado en muestras de esfalerita, un mineral de sulfuro de zinc. El propósito era comprender cómo la estructura y composición de las muestras afectan la velocidad y eficiencia de la reacción de lixiviación. Se utilizó una muestra de esfalerita pura (Ward) y una muestra impura (ZCR) que contenía impurezas de plomo. La esfalerita pura mostró una disolución uniforme en toda su superficie, mientras que la muestra impura se disolvió de manera compleja, principalmente a lo largo de los límites de grano. Además, se observó una inhibición en la tasa de disolución de las muestras impuras debido

a la presencia de impurezas. Estos resultados resaltan la importancia de la estructura y composición de la muestra en la eficiencia de la lixiviación de esfalerita y tienen relevancia en la industria minera para el diseño de procesos de lixiviación.

Otro factor relevante en un sistema de lixiviación, como mencionan Yue et al. (2016) es el potencial de oxidación-reducción (ORP). Respecto a este potencial, se han realizado diferentes investigaciones en las cuales se ha estudiado su relación con la presencia del hierro en los sistemas de lixiviación. Dentro de ellas, se encuentra la investigación titulada "Dissolution and passivation of chalcopyrite during bioleaching by Acidithiobacillus ferrivorans at low temperature", en la cual Peng et al. (2019) demostraron cómo se incrementa el ORP durante una reacción de biolixiviación de calcopirita debido al consumo de iones ferrosos (Fe^{2+}) y el incremento de la concentración de iones férricos (Fe^{3+}).

Además, Sundramur et al. (2019) en su investigación "Bioleaching of zinc and iron from sphalerite using Leptospirillum ferriphilum: kinetic aspects" estudian el impacto de la densidad de pulpa en el pH y ORP durante la biolixiviación indirecta del mineral de esfalerita y analizan la cinética de dicha reacción basados en un modelo de primer orden. Para ello emplearon Leptospirilum ferriphilum adaptada, un tipo de bacteria de hierro (IOB) que permite la obtención de iones férricos, a través de la oxidación de los componentes ferrosos, que son responsables de la oxidación de sulfuros metálicos a sulfatos metálicos solubles. Dentro de los resultados, se observó que la oxidación bacteriana Fe^{2+} a Fe^{3+} ocasionó la presencia de electrones libres, lo cual a su vez conllevó a incremento en el ORP de la reacción. Asimismo, se observó que, a mayores densidades de pulpa, se obtuvo mayores valores de ORP. Del estudio mencionado, se puede concluir la relación existente entre los valores de ORP de una reacción con la presencia del ion férrico.

Como se mencionó anteriormente, la presencia del hierro en los sistemas de lixiviación, en forma de ciertas especies y a ciertas concentraciones, puede ser perjudicial para procesos posteriores de tratamiento. Por ello, es importante determinar en qué formas se encuentra el hierro y determinar la concentración de estas. En ese sentido, Yue et al. (2014) en su investigación "Speciation of the H_2SO_4-$Fe_2(SO_4)_3$-$FeSO_4$-H_2O system and development of an expression to predict the redox potential of the Fe^{3+}/ Fe^{3+} couple up to 150 ◦C" estudiaron la especiación de un sistema cuaternario de sulfato de hierro ácido mediante el empleo de un modelo termodinámico bajo las condiciones más relevantes para la industria hidrometalúrgica. Los resultados obtenidos de la distribución de las principales especies férricas y ferrosas en función de la temperatura, concentración de hierro, acidez y el ratio nominal Fe^{+3}/Fe^{+2} revelaron que la mayor parte del Fe (III) se encontraba presente como complejos o precipitados y que los iones férricos libres solo se encontraban en un bajo porcentaje; mientras que la mayor cantidad de Fe (II) se encontraba en forma de iones ferrosos libres. En tanto que, Yue et al. (2016) en su investigación "Extended validation of an expression to predict ORP and iron chemistry: application to complex solutions generated during the acidic leaching or bioleaching of printed circuit boards" mencionan que el metódo de Espectroscopía por Absorción Atómica (AAS) es un método confiable para la estimación del contenido de fierro total en solución. Esto debido a que posee un límite de detección de 0.1 mg/L y el error experimental de dicho método se estima entre 3 y 5%. Por otro lado, emplean la valoración con sulfato de cerio (IV) para la determinación de ion ferroso (Fe^{2+}). Respecto este método, mencionan que, en una solución ácida de sulfato de hierro con predominio ferroso, probablemente no se reflejará la composición real de la solución, especialmente con relaciones nominales férrico/ferroso inferiores a 0.01. Sin embargo, precisan también que puede existir un intervalo en el cual el empleo de valoración con sulfato de cerio (IV) para la determinación de Fe^{2+}

es confiable y sugiere, a partir del estudio realizado, un intervalo de 0.01-100, pero afirman que se requieren estudios más detallados para comprobarlo.

Por otra parte, otro punto relevante en la presente investigación fue la aplicación del coeficiente de correlación en los resultados experimentales y su interpretación. En ese sentido, se han realizado diversos estudios como el presentado en la investigación de Zhi et al. (2017) titulada "Research on the Pearson correlation coefficient evaluation method of analog signal in the process of unit peak load regulation", en la cual emplean el método de correlación de Pearson para medir la precisión de correlación lineal entre dos variables y mencionan la aplicabilidad de este método en diferentes áreas. Asimismo, mencionan 5 intervalos para facilitar la interpretación de este coeficiente: 0.8-1 (correlación extremadamente fuerte), 0.6-0.8 (correlación fuerte), 0.4-0.6 (correlación moderada), 0.2-0-4 (correlación débil) y 0.0-0.2 (correlación extremadamente débil o inexistente).

Además, Santana et al. (2019) en su investigación "A comparative study of particle size distribution using analysis of variance for sedimentation and laser diffraction methods" cuantifica el grado de correlación entre tres métodos para análisis granulométrico de 5 muestras compuestas por diferentes porcentajes de caolín y cuarzo. Para ello, determinaron el coeficiente de correlación de Pearson existente entre los porcentajes de volumen acumulado para el método del densímetro y difracción láser (con y sin preparación de muestra). Los resultados de la investigación arrojaron coeficientes de correlación de 0.9818, 0.914, 0.9368, 0.8760 y 0.8814, para las muestras con contenido de caolín de 100, 75, 50, 25 y 0% respectivamente, cuando se compararon los volúmenes acumulados obtenidos para los métodos del densímetro y difracción láser. Por otro lado, cuando se compararon los métodos de difracción láser con y sin preparación de la muestra, se obtuvieron coeficientes de correlación de 0.9858, 0.9240, 0.9890, 0.9392 y 0.9511, para las muestras con

contenido de caolín de 100, 75, 50, 25 y 0% respectivamente. Los autores concluyeron que existe una fuerte correlación entre los métodos aplicados.

Sumado a ello, Kozak et al. (2012), en su investigación titulada "Use of the correlation coefficient in agricultural sciences: problems, pitfalls and how to deal with them" identifican los problemas que se presentan cuando se requiere interpretar y reportar los resultados de un análisis de correlación. Asimismo, ejemplifican estos problemas y realiza recomendaciones para no cometerlos. En ese sentido, mencionan que la aplicación del coeficiente de correlación solo es posible cuando existe una relación lineal entre dos variables. Finalmente, concluyen que el coeficiente de correlación es una de las herramientas estadísticas más utilizadas para analizar asociaciones entre variables y yace ahí la importancia de una adecuada interpretación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Proceso de Precipitación de Goethita (Vieille Montagne)

Dutrizac (1987) en su investigación "An Overview Iron Precipitation in Hydrometallurgy" menciona que en los procesos hidrometalúrgicos, la eliminación del hierro se lleva a cabo comúnmente mediante la oxidación de este a su forma de ion férrico. Posterior a ello, se realiza una etapa de hidrólisis que concluye con la precipitación de algún componente filtrable de hierro. Dentro de estos precipitados tenemos a la jarosita, goethita y hematita.

En el caso de la precipitación de la goethita, a inicios de los años 70 se desarrolló el proceso de Vieille Montagne en la fundición de Balen. Este proceso se basa en la reducción del fierro al estado ferroso mediante el uso de concentrado de sulfuro de zinc, siendo luego reoxidado por medio de aire en los tanques de precipitación de goethita, obteniendo así concentraciones de férrico a bajos niveles (Sinclair, 2005). Dutrizac (1987) menciona que la precipitación de la goethita puede llevarse a cabo mediante las siguientes etapas:

La solución obtenida de la etapa de lixiviación ácida caliente contiene entre 15-20 g/L de ion férrico y hasta 50 g/L de ácido sulfúrico. Al añadir concentrado a 90 °C a esta solución, se produce la reducción del ion férrico al estado ferroso mediante la reacción:

$$Fe_2(SO_4)_3 + ZnS \rightarrow ZnSO_4 + FeSO_4 + S^0 \quad (2\text{-}1)$$

Posterior a ello, la solución obtenida se neutraliza con calcina hasta 3-5 g/L de ácido sulfúrico y el residuo obtenido se recicla hacia la etapa de lixiviación ácida caliente. Finalmente, entre 85-90 °C y a un pH entre 2.5-4.2 se produce la precipitación de la goethita en una etapa de oxidación y neutralización.

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O \quad (2\text{-}2)$$

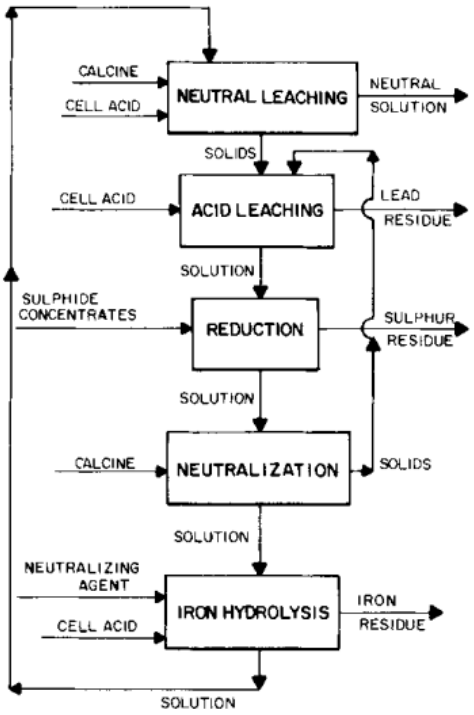
$$Fe^{3+} + 2H_2O \rightarrow FeO.OH + 3H^+ \quad (2\text{-}3)$$

El hierro se precipita tan rápidamente como se oxida, y la concentración férrica de la solución permanece por debajo del valor crítico de 2 g/L a pesar de que la concentración total de hierro es de muchos gramos por litro. La goethita produce un precipitado fácil de filtrar con una densidad aparente relativamente alta; también se consigue una eliminación eficaz del hierro de la solución de tratamiento. (pp. 271-272)

El flujo del proceso descrito en las líneas anteriores se muestra en la Figura 2-1.

Figura 2-1

Diagrama simplificado del proceso de goethita de Vielle-Montagne



Nota. Adaptado de "An Overview Iron Precipitation in Hydrometallurgy" (p.272), por J. Dutrizac, 1987, *Crystallization and Precipitation, 1*(1).

2.2.2. Proceso de Precipitación de Goethita (Nexa Resources)

La refinería Nexa Resources Cajamarquilla (Nexa CJM) está ubicada en el distrito de Lurigancho/Chosica en Lima, Perú. Sus inicios abarcan desde el año 1981 siendo su principal producto el zinc refinado. Además del zinc, la refinería también produce subproductos como ácido sulfúrico, concentrado de cobre, concentrado de plata y cemento de cadmio. Actualmente, Nexa está posicionada como la fundición de zinc más grande de América Latina, esto convierte a Nexa en una empresa líder en la industria que además destaca por su compromiso con la sostenibilidad, la excelencia operativa y la responsabilidad social corporativa. (Nexa, 2023).

El proceso Nexa CJM detallado en la Certificación VM-CJM, Matriz de Competencias: Manual del Proceso Productivo (2016) comienza con la recepción de concentrados de zinc los cuales son comprados de minas y son la materia prima para la producción de zinc refinado. Estos concentrados se mezclan con diferentes materiales y se someten a un proceso de tostación para convertir sulfuros en óxidos de zinc y azufre en ácido sulfúrico. La calcina resultante de la tostación se somete a lixiviación para convertirla en una solución de sulfato de zinc. El proceso de lixiviación empleado contempla algunas modificaciones al proceso planteado por Vieille-Montagne. En el caso de Nexa Cajamarquilla, primero, ocurre la lixiviación neutra, donde se disuelve el sulfato de zinc y parte del óxido de zinc usando soluciones ácidas. Esta solución pre purificada de sulfato de zinc pasa a su posterior procesamiento en la planta de Purificación cuyo objetivo es eliminar impurezas como cobre, cadmio y cobalto que aún están presentes en las soluciones de sulfato de zinc acompañan al zinc en los concentrados. Esto es crucial para garantizar que no afecten la calidad del zinc refinado y el funcionamiento del proceso de electrodeposición y finalmente al proceso de fusión y moldeo.

Según lo detallado en el manual para el proceso de lixiviación, este empieza con la etapa de neutra en donde su underflow pasa a la etapa de lixiviación ácida 1 (LAC1) para disolver los compuestos de zinc y hierro restantes, el residuo de esta etapa pasa por la lixiviación ácida 2 (LAC2) en donde se completa la disolución de cualquier compuesto de zinc remanente que no fue disuelto en la etapa de LAC1; asimismo, de la LAC2 se produce un residuo que contiene plomo y plata para su posterior tratamiento en cemento de plata.

El overflow de la LAC1 es tratada por la etapa de reducción ácida (RA); en esta etapa el objetivo es reducir el hierro férrico (Fe^{3+}) a hierro ferroso (Fe^{2+}) contenido en las soluciones de LAC1 la cual es importante que ya un alto contenido de hierro férrico genera precipitaciones que

incrementan la carga circulante de hierro y complica la separación sólido-líquido. “La adición de concentrado es en base al estequiométrico, llegando a ser 1.5 veces dicho valor a fin de garantizar el contenido de férrico a la salida de esta etapa” (Matriz de Competencias: Manual del Proceso Productivo, 2016, p.30). El estequiométrico hace referencia a la adición de concentrado de acuerdo con la reacción química principal de la reducción ácida balanceada y las relaciones molares entre los reactivos:

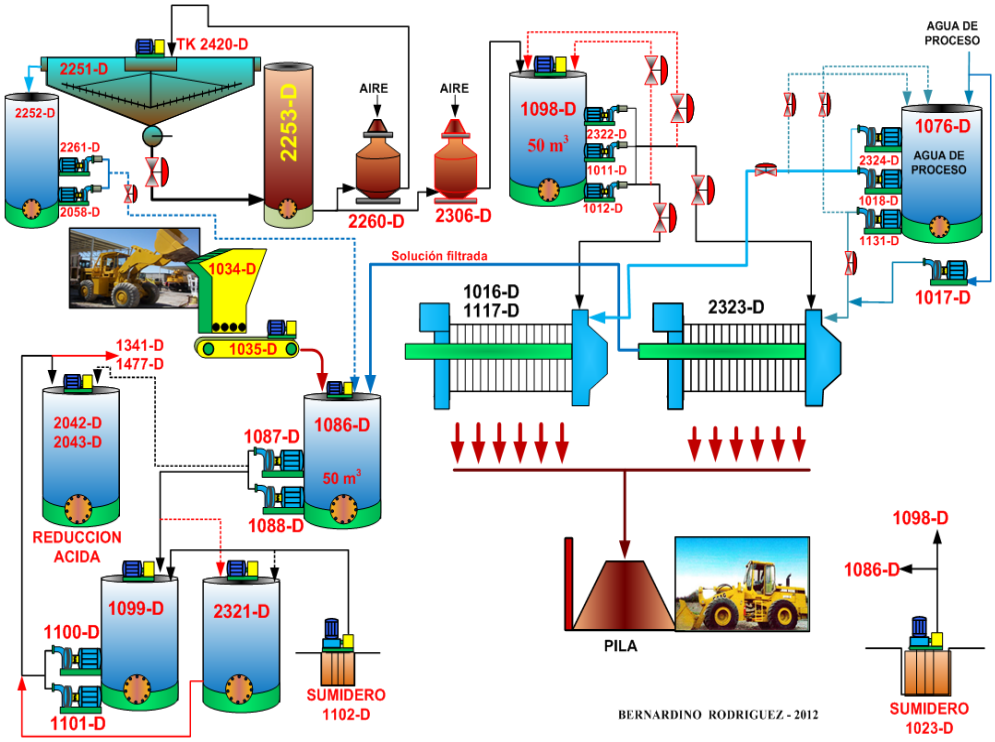
$$\mathrm{ZnS} + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow ZnSO_4 + 2\,Fe\,(SO_4)_3 + S^0 \qquad (2\text{-}4)$$

Asimismo, se añade un 50 por ciento adicional (1.5 veces) para asegurarse de que haya suficiente reactivo para garantizar que la reacción se complete y que se obtenga la cantidad deseada de productos.

Prosiguiendo con lo detallado en el manual y en la Figura 2-2, la pulpa de concentrado que ingresa a la etapa de RA es preparada en la sección denominada 40/10 en donde se mezcla el concentrado fresco con solución filtrada de los filtros de reducción ácida. La pulpa se bombea hasta el tanque del almacenamiento ubicado en la sección 40 y desde este tanque se bombea a la etapa de reducción ácida. La pulpa de concentrado pasa por un proceso de mezcla en donde el concentrado es administrado por un controlador de secuencia continua el cual ajusta la velocidad de la faja (con tag de identificación: D-1035) de alimentación del concentrado al tanque con tag de identificación de D-1086 en donde se repulpa con la solución filtrada de los filtros Andritz (con tags de identificación: D-2323, D-1016 y D-1117); asimismo, el control se da en base al nivel de los tanques de almacenamiento de la pulpa de concentrado (con tags de identificación de: D-1099 y D-2321), el flujo de filtrado y el flujo del concentrado.

Figura 2-2

Diagrama de flujo de la etapa de reducción ácida en la sección 40/10



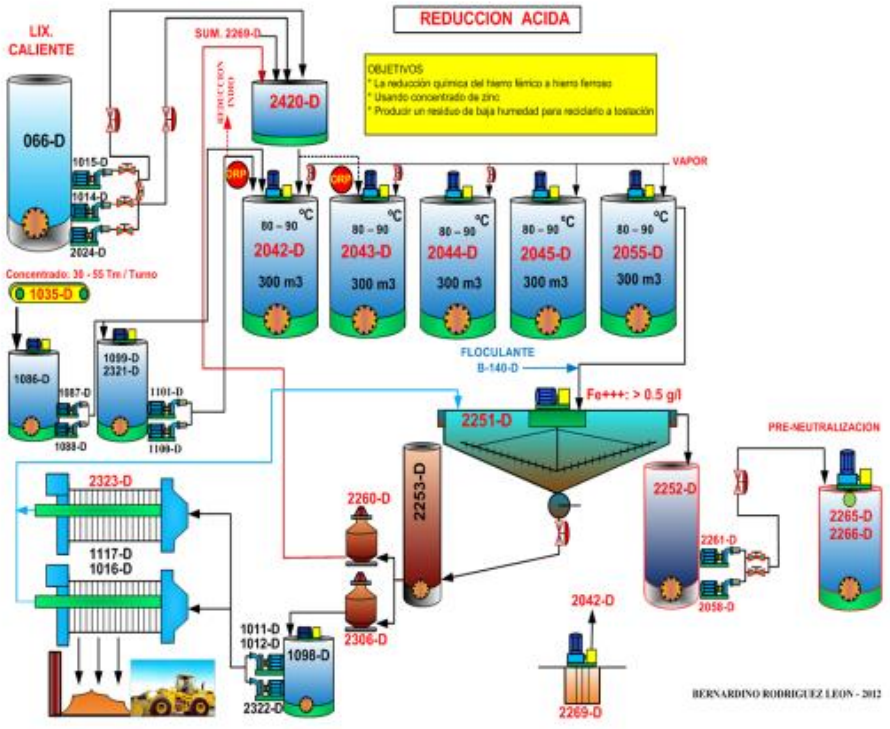
Nota. Este gráfico representa la sección 40/10 de la planta Nexa Cajamarquilla donde se encuentra la faja transportadora de concentrado y los filtros Andritz los cuales forman las tortas de Concentrado Pre Tratado. Adaptado de *Matriz de Competencias: Manual del Proceso Productivo* (p.32), por Gerencia de Procesos y PCP, 2016.

La Figura 2-3, representa el diagrama de flujo de la etapa de reducción ácida, esta etapa cuenta con 5 tanques reactores de los cuales usualmente 1 está fuera de operación; siendo así el tiempo de reacción de la pulpa de concentrado con el overflow de LAC1 de 4 horas aproximadamente, el tanque de reacción con tag de identificación D-2042 es el primero de la etapa y es al que se alimenta directamente la pulpa de concentrado. Es en estos reactores donde se reduce

el férrico a ferroso por acción del concentrado que actúa como agente reductor y se forma azufre elemental bajo la reacción química 3.4.

Figura 2-3

Diagrama de flujo de la etapa de reducción ácida en la sección 40



Nota. Adaptado de *Matriz de Competencias: Manual del Proceso Productivo* (p.31), por Gerencia de Procesos y PCP, 2016.

El underflow de la etapa de reducción ácida pasa por los filtros Andritz (con tags de identificación: D-2323, D-1016 y D-1117) para formar una torta denomina Concentrado Pre Tratado (CPT), el cual es alimentado a los hornos de tostación, por lo que debe contender baja humedad y bajo contenido de sales sulfatos.

Por otro lado, como señala el manual, el overflow de la reducción ácida es dirigido a la etapa de pre-neutra (PN), cuyo objetivo es reducir la acidez de la reducción ácida, para minimizar la necesidad de utilizar calcina en la siguiente etapa que es la etapa de pre-indio (PI), se ajusta el pH para minimizar el consumo de calcina y las pérdidas de zinc antes de la precipitación de hierro en la etapa de goethita. En esta última etapa, el hierro se separa y precipita como goethita, controlando la acidez mediante la adición de calcina. El producto final de goethita se filtra y se envía para su eliminación y almacenamiento.

2.2.3. Potencial de Oxidación-Reducción (ORP)

Banhidi, M. (2022) menciona que el ORP es una medida que permite monitorear reacciones químicas, cuantificar la actividad, así como determinar capacidad oxidante o reductora de las soluciones. Además, el ORP varía con el potencial estándar, concentración relativa del ion, temperatura y el número de electrones transferidas en las reacciones. Asimismo, para su medición en mV pueden emplearse tres tipos de electrodos:

- Metal en contacto con una solución de su propio ion, donde el electrodo metálico está en forma reducida y los iones en estado oxidado.
- Metal recubierto con un poco soluble sal de este metal en una solución de sal soluble con el mismo anión.
- Metal inerte en contacto con una solución que contiene tanto el estado reducido como el oxidado de un sistema de oxidación-reducción.

En ese sentido, afirma que los electrodos de platino y oro son los más utilizados para realizar mediciones de ORP.

Por otro lado, Yokogawa (2014) describe al ORP como la capacidad de transferencia de electrones de una solución, reflejando la complementariedad entre la oxidación y reducción. Además, cuando se realizan mediciones de ORP por encima de 0 mV la solución se considera ácida, mientras que por debajo de 0 mV es básica. Agregando a lo anterior, bajo condiciones oxidantes, la sonda de medición pierde electrones en la solución, lo que crea un potencial positivo; caso contrario a un ambiente reductor, los electrones son donados a la sonda, produciendo un potencial negativo. En esa misma línea, mientras mayor sea el poder reductor, el valor de ORP será más negativo, y mientras mayor sea el poder oxidante, se obtendrá un valor más positivo de ORP.

2.2.4. Análisis Granulométrico

La granulometría es la medición que describe la distribución de tamaños de partículas en una muestra de material sólido. Esta distribución se refiere a la proporción de partículas de diferentes tamaños que componen la muestra y puede tener un impacto significativo en las propiedades y el comportamiento de los materiales en diversos procesos y aplicaciones (Toirac, J., 2012).

El tamaño de partícula se refiere a la dimensión física que describe cuán grande o pequeña es una partícula en un material. Es una medida de las dimensiones reales de las partículas individuales o de un conjunto de partículas en una muestra y se expresa generalmente en unidades de longitud, como micrómetros o nanómetros (Errol, G. y David, J.,1990).

El diámetro nominal de partícula es una medida específica utilizada para representar el tamaño de estas partículas como si fueran esferas con igual comportamiento. Es decir, es una forma de cuantificar el tamaño de partícula de manera estandarizada, facilitando la comparación y comprensión de cómo influye el tamaño en las propiedades y comportamiento de las partículas en

diversas aplicaciones tal como detallada en la Tabla 2-1. Es importante comprender que el diámetro que se obtenga de la partícula irregular dependerá de la técnica de medición aplicada.

Tabla 2-1

Diámetros nominales

Símbolo	Nombre adecuado	Ecuación	Base
$\boldsymbol{d_0}$			Diámetro de una esfera
$\boldsymbol{d_A}$	Diámetro del tamiz		El ancho de la abertura cuadrada mínima por la que pasa la partícula
$\boldsymbol{d_s}$	Diámetro de superficie	$(S/\pi)^{1/2}$	El diámetro de una esfera que tiene la misma área de superficie que la partícula (~$1.28d_A$)
$\boldsymbol{d_V}$	Diámetro de volumen	$(6V/\pi)^{1/3}$	El diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula (~$1.10d_A$)

Nota. La elección del tipo de diámetro nominal depende de la aplicación específica y del aspecto de un objeto o del sistema que se esté midiendo o analizando. Cada tipo de diámetro se utiliza para describir características diferentes, como tamaño de partículas, área superficial, etc. Adaptado de *Introducción al Procesamiento de Minerales* (p.51), por G. Errol y J David, J.,1990, Limusa, S.A.

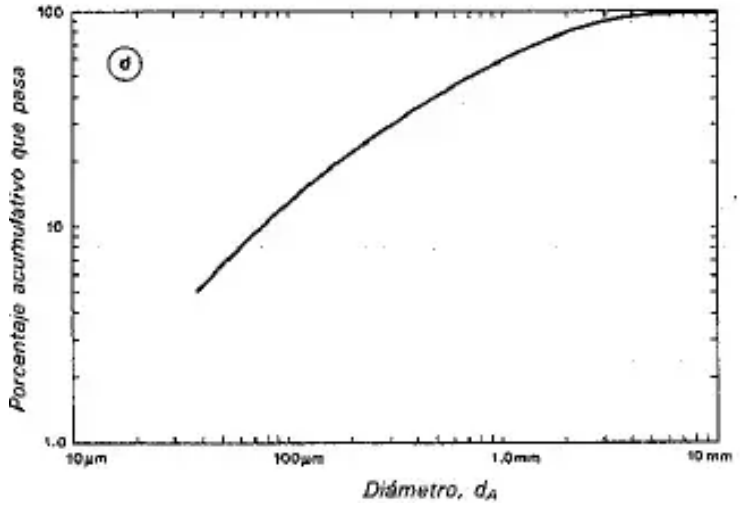
2.2.4.1. Distribución de Tamaño de Partícula. De acuerdo a lo mencionado por Cardenas y Huaman (2022), la distribución de tamaño analiza cómo las partículas varían en tamaño en una muestra, es una representación que describe cómo se distribuyen las partículas en términos de su tamaño. Una métrica fundamental en la caracterización del tamaño de partículas que permite comprender la distribución de tamaño en una muestra dada es el P80 el cual refiere al diámetro de partícula al cual el 80 por ciento de las partículas pasan a través de una malla o se retienen por debajo de ese tamaño.

Según nos indica Errol y David (1990), los datos de distribución de tamaños se suelen presentar en tablas, pero las representaciones gráficas son más efectivas. Para describir estas distribuciones, se utilizan ecuaciones matemáticas, en su mayoría basadas en relaciones empíricas, que simplifican la descripción de los datos. Dos sistemas comunes se utilizan: uno que muestra la cantidad en cada tamaño (ya sea en valores absolutos, fracciones o porcentajes), y otro que representa la cantidad acumulada (fracción o porcentaje) por encima o por debajo de un tamaño específico.

2.2.4.1.1. Distribución de Gaudin – Schumann. En ocasiones, es necesario hacer un análisis de tamaños para averiguar cuánto material hay por encima o por debajo de un tamaño específico. Por eso, es más común representar los datos como la cantidad acumulativa de material en función del tamaño en una gráfica con escala logarítmica como se representa en la Figura 2-4.

Figura 2-4

Gráfica acumulativa en escala logarítmica (Gaudin-Schuhmann)



Nota. Adaptado de *Introducción al Procesamiento de Minerales* (p.48), por G. Errol y J David, J.,1990, Limusa, S.A.

Es así que, los autores ya mencionados, indican que este gráfico perteneciente a Gaudin-Schuhmann representa el tamaño de las partículas (denotado como "d_n") en relación con el porcentaje acumulado por encima o por debajo de ese tamaño. A pesar de que este gráfico ofrece una distribución satisfactoria de los datos en la región de tamaños más pequeños, puede ser menos apropiados para representar tamaños más grandes. A veces, los datos de reducción de tamaño pueden revelar una relación lineal en una parte considerable de su rango, especialmente en los tamaños más pequeños.

El modelo de Gaudin-Schuhmann compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante con el tamaño de partícula o abertura de malla de la serie empleada (Frare et al., 2000).

Para nuestro caso de estudio, utilizaremos la fórmula de distribución de tamaño de Gaudin-Schuhmann la cual está representada por la Ecuación 2-1 en donde F representa el porcentaje acumulado pasante, d representa la abertura de malla y $n\ y\ b$ son constantes a determinar

$$F = 100\ (\frac{d}{b})^n \quad (2\text{-}1)$$

Aplicando logaritmo y las propiedades logarítmicas a la Ecuación 2-1 se obtendrá la Ecuación 2-2 la cual es la expresión reordenada de Gaudin-Schuhmann manteniendo la forma de la ecuación general de la recta;

$$\log(F) = n\ \log(d) + \log(\frac{100}{b^n}) \quad (2\text{-}2)$$

3.2.4.2. Ejemplo de Estimación del P80 para una Calidad de Concentrado. Siguiendo el método de Gaudin-Schuhmann, se construye la Tabla 2-2 calculando el porcentaje retenido, el porcentaje acumulado retenido y el porcentaje acumulado pasante.

Tabla 2-2

Ejemplo de estimación del P80 para una calidad de concentrado

Abertura (µm)	**Peso (g)**	**%Retenido**	**%Acumulado Retenido**	**%Acumulado pasante**	**Log abertura**	**Log (%acumulado pasante)**
150	18.13	18%	18%	81.93	2.176	1.913
75	25.25	25%	43%	56.75	1.875	1.754
45	14.83	15%	58%	41.97	1.653	1.623
0	42.1	42%	100%	0.00		
	100.31	100%				

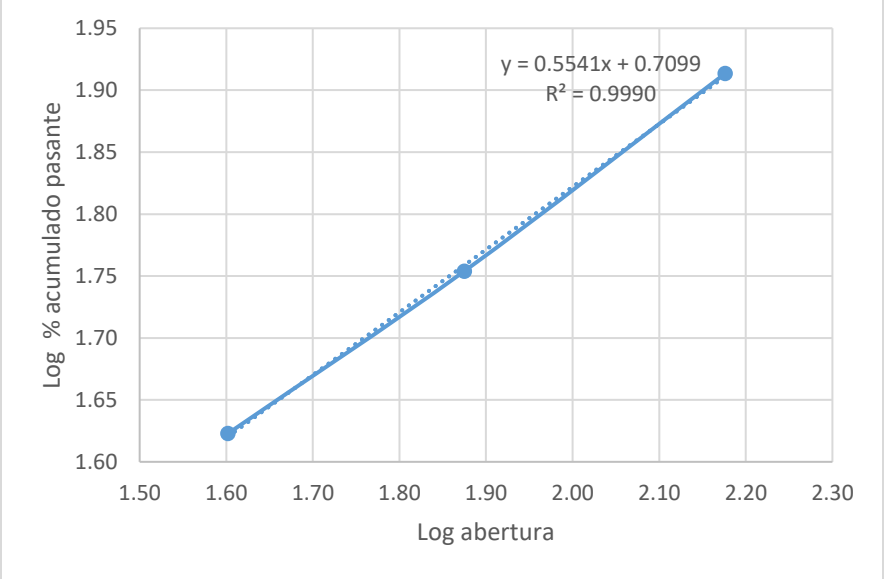
Nota. Elaboración propia.

El porcentaje retenido se calcula dividiendo el peso retenido en la malla sobre el peso total, el porcentaje acumulado retenido se calcula sumando los porcentajes retenidos en cada tamiz a medida que se avanza desde los tamices más gruesos hacia los más finos y el porcentaje acumulado pasante se calcula restando 100% menos el porcentaje acumulado retenido en cada tamiz. Luego, se calcula el logaritmo a la abertura de la malla y también se calcula el logaritmo al porcentaje acumulado pasante.

Seguidamente, de la Figura 2-5 se obtiene la Ecuación 2-3.

Figura 2-5

Logaritmo de apertura de la malla vs logaritmo de porcentaje de acumulado pasante



Nota. Elaboración propia

$$y = 0.5541x + 07099 \quad (2\text{-}3)$$

Comparando la Ecuación 2-2 y Ecuación 2-3, se concluye que la pendiente de la recta encontrada 0.5541 es igual al valor de "n" de la expresión de Gaudin-Schuhmann; asimismo, la

constante de la recta encontrada 0.7099 es igual a $\log(\frac{100}{b^n})$ de la expresión de Gaudin-Schuhmann. Por lo tanto, reemplazando el valor de"n" y aplicando propiedades logarítmicas, se procede a encontrar el valor de "b" que es igual 213.01

Finalmente, reemplazando los valores encontrados en la Ecuación 2-3 para un pasante 80, aplicando logaritmo y propiedades logarítmicas, se obtiene la Ecuación 2-4 y con él, el valor de "d" que representa la abertura de la malla y es igual 142.39.

$$d = 10^{\frac{\log(\frac{80}{100}) + 0.5541\ x\ \log(213.01)}{0.5541}} \quad (2\text{-}4)$$

La determinación de características de las partículas se da a través de métodos empleados para medir las características de las partículas, para obtener resultados precisos en el análisis, es crucial un muestreo controlado y una adecuada preparación de las muestras. Esto es especialmente importante en partículas finas, donde las fuerzas entre partículas pueden causar aglomeración, lo que podría llevar a resultados incorrectos.

Wills y Finch (2016) describen los principales métodos de análisis de tamaño donde cada método tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de precisión y confiabilidad. En el presente caso de estudio, la determinación de característica de la partícula se realizó a través del fraccionamiento de una muestra de partículas (tamizado).

2.2.4.3. Análisis por tamizado. Este método implica pasar una muestra de partículas a través de una serie de tamices con aberturas de tamaño graduado. Las partículas más grandes se retienen en los tamices de abertura más pequeña, mientras que las partículas más pequeñas pasan a través de los tamices de abertura más grande.

El tamaño de las partículas se determina midiendo el peso de las partículas retenidas en cada tamiz. Este método es simple y económico, pero puede ser menos preciso que otros métodos y no es adecuado para partículas muy finas.

Stanley y Lin-Sien (2001) nos indican las ventajas y detalles de realizar un análisis vía húmeda y vía seca. Debido a diferentes aspectos, propiedades del concentrado de zinc y objetivo de análisis, se realizó un análisis por tamizado vía húmeda.

A continuación, en la Tabla 2-3 se muestra un cuadro comparativo del análisis por tamizado en vía húmeda y por vía seca.

Tabla 2-3

Comparación entre granulometría vía húmeda y vía seca

Aspecto	Tamizado en Húmedo	Tamizado en Seco
Medio de Análisis	Medio líquido, generalmente agua o un líquido para dispersar partículas.	Se realiza en condiciones secas, sin la presencia de líquido.
Dispersión de Partículas	Es uniforme en medio líquido, lo que facilita la separación y medición de partículas finas.	Partículas tienden a aglutinarse o entre sí, lo que puede dificultar la separación y medición precisas.
Generación de Polvo	La generación de polvo es mínima o nula.	Puede generar polvo, impactando el ambiente.
Electrostaticidad	La presencia de líquido reduce el efecto de la electrostaticidad en las partículas.	Las partículas secas pueden volverse electrostáticas, generando adhesión a las superficies y afecten la medición.
Precisión y Reproducibilidad	Proporciona mediciones más precisas y reproducibles debido a la dispersión uniforme de las partículas.	La precisión puede verse afectada por la formación de aglomerados de partículas en el estado seco.

Nota. Adaptado de *Particle Size Characterization.* (p.30), por J. Stanley y H. Lin-Sien, 2001, National Institute of Standards and Technology.

El tamaño de las partículas y su área superficial específica están íntimamente relacionados y desempeñan un papel esencial en procesos químicos y físicos, como la lixiviación. Cuando las partículas se reducen de tamaño, su área superficial por unidad de masa o volumen aumenta significativamente. Esto se debe a que dividir una partícula grande en muchas partículas más pequeñas crea más bordes, esquinas y superficies expuestas (Crundwel y Verbaan, 1987).

Para comprender mejor esta relación, Rojas y Nemias (2014) nos mencionan que, en el contexto de la lixiviación, la velocidad de disolución está vinculada a la superficie de contacto entre sólido y líquido. Partículas más pequeñas tienen más superficie expuesta, lo que acelera la reacción. Además, en partículas pequeñas, los solutos se desplazan más rápido desde el interior al exterior, lo que mejora la eficiencia de disolución.

2.2.5. Análisis de Regresión

Es una metodología estadística que emplea la relación entre dos o más variables cuantitativas con el objetivo de predecir una variable a partir de otra u otras mediante el empleo de modelos estadísticos (Kutner et al., 2005).

En ese sentido, un análisis de regresión permite encontrar la mejor relación entre dichas variables y a la vez cuantifica la fuerza de esa relación (Kothari, 2004).

2.2.5.1. Regresión Lineal. Como mencionan Walpole et al. (2012), este tipo de análisis se lleva a cabo cuando solo se presenta una variable regresora y la relación entre las variables a estudiar es lineal. Para un estudio entre las variables X e Y, el modelo puede plantearse como se muestra en la Ecuación 2-5:

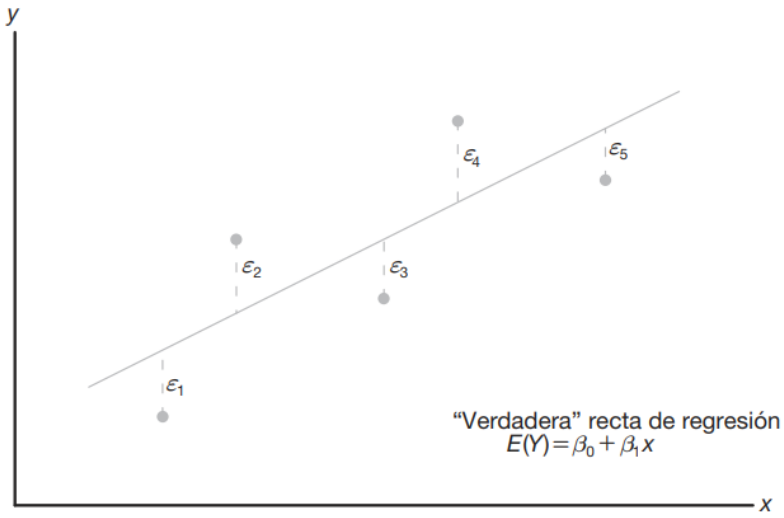
$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \qquad (2\text{-}5)$$

En dicha expresión se representa a Y_i como valor de la variable de respuesta para el ensayo "i", β_0 y β_1 son los parámetros, X_i es el valor de la variable predictora para el ensayo "i" y ε_i es el error aleatorio con varianza constante y media $E\{\varepsilon_i\} = 0$. Debido a que $E\{\varepsilon_i\} = 0$, conlleva a que para una X específica, los valores que se obtienen de Y sean distribuidos alrededor de la denominada recta verdadera o recta de regresión de la población cuya expresión se puede observar en la Ecuación 2-6 y se puede representar gráficamente en la Figura 2-6:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \qquad (2\text{-}6)$$

Figura 2-6

Datos (x,y) hipotéticos alrededor de la verdadera recta de regresión para un número de observaciones igual a 5



Nota. Reproducido de *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (p. 392), por Walpole, R. et al., 2012, Pearson.

2.2.5.1.1. Recta de regresión ajustada. La estimación de los coeficientes de regresión β_0 y β_1 es un aspecto fundamental en un análisis de regresión. Si se denota a los estimados como b_0 para β_0 y b_1 para β_1. La denominada recta de regresión ajustada o estimada se representa mediante la Ecuación 2-7:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \qquad (2\text{-}7)$$

El método de mínimos cuadrados permite determinar los estimados b_0 y b_1 buscando que la suma de los cuadrados de los residuales (SCE) sea mínima, siendo un residual un error en el ajuste, representado por la Ecuación 2-8:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2\text{-}8)$$

La SCE permite determinar los valores de los coeficientes de regresión mediante la Ecuación 2.9:

$$SCE = \sum_{i=1}^{n} e_i{}^2 = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n}(y_i - b_0 - b_1 x)^2 \quad (2\text{-}9)$$

Los estimados b_0 y b_1 se determinan al diferenciar la Ecuación 5 respecto a estos estimados, igualando a cero las derivadas parciales y resolviendo las ecuaciones. Estas expresiones resultan en la Ecuación 2-10 y Ecuación 2-11:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (2\text{-}10)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (2\text{-}11)$$

2.2.5.1.2. Coeficiente de determinación. Este coeficiente permite medir la proporción de la variabilidad, la cual es explicada por el modelo ajustado y se define mediante la Ecuación 2-12:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SCE}}{\text{STCC}} \quad (2\text{-}12)$$

En la Ecuación 2-12, la suma total de los cuadrados corregida viene representada por $\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2$. Por lo tanto, cuando R^2 es igual a 1, el ajuste obtenido es perfecto y todos los residuales son cero, es decir, mientras dicho valor esté más cercano a 1, el grado de asociación lineal entre X e Y será mayor.

2.2.6. Covarianza de Dos Variables Aleatorias y Correlación

De acuerdo a Wackerly et al. (2008), la covarianza es una medida lineal de dos variables expresada mediante la Ecuación 2-13:

$$Cov\,(Y_1, Y_2) = E\,[(Y_1, -\mu_1)(Y_2, -\mu_2)] \quad (2\text{-}13)$$

En la Ecuación 2-13, Y_1 y Y_2 son las variables aleatorias y μ_1 y μ_2 son las medias de dichas variables. Un mayor valor absoluto de la covarianza se traduce en una mayor dependencia lineal entre dichas variables. Asimismo, cuando el valor obtenido es positivo, implica una relación directa entre estas variables; mientras que, si el valor de covarianza resultante es negativo, existe una relación inversa entre las dos variables. Sin embargo, al ser el valor de covarianza dependiente de la escala de medición, se opta por emplear el coeficiente de correlación definido mediante la Ecuación 2-14:

$$\rho = \frac{Cov\,(Y_1,Y_2)}{\sigma_1\sigma_2} \tag{2-14}$$

En ese sentido, se menciona que el rango del coeficiente de correlación es de $-1 \leq \rho \leq 1$ y el signo de este posee el mismo significado que el de covarianza.

2.2.6.1. Coeficiente de Correlación Producto-Momento de Pearson. Walpole et al. (2012) mencionan que el coeficiente de Pearson permite estimar la máxima probabilidad de ρ y y viene representado mediante la Ecuación 2-15:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{2-15}$$

2.2.7. Prueba de Hipótesis

Cuando se realiza una prueba estadística, se requiere plantear una hipótesis de investigación. En caso se apoye esta hipótesis se denomina hipótesis alternativa (H_a), la cual se obtiene demostrando que lo contrario de esta o hipótesis nula (H_0) es falsa. Generalmente, con la información que contiene la muestra, se requiere comprobar la hipótesis alternativa (Wackerly et al., 2008).

Tanto la hipótesis nula como alternativa se encuentran dentro de los elementos de una prueba estadística. Así también se tiene al estadístico de prueba y a la región de rechazo, siendo el primero definido por Wackerly et al. (2008) como "una función de las mediciones muestrales en las que la decisión estadística estará basada" (p.490). Asimismo, menciona que la región de rechazo "específica los valores del estadístico de prueba para el cual la hipótesis nula ha de ser rechazada a favor de la hipótesis alternativa" (p.490). Por lo tanto, si el valor calculado del estadístico de prueba cayera en la región de rechazo, esto quiere decir que se rechazaría H_0 y se aceptaría H_a.

Por otro lado, cuando se toma una decisión respecto al resultado, pueden cometerse dos tipos de errores (Kothari, 2004), los cuales se muestran en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4

Errores en pruebas de hipótesis

Hipótesis nula	**Aceptar H_0**	**Rechazar H_0**
H_0 (verdadera)	Decisión correcta	Error Tipo I
H_0 (falsa)	Error Tipo II	Decisión correcta

Nota. Adaptado de *Research Methodology: Methods and Techniques* (p. 187), por Kothari, C., 2004, New Age International Publishers.

Respecto a los tipos de errores, menciona:

- Error tipo I: cuando H_0 es rechazada siendo verdadera. Se denota como α a la probabilidad que ocurra un error de este tipo.

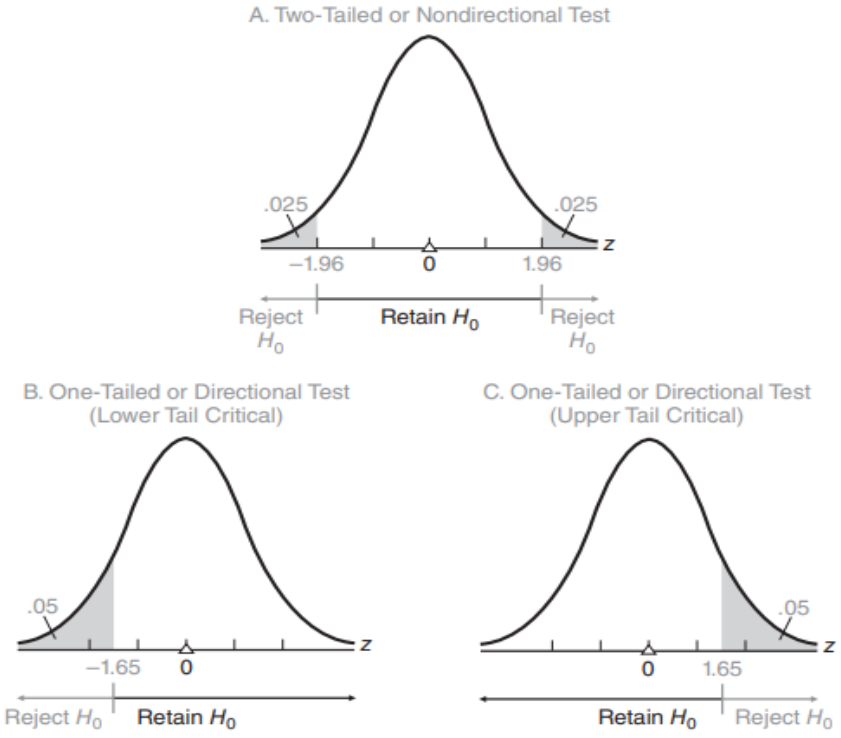
- Erro tipo II: cuando H_0 es aceptada siendo H_a verdadera. Se nota como β a la probabilidad que ocurra un error de este tipo.

Asimismo, indica que α también es denominado el nivel de significancia de la prueba y según generalmente es del 5%.

Witte, R. y Witte, J. (2017) hacen referencia a los tres tipos de pruebas estadísticas existentes, las cuales se presentan en la Figura 2-7:

Figura 2-7

Tres diferentes tipos de pruebas estadísticas (α=0.05)



Nota. Reproducido de *Statistics* (p. 200), por Witte, R. y Witte, J., 2017, Wiley.

Asimismo, describen a las hipótesis alternativas de dichas pruebas en la Tabla 2-5:

Tabla 2-5

Hipótesis alternativas de las pruebas estadísticas

Prueba de dos colas	**Prueba de una cola (cola inferior crítica)**	**Prueba de una cola (cola superior crítica)**
$H_a: \mu = A$	$H_a: \mu \leq A$	$H_a: \mu > A$

Nota. Adaptado de *Statistics* (pp. 200-201), por Witte, R. y Witte, J., 2017, Wiley.

2.2.7.1. Prueba de Hipótesis con Coeficiente de Correlación. Kothari (2004) hace referencia al empleo de la prueba t, siendo calculada esta variable mediante la Ecuación 2-16:

$$t = r\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \tag{2-16}$$

Como se vio anteriormente, r hace referencia al coeficiente de correlación de Pearson, mientras que n-2 a los grados de libertad. Describe, además, que una vez determinado el estadístico, su valor es comparado al valor crítico (ubicado en tablas de distribución a un determinado nivel de significancia y grados de libertad). Si el valor calculado es menor que el obtenido mediante tablas, quiere decir que se acepta H_0 a dicho nivel de significancia. En otras palabras, no existe relación estadísticamente significativa entre esas dos variables.

Por otro lado, es posible presentar los resultados de una prueba estadística empleando el nivel de significancia o α (probabilidad de un error tipo I). Wackerly et al. (2008) menciona que esto se puede realizar tomando en cuenta que "el valor ρ es el nivel más pequeño de significancia α para el cual la información observada indica que la hipótesis nula debe ser rechazada" (p. 513). Esto quiere decir, que a medida que el valor de ρ sea más pequeño, existe mayor evidencia de que la hipótesis nula debe ser rechazada.

2.3. Marco Conceptual

- Ácido sulfúrico: Compuesto químico altamente corrosivo y ácido, utilizado en la hidrometalurgia como agente lixiviante para la recuperación de metales y el procesamiento de minerales. Así mismo, es un subproducto de la planta de ácido destinado para venta.
- Agente reductor: Es una sustancia química que se utiliza en procesos de reducción química para disminuir el estado de oxidación de otra sustancia.
- Abertura de malla: Tamaño de las aberturas en un tamiz que se utiliza para clasificar partículas de acuerdo con su tamaño en operaciones de procesamiento de minerales.
- Análisis de tamiz: Procedimiento utilizado para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra, utilizando tamices de diferentes tamaños de abertura.
- Cinética: Rama de la química que se ocupa de la velocidad de las reacciones químicas y cómo cambian con el tiempo.
- Complejos: Compuestos químicos en los que una o más moléculas se unen alrededor de un ion central, formando una estructura más grande y coordinada.
- Concentrados: Materia prima para la producción del zinc refinado y se refiere a los concentrados sulfurosos de zinc que compramos a las minas/concentradoras.
- Concentración: Cantidad de una sustancia disuelta en una solución, generalmente expresada en términos de moles por litro o porcentaje en peso.
- Correlación: Relación o asociación estadística entre dos o más variables que tienden a cambiar juntas de manera predecible.
- Disolución: Proceso de mezclar un sólido, líquido o gas en un líquido para formar una solución homogénea.

- Electrólisis: Proceso que permite la separación de metales desde soluciones acuosas que lo contienen con el uso de una corriente eléctrica continua
- Esfalerita: Mineral del sulfuro de zinc (ZnS), siendo una fuente importante de zinc metálico.
- Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS): Técnica analítica utilizada para determinar la concentración de elementos metálicos en una muestra líquida, basada en la absorción de luz por átomos en estado gaseoso.
- Fusión: Proceso físico con cambio de estado de la materia, desde el estado sólido al
- estado líquido por la acción del calor. Cuando se calienta un sólido, se transfiere energía a los átomos que vibran con más rapidez a medida que gana energía convirtiéndose en líquido.
- Goethita: Mineral perteneciente al grupo de los hidróxidos de hierro, que se forma por la oxidación de minerales que contienen hierro en su composición.
- Hematita: Óxido de hierro y se considera una de las menas de hierro más importante ya que contiene un 70% de este metal.
- Hidrometalurgia: Compuesto químico altamente corrosivo y ácido, utilizado en la hidrometalurgia como agente lixiviante para la recuperación de metales y el procesamiento de minerales. Así mismo, es un subproducto de la planta de ácido destinado para venta.
- Hidrólisis: Reacción química en la que una sustancia reacciona con agua para formar otros compuestos.
- Impurezas: Sustancias no deseadas o contaminantes presentes en una muestra o material, que deben eliminarse o reducirse en procesos de refinamiento.
- Ion Férrico: Ion con un estado de oxidación de +3 de hierro, Fe^{3+}.

- Ion Ferroso: Ion con un estado de oxidación de +2 de hierro, Fe^{2+}.
- Jarosita: Mineral que contiene hierro y aluminio que a veces se forma como un precipitado en procesos de lixiviación.
- Lixiviación: Proceso de extracción de componentes valiosos de un sólido, generalmente utilizando una solución líquida para disolver los componentes deseados.
- Materias primas: Materiales iniciales que se utilizan en un proceso industrial antes de ser transformados en productos finales.
- Moldeo: Consiste en vaciar el metal fundido dentro de un recipiente que tiene una cavidad interior con la forma que se espera lograr luego de solidificar al metal al dejarlo enfriar convenientemente.
- Neutralización: Proceso de ajustar el pH de una solución mediante la adición de sustancias ácidas o alcalinas para alcanzar un pH neutral.
- Oxidación: La oxidación es una reacción electroquímica donde un compuesto, elemento o ion cede electrones y por lo tanto aumenta su estado de valencia u oxidación.
- Overflow: Corriente de salida de una operación de procesamiento que generalmente contiene materiales más finos o líquidos.
- P80: Indicador de granulometría que indica una fragmentación gruesa o fina. Es obtenido a partir de la curva de distribución granulométrica, y representa al tamaño de partícula en el que el 80% de todos los fragmentos son menores a este tamaño.
- Precipitados: Sólidos que se forman cuando sustancias disueltas en una solución se vuelven insolubles y se separan de la solución.
- Purga: Proceso de eliminación de impurezas o materiales no deseados de un sistema o proceso.

- Purificación: Proceso de eliminación de impurezas o contaminantes de una muestra o sustancia para obtener un producto más puro. En el caso de la refinería Nexa Cajamarquilla, las soluciones neutras de sulfato de zinc que se producen en la etapa de lixiviación necesitan purificarse principalmente por cobre, cadmio y cobalto (níquel).
- Reducción: Es el proceso electroquímico por el cual un ion reduce su estado de valencia
- ganando electrones. Este proceso es contrario al de una oxidación.
- Refinería: Instalación industrial donde se procesan y refinan materiales crudos para obtener productos finales de mayor calidad.
- Subproductos: Productos secundarios que se generan en un proceso principal.
- Sulfuro: Compuesto químico que contiene azufre en un estado de oxidación negativo, como el sulfuro de zinc.
- Superficie específica: Medida de la superficie por unidad de masa o volumen de una sustancia, importante en procesos de adsorción y reacciones químicas.
- Soluciones: Mezclas homogéneas de dos o más sustancias en la que una sustancia se disuelve en otra.
- Tamiz: Dispositivo utilizado para separar partículas.

3. Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis General

La evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla permitirá determinar qué calidades de concentrados de zinc son las óptimas a emplear en la etapa de reducción ácida.

3.2. Hipótesis Específicas

- El ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación resultará negativo.
- El análisis por tamizado y la ecuación Gaudin – Schumann permitirán determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.
- El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.
- El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.

3.3. Identificación de las Variables

3.3.1. Variables Independientes

- Calidad de concentrado de zinc
- Grado de dependencia lineal

3.3.2. Variables Dependientes

- ΔORP
- Eficiencia de reducción del ion férrico
- P80 de concentrado de zinc

3.4. Operacionalización de las Variables

Tabla 3-1

Operacionalización de las variables

Hipótesis general	Tipo de variable	Variable	Indicadores
La evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla permitirá determinar qué calidades de concentrados de zinc son las óptimas a emplear en la etapa de reducción ácida.	INDEPENDIENTE	- Calidad de concentrado de zinc	-Mina proveedora -Proceso productivo
	DEPENDIENTE	- Eficiencia de reducción	-Concentración de ion férrico inicial (g/L) -Concentración de ion férrico final (g/L)
Hipótesis específica	**Tipo de variable**	**Variable**	**Indicadores**
El ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación resultará negativo.	INDEPENDIENTE	- Calidad de concentrado de zinc	-Mina proveedora -Proceso productivo
	DEPENDIENTE	- ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida	-ORP incial (mV) -ORP final (mV)
El análisis por tamizado y la ecuación Gaudin – Schumann permitirán determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.	INDEPENDIENTE	- Calidad de concentrado de zinc	-Mina proveedora -Proceso productivo
	DEPENDIENTE	- P80 de muestra de concentrado de zinc	-Distribución granulométrica
El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.	INDEPENDIENTE	- Grado de dependencia lineal	-Coeficiente de Pearson -Nivel de significancia
	DEPENDIENTE	- P80 del concentrado - Eficiencia de reducción del ion férrico del concentrado	-Distribución granulométrica -Concentración de ion férrico inicial (g/L) -Concentración de ion férrico final (g/L)
El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.	INDEPENDIENTE	- Grado de dependencia lineal	-Coeficiente de Pearson -Nivel de significancia
	DEPENDIENTE	- ΔORP de la reacción generada - Eficiencia de reducción del ion férrico del concentrado	-ORP inicial (mV) -ORP final (mV) -Concentración de ion férrico inicial (g/L) -Concentración de ion férrico final (g/L)

Nota. Elaboración propia

3.5. Matriz de Consistencia

Tabla 3-2

Matriz de consistencia

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables
¿Qué determina la evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de los concentrados de zinc en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla?	- Evaluar la eficiencia de reducción del ion férrico de los concentrados de zinc que se emplean en la etapa de reducción ácida de la refinería Nexa Resources Cajamarquilla.	- La evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla permitirá determinar qué calidades de concentrados de zinc son las óptimas a emplear en la etapa de reducción ácida**.**	**Variables Independientes** - Calidad de concentrado de zinc - Grado de dependencia lineal **Variables Dependientes** - ΔORP - Eficiencia de reducción del ion férrico - P80 de concentrado de zinc
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**	
- ¿Cuál es el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación? - ¿Cuál es el P80 de los concentrados de zinc empleados en la evaluación? - ¿Existe dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación? - ¿Existe dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación?	- Determinar el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida de los concentrados de zinc empleados en la evaluación. - Determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleados en la evaluación. - Determinar la existencia de dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación. - Determinar la existencia de dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.	- El ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación resultará negativo. - El análisis por tamizado y la ecuación Gaudin – Schumann permitirán determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación. - El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el P80 y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación. - El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar el grado de dependencia lineal entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.	

Nota. Elaboración propia.

4. Metodología

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

Esta investigación empleó un diseño experimental verdadero en el cual la toma de la muestra se realizó in situ. Además, se requirió que la caracterización de las muestras sea realizada por un laboratorio.

4.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis corresponde a la refinería Nexa Cajamarquilla.

4.3. Población de Estudio

Solución clara y lodos contenidos en espesador de etapa de lixiviación ácida caliente y concentrados de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla en el 2023.

4.4. Tamaño de Muestra

500 L de overflow (solución clara) del espesador de la etapa de lixiviación ácida caliente y 5 kg de 9 calidades de concentrados de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla en el 2023.

4.5. Selección de Muestra

4.5.1. Consideraciones para la Elección de Concentrados de Zinc

Las consideraciones para la elección de concentrados como agente reductor en la etapa de reducción ácida fueron definidas de la siguiente manera:

Se seleccionaron concentrados con las mayores toneladas de recepción anual como se detalla en la Tabla 4-1, esto con el propósito de asegurar una disponibilidad constante y suficiente del concentrado. Esta elección obedece a la necesidad de evitar retrasos en la recepción de los concentrados, esto significa que se evitó la selección de concentrados que se cambian con

frecuencia, ya que la continuidad en la fuente de los mismos es crucial para obtener resultados consistentes y confiables.

Tabla 4-1

Recepción de concentrados en toneladas húmedas en los años 2022 y 2023

	Toneladas recepcionadas (tmh)		
Calidad	**2022**	**2023**	**Total**
1	119,292	73,153	192,446
2	87,816	60,193	148,008
3	58,465	55,272	113,737
4	55,754	19,887	75,640
5	43,597	46,402	89,998
6	39,886	35,987	75,873
7	27,583	26,127	53,710
8	6,916	33,968	40,883
9	4,990	8,080	13,070

Nota. Adaptado de *Recepción de concentrados en toneladas húmedas en los años 2022 y 2023*, de PCP y Procesos, 2022-2023, Balance Metalúrgico.

Otro factor adicional que se consideró fue la ley de zinc en los concentrados, ya que concentrados con leyes de zinc altas son destinados solo al proceso de tostación para ser transformados en óxidos de zinc denominado calcina. En ese sentido, en la Tabla 4-2 presenta las leyes de zinc de los concentrados empleados en la presente investigación.

Tabla 4-2

Ley promedio de Zn (%) en concentrados de los años, 2022 y 2023

Ley promedio de Zn (%)		
Calidad	**2022**	**2023**
1	56.32	56.86
2	48.85	49.64
3	52.79	52.77
4	50.39	51.57
5	55.91	56.14
6	52.21	51.47
7	51.75	52.49
8	50.09	50.15
9	45.44	46.11

Nota. Adaptado de *Recepción de concentrados en toneladas húmedas en los años 2022 y 2023,* de PCP y Procesos, 2022-2023, Balance Metalúrgico.

4.6. Técnicas de recolección de datos

Se empleó la experimentación como técnica de recolección de datos.

4.7. Procedimiento experimental

4.7.1. Localización del punto de muestreo

Se realizó en el punto de muestreo del operador del espesador, ubicado en el techo de este, de la etapa de Lixiviación Ácida caliente, con tag de identificación D063, de la refinería Nexa Cajamarquilla, ubicada en el km 9.5 de la Carretera Central, desvío a Huachipa.

4.7.2. Toma de muestra

Se colocó una manguera corrugada en el punto de muestro, ubicado en el techo del espesador D063 a 3.5 m del nivel del suelo (altura del espesador). Asimismo, se ubicó un punto de aire y mediante el empleo de una bomba neumática se transportó el fluido hasta un contenedor IBC con capacidad de 1000 L, ubicado a nivel del suelo. Posterior a ello, se transportó con montacargas el IBC hacia la planta piloto de la refinería donde se realizaron las pruebas.

Por otro lado, los concentrados que se emplearon como agente reductor de la reacción fueron proporcionados por el área de Laboratorio a través de un composito de notas de Romaneo, la cual equivale al muestreo de 10-20 camiones de determinada calidad de concentrado.

4.7.3. Caracterización de la muestra

Una muestra representativa del overflow fue enviada al laboratorio químico de la refinería para la caracterización del contenido de hierro total (g/L) y de ion Fe^{2+} (g/L); mientras que para los concentrados de zinc se realizó la caracterización granulométrica con mallas de 45 µm, 75 µm y 150 µm.

4.7.4. Procedimiento

4.7.4.1. Simulación de etapa de reducción ácida

- Se montó el equipo con 3 L de muestra de overflow y se realizó agitación al sistema.
- Se fijó la temperatura en la plancha calentadora a 83 °C, manteniendo la agitación constante.
- Mientras la muestra estuvo calentando, se pesaron 120 g de muestra de concentrado de zinc.
- Cuando se llegó a la temperatura fijada, se midió el ORP inicial de la solución y se dosificó toda la muestra de concentrado de zinc al sistema.
- Se midió el ORP cada 15 minutos durante 4 h, calibrando el electrodo cada vez que se requirió.
- Se realizaron 3 corridas para cada calidad de concentrado.
- Se enviaron las muestras al laboratorio para análisis de hierro total (g/L) y de ion Fe^{2+} (g/L).
- Se recopilaron los resultados obtenidos.

4.7.4.2. Caracterización granulométrica de concentrados de zinc

- Se homogenizó la muestra y se pesaron 100 g de concentrado de zinc.
- Se empleó la técnica de tamizado vía húmeda.
- Se hizo pasar la muestra por mallas de 150 µm, 75 µm y 45 µm.
- Las muestras retenidas se filtraron, se colocaron a secar a un horno eléctrico Binder y fueron pesadas.
- Se realizaron 3 corridas para cada calidad de concentrado.
- Se recopilaron los resultados obtenidos.

5. Resultados y discusión

5.1. Resultados

De las 3 corridas realizadas para cada calidad de concentrado, se presenta el promedio obtenido para la eficiencia de reducción, P80 y ΔORP en la Tabla 5-1. Asimismo, se presentan los análisis de regresión realizados mediante el software estadístico Minitab entre la eficiencia de reducción y P80 (Figura 5-2) y entre la eficiencia de reducción y ΔORP (Figura 5-3).

Tabla 5-1

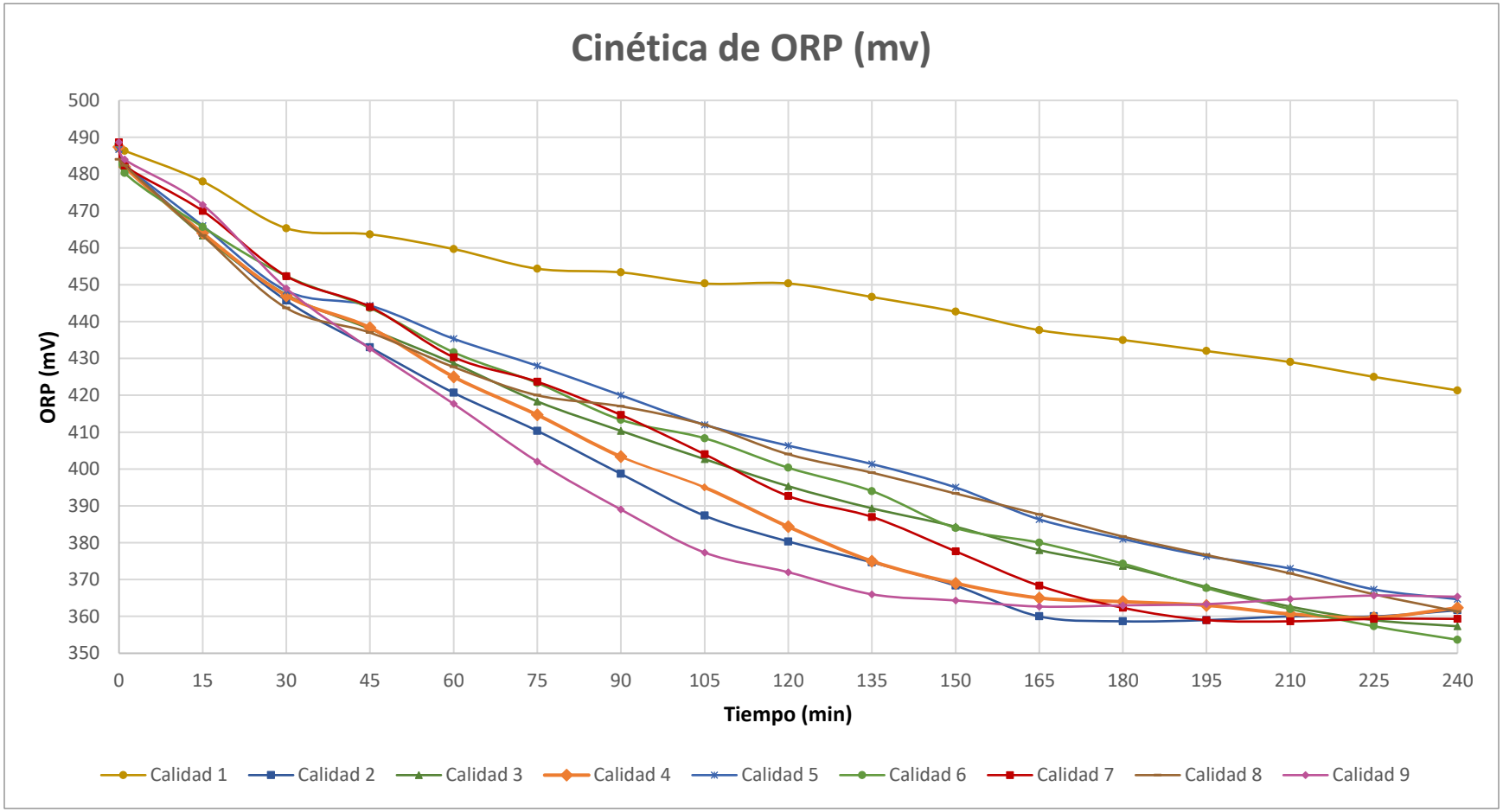
Resultados experimentales según calidades

Calidad	Eficiencia de reducción (%)	P80 (µm)	ΔORP (mV)
1	45.0	143	-66
2	79.0	116	-126
3	71.8	100	-130
4	79.3	105	-125
5	68.7	118	-122
6	85.1	80	-135
7	76.3	103	-129
8	84.5	88	-123
9	76.3	106	-127

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-1

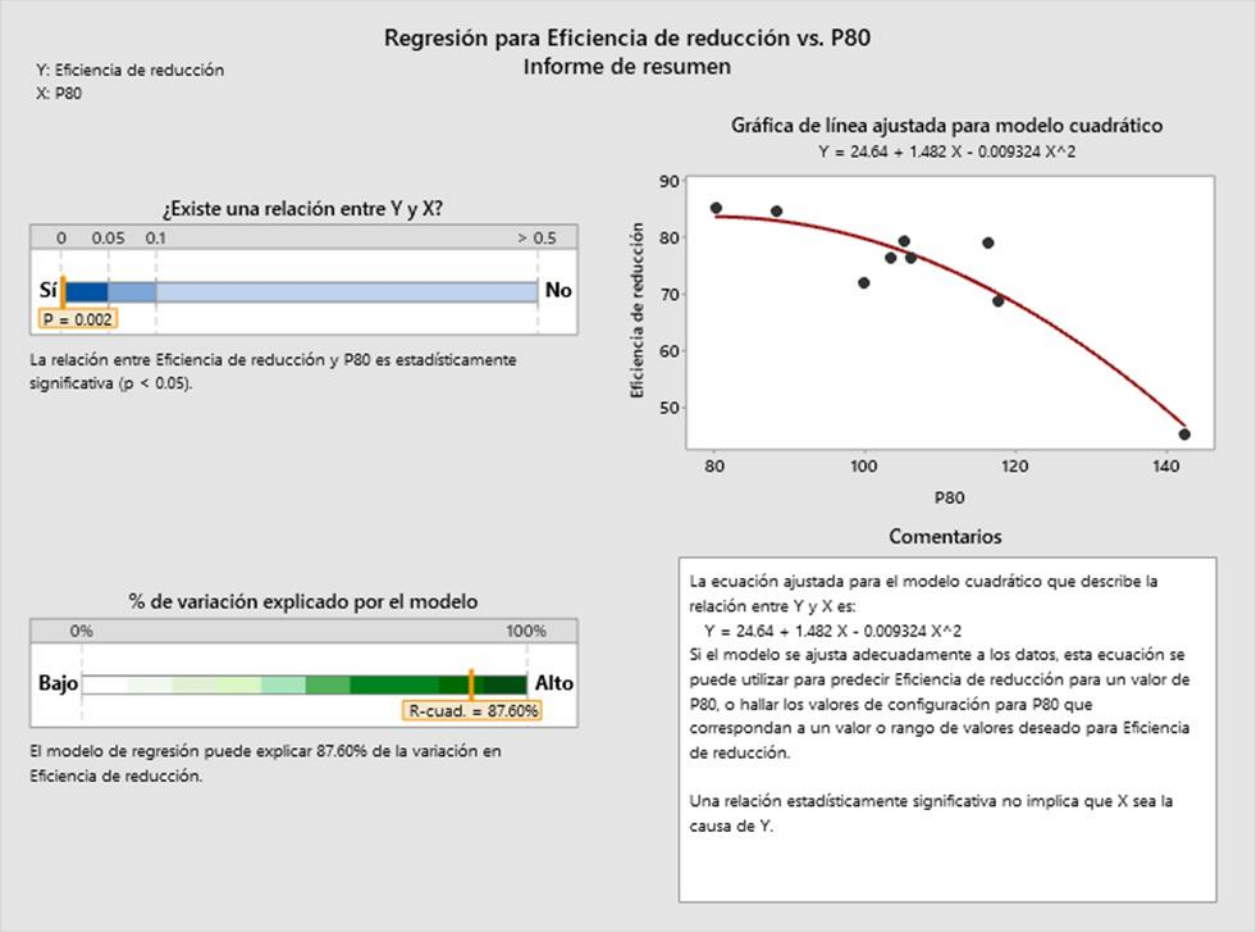
Cinética de ORP experimental promedio



Nota. Elaboración propia.

Figura 5-2

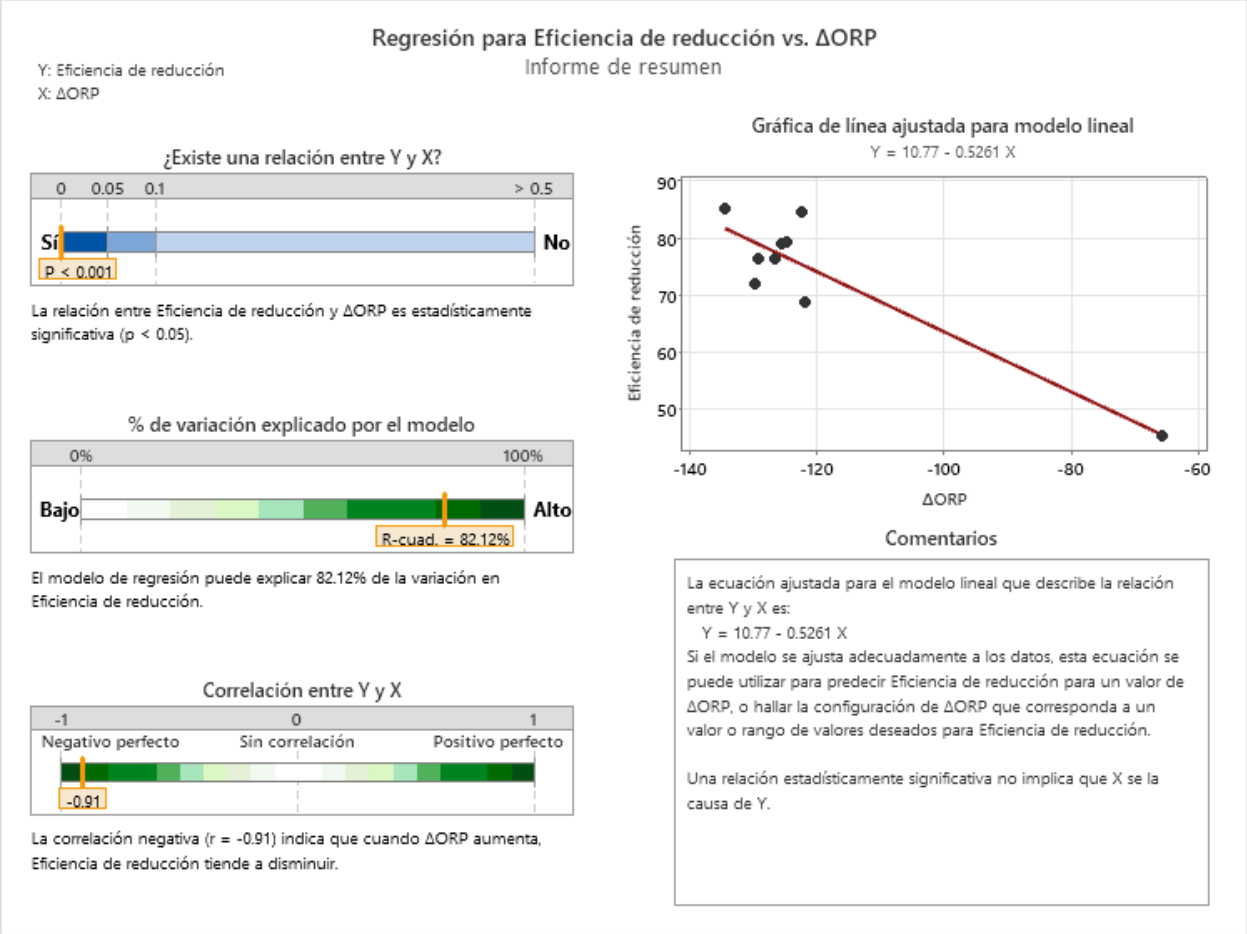
Análisis de regresión entre la eficiencia de reducción y el P80



Nota. Elaboración propia.

Figura 5-3

Análisis de regresión entre la eficiencia de reducción y ΔORP



Nota. Elaboración propia.

5.1.1. Resultados de la eficiencia de reducción

Tabla 5-2

Resultados experimentales de fierro total, ion ferroso, ion férrico y eficiencia de reducción

Calidad	Corrida	Muestra inicial			Muestra final			Eficiencia de reducción (%)
		FeT (g/L)	Fe^{2+} (g/L)	Fe^{3+} (g/L)	FeT (g/L)	Fe^{2+} (g/L)	Fe^{3+} (g/L)	
1	1	18.34	7.59	10.75	21.73	15.82	5.91	45.02
	2	18.34	7.59	10.75	21.68	15.87	5.81	45.95
	3	18.34	7.59	10.75	21.78	15.77	6.01	44.09
2	1	18.34	7.59	10.75	22.71	20.38	2.33	78.33
	2	18.34	7.59	10.75	19.98	17.58	2.40	77.67
	3	18.34	7.59	10.75	20.67	18.64	2.03	81.12
3	1	18.34	7.59	10.75	20.92	18.58	2.34	78.23
	2	18.34	7.59	10.75	21.59	18.76	2.83	73.67
	3	18.34	7.59	10.75	22.87	18.95	3.92	63.53
4	1	18.34	7.59	10.75	20.51	19.65	0.86	92.00
	2	18.34	7.59	10.75	21.08	17.64	3.44	68.00
	3	18.34	7.59	10.75	21.09	18.71	2.38	77.86
5	1	18.34	7.59	10.75	22.76	17.15	5.61	47.81
	2	18.34	7.59	10.75	20.7	18.48	2.22	79.35
	3	18.34	7.59	10.75	20.06	17.8	2.26	78.98
6	1	18.34	7.59	10.75	22.07	20.64	1.43	86.70
	2	18.34	7.59	10.75	20.87	18.86	2.01	81.30
	3	18.34	7.59	10.75	21.56	20.19	1.37	87.26
7	1	18.34	7.59	10.75	21.04	17.08	3.96	63.16
	2	18.34	7.59	10.75	21.11	19.01	2.1	80.47
	3	18.34	7.59	10.75	20.78	19.19	1.59	85.21
8	1	18.34	7.59	10.75	20.7	19.43	1.27	88.19
	2	18.34	7.59	10.75	21.55	18.66	2.89	73.12
	3	18.34	7.59	10.75	20.28	19.43	0.85	92.09
9	1	18.34	7.59	10.75	22.33	19.98	2.35	78.14
	2	18.34	7.59	10.75	22.12	19.04	3.08	71.35
	3	18.34	7.59	10.75	21.51	19.29	2.22	79.35

Nota. Los resultados de hierro total e ion ferroso fueron obtenidos por análisis de laboratorio.

5.1.2. Resultados del P80

Tabla 5-3

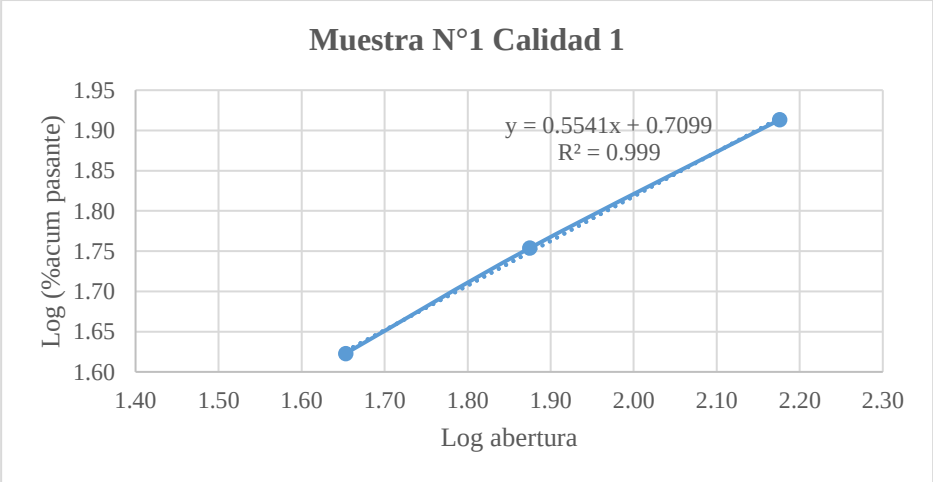
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 1								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	18.13	18%	18%	81.93	2.18	1.91	142.39
200	75	25.25	25%	43%	56.75	1.88	1.75	
355	45	14.83	15%	58%	41.97	1.65	1.62	
	<45	42.10	42%	100%	0.00			
	Total	**100.31**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-4

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 1



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-4

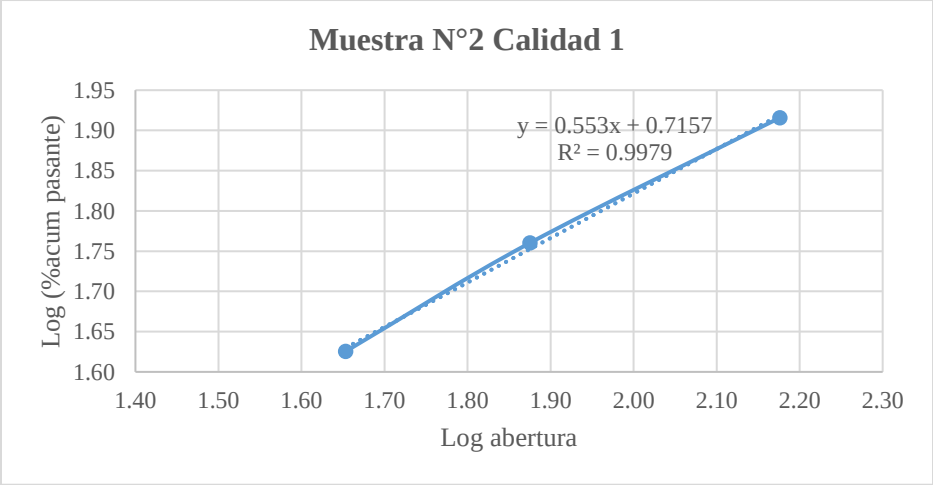
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 1								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	17.71	18%	18%	82.36	2.18	1.92	140.40
200	75	24.89	25%	42%	57.57	1.88	1.76	
355	45	15.42	15%	58%	42.21	1.65	1.63	
	<45	42.38	42%	100%	0.00			
	Total	**100.4**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-5

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 1



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-5

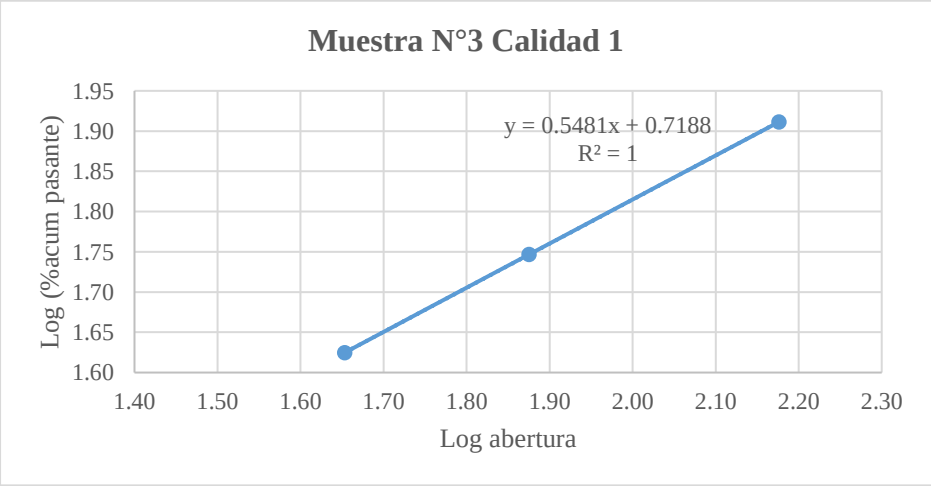
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 1 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 1								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	18.49	18%	18%	81.53	2.18	1.91	144.85
200	75	25.74	26%	44%	55.80	1.88	1.75	
355	45	13.67	14%	58%	42.14	1.65	1.62	
	<45	42.17	42%	100%	0.00			
	Total	**100.07**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-6

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 1



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-6

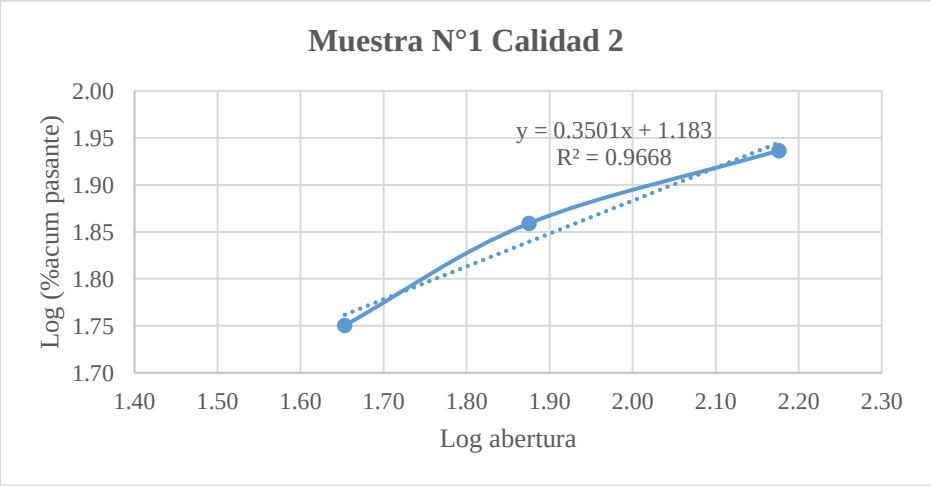
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 2								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	18.13	13.6	14%	14%	86.39	2.18	114.02
200	75	25.25	14.1	14%	28%	72.28	1.88	
355	45	14.83	16.0	16%	44%	56.29	1.65	
	<45	42.10	56.4	56%	100%	0.00		
	Total	**100.16**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-7

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 2



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-7

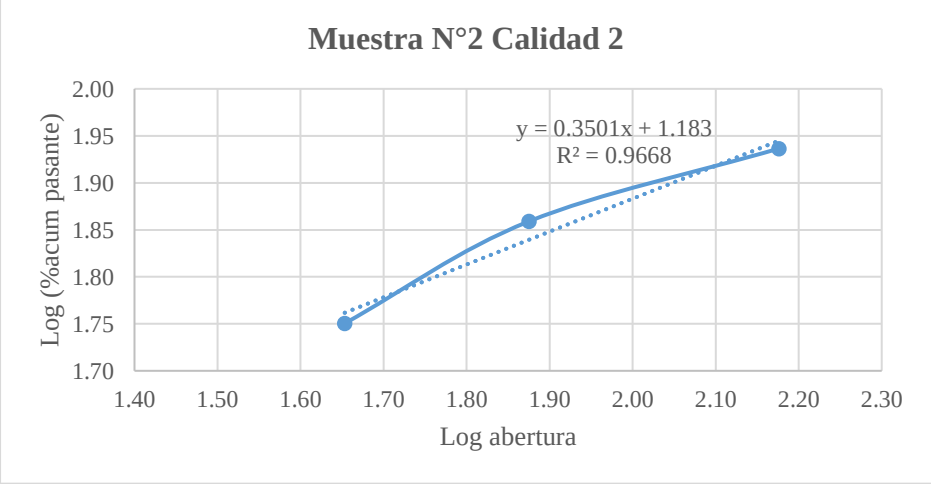
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 2								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	13.63	14%	14%	86.39	2.18	1.94	114.02
200	75	14.14	14%	28%	72.28	1.88	1.86	
355	45	16.01	16%	44%	56.29	1.65	1.75	
	<45	56.38	56%	100%	0.00			
	Total	**100.16**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-8

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 2



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-8

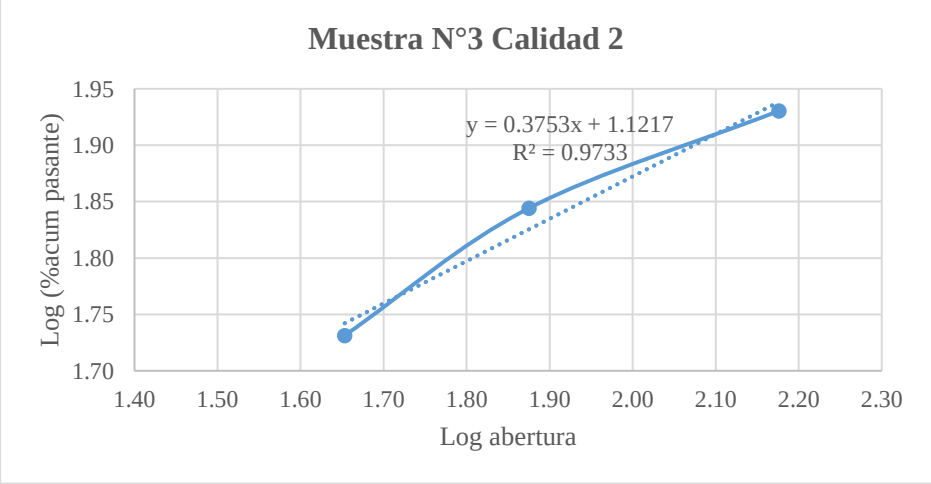
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 2 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 2								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	14.81	15%	15%	85.20	2.18	1.93	120.78
200	75	15.36	15%	30%	69.85	1.88	1.84	
355	45	15.99	16%	46%	53.87	1.65	1.73	
	<45	53.91	54%	100%	0.00			
	Total	**100.07**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-9

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 2



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-9

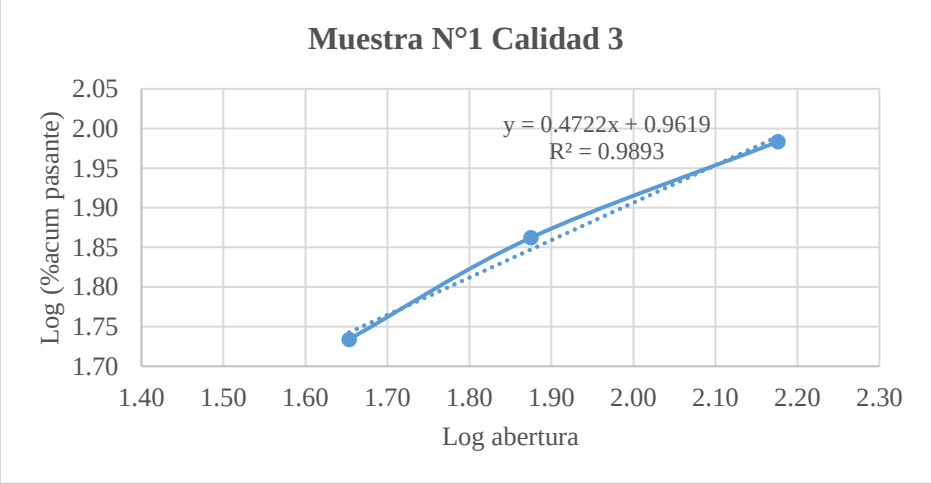
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 3								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	18.13	3.8	4%	4%	96.21	2.18	98.41
200	75	25.25	23.5	23%	27%	72.82	1.88	
355	45	14.83	18.7	19%	46%	54.21	1.65	
	<45	42.10	54.4	54%	100%	0.00		
	Total	**100.32**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-10

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 3



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-10

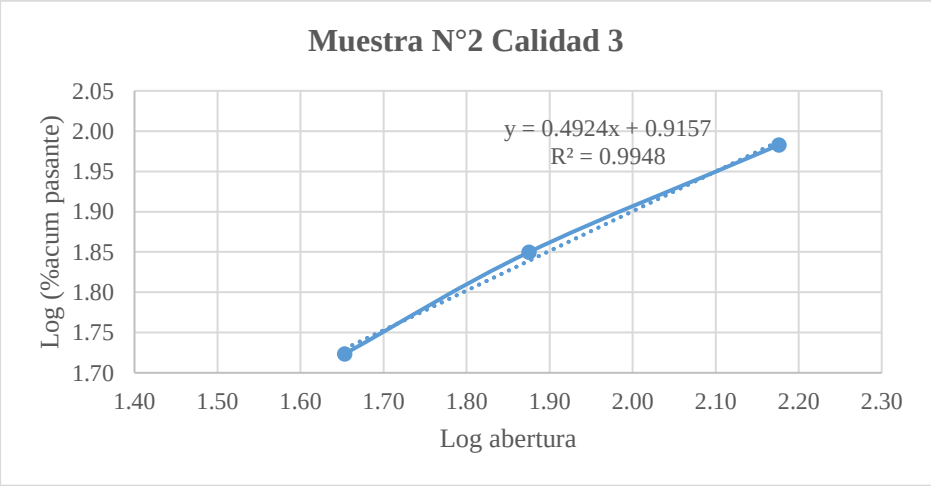
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 3								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	3.91	4%	4%	96.09	2.18	1.98	101.19
200	75	25.36	25%	29%	70.77	1.88	1.85	
355	45	17.87	18%	47%	52.92	1.65	1.72	
	<45	52.98	53%	100%	0.00			
	Total	**100.16**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-11

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 3



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-11

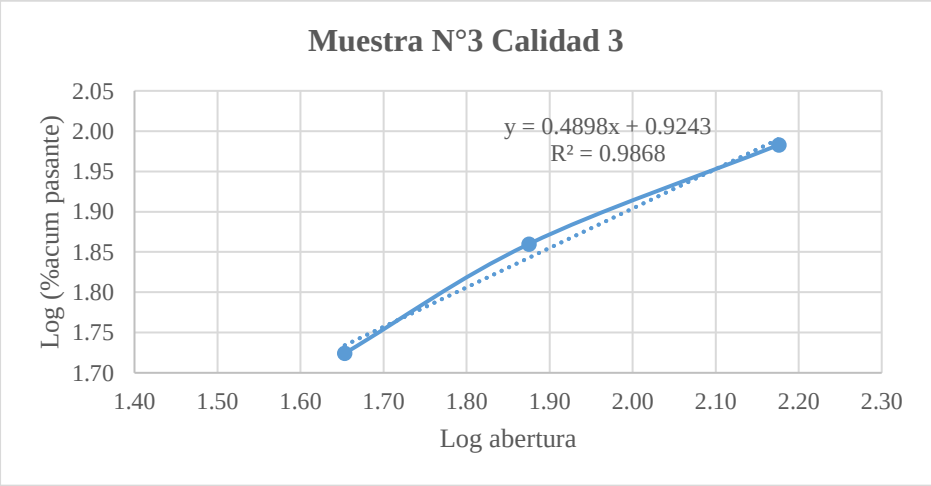
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 3 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 3								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	3.84	4%	4%	96.16	2.18	1.98	99.58
200	75	23.74	24%	28%	72.43	1.88	1.86	
355	45	19.43	19%	47%	53.00	1.65	1.72	
	<45	53.01	53%	100%	0.00			
	Total	**100.02**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-12

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 3



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-12

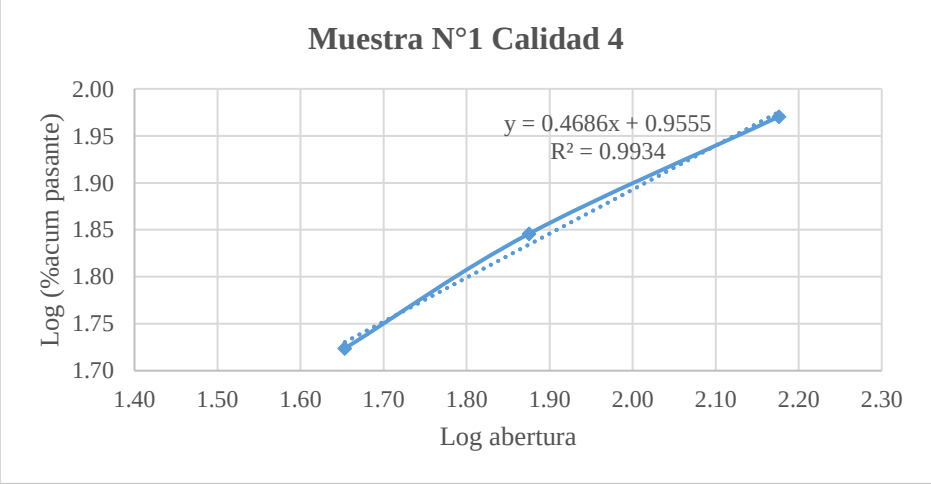
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 4								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	6.6	7%	7%	93.41	2.18	1.97	105.21
200	75	23.4	23%	30%	70.10	1.88	1.85	
355	45	17.3	17%	47%	52.92	1.65	1.72	
	<45	53.2	53%	100%	0.00			
	Total	**100.44**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-13

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 4



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-13

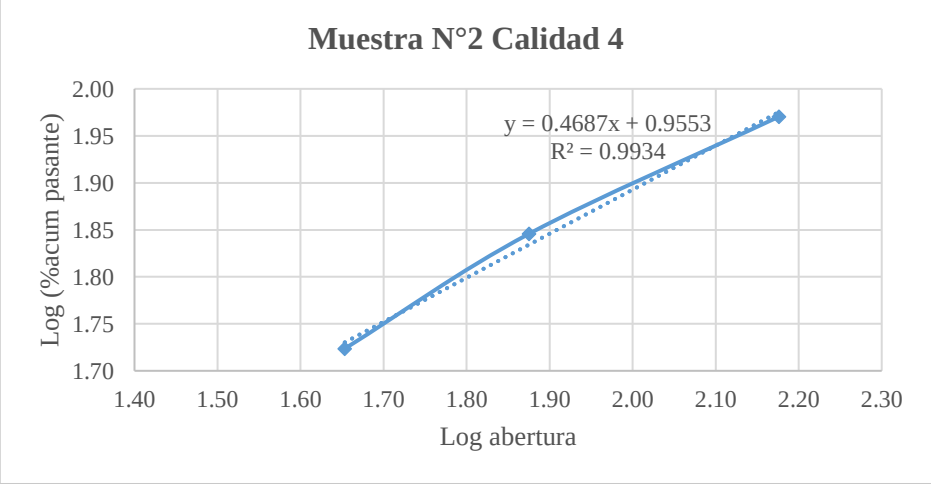
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 4								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	6.62	7%	7%	93.41	2.18	1.97	105.22
200	75	23.41	23%	30%	70.10	1.88	1.85	
355	45	17.26	17%	47%	52.91	1.65	1.72	
	<45	53.14	53%	100%	0.00			
	Total	**100.43**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-14

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 4



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-14

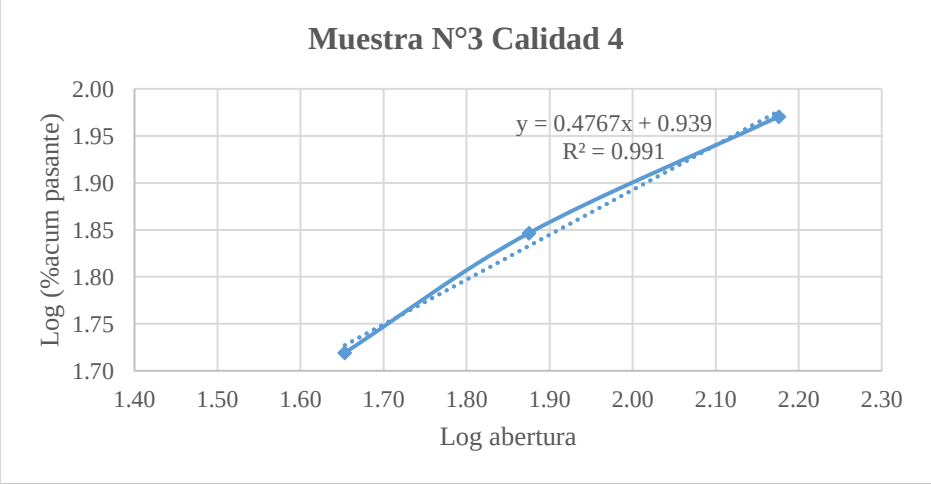
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 4 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 4								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	6.56	7%	7%	93.44	2.18	1.97	105.30
200	75	23.21	23%	30%	70.23	1.88	1.85	
355	45	17.85	18%	48%	52.38	1.65	1.72	
	<45	52.39	52%	100%	0.00			
	Total	**100.01**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-15

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 4



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-15

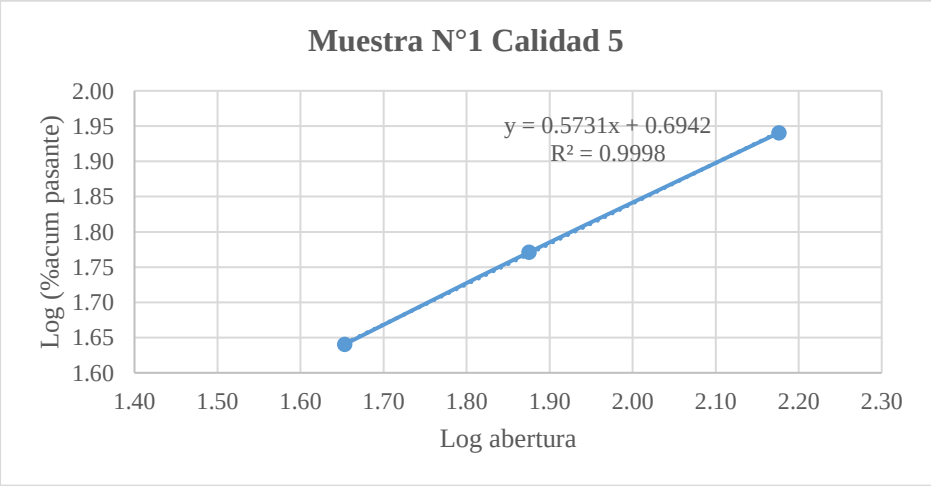
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 5								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	12.9	13%	13%	87.18	2.18	1.94	128.64
200	75	28.3	28%	41%	59.02	1.88	1.77	
355	45	15.4	15%	56%	43.69	1.65	1.64	
	<45	43.9	44%	100%	0.00			
	Total	**100.38**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-16

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 5



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-16

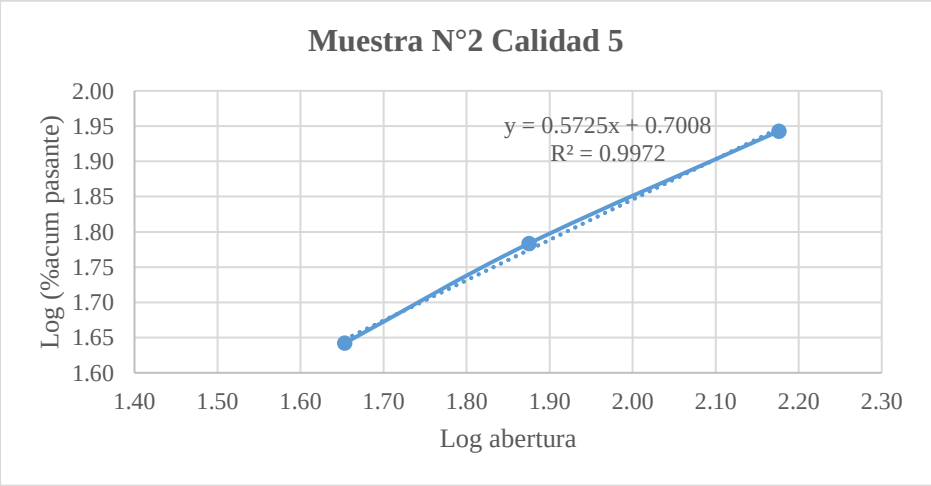
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 5								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	12.35	12%	12%	87.66	2.18	1.94	125.88
200	75	26.94	27%	39%	60.74	1.88	1.78	
355	45	16.89	17%	56%	43.86	1.65	1.64	
	<45	43.89	44%	100%	0.00			
	Total	**100.07**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-17

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 5



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-17

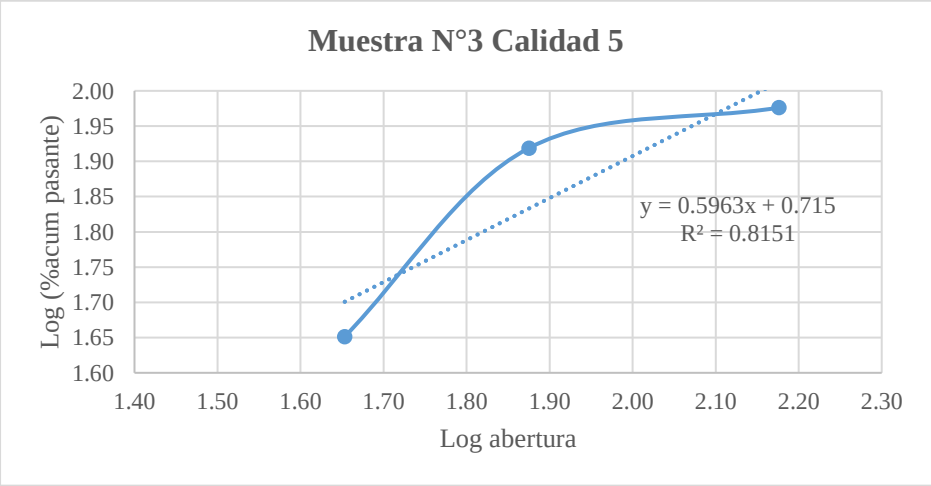
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 5 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 5								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	5.34	5%	5%	94.66	2.18	1.98	98.29
200	75	11.73	12%	17%	82.94	1.88	1.92	
355	45	38.16	38%	55%	44.81	1.65	1.65	
	<45	44.85	45%	100%	0.00			
	Total	**100.08**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-18

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 5



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-18

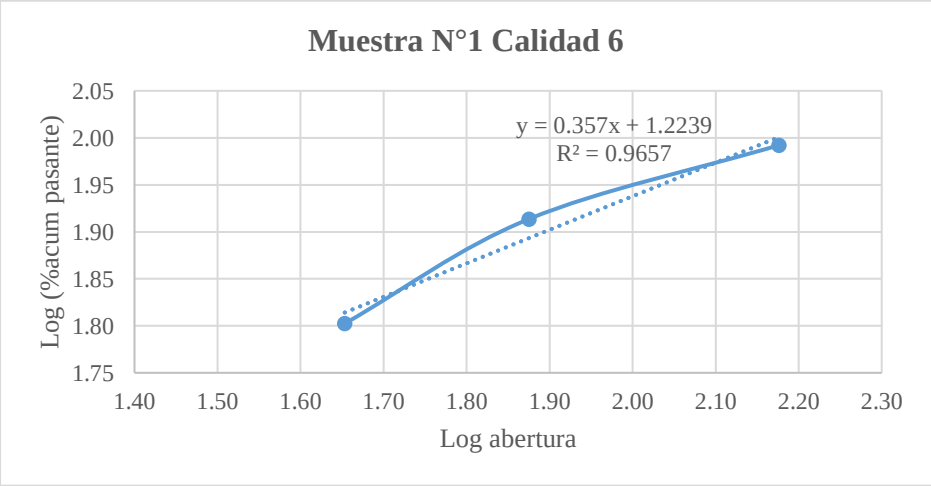
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 6								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.8	2%	2%	98.20	2.18	1.99	79.89
200	75	16.3	16%	18%	81.96	1.88	1.91	
355	45	18.6	19%	37%	63.44	1.65	1.80	
	<45	63.6	63%	100%	0.00			
	Total	**100.23**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-19

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 6



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-19

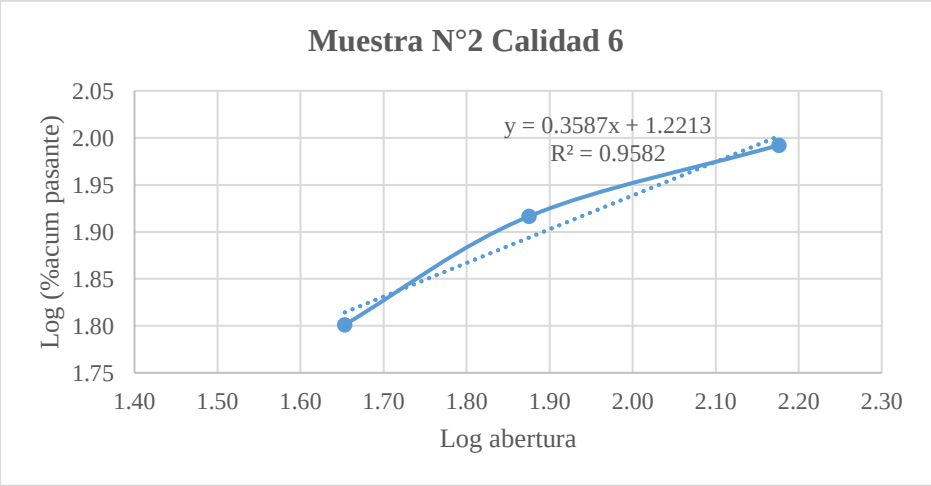
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 6								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.78	2%	2%	98.22	2.18	1.99	79.60
200	75	15.73	16%	18%	82.50	1.88	1.92	
355	45	19.23	19%	37%	63.27	1.65	1.80	
	<45	63.30	63%	100%	0.00			
	Total	**100.04**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-20

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 6



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-20

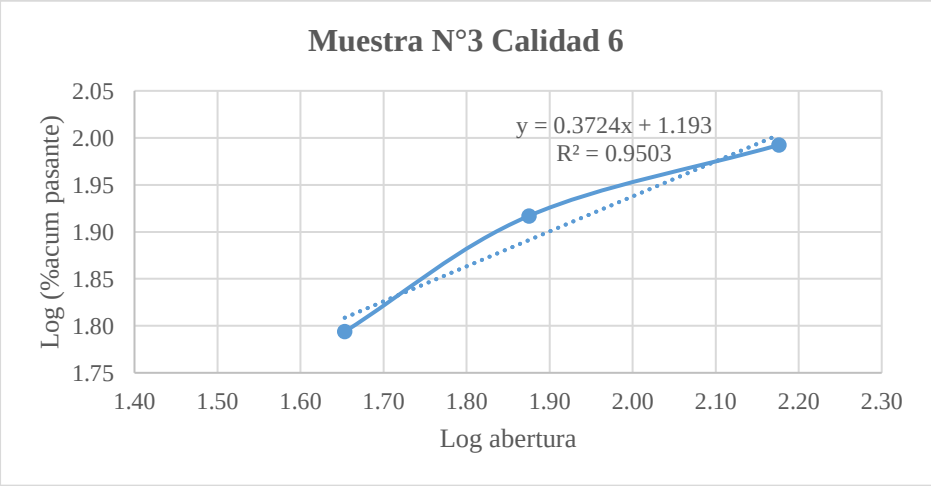
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 6 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 6								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.75	2%	2%	98.27	2.18	1.99	80.71
200	75	15.78	16%	17%	82.59	1.88	1.92	
355	45	20.53	20%	38%	62.20	1.65	1.79	
	<45	62.63	62%	100%	0.00			
	Total	**100.69**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-21

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 6



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-21

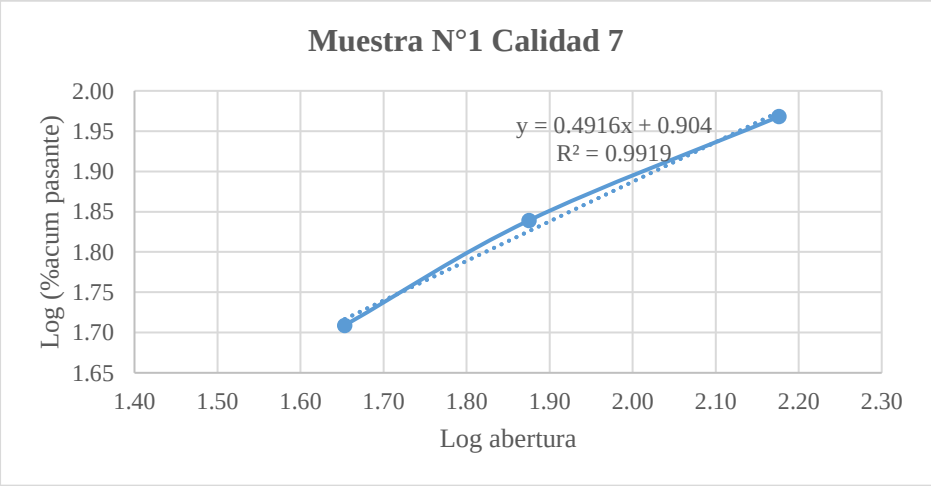
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 7								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	7.1	7%	7%	92.90	2.18	1.97	107.75
200	75	23.9	24%	31%	69.05	1.88	1.84	
355	45	17.9	18%	49%	51.17	1.65	1.71	
	<45	51.3	51%	100%	0.00			
	Total	**100.34**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-22

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 7



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-22

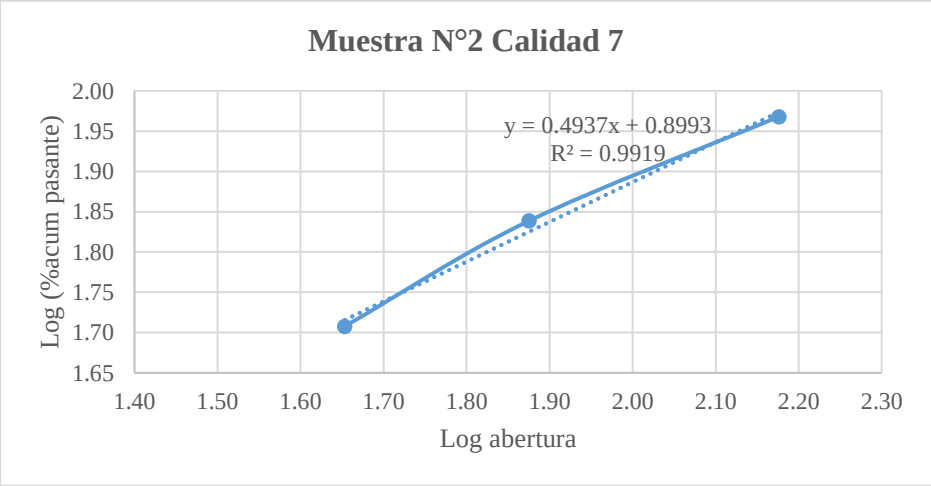
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 7								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	7.12	7%	7%	92.88	2.18	1.97	107.93
200	75	23.94	24%	31%	68.95	1.88	1.84	
355	45	17.94	18%	49%	51.02	1.65	1.71	
	<45	51.04	51%	100%	0.00			
	Total	**100.04**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-23

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 7



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-23

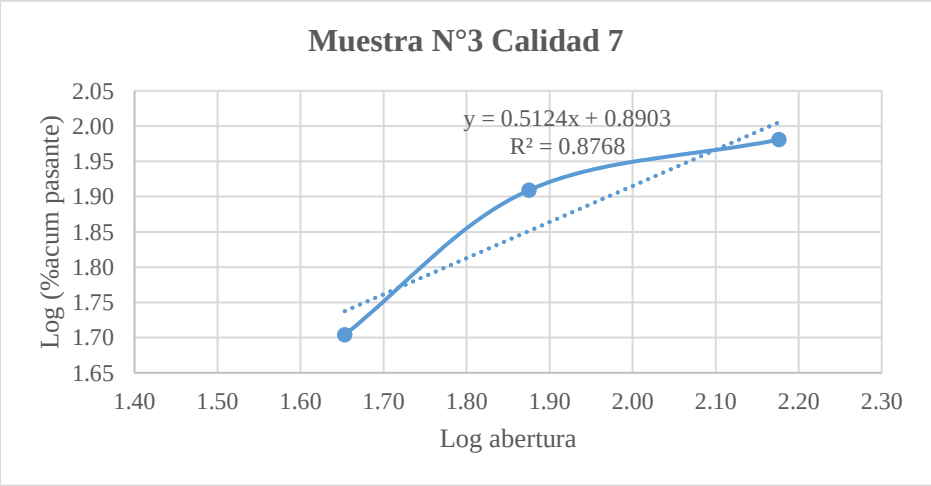
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 7 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 7								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	4.33	4%	4%	95.67	2.18	1.98	94.73
200	75	14.57	15%	19%	81.12	1.88	1.91	
355	45	30.55	31%	49%	50.59	1.65	1.70	
	<45	50.63	51%	100%	0.00			
	Total	**100.08**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-24

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 7



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-24

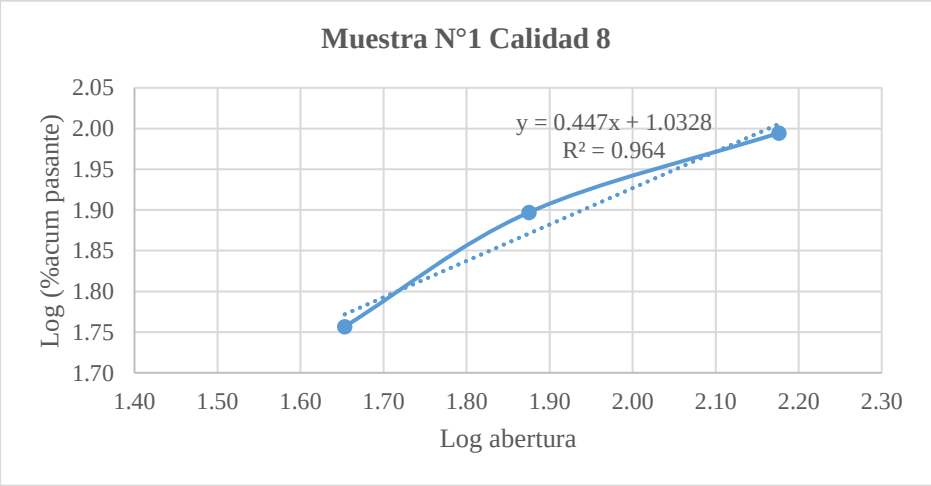
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 8								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.3	1%	1%	98.72	2.18	1.99	88.52
200	75	19.9	20%	21%	78.88	1.88	1.90	
355	45	21.8	22%	43%	57.12	1.65	1.76	
	<45	57.3	57%	100%	0.00			
	Total	**100.25**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-25

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 8



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-25

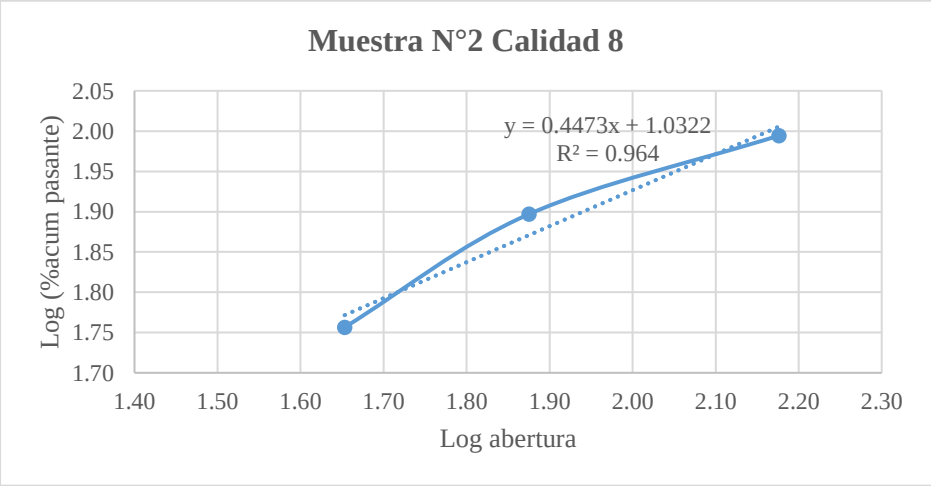
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 8								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.28	1%	1%	98.72	2.18	1.99	88.54
200	75	19.89	20%	21%	78.87	1.88	1.90	
355	45	21.82	22%	43%	57.10	1.65	1.76	
	<45	57.21	57%	100%	0.00			
	Total	**100.2**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-26

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 8



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-26

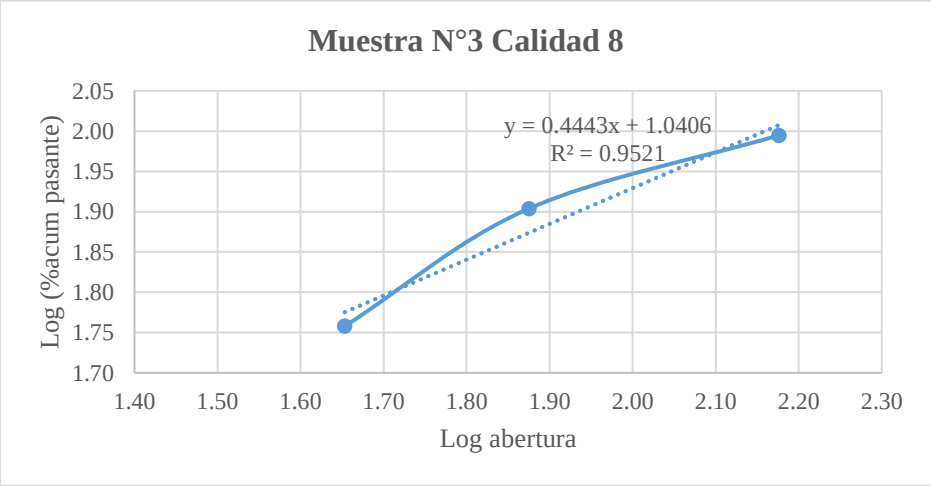
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 8 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 8								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	1.20	1%	1%	98.80	2.18	1.99	87.31
200	75	18.67	19%	20%	80.14	1.88	1.90	
355	45	22.89	23%	43%	57.26	1.65	1.76	
	<45	57.29	57%	100%	0.00			
	Total	**100.05**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-27

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 8



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-27

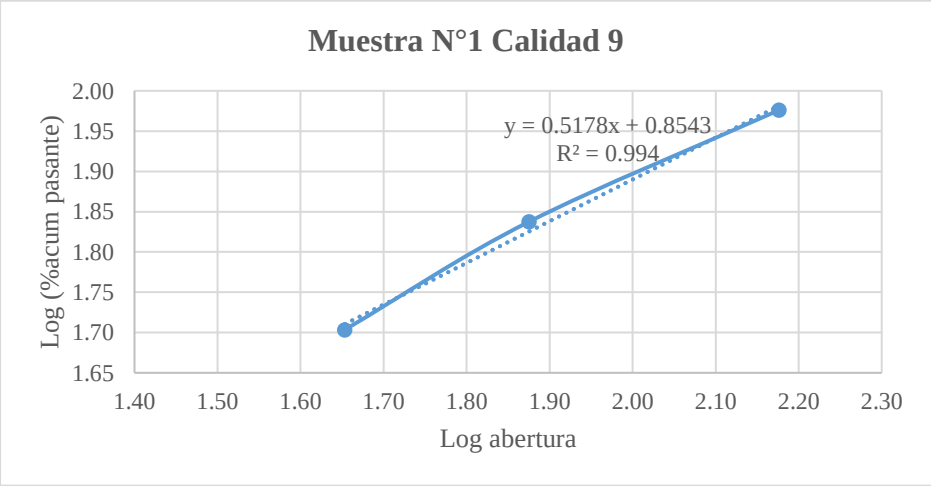
Estimación del P80 para la muestra N°1 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°1 calidad 9								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	5.4	5%	5%	94.63	2.18	1.98	106.00
200	75	25.9	26%	31%	68.78	1.88	1.84	
355	45	18.3	18%	49%	50.51	1.65	1.70	
	<45	50.7	51%	100%	0.00			
	Total	**100.29**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-28

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°1 de la calidad 9



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-28

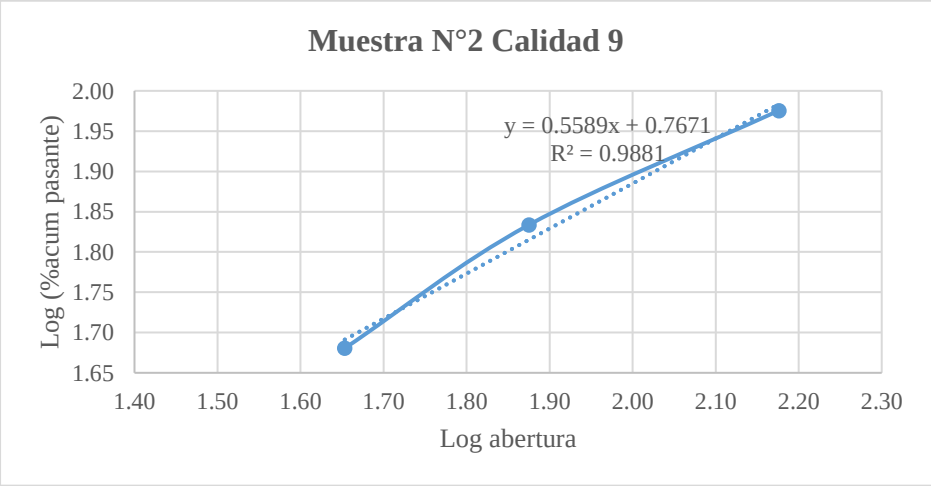
Estimación del P80 para la muestra N°2 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°2 calidad 9								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	5.53	5%	5%	94.52	2.18	1.98	107.75
200	75	26.60	26%	32%	68.18	1.88	1.83	
355	45	20.46	20%	52%	47.92	1.65	1.68	
	<45	48.38	48%	100%	0.00			
	Total	**100.97**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-29

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°2 de la calidad 9



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-29

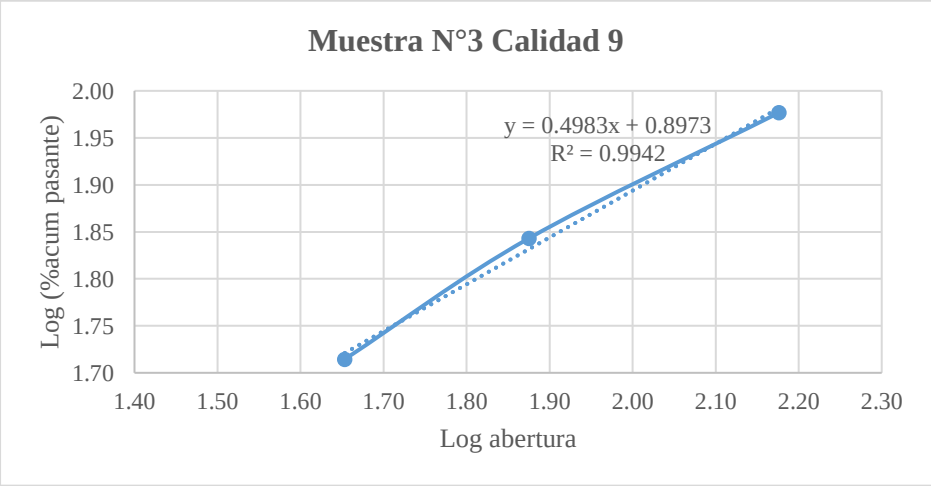
Estimación del P80 para la muestra N°3 de la calidad 9 mediante el método de Gaudin-Schuhmann

Muestra N°3 calidad 9								
		Distribución Granulométrica						
Malla	**Abertura (µm)**	**Peso (g)**	**% Peso retenido**	**% Acumulado Retenido**	**% Acumulado Pasante**	**Log (Abertura)**	**Log (%Acumulado pasante)**	**P80 µm**
100	150	5.22	5%	5%	94.78	2.18	1.98	104.36
200	75	25.13	25%	30%	69.68	1.88	1.84	
355	45	17.88	18%	48%	51.81	1.65	1.71	
	<45	51.86	52%	100%	0.00			
	Total	**100.09**	**1.0**					

Nota. Elaboración propia.

Figura 5-30

Distribución de Gaudin-Schuhmann para la muestra N°3 de la calidad 9



Nota. Elaboración propia.

5.1.3. Resultados del ORP

Tabla 5-30

Resultados experimentales de ORP para calidad 1

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	482	485	494
1	481	485	493
15	471	479	484
30	465	459	472
45	461	458	472
60	458	456	465
75	451	451	461
90	447	455	458
105	444	452	455
120	451	448	452
135	447	445	448
150	438	444	446
165	428	441	444
180	427	437	441
195	423	435	438
210	418	433	436
225	413	430	432
240	412	423	429
ΔORP	-70	-62	-65

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-31

Resultados experimentales de ORP para calidad 2

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	482	483	497
1	475	478	495
15	458	456	478
30	444	431	462
45	429	420	450
60	417	408	437
75	403	403	425
90	391	392	413
105	382	377	403
120	382	366	393
135	373	365	386
150	369	362	374
165	358	354	368
180	360	354	362
195	358	358	361
210	358	360	362
225	356	362	362
240	358	364	363
ΔORP	-124	-119	-134

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-32

Resultados experimentales de ORP para calidad 3

Tiempo (min)	**Corrida 1 ORP (mV)**	**Corrida 2 ORP (mV)**	**Corrida 3 ORP (mV)**
0	485	492	485
1	484	479	485
15	462	467	461
30	449	445	448
45	435	435	444
60	427	425	434
75	418	417	420
90	408	410	413
105	402	402	404
120	394	393	399
135	386	387	395
150	381	383	389
165	375	377	382
180	371	372	378
195	365	367	372
210	358	362	368
225	354	362	361
240	352	362	358
ΔORP	-133	-130	-127

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-33

Resultados experimentales de ORP para calidad 4

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	485	492	485
1	481	480	485
15	462	468	462
30	447	445	449
45	437	431	447
60	423	418	434
75	415	409	420
90	403	397	410
105	398	385	402
120	385	373	395
135	374	366	385
150	367	362	378
165	362	361	372
180	362	362	368
195	362	362	365
210	355	362	365
225	355	363	361
240	357	368	362
ΔORP	-128	-124	-123

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-34

Resultados experimentales de ORP para calidad 5

Tiempo (min)	**Corrida 1 ORP (mV)**	**Corrida 2 ORP (mV)**	**Corrida 3 ORP (mV)**
0	483	492	485
1	474	489	485
15	458	478	462
30	438	458	449
45	435	451	447
60	429	443	434
75	427	437	420
90	422	428	410
105	411	423	402
120	406	418	395
135	404	415	385
150	399	408	378
165	385	402	372
180	379	396	368
195	374	390	365
210	370	384	365
225	363	378	361
240	360	372	362
ΔORP	-123	-120	-123

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-35

Resultados experimentales de ORP para calidad 6

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	482	492	491
1	474	489	478
15	455	475	467
30	444	455	458
45	434	445	452
60	427	437	431
75	416	428	426
90	403	418	419
105	401	412	412
120	395	403	403
135	386	399	397
150	372	389	391
165	369	385	386
180	360	381	382
195	357	376	370
210	349	372	365
225	344	365	363
240	338	364	359
ΔORP	-144	-128	-132

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-36

Resultados experimentales de ORP para calidad 7

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	483	492	491
1	477	492	478
15	464	476	470
30	440	455	462
45	432	445	455
60	421	431	439
75	417	425	429
90	410	412	422
105	393	403	416
120	380	394	404
135	378	386	397
150	369	376	388
165	355	368	382
180	353	362	372
195	356	362	359
210	359	361	356
225	361	362	355
240	361	362	355
ΔORP	-122	-130	-136

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-37

Resultados experimentales de ORP para calidad 8

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	482	485	485
1	479	484	484
15	458	466	466
30	440	441	450
45	433	434	444
60	417	429	437
75	410	420	430
90	407	420	424
105	401	416	419
120	389	410	413
135	385	403	409
150	378	399	403
165	372	392	399
180	368	385	392
195	362	382	386
210	358	379	378
225	353	372	373
240	351	366	367
ΔORP	-131	-119	-118

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5-38

Resultados experimentales de ORP para calidad 9

Tiempo (min)	Corrida 1 ORP (mV)	Corrida 2 ORP (mV)	Corrida 3 ORP (mV)
0	482	485	499
1	472	483	497
15	465	471	479
30	445	440	462
45	427	422	449
60	413	410	430
75	393	396	417
90	379	386	402
105	370	376	386
120	375	369	372
135	369	362	367
150	368	362	363
165	362	362	364
180	362	363	364
195	361	364	365
210	362	366	366
225	361	367	369
240	362	365	369
ΔORP	-120	-120	-130

Nota. Elaboración propia.

6.2. Discusión de resultados

- Según la información recopilada durante el periodo de enero 2022 hasta octubre 2023 mostrada en la Figura 9-1 ubicada en el Anexo, se presentó un promedio de 82.85% de eficiencia de reducción en la refinería. Para la evaluación de las calidades de concentrados de zinc recepcionadas en dicho periodo de tiempo, se seleccionaron aquellas que tienen un mayor ingreso de tonelaje anual, siendo seleccionadas 9 de ellas bajo recomendación del ingeniero especialista del área.

  A partir de las pruebas experimentales realizadas se obtuvo que las calidades de concentrados de zinc 6 y 8 poseen una eficiencia de reducción de 85.1% y 84.5% respectivamente, siendo estas eficiencias superiores al valor promedio.

- En la Tabla 5-1 se muestran los resultados obtenidos del ΔORP de la reacción con cada calidad de concentrado de zinc. El empleo de estos concentrados en la reacción generó un ambiente reductor, lo cual a su vez generó una disminución del ORP a medida que se iba llevando a cabo la reacción con la solución lixiviante como se observa en la Figura 5-1. A partir de ello se verificó que en los todos los concentrados empleados en las pruebas experimentales desencadenó una reacción cuyo Δ ORP resultó negativo.

- Por otro lado, a partir del análisis por tamizado realizado a través de las mallas N°100, N°200 y N°355 para cada calidad de concentrado de zinc se obtuvo los porcentajes acumulados pasantes. Los resultados obtenidos junto a la abertura de las mallas empleadas se ajustaron al modelo de distribución de Gaudin – Schumann cuya gráfica de escala logarítmica permitió obtener una mejor distribución para partículas de tamaños pequeños que resultaron óptimos para la caracterización de tamaño de partícula a través del P80 (ver sección 5.1.2).

- En la Figura 5-2 se muestra un análisis de regresión entre la eficiencia de reducción (respuesta) y el P80 (variable predictora) a un nivel de confianza del 95% realizado en el software Minitab. El mejor ajuste para la información obtenida a partir de las pruebas experimentales fue un modelo cuadrático descrito por la ecuación cuyo R^2 resultó en 87.60%, en otras palabras, el modelo puede explicar 87.60% de la variación de la eficiencia de reducción.

  Al ser un modelo cuadrático, el coeficiente de Pearson no podría cuantificar el grado de dependencia lineal. Por otro lado, se obtuvo un ρ de 0.002 el cual al ser menor que 0.05 (1-95%) se puede interpretar como una relación estadísticamente significativa entre la eficiencia de reducción y el P80.

  Asimismo, según de la ecuación cuadrática se obtendrían eficiencias de reducción iguales o superiores al promedio 82.85% en concentrados de zinc cuyo P80 se encuentren en un rango aproximado de 80 µm y 88 µm.

- En la Figura 5-3 se muestra un análisis de regresión entre la eficiencia de reducción (respuesta) y el ΔORP (variable predictora) a un nivel de confianza del 95% realizado en el software Minitab. El mejor ajuste para la información obtenida a partir de las pruebas experimentales fue un modelo lineal descrito por la ecuación cuyo R^2 resultó en 82.12%, en otras palabras, el modelo puede explicar 82.12% de la variación de la eficiencia de reducción.

  En este caso, al ser un modelo lineal fue posible cuantificar el grado de dependencia lineal entre estas dos variables mediante el coeficiente de Pearson el cual resultó -0.91, la cual se traduce como una correlación negativa lo que indica que mientras el ΔORP aumenta la eficiencia de reducción tiende a disminuir.

Por otro lado, se obtuve un ρ menor a 0.001 el cual al ser menor que 0.05 (1-95%) se puede interpretar como una relación estadísticamente significativa entre la eficiencia de reducción y ΔORP.

Asimismo, bajo la premisa que fuera del rango de estudio (-135mV a -66mV), se mantendrá una dependencia lineal entre las dos variables descrita por la ecuación de la cual se obtendrá una eficiencia de reducción iguales o superiores al promedio 82.85% en concentrados de zinc cuyo ΔORP menores o iguales a -137mV.

6. Conclusiones

- A partir de la evaluación de la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc de la refinería Nexa Cajamarquilla, se determinó que las calidades 6 y 8 son las óptimas en el proceso de reducción ácida con eficiencias de 85.1% y 84.5% respectivamente.
- El ΔORP en la reacción generada en la etapa de reducción ácida con los diferentes concentrados de zinc empleados en la evaluación resultó negativo en un rango de -135mV a -66mV, lo cual es explicado por el carácter reductor de los concentrados de zinc.
- El análisis por tamizado y la ecuación Gaudin – Schumann permitió determinar el P80 de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación resultando en un rango de 80µm a 143 µm.
- La relación entre la eficiencia de reducción y el P80 se determinó bajo un modelo cuadrático con un R^2 de 87.60%. Al ser una relación cuadrática, el coeficiente de Pearson no permitió estimar el grado de correlación.
- El coeficiente de correlación de Pearson de -0.91 permitió determinar el grado de dependencia lineal negativa entre el ΔORP de la reacción generada en la etapa de reducción ácida y la eficiencia de reducción del ion férrico de las calidades de concentrado de zinc empleadas en la evaluación.

7. Recomendaciones

- Evaluar la eficiencia de reducción contempladas en este estudio a nivel planta industrial.
- Estudiar el efecto de la dosificación de las calidades de concentrados de zinc empleadas en las pruebas en la eficiencia de reducción.
- Se recomienda realizar pruebas en el laboratorio de planta piloto para evaluar las eficiencias de reducción cuando se recepcionen nuevas calidades de concentrados de zinc.
- Evaluar el efecto en la eficiencia de reducción al combinar las dos mejores calidades obtenidas en el estudio.

8. Referencias

Babu, M., Sahu, K. y Pandey, B. (2002). Zinc recovery from sphalerite concentrate by direct oxidative leaching with ammonium, sodium and potassium persulphates. *Hydrometallurgy*, *64*(2), 119–129. https://doi:10.1016/s0304-386x(02)00030-0

Banhidi, M. (2002). pH and ORP. *Metal Finishing*, *100*(1), 587-594. https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82060-8

Banhidi, M. (2007). pH and ORP. *Metal Finishig, 105,* 518-523. https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80368-0

Cardenas, M. y Huaman, E. (2022). *Optimizar la recuperación de cobre por la influencia de P80, el PH y la dosificación de reactivos de flotación en la Cia. Minera Antapaccay S.A.* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6363/253T20220057_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cardoza, O. (2019). *Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10897

Chen, T. y Cabri, L. (1986). Mineralogical overview of iron control in Hydrometallurgy en Dutrizac, J. y Monhemius, A. (Eds.), *Iron Control in Hydrometallurgy* (pp. 11-55).

Crundwell, F. y Verbaan, B. (1987). Kinetics and mechanisms of the non-oxidative dissolution of sphalerite (zinc sulphide). *Hydrometallurgy*, *17*(3), 369–384. http/doi:10.1016/0304-386x(87)90065-x

Dutrizac, J. (1987). An Overview Iron Precipitation in Hydrometallurgy. *Crystallization and Precipitation, 1*, 259-283. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-035751-5.50038-6

Errol, G. y David, J. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Limusa, S.A. https://www.academia.edu/36214798/303748853_E_G_Kelly_D_J_Spottiswood_Introduccion_Al_Procesamiento_de_Minerales_pdf

Frare, L., Gimenes, M., Pereira, N. y Mendes, E. (2000). Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamaño de partículas. *Acta Scientiarum, 22*(5), 1235–1239. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v22i0.3128

Gerencia de Procesos y PCP. (2016). *Certificación VM-CJM, Matriz de Competencias: Manual del Proceso Productivo 2016*. Phemsol SAC

Kothari, C. (2004). *Research Methodology: Methods and Techniques*. New Age International Publishers.

Kozak, M., Krzanowski, W. y Tartanus, M. (2012). Use of the correlation coefficient in agricultural sciences: problems, pitfalls and how to deal with them. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84*(4), 1147-1156. https://doi.org/10.1590/S0001-37652012000400029

Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J y W. Li (2005). *Applied Linear Statistical Models*. McGrawHillEducation.

Monhemius, A. (2017). The iron elephant: A brief history of hydrometallurgists' struggles with element no. 26. *CIM Journal, 8* (4), 1-13. https://doi.org/10.15834/cimj.2017.21

Nexa. (2023). *Cajamarquilla*. https://ri.nexaresources.com/operations_smelting/cajamarquilla/

Peng, T., Chen, L., Wang, J., Miao, J., Shen, L., Yu, R., Gu, G., Qiu, G. y Zeng, W. (2019). Dissolution and passivation of chalcopyrite during bioleaching by Acidithiobacillus ferrivorans at low temperature. Minerals, *9*(6). https://doi.org/10.3390/min9060332

Perez, I. y Dutrizac, J. (1991). The effect of the iron content of sphalerite on its rate of dissolution in ferric sulphate and ferric chloride media. *Hydrometallurgy*, *26*(2), 211–232. https://doi:10.1016/0304-386x(91)90032-h

Rojas, C. y Nemias, G. (2014). *Optimización del proceso de lixiviación en medio ácido de concentrados sulfurados de cobre* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/912

Santana, G, Brasileiro, C., Azeredo, H, Ferreira, H., Neves, G. y Ferreira H. (2019). A comparative study of particle size distribution using analysis of variance for sedimentation and laser diffraction methods. Cerâmica, 65(375), 452-460. 1293-1300. https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752623

Sinclair, R. (2005). *The Extractive Metallurgy of Zinc*. AusIMM. https://www.ausimm.com/globalassets/rio---pubs-not-on-onemine/spectrum/extractive-metallurgy-of-zinc.pdf

Stanley, J. y Lin-Sien, H. (2001). *Particle Size Characterization. National Institute of Standards and Technology*. https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-b439fe523409ad8e8d75fd5274f0fc5b/pdf/GOVPUB-C13-b439fe523409ad8e8d75fd5274f0fc5b.pdf

Sundramur, V, Rajoo, B., Ramesh, G y Adugna, A. (2019) Bioleaching of zinc and iron from sphalerite using Leptospirillum ferriphilum: kinetic aspects. *International Journal of Scientific & Technology Research*, *8*(11), 1293-1300. https://www.ijstr.org/final-

print/nov2019/-Bioleaching-Of-Zinc-And-Iron-From-Sphalerite-Using-Leptospirillum-Ferriphilum-Kinetic-Aspects.pdf

Suni, J., Henein, H., Warren, G. y Reddy, D. (1989). Modelling the leaching kinetics of a sphalerite concentrate size distribution in ferric chloride solution. *Hydrometallurgy*, *22*(1-2), 25–38. https://doi:10.1016/0304-386x(89)90039-x

Toirac, J. (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la República Dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(3), 293-334.

Wackerly, D., Mendenhall III, W. y Scheaffer, R. (2008). *Estadística matemática con aplicaciones*. CENGAGE Learning.

Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson.

Wills, B. y Finch, J. (2016). Particle Size Analysis. *Wills' Mineral Processing Technology*, 91–107. https://doi:10.1016/b978-0-08-097053-0.00004-2

Witte, R. y Witte, J. (2017). *Statistics*. Wiley

Yokogawa. (2014). *Back to the pHture: pH and ORP Learning Handbook.* https://web-material3.yokogawa.com/TI12B00A20-01E_pH_Handbook.eu.pdf

Yue, G., Guezennec, A. y Asselin, E. (2016). Extended validation of an expression to predict ORP and iron chemistry: Application to complex solutions generated during the acidic leaching or bioleaching of printed circuit boards. *Hydrometallurgy*, *164*, 334-342. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.027

Yue, G., Olvera, O. y Asselin, E. (2014). Speciation of the H_2SO_4-$Fe_2(SO_4)_3$-$FeSO_4$-H_2O system and development of an expression to predict the redox potential of the Fe^{3+}/Fe^{2+} couple up

to 150 ◦C. *Hydrometallurgy*, *147-148*, 196-209. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.008

Yu, A. B., & Standish, N. (1990). A study of particle size distributions. *Powder Technology*, *62*(2), 101–118. doi:10.1016/0032-5910(90)80073-8

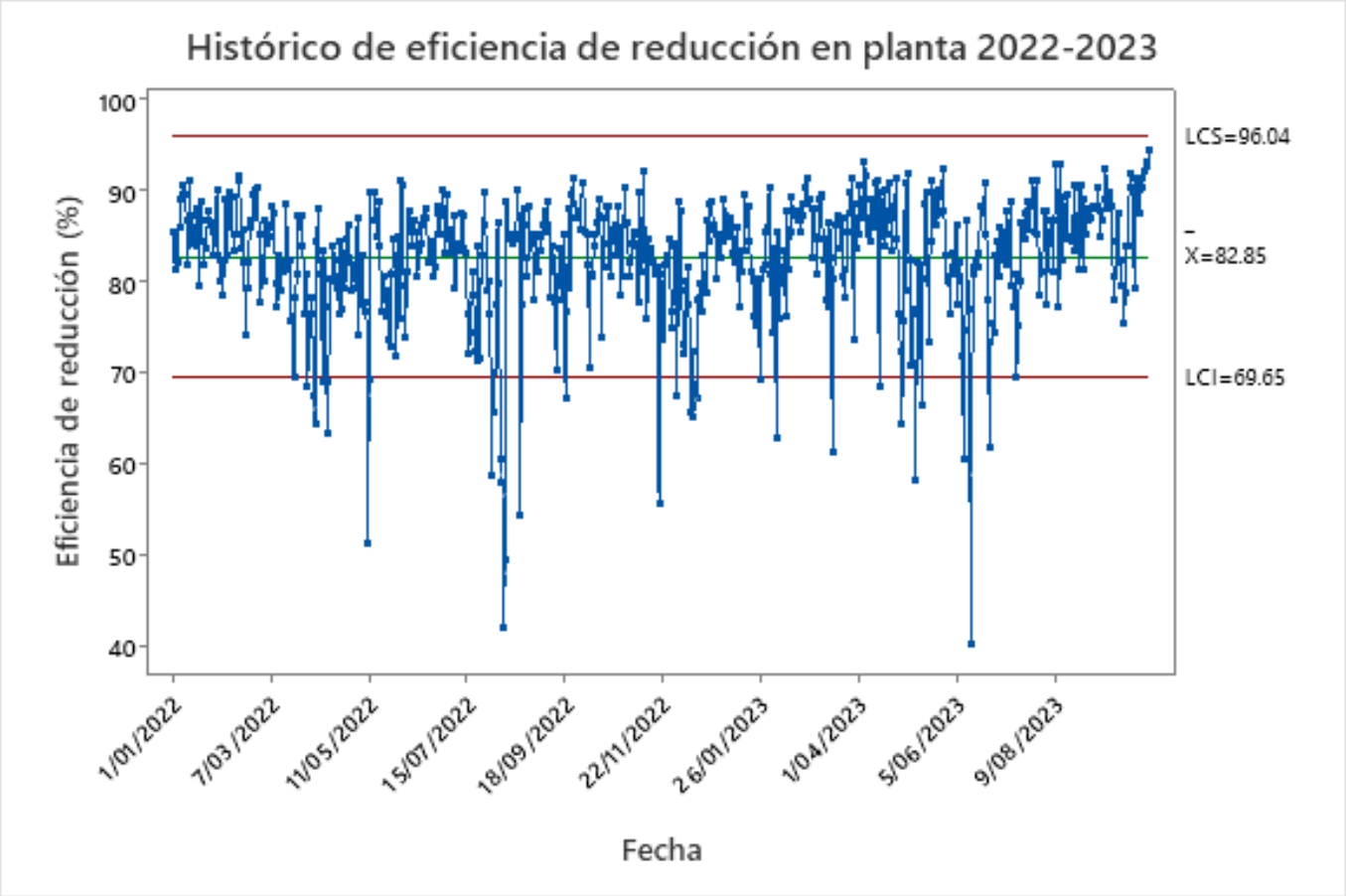
Zhi, X., Yuexin, S., Jin, M., Lujie, Z. y Zijian, D. (2017). Research on the Pearson correlation coefficient evaluation method of analog signal in the process of unit peak load regulation. 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 522-527. https://doi.org/10.1109/icemi.2017.8265997

9. Anexo

9.1. Eficiencia de reducción en Nexa Resources

Figura 9-1

Eficiencia de reducción en la refinería Nexa Resources durante 2022-2023

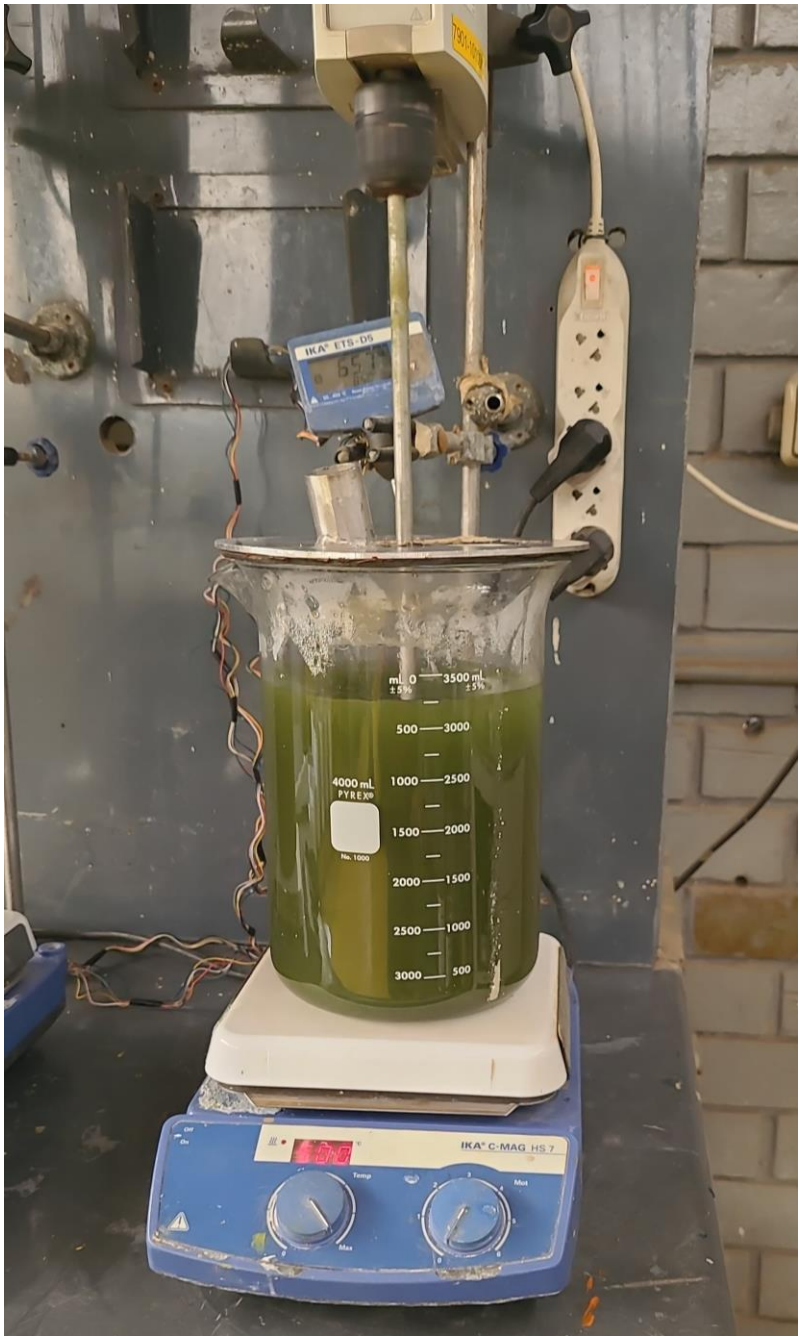


Nota. Elaboración propia.

9.2. Procedimiento experimental

Figura 9-2

Simulación de etapa de reducción ácida en laboratorio



Nota. Elaboración propia.