



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Influencia de gangas, resistencia a compresión uniaxial
y alteración hidrotermal en el tonelaje horario de
molienda en minera Gold Fields**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geometalurgia

AUTOR

Julio Alejandro CASTRO ANDRADE

ASESOR

Dr. Jesús Alberto TORRES GUERRA

Lima, Perú

2023



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

Castro, J. (2023). *Influencia de gangas, resistencia a compresión uniaxial y alteración hidrotermal en el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Julio Alejandro Castro Andrade
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46701853
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0507-6680
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jesús Alberto Torres Guerra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07219691
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8186-5249
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Alfonso Alberto Romero Baylón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	31625834
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jaime César Mayorga Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10369482
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Enrique Soto Yen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	03493146
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.4.1. Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cajamarca Provincia: Hualgayoc Distrito: Hualgayoc Urbanización: Paraje Coimolache 9045 Sector Predio La Jalca Hualgayoc Latitud: -6.76556 Longitud: -78.6119
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería de procesos: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02 Geociencias, Multidisciplinar: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los diecisiete días del mes de julio del año dos mil veintitres, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000423-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 12 de julio del 2023, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«INFLUENCIA DE GANGAS, RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL Y ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL TONELAJE HORARIO DE MOLIENDA EN MINERA GOLD FIELDS»

Presentado por el Bach. **JULIO ALEJANDRO CASTRO ANDRADE**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20200039548, de fecha 04 de diciembre del 2020, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy bueno (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA** al Bach. **JULIO ALEJANDRO CASTRO ANDRADE**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN
Presidente

DR. JORGE ENRIQUE SOTO YEN
Secretario

DR. JAIME CÉSAR MAYORGA ROJAS
Miembro

DR. JESÚS ALBERTO TORRES GUERRA
Asesor

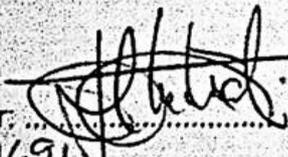


UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA, METALURGICA Y GEOGRAFICA
UNIDAD DE POSGRADO

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Mg. JESÚS ALBERTO TORRES GUERRA en mi condición de asesor acreditado con el Número de Dictamen N°000230-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es « INFLUENCIA DE GANGAS, RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL Y ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL TONELAJE HORARIO DE MOLIENDA EN MINERA GOLD FIELDS» presentado por el Bachiller JULIO ALEJANDRO CASTRO ANDRADE para optar el grado de Magister en GEOMETALURGIA 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 el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 10 % 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 del grado correspondiente.

Firma del Asesor: .....

DNI: 07219691.....

Nombres y apellidos del asesor:

Jesús Alberto Torres Guerra.....

Huella Digital



DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mi familia por su cariño, por sus enseñanzas, y apoyo durante toda mi vida y haberme conducido por el camino correcto.

AGRADECIMIENTOS

A la plana docente y directivos de la UPG de la FIGMMG de la UNMSM por difundir los conocimientos necesarios y dar los lineamientos para hacer un Perú mejor cada día.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	3
1.2.1. Problema General.....	3
1.2.2. Problemas Específicos.....	3
1.3. Justificación Teórica.....	4
1.4. Justificación Práctica.....	4
1.5. Objetivos de la Investigación	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Marco Filosófico o epistemológico de la investigación.....	5
2.2. Antecedentes de la investigación.....	6
2.3. Bases Teóricas	12
2.3.1. Depósitos de pórfido.....	12
2.3.2. Depósitos de pórfido de cobre	13
2.3.3. Cerro Corona Depósitos tipo pórfido Cu – Au.....	17
2.3.4. Índices de Alteración.....	19
2.3.4.1. Índice de alteración de Ishikawa.....	19
2.3.4.2. Índice de Kishida y Kerrich	20
2.3.4.3. Índice de alteración hidrotermal de Bruce Gemmell	21
2.3.5. Caracterización mineralógica.....	22
2.3.5.1. Caracterización por análisis de Imagen.....	22
2.3.5.2. Caracterización Mineralógica BULK	23
2.3.5.3. Difracción de rayos X (XRD).....	24

2.3.6.	Resistencia a la rotura de la roca	25
2.3.6.1.	Prueba de fuerza	25
2.3.6.2.	Prueba de resistencia a la compresión (UCS)	26
2.3.6.3.	Prueba de compresión uniaxial	27
2.3.6.4.	Prueba de carga puntual (PLT)	28
2.3.7.	Medidas de estrés por conminución	30
2.3.7.1.	Prueba de Bond.....	30
2.3.7.2.	Índice de trabajo del molino de bolas Bond (BWI).....	30
2.3.7.3.	Prueba de caída de peso JK (JKDWT).....	31
2.3.7.4.	Prueba de rotura por impacto	32
2.3.7.5.	Prueba de rotura por abrasión.....	33
2.3.7.6.	Índice de potencia del molino semi autógeno (SPI).....	34
CAPITULO III: METODOLOGÍA		36
3.1.	Tipo y Diseño de Investigación	36
3.2.	Unidad de análisis.....	37
3.3.	Población de estudio.....	37
3.4.	Tamaño de muestra	39
3.5.	Selección de muestra.....	40
3.6.	Técnicas de recolección de Datos	41
3.6.1.	Técnicas	41
3.6.2.	Análisis de laboratorio.....	42
3.6.3.	Instrumentos	42
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		43
4.1.	Análisis, interpretación y discusión de resultados	43
4.1.1.	Análisis e interpretación de resultados	43
4.1.1.1.	Análisis mineralógico de gangas	44
4.1.1.2.	Índice de Alteración Hidrotermal (IA)	49
4.1.1.3.	Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS)	52
4.1.1.4.	Modelamiento del Sag Power Index (SPI)	54
4.1.1.5.	Relación empírica para la conversión de tiempo del Sag power index (SPI) a Tonelaje por Hora (TPH)	58
4.1.2.	Discusión de resultados.....	59
4.2.	Pruebas de hipótesis.....	62
4.3.	Presentación de Resultados	64
CONCLUSIONES		70

RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
ANEXOS.....	74

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Recientes sobrecostos de CAPEX de importantes proyectos mineros.....	3
Tabla 2. Valores típicos de resistencia uniaxial (en MPa) para nueve tipos de rocas comunes.....	27
Tabla 3. Resistencia media a la tracción y a la compresión para determinados tipos de rocas sedimentarias.	28
Tabla 4. Rangos de dureza metalúrgica.	34
Tabla 5. Tabla de porcentaje de variabilidad de dureza por etapa de proyecto (Morrell, 2015).....	40
Tabla 6. Distribución de especies de gangas del depósito	44
Tabla 7. Resumen de valores para la prueba T student.	62
Tabla 8. Análisis T student para varianzas diferentes.....	63
Tabla 9. Matriz de correlación para componentes principales.	64
Tabla 10. Resumen de valores de correlación para modelo SPI.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución general de pórfidos de cobre.....	14
Figura 2.Distribución litológica de los pórfidos de cobre en el mundo.	15
Figura 3.Patrón generalizado de zonificación de alteración-mineralización para depósitos de pórfido de cobre telescópico, basado en la geología del anfitrión y el estilo del depósito.	17
Figura 4. Geología regional de Cerro Corona.	18
Figura 5.Campaña de Drill Hole en análisis de imagen Core Scam.	23
Figura 6.Diagrama de funcionamiento del QemScam.	24
Figura 7.Acercamiento de una litología gris clara de grano fino (B) entremezclada con una unidad más oscura, ultramórfica y magmática (A) y las identificaciones de los minerales realizados por el analizador TERRA XRD.	25
Figura 8.Prueba de caída de peso.	33
Figura 9.Diagrama de flujo de circuito para el software IGS en función con los parámetros SPI y BWI.	36
Figura 10.Flujograma de representación de variables dependientes e independientes.....	37
Figura 11. Mapa de Locación de la compañía minera Gold Fields.	38
Figura 12.Ubicación de la mina Cerro Corona y la geología regional.	38
Figura 13. Relación entre selección de muestras y el porcentaje de variabilidad.....	39
Figura 14.Plano de selección general de muestras en campo.	41
Figura 15. Ocurrencia mineralógica de gangas.	46
Figura 16.Microscopia electrónica de partícula de cuarzo.	47
Figura 17.Microscopia electrónica de partícula de feldespato y plagioclasa.	47
Figura 18.Marco de referencia del modelamiento de la espectroscopia de infrarrojo cercano (Estadísticos de correlación: R^2 y error promedio: SEE).	48
Figura 19.Imagen de clasificación del índice de alteración Hidrotermal.	49
Figura 20.Diagrama GER/PER de los dominios de alteración respecto del Work Index.....	50
Figura 21.Distribución de Alteraciones Hidrotermales.	50

Figura 22.Marco de referencia del modelamiento del Índice de Alteración (Estadísticos de correlación: R2 y error promedio: SEE).....	51
Figura 23.Plano de valores de Ucs para las campañas de muestreo 2018, 2019 y 2020.	53
Figura 24.Imágenes de muestras de mano para ensayo de carga puntual.	53
Figura 25.Distribución de ensayos de carga puntual en valores de Mega Pascales.	54
Figura 26.Influencia del Ratio Metalúrgico sobre el Sag Power Index.	55
Figura 27.Influencia de la resistencia a la compresión uniaxial sobre el Sag Power Index.....	55
Figura 28.Influencia de los Dominios de Alteración sobre el Work Index. ...	56
Figura 29.Marco de referencia del modelamiento del Sag Power Index (Estadísticos de correlación: R2 y error promedio: SEE).....	57
Figura 30. Influencia del sag power index en el tonelaje horario del molino SAG.	58
Figura 31.Rango de análisis granulométrico para el periodo 2021 - 2030... ..	60
Figura 32. Box Plot comparativo de valores reales de tonelaje horario respecto del modelo.....	63
Figura 33.Grafica de sedimentación para componentes principales.....	65
Figura 34.Dendograma para componentes principales.	66
Figura 35.Diagrama de Pareto para las significancias del modelo SPI.....	67
Figura 36.Diagrama waterfall para la significancia de variables independientes.....	68
Figura 37.Grafica de residuos del modelo SPI.	69
Figura 38.Gráfico de dispersión para el modelo de tonelaje horario SAG. ...	70

RESUMEN

La molienda de minerales cumple un rol importante en la liberación de los minerales valiosos de las gangas para poder ser concentrado. Esta liberación depende de la energía que necesita el circuito para poder vencer la dureza metalúrgica de la roca, la cual está relacionada con la resistencia, la composición mineralógica, alteración hidrotermal, textura y frecuencia de fracturas. Estas situaciones son de común interés para depósitos del tipo pórfido de cobre (70% del cobre a nivel mundial), que tienen circuitos de molienda convencional, semi autógena y/o una combinación de estas dos. Los estudios recientes en geometalúrgica han demostrado la necesidad de comprender la variabilidad propia del mineral y su efecto en el procesamiento. Las metodologías desarrolladas ahora se están adaptando para su incorporación en bases de datos geológicas y metalúrgicas, con el objetivo de vincular la mineralogía del mineral con el rendimiento del consumo específico de energía y el beneficio. Sin embargo, los desarrollos actuales están impulsados por correlaciones estadísticas más que por una comprensión fundamental del depósito. Esta tesis tiene como objetivo proponer una nueva metodología de modelamiento geometalúrgico de tonelaje para la comprensión de la variabilidad del depósito expresado en la mineralogía, resistencia de roca, alteración hidrotermal y pruebas de rendimiento en molienda, midiendo de esta manera su impacto en el tonelaje horario procesado para circuito de molienda. Este modelamiento geometalúrgico de tonelaje introduce parámetros intrínsecos de la génesis del yacimiento para el procesamiento de minerales basado en el rendimiento de molienda y el grado de alteración hidrotermal. Esto proporciona una relación de la génesis del pórfido con la resistencia de la roca y el comportamiento de rotura por impacto. Se utilizó el ensayo de carga puntual para medir la resistencia de la roca. La relación entre el consumo específico de energía y las características geológicas de la roca encajante se estudia utilizando la geoquímica, el espectro de infrarrojo cercano (NIR) y la evaluación cuantitativa de materiales mediante microscopio (QSCAM). La tesis establece que existe una relación del 96.80% de correlación entre el índice de alteración hidrotermal, esfuerzos de compresión uniaxial y las gangas de formación de la

geología primaria en el pórfido cobre sobre las 651 pruebas de rendimiento de moliendabilidad expresada en tonelaje horario procesado, para un 95% de confiabilidad con valores t de student de 0.85 para un valor crítico de 1.96. El modelamiento geometalúrgico de tonelaje de este estudio se puede utilizar para desarrollar las relaciones entre las características geológicas de formación del yacimiento y el rendimiento de la molienda en planta concentradora, proporcionando una técnica novedosa para propagar las características de moliendabilidad de variables no aditivas en el modelo geometalúrgico.

ABSTRACT

Mineral grinding plays an important role in freeing valuable minerals from gangues so that they can be concentrated. This release depends on the energy that the circuit needs to be able to overcome the metallurgical hardness of the rock, which is related to its resistance, mineralogical composition, hydrothermal alteration, texture, and fracture frequency. These situations are of common interest for porphyry type copper deposits (70% of the world's copper), which have conventional or semi-autogenous grinding circuits and/or a combination of these two. Recent studies in geometalurgical have demonstrated the need to understand the variability of the mineral itself and its effect on processing. The developed methodologies are now being adapted for incorporation into geological and metallurgical databases, with the goal of linking ore mineralogy to specific energy consumption and beneficiation performance. However, current developments are driven by statistical correlations rather than a fundamental understanding of the deposit. This thesis aims to propose a new tonnage geometalurgical modeling methodology for understanding the variability of the deposit expressed in mineralogy, rock resistance, hydrothermal alteration and milling performance tests, thus measuring its impact on hourly tonnage. processed for grinding circuit. This tonnage geometalurgical modeling introduces intrinsic parameters of reservoir genesis for mineral processing based on milling yield and degree of hydrothermal alteration. This provides a relationship of the genesis of the porphyry with the strength of the rock and the behavior of failure by impact. The point load test was used to measure the resistance of the rock. The

relationship between the specific energy consumption and the geological characteristics of the host rock is studied using geochemistry, the near-infrared spectrum (NIR) and the quantitative evaluation of materials by microscope (QSCAM). The thesis establishes that there is a 96.80% correlation relationship between the hydrothermal alteration index, uniaxial compression stresses and the formation gangues of primary geology in porphyry copper over the 651 millability performance tests expressed in processed hourly tonnage, for 95% reliability with student's t values of 0.85 for a critical value of 1.96. The tonnage geometallurgical modeling of this study can be used to develop the relationships between reservoir formation geological characteristics and concentrator mill milling performance, providing a novel technique to propagate the grindability characteristics of non-additive variables in the geometallurgical model.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

Actualmente el sector minero en el Perú busca maximizar la producción, mejorar la productividad, racionalizar los procesos y mejorar la rentabilidad de los beneficios de sus operaciones. En esta medida los principales problemas operacionales en el procesamiento de los minerales es el bajo tonelaje horario procesado en planta debido a la alta competencia del mineral y al desconocimiento de la génesis del yacimiento. De acuerdo con el panorama mundial, la importancia de la predictibilidad del tonelaje horario radica según Michaux et al (2019) “En el riesgo en el rendimiento esperado lo cual se traduce en un exceso del gasto de capital (CAPEX) o del dinero necesario para construir y poner en marcha una operación minera hasta el punto en que pueda comenzar a producir un concentrado de metal vendible. La Tabla 1 a continuación muestra un ejemplo de varios sobrecostos de CAPEX recientes (Noort y Adams 2006). Estos excesos de CAPEX son una consecuencia de no comprender lo que realmente se requería para producir ingresos económicamente viables de estos depósitos”.¹

Como lo señala Gazanfer et al (2018) “Los desarrollos recientes en los estudios integrados entre la variabilidad del mineral y el procesamiento en molienda han impulsado la necesidad de comprender mejor la génesis de los yacimientos. Como resultado, las metodologías desarrolladas ahora se están adaptando para su incorporación en la base de datos geológicas y metalúrgicas, con el objetivo de vincular la mineralogía con el rendimiento de la trituración y el beneficio. Sin embargo, los desarrollos actuales están impulsados por correlaciones estadísticas más que por una comprensión fundamental”.²

¹ Michaux, S. (2019, 5 11). How to Set Up and Develop a Geometallurgical Program. Amira. doi:10.13140/RG.2.2.16170.24005

² Gazanfer, B. (2018, 12 21). Development of a correlation between mineralogy, rock strength measures, and breakage of Copper Porphyries. Queensland, Brisbane, Australia. Retrieved 11 11, 20, from <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:413846>

Existe evidencia en lo mencionado por Díaz et al (2018) “En conminución de minerales, existen dos grandes procesos: chancado y molienda. Mientras el chancado tiene por objetivo reducir de tamaño las partículas, en la molienda se busca alcanzar un grado de liberación tal que los procesos posteriores de concentración sean efectivos. Uno de los grandes problemas de las operaciones de conminución es el alto valor económico que conlleva su aplicación, tanto por el consumo energético como por el consumo de insumos, llegando a representar entre el 30 y el 50% de los costos operacionales de un proyecto minero”.³ En el Perú según Cáceres et al (2018) “La implementación de un estudio del mineral basado en la caracterización mineralógica y la medida de resistencia a la roca junto a un sistema de control y automatización para optimizar los procesos de planta puede llevar a que los proyectos mineros que procesan desde 100,000 TM por día incrementen la recuperación entre 1% y 3%, que traducido en ingresos extras puede representar hasta US\$ 50 millones para estas compañías”⁴. En cerro corona este problema se traduce, por lo tanto, en determinar las variables que influyen en la predictibilidad del tonelaje horario de molienda.

³ Díaz, E. (2018, 07 20). Modelamiento Geometalúrgico Del Consumo De Medios De Molienda Basado En Técnicas De Caracterización Avanzada. Santiago de Chile, Chile. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147418>

⁴ Cáceres, S. (2018, 11 10). Influencia Del Modelo Geometalúrgico Para La Optimización De Los Procesos De Explotación Y Beneficio Del Au En El Yacimiento Don Marcelo De La Provincia De Recuay, Ancash - 2017. Huancavelica, Huancavelica, Perú. Retrieved 11 01, 20, from https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNH_ca341864a0270cc522b65ffc5fb8fb19

Tabla 1

Recientes sobrecostos de CAPEX de importantes proyectos mineros

Proyecto	Compañía	Presupuesto de factibilidad	Costo Real/Pronosticado
Ravensthorpe/ Yabilu Expansion	BHP Billiton	A\$ 1.4 Billion	30%
Spence (Chile)	BHP Billiton	US\$990 millon	10%
Telfer Mine	Newcrest	A\$1.19 billion	17.50%
Stanwell Magnesium	AMC	A\$1.3 billion	30%
Boddington	Newmont	A\$866 million	100%
Goro-Project (Indonesia)	Inco	US\$1.45 billion	15%
Prominent Hill	Oxiana	A\$350 million	51%

Fuente: Adaptado de Noort y Adams 2006

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿De qué manera las gangas, la resistencia a compresión uniaxial y alteración hidrotermal, influyen en el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields?

1.2.2. Problemas Específicos

- a. ¿De qué manera las gangas influyen en el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields?
- b. ¿De qué manera influye la resistencia a la compresión uniaxial sobre el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields?
- c. ¿Por qué, la alteración hidrotermal influye en el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields?

1.3. Justificación Teórica

Elaborar modelo geometalúrgico de competencia para la predicción del tonelaje horario antes de que el mineral sea procesado por ser de suma importancia, porque permitirá predecir, planificar, optimizar el ritmo de producción (toneladas por hora) y beneficio con un grado de precisión y certeza, para evitar problemas en el diseño y planeamiento de las operaciones mineras. Además, permitirá anticiparnos en la búsqueda de estrategia para su mejor procesamiento en planta concentradora.

1.4. Justificación Práctica

Entre las justificaciones prácticas tenemos:

- Lo que brinda este trabajo de investigación es permitir cambios significativos en los procesos productivos dentro de la empresa minera significando ahorros importantes en los costos de producción que se reflejen de alguna u otra manera en un bienestar socioeconómico para sus trabajadores y para las comunidades que se ubican dentro del entorno del proyecto.
- Con el presente trabajo de investigación se proyecta realizar una optimización en el consumo energético en la etapa de conminución de mineral, disminuyendo de tal manera el impacto de la gestión energética. Además de la disminución en la generación de dióxido de carbono.

1.5. Objetivos de la Investigación

1.5.1. Objetivo General

Evaluar la influencia de gangas, resistencia a compresión uniaxial y alteración hidrotermal sobre el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Determinar las gangas que influye sobre el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields.
2. Calcular el valor de resistencia a compresión uniaxial que influye sobre el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields.
3. Determinar la influencia de la alteración hidrotermal en el tonelaje horario de molienda en minera Gold Fields.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Filosófico o epistemológico de la investigación

La geometalúrgia es una integración de la información, minera, geológica, metalúrgica y económica que tienen como finalidad maximizar el valor neto actual de un yacimiento. En la geometalúrgica aplicada, se busca predecir el comportamiento metalúrgico de los minerales en función de sus atributos geológicos y las respuestas metalúrgicas a pruebas en condiciones estándar que sirve para realizar el escalamiento metalúrgico a una planta industrial (Danish, 2017).

Considerando que la epistemología es una rama de la filosofía mientras que el método científico es un procedimiento que seguimos aplicando a la ciencia, en la presente investigación abordaremos conceptos y metodologías de predicción del tonelaje horario procesado en una molienda semi autógena, lo cual aún no ha sido aplicado en nuestro país, sin embargo, son ampliamente estudiados individualmente para cada caso particular.

En el Perú debido al cinturón del fuego del pacifico se tienen formaciones geológicas muy complejas, que conllevan a tener ensambles mineralógicos de muy difícil liberación, lo cual no hacen rentable la aplicación de los métodos tradicionales de molienda y su predicción del mismo fenómeno, por lo tanto, incidiremos en adoptar una metodología holista que se centre en los objetivos

como logros sucesivos de un proceso continuo, más que como un resultado final.

A través del ciclo holístico de explorar, describir, comparar, analizar, explicar, predecir, proponer y confirmarse se describirá los métodos de aplicación, respecto a la construcción del conocimiento científico, es decir, la forma cómo éste ha objetivado, especializado y otorgado un status de cientificidad al mismo; pero a su vez, el reconocimiento que goza este tipo de conocimiento por parte de la comunidad científica.

Finalmente, la geometalúrgica aplicada respecto a la predictibilidad del tonelaje utiliza a la estadística como herramienta para aplicar el conocimiento geológico del yacimiento de manera cuantitativa hacia el procesamiento del mineral. (Dianderas Smith & Rivera León, 2018).

2.2. Antecedentes de la investigación

(Gazanfer, 2018), titulado: Desarrollo de una correlación entre mineralogía, medidas de resistencia de la roca y rotura de pórfidos de cobre.

El objetivo general fue: Definir la alteración y las variabilidades litológicas relevantes para el procesamiento utilizando proporciones de minerales clave y destrucción de textura causada por la formación de minerales

En este trabajo se menciona que el papel de la trituración es reducir el tamaño del mineral para que los minerales valiosos liberados de la ganga. La eficacia del paso de trituración está relacionada con la resistencia de la roca, que está controlada por los minerales que la componen, la abundancia relativa de minerales, la textura, la frecuencia de fracturas y sus asociaciones. La tesis establece que existe una relación entre el índice de alternancia del proceso de cobre pórfido propuesto y la resistencia de la roca. Los métodos de este estudio se pueden utilizar para desarrollar las relaciones entre las características geológicas primarias y la resistencia de la roca; proporcionando una técnica novedosa y poderosa para propagar las características de rotura en el modelo geológico de un yacimiento.

Se determinó que el sistema de formación de mineral de pórfido de cobre tiene su propia armonía y espacio mineral. Ciertas litologías son reemplazadas por ciertos minerales de alteración que permiten las condiciones químicas adecuadas para el depósito del cobre. No es una coincidencia que la mayoría de los pórfidos de cobre estén alojados en pórfidos de feldespato de cuarzo, cuya composición mineralógica general del pórfido de feldespato de cuarzo, plagioclasa, feldespato de potasio y biotita.

(Wilkie, 2021), titulado: Evaluación rápida del potencial de clasificación de minerales de pórfido de cobre mediante el modelado de texturas y distribuciones de grados.

El objetivo general fue: Generar un modelo de distribución logarítmica normal refinado para estimar la distribución de ley de partículas de un mineral a partir de mediciones de la ley media de mineral de sulfuro y la ley de mineral de sulfuro de modo adquirida a partir de partículas gruesas.

El estudio se efectuó una evaluación rápida del potencial de clasificación de minerales de pórfido de cobre mediante el modelado de texturas y distribuciones de grados. Los objetivos definidos fueron desarrollar un modelo matemático para estimar la dimensión de la textura del mineral de sulfuro a partir de mediciones de la ley media de sulfuro mineral y el tamaño medio de grano del mineral de sulfuro a partir de mediciones adquiridas de partículas gruesas, además de un nuevo modelo matemático para estimar la dimensión de la textura del mineral de sulfuro a partir de mediciones de la ley media de sulfuro mineral y el tamaño medio de grano del mineral de sulfuro a partir de mediciones adquiridas de partículas gruesas.

Los resultados obtenidos fueron modelados log normal mostró que, con la excepción de dos fracciones de tamaño, las distribuciones de grado de partículas medidas siguieron de cerca las estadísticas log normal que validaron el proceso de modelado log normal que se desarrolló en la tesis, además evidenciaron el orden de un atributo directo de la forma de la distribución logarítmica normal con el grado de modo que determina cuántas partículas de ganga liberadas y casi liberadas estaban presentes en la

distribución, mientras que la posición del grado medio determinaba cuánta falta de homogeneidad estaba presente en la distribución.

(Mwanga, 2020), titulado: Métodos de prueba para caracterizar el comportamiento de la trituración del mineral en geometalúrgia.

El objetivo general fue: La mineralogía define las propiedades de trituración y el número de pruebas necesarias para la caracterización geometalúrgica de un cuerpo mineralizado puede reducirse significativamente al conocer la mineralogía.

La metodología comprende en caracterizar el comportamiento de la trituración del mineral en geometalúrgia. Los objetivos fueron determinar La mineralogía define las propiedades de trituración y el número de pruebas necesarias para la caracterización geometalúrgica de un cuerpo mineralizado puede reducirse significativamente al conocer la mineralogía, además de definir las propiedades de trituración y el número de pruebas necesarias para la caracterización geometalúrgica de un cuerpo mineralizado puede reducirse significativamente al conocer la mineralogía.

Los resultados mostraron que La mineralogía define las propiedades de trituración hasta cierto punto y el número de pruebas necesarias para la caracterización geometalúrgica de un mineral puede reducirse significativamente al conocer la mineralogía.

(Danish, 2017), titulado: Estimación geometalúrgica de índices de trituración para depósitos de pórfido de cobre aplicando un enfoque mineralógico.

El objetivo general fue: La medición de índices de molienda para el mineral Aitik usando el método de prueba de trituración geometalúrgica.

Se realizó una estimación geometalúrgica de índices de trituración para depósitos de pórfido de cobre aplicando un enfoque mineralógico. El objetivo fue la estimación del índice de trabajo de bond mediante mineralogía modal. Los resultados encontraron correlaciones entre BWi y mineralogía modal. Se utilizó regresión lineal múltiple para predecir los valores de BWI.

Los resultados indicaron que los minerales seleccionados han cubierto una variación del 57% del BWi. En este estudio, se revisaron diferentes métodos de trituración para encontrar un método de prueba de trituración adecuado. Se utilizó el método de prueba de trituración geometalúrgica para estimar el índice de adherencia de las muestras de Aitik.

(Cáceres, 2018), titulado: Influencia Del Modelo Geometalúrgico Para La Optimización De Los Procesos De Explotación Y Beneficio Del Au En El Yacimiento Don Marcelo De La Provincia De Recuay, Ancash – 2017.

El objetivo general fue: Determinar la influencia del modelo geometalúrgico para la optimización de los procesos de explotación y beneficio del oro en el yacimiento Don Marcelo.

El estudio mostró la influencia del modelo geometalúrgico para la optimización de los procesos de explotación y beneficio del Au en el yacimiento Don Marcelo (ubicada en Recuay – Ancash). Los objetivos fueron Determinar la influencia del modelo geometalúrgico para la optimización de los procesos de explotación y beneficio del oro en el yacimiento Don Marcelo, además de determinar la influencia del análisis textural de las rocas mineralizadas en la optimización del beneficio del oro en el yacimiento Don Marcelo y conocer la importancia del estudio geoquímico en la generación del modelo geológico y en la definición de los límites del PIT. Los resultados obtenidos fueron que el modelo geometalúrgico del Yacimiento Don Marcelo tiene una influencia positiva en un 100%, esto por el nivel de conocimiento generado del yacimiento, el mismo que posibilitará el mejorar los criterios para la toma de decisiones que permitan la optimización de los procesos de explotación y beneficio del oro. Con los diferentes estudios y análisis realizados se comprobó que las rocas volcánicas presentan condiciones favorables (textura, geoquímica, mineralogía, y su comportamiento mineralógico) para optimizar los procesos cuando el proyecto pase a etapa de mina y el nivel de conocimiento de las principales texturas que presentan las rocas también influirá positivamente en un 100% para tomar decisiones acertadas, definiendo tratamientos adecuados por tipo de textura y su relación con la mineralización de Au.

El análisis textural permitió identificar las texturas brechadas y relícticas, y tienen que ver directamente con la sílice que está presente en los diferentes tipos de cuarzo identificados en el estudio petrográfico dando como resultado alteraciones en la roca tales como sílice vuggy y sílice granular donde la recuperación metalúrgica sobrepasa el 85%. Por último, permitieron definir la concentración de Au por tipo de material de acuerdo a su comportamiento geológico en tufos dacíticos, tufos andesíticos y andesitas, en los cuales la recuperación promedio es de 80.26%. Esto posteriormente permitirá delimitar los límites del PIT optimizado, empleando para ello una adecuada ley de corte para el mineral económico.

(Amelunxen, 2018), titulado: La aplicación del índice de potencia a la caracterización de la dureza del cuerpo de mineral para el diseño y optimización de circuitos de molienda autógenos.

El objetivo general fue: Desarrollar una metodología para caracterizar la dureza, en términos del Índice de Energía SAG, de un cuerpo mineralizado para el diseño y optimización del circuito de molienda.

Se estudió la aplicación del índice de potencia a la caracterización de la dureza del cuerpo de mineral para el diseño y optimización de circuitos de molienda autógenos. Los objetivos fueron desarrollar una metodología para caracterizar la dureza, en términos del índice de energía de molienda, Modelar adecuadamente la prueba SPI representando el porcentaje retenido en la fracción de malla entre 10 y 1,7 mm, respecto al tiempo como una de varias curvas exponenciales, determinando el error de estimación del consumo específico de energía. Los resultados permitieron predecir el comportamiento de una mezcla de minerales basándose únicamente en los modelos de sus minerales madre.

Se concluyó que el SPI no es un parámetro aditivo. Los estudios geoestadísticos y de mezcla deben considerar la curva completa de molienda versus tiempo si se desea un parámetro aditivo y el error combinado de una estimación de energía específica utilizando los modelos CEE, que tienen en cuenta los efectos del tamaño de alimentación, la carga circulante y el tamaño

de transferencia dentro de la ecuación de calibración primaria SPI es de aproximadamente 20 a 26 por ciento.

(Foggiatto, 2019), titulado: Enfoques de modelado y simulación para la explotación de características de componentes múltiples de minerales en circuitos de procesamiento de minerales.

El objetivo general fue: Definir las propiedades de la secuencia de componentes múltiples necesarias para rastrear las propiedades mecánicas de las secuencias de procesamiento por componente para cada estudio de caso y detallar los requisitos de datos para los flujos y modelos en cada caso.

Se realizó un enfoque de modelado y simulación para la explotación de características de componentes múltiples de minerales en circuitos de procesamiento de minerales. Los objetivos fueron definir las propiedades de la secuencia de componentes múltiples necesarias para rastrear las propiedades mecánicas de las secuencias de procesamiento por componente para cada estudio de caso y detallar los requisitos de datos para los flujos y modelos en cada caso, además de Utilizar modelos de componentes múltiples para simular circuitos de procesamiento y demostrar la capacidad de cuantificar el rendimiento de componentes individuales.

Los resultados obtenidos pudieron determinar los requisitos con respecto a las capacidades de datos, modelos y simuladores para el uso de una plataforma integrada (modelos de conminución y separación) para el modelado de múltiples componentes, además Se desarrolló y verificó las metodologías para explotar las características multicomponentes de los minerales en el modelado de procesos.

(Junhyeok & Kwangmin, 2020), titulado: Uso del rendimiento de la perforación para mejorar la eficiencia de rotura de rocas: una parte de los estudios de optimización de mina a molino en una mina de roca dura.

El objetivo general fue: Usar dos parámetros para representar las propiedades intactas de la roca para predecir la eficiencia de la trituración: resistencia a la tracción (TS) e índice de trabajo de adherencia (BWI).

El estudio del rendimiento de la perforación para mejorar la eficiencia de rotura de rocas: una parte de los estudios de optimización de mina a molino en una mina de roca dura. Los resultados obtenidos fueron determinar la fragmentación óptima de voladura y controlar la fragmentación de partículas post voladura y usar dos parámetros para representar las propiedades intactas de la roca para predecir la eficiencia de la trituración: resistencia a la tracción (TS) e índice de trabajo de adherencia (BWI).

Los resultados obtenidos fueron que al usar datos de rendimiento de perforación para estimar las características de rotura de rocas en trituración y molienda como parte de los esfuerzos de MTM, además los resultados de las pruebas de laboratorio con muestras de arenisca y piedra caliza indicaron que APR podría estar correlacionado con TS y BWI, que estaban directamente relacionados con las eficiencias de rotura de rocas en los procesos de trituración y molienda, respectivamente.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Depósitos de pórfido

El término "pórfido" en geología se refiere a una roca ígnea que contiene más del 25% de fenocristales de grano medio a grueso por volumen. El mineral fenocristal suele ser feldespatos alcalinos. El término se usa como sufijo para nombrar rocas específicas, p. pórfido de cuarzo, así como para describir la mineralización, (Foggiatto, 2019).

"Los depósitos de pórfido son depósitos grandes, de grado bajo a medio en los que los minerales primarios (hipógenos) están controlados estructuralmente de manera dominante y que están relacionados espacial y genéticamente con intrusiones félsicas a porfiríticas intermedias" (Cáceres, 2018).

"Los minerales secundarios pueden desarrollarse en zonas supergénicas enriquecidas en depósitos de pórfido de Cu por meteorización de sulfuros

primarios. Estas zonas tienen leyes de Cu significativamente más altas, lo que mejora el potencial de explotación económica” (Díaz, 2018).

2.3.2. Depósitos de pórfido de cobre

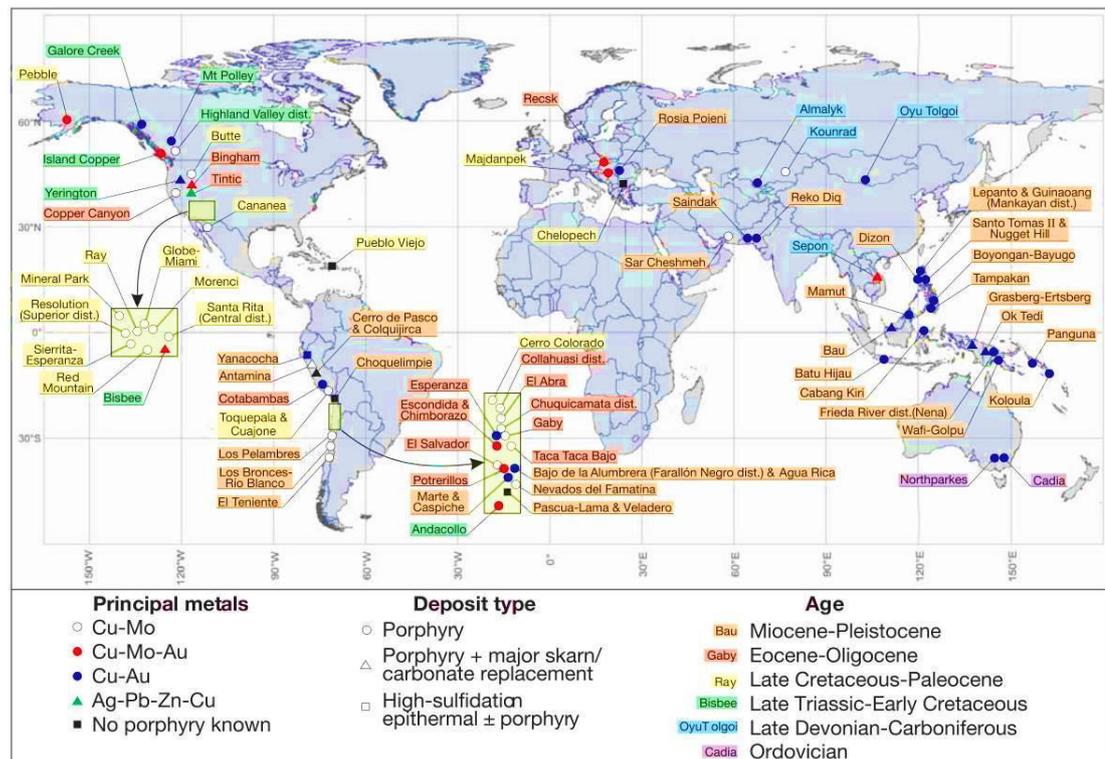
Las cifras indican que la producción mundial de minas de cobre en 2011 alcanzó más de 16 millones de toneladas (World Copper Fact Book, 2012), y aproximadamente dos tercios del cobre mundial provienen de depósitos de pórfido. Los depósitos de pórfido de cobre tienen muchos atributos distintos, incluidos múltiples eventos en su formación con los consiguientes efectos sobre la serie de reacciones entre un fluido hidrotermal y su roca huésped. Estas reacciones definen la alteración y las principales causas de la formación del mineral que proporcionan suficiente mineral concentrado portador de metales en una parte accesible de la corteza terrestre para que pueda extraerse. La abundancia promedio de Cu en la corteza terrestre es de 55 ppm y los fluidos hidrotermales proporcionan el mecanismo necesario para mejorar el contenido de cobre a grados económicos como el 0,25%.

Desde una perspectiva geológica, los depósitos de pórfido de cobre se consideran una de las clases mejor comprendidas de sistemas hidrotermales que operan sobre una cámara de magma en cristalización que puede haber invadido su estratovolcán coetáneo. (Sillitoe, 2021), define los sistemas de pórfido de cobre como grandes volúmenes (10 hasta >100 km³) de roca alterada hidrotermalmente centrada en reservas de pórfido de cobre que también pueden contener skarn, reemplazo de carbonato, alojado en sedimentos e intermedio a la base epitermal de alta sulfuración y mineralización de metales preciosos. Las partes más profundas de los sistemas de pórfido de cobre pueden contener pórfido de cobre \pm molibdeno \pm mineralización de oro en diversas cantidades (10^6 a 10^9 toneladas métricas) además de skarn de cobre, oro y/o zinc (10^6 a 10^9 toneladas métricas), mientras que sus partes menos profundas puede albergar cuerpos de mineral de oro \pm plata \pm cobres epitermales de sulfuración intermedia a alta (10^6 a 10^9 toneladas métricas). (Sillitoe, 2021) los describe como sistemas de pórfido de

cobre "jóvenes" y señala que se han generado en todo el mundo desde la era arcaica con los ejemplos meso-cenozoicos conservados más abundantemente, como se muestra en los ejemplos de la Figura 1.

Figura 1

Distribución general de pórfidos de cobre



Fuente: Porphyry Copper Deposit Model (Sillitoe, 2021).

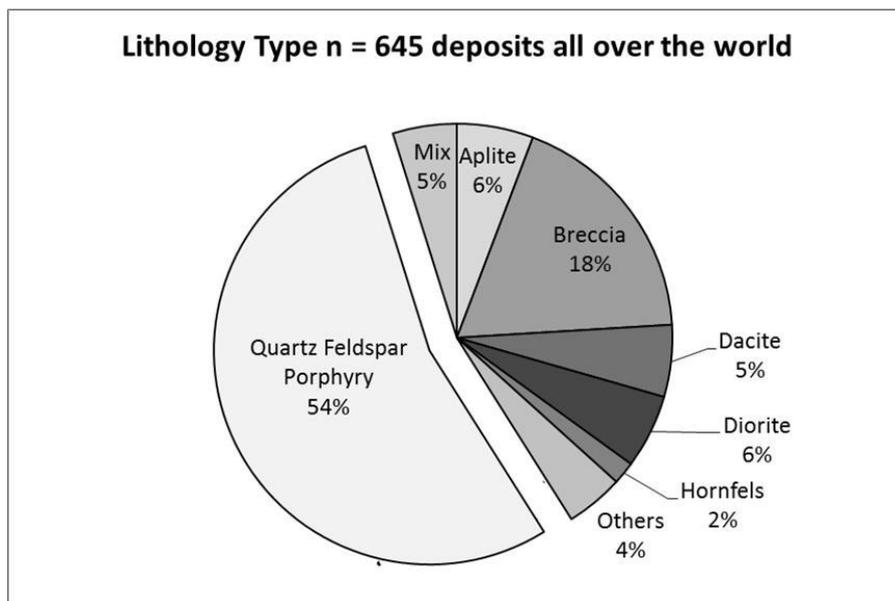
Los depósitos de pórfidos de Cu envejecidos del Eoceno-Oligoceno ubicados en Chile son uno de los importantes sistemas de pórfidos de cobre "joven". Junto con Escondida, el sistema tiene otros seis sistemas de pórfidos de cobre gigantes, a saber, Potrerillos, El Salvador, Chuquibambilla, El Abra, Collahuasi y Radomiro Tomic. Estos depósitos, alojados por intrusiones de cuarzo monzonita y granodiorita, al igual que muchos depósitos de pórfido de cobre, están alojados en pórfidos de cuarzo-feldespatos, donde la alteración-mineralización se divide en zonas desde estériles tempranos sódico-cálcicos hasta potásicos potencialmente de grado mineral, clorita-sericita y sericíticos., argílico avanzado. La mineralización de calcopirita ± bornita en muchos depósitos de pórfido de cobre se limita en gran medida a las zonas potásicas

(Sillitoe, 2021). Hay casos en los que la alteración argílica es el tipo de mineral dominante dentro del depósito, como el depósito de pórfido corona Cu-Au ubicado en Hualgayoc, en el norte de Perú.

La composición mineralógica general del pórfido de feldespato de cuarzo (en lo sucesivo, la "forma original") consiste en cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico, hornablenda y biotita. En los sistemas de formación de mineral, la mineralización se complementa con calcopirita, bornita y otros minerales secundarios de cobre, con pirita accesoria, magnetita, apatita, etc. En los depósitos de pórfido, estos conjuntos minerales son reemplazados por minerales de alteración como cuarzo, feldespato de potasio, illita, caolinita, sericita, clorita, dickita, biotita, calcita, zunyita, etc. de acuerdo con una serie de reacciones químicas (en lo sucesivo, "forma de alteración"). La distribución litológica de los pórfidos de Cu del mundo se muestra en la Figura 2, y muestra que el Pórfido de Feldespato de Cuarzo y la Brecha son las litologías dominantes.

Figura 2

Distribución litológica de los pórfidos de cobre en el mundo



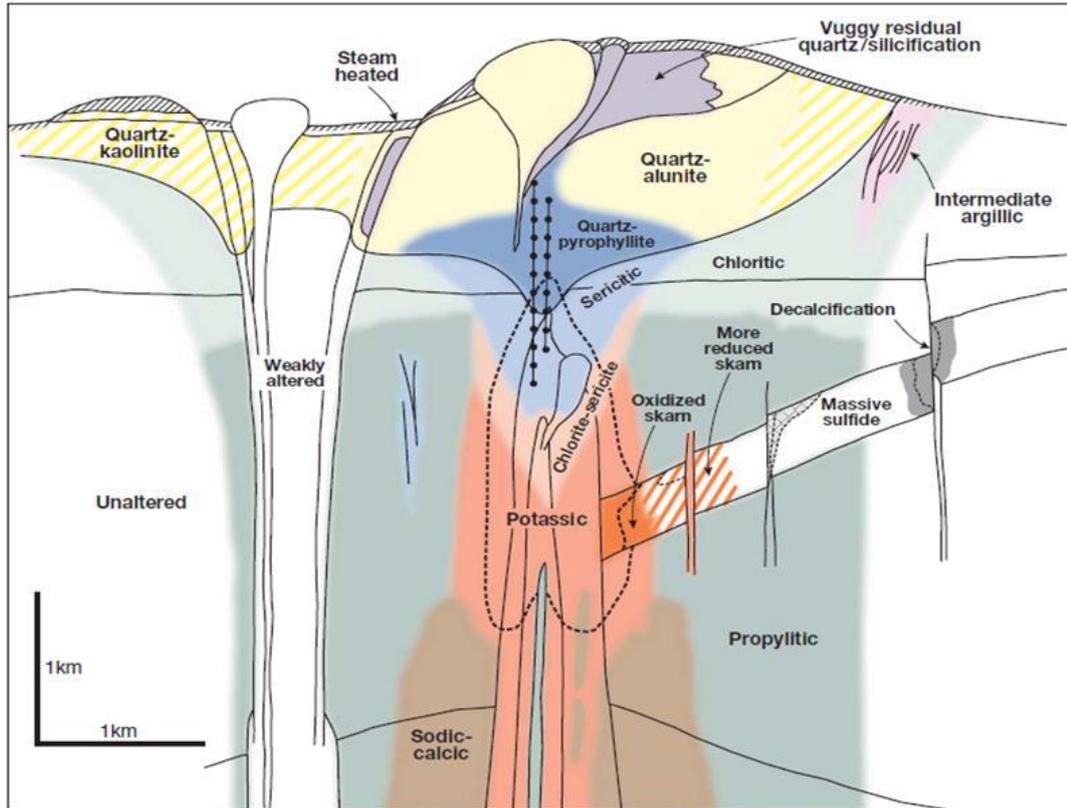
Fuente: Modificado de Porphyry Copper Deposit Model (Gazanfer, 2018).

Se cree que los magmas que forman depósitos de pórfido de cobre se generan por el derretimiento de la corteza oceánica subducida. El contenido de agua

en esta corteza se deshidrata y luego se derrite cuando se calienta la corteza oceánica. El magma penetra en la corteza inferior porque es menos denso que las rocas del manto circundante. El magma ascendente también puede comenzar a cristalizar los minerales como la plagioclasa. Estos cristales forman los fenocristales en rocas porfídicas. El agua es un componente importante que se libera del magma cuando cristaliza. El metal traído en los magmas también pueden dividirse en las salmueras, provocando el enriquecimiento de metales valiosos en estos fluidos de alta temperatura. Cuando las salmueras son expulsadas durante la fracturación, atraviesan rocas con las que ya no están en equilibrio químico. Como resultado del intercambio de componentes químicos entre la roca y el fluido conocido como "alteración hidrotermal". La alteración hidrotermal es común y ocurre desde la escala centimétrica hasta la escala kilométrica, en formas tales como halos de venas individuales y alteraciones extensivas a escala de depósitos. "En muchos depósitos de pórfido, las zonas de alteración en una escala de depósito consisten en una zona potásica interior caracterizado por biotita y / o feldespato potásico (\pm anfíbol \pm magnetita \pm anhidrita) y una zona exterior de alteración propilítica que consiste en cuarzo, clorita, epidota, calcita y, localmente, albita asociada a pirita. Las zonas de alteración fílica (cuarzo + sericita + pirita) y alteración argílica (cuarzo + illita + pirita \pm caolinita \pm esmectita \pm montmorillonita \pm calcita) pueden ser parte del patrón zonal entre las zonas potásica y propilítica, o pueden ser irregulares o tabulares, y las zonas más jóvenes podrían superponerse a alteraciones más antiguas y ensamblajes de sulfuros.

Figura 3

Patrón generalizado de zonificación de alteración-mineralización para depósitos de pórfido de cobre telescópico, basado en la geología del anfitrión y el estilo del depósito



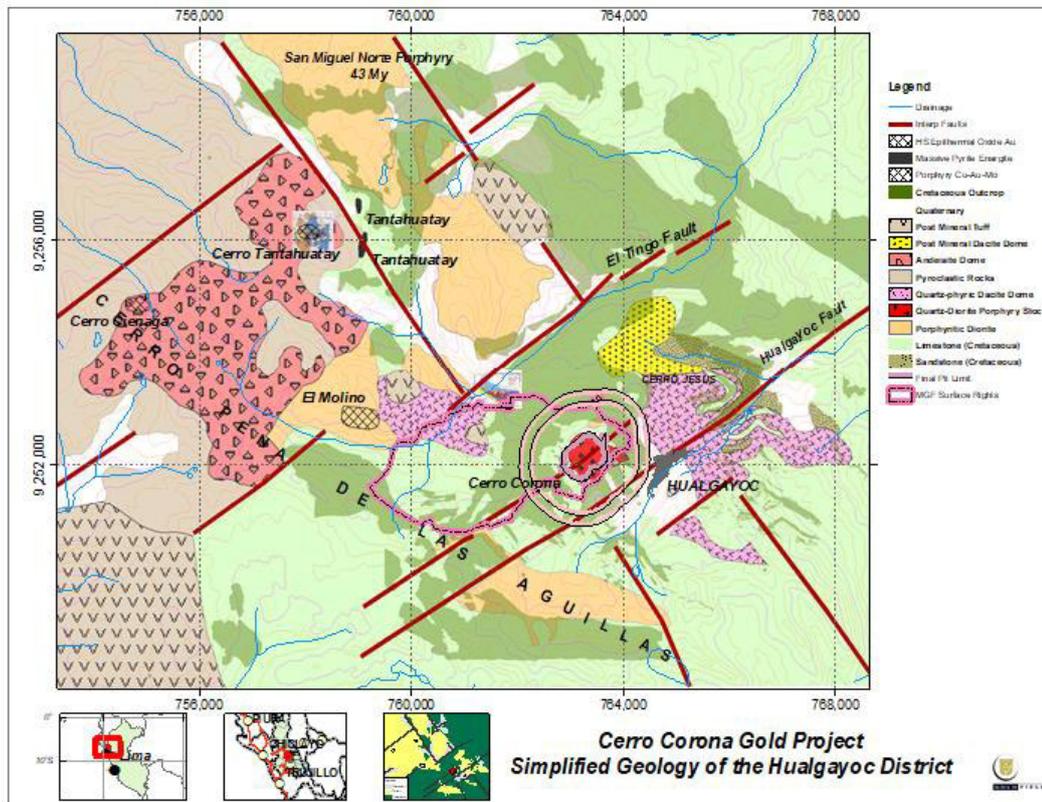
Fuente: Porphyry Copper Deposit Model (Sillitoe, 2021).

2.3.3. Cerro Corona Depósitos tipo pórfido Cu – Au

Cerro Corona es una operación minera a Tajo abierto que se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca en el norte del Perú (Figura 04), se trata de un yacimiento tipo Pórfido cobre-oro desarrollado en diorita (14.4 a 13.35 millones años) que intruye a la formación calcárea Yumagual del cretácico (Sillitoe, 2021).

Figura 4

Geología regional de Cerro Corona



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Es operada por Gold Fields La Cima S.A. desde el año 2008. A diciembre del 2019, se cuenta con recursos minerales, dentro del cono económico, en el orden de 107.22Mt @ 0.58g/t Au y 0.36% Cu.

La planta consta de un circuito de chancado primario/secundario, molienda SABC-B y celdas de flotación para recuperar concentrados de cobre con contenidos de oro como mineral accesorio. La planta empezó a operar el año 2008 con materiales mixtos (transicionales) y supérgenos de competencia mecánica suave (arcillas) y con leyes altas de cobre (zonas de enriquecimiento supergénico); el 2012 se crea el departamento de geometalúrgia, con el objetivo de maximizar las ganancias y mejorar el proceso metalúrgico.

2.3.4. Índices de Alteración

Ishikawa et al (1976). Introdujeron índices de alteración utilizando proporciones de óxido y moleculares. Spitz y Darling (1978) y Saeki y Date (1980). También se utilizaron cálculos de balance de masa (Greisen, 1967; Kranidiotis y MacLean, 1987; Pearce, 1968; MacLean, 1990), se han aplicado tentativamente las proporciones de elementos (Stanley y Madeisky, 1994) y estudios adicionales realizados por Piche y Jebrak (2003). utilizó cinco reglas fundamentales de formación de minerales basadas en una técnica de análisis de roca completa. Los índices de alteración primaria desarrollados hasta la fecha se analizan a continuación.

2.3.4.1. Índice de alteración de Ishikawa

El índice de alteración propuesto por Ishikawa mide la intensidad de la alteración mediante el uso de análisis químicos de toda la roca y calcula el agotamiento relativo de los elementos alcalinos, para lo cual la ecuación 1 es la siguiente:

$$\text{Índice de alteración} = (K_2O + Na_2O) / (K_2O + MgO) + (Na_2O + CaO) \quad (1)$$

A medida que avanza la intensidad de la alteración, aumentan las cantidades de óxido de potasio y óxido de magnesio, mientras que el contenido de óxido de sodio y óxido de calcio disminuye. El valor del índice de alteración tiende hacia 100 cuando la alteración alcanza la máxima intensidad.

El índice de alteración de Ishikawa se utiliza en varios depósitos, por ejemplo, en el estudio de Bruce Gemmell sobre el depósito de sulfuro masivo alojado en el volcán Hellyer (VHMS) en Tasmania, Australia. Este estudio indica que los valores del índice de alteración oscilan entre 2 y 97 en Hellyer VMS, y todos los promedios de los valores del índice de alteración para las diversas zonas de alteración de la pared del pie se trazan bien fuera de la caja de andesita inalterada, lo que indica cambios geoquímicos significativos durante la alteración del muro.

2.3.4.2. Índice de Kishida y Kerrich

(Kishida & Kerrich, 2018) completaron un extenso estudio sobre el depósito de oro de vetas de Kerr-Addison Archaean en Kirkland Lake, Ontario, Canadá. Desarrollaron un índice de “saturación” para monitorear la intensidad de la alteración de los carbonatos. La geoquímica de las rocas alteradas se analiza en términos del grado de saturación de ciertos elementos móviles más que en términos de ganancias o pérdidas de componentes. Se consideraron cinco parámetros principales en sus índices; estos son el CO₂, el enriquecimiento de metales alcalinos, la distribución de tipos de alteración, la movilidad de otros elementos y el balance de masa químico.

Según el estudio, la secuencia de alteración se caracteriza por una introducción masiva de CO₂ y cantidades variables de CaO y metales alcalinos en las rocas; se eliminan el agua y el hidrógeno. El grado de enriquecimiento de las rocas en CO₂ y metales alcalinos se puede controlar mediante índices de saturación como las relaciones molares definida por la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\text{Índice de alteración} = (3K + Na) / Al \quad (2)$$

Los picos de contenido de oro corresponden a puntos donde los índices de saturación $3K / Al$ y Na / Al se cruzan, indicativos de los tipos de alteración carbonato-moscovita y carbonato-albita respectivamente. Este cruce sugiere un vínculo genético entre el enriquecimiento de oro y la alteración hidrotermal. El estudio se completó en los depósitos de Lode-Au de Archaean que están ubicados en los cinturones de piedra verde de todas las áreas de escudo de Archaean y representan casi el 20% de la producción mundial de Au (Roberts, 1987). A pesar de la similitud de alteración hidrotermal con diferentes modelos de mineralización, la deposición de pórfido de cobre tiene un mecanismo diferente al de los modelos de depósito de Au tipo veta de Archaean.

2.3.4.3. Índice de alteración hidrotermal de Bruce Gemmell

Bruce Gemmell y sus colaboradores desarrollaron un índice de alteración para medir la intensidad del reemplazo de sericita, clorita, carbonato y piritita de feldespatos sódicos y vidrio asociado con una alteración hidrotermal.

Gemmell identificó dos limitaciones en el uso del índice de alteración de Ishikawa (IA): el índice de Ishikawa no tiene en cuenta la alteración de carbonatos, que puede ser significativa en algunos sistemas de alteración de depósitos de sulfuros masivos (VHMS) alojados en un volcán y puede conducir a una disminución en la IA, incluso cuando la intensidad de la alteración es alta (Large, Gemmell, Paulick, 2001). En otras palabras, la IA no permite la separación de clorita de la alteración rica en sericita, que es un tipo de alteración común en depósitos masivos de sulfuros. Por lo tanto, se desarrolló el índice de clorito-carbonato-piritita:

$$\text{Índice de alteración} = 100 (\text{MgO} + \text{FeO}) / (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

(3)

Gemmell, Large y Paulick completaron estudios adicionales, utilizando el diagrama de caja de alteración para comprender la relación entre la mineralogía de alteración y la litogeoquímica asociada con depósitos de sulfuros masivos alojados en un volcán. El diagrama de caja de alteración es una representación gráfica que utiliza dos índices de alteración: el índice de alteración de Ishikawa (AI) y el índice de clorita-carbonato-piritita (CCPI).

Como la mayoría de los otros índices de alteración, el CCPI y el diagrama de caja de alteración se desarrollaron con fines de exploración. Ayudan a generar objetivos de perforación y contribuyen a la comprensión de la zonificación dentro de los depósitos minerales. Este estudio en particular se centra en los sistemas hidrotermales relacionados con VHMS.

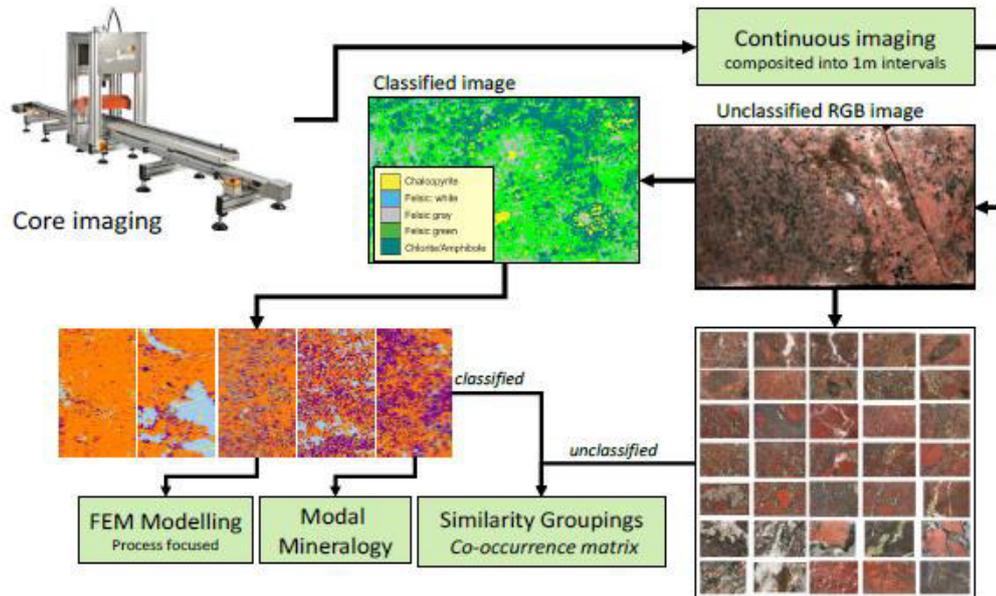
2.3.5. Caracterización mineralógica

2.3.5.1. Caracterización por análisis de Imagen

Si el alcance y el presupuesto del estudio permiten obtener imágenes centrales de las muestras, se pueden desarrollar algunas oportunidades interesantes. Históricamente, solo se podía medir la textura de la roca a microescala con relativa facilidad. A través de los avances tecnológicos, se pueden realizar capacidades multisensoriales, cámaras ópticas, imágenes de rayos X (CT) y gamma en el núcleo de perforación y los datos recopilados. Los datos están en forma de imágenes más recientemente, elementales. Las imágenes recopiladas pueden filtrarse en su forma cruda en agrupaciones de similitud, o clasificarse primero y luego agruparse, utilizando software especializado (Desarrollado en el Centro de Investigación de Minerales Julius Kruttschnitt JKMRG).

Figura 5

Campaña de Drill Hole en análisis de imagen Core Scam



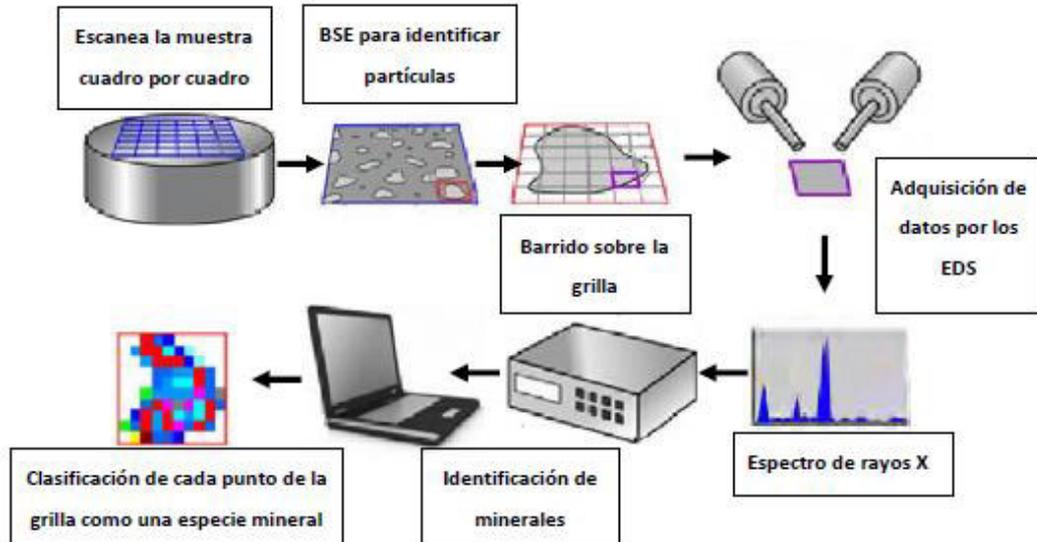
Fuente: How to Set Up and Develop a Geometallurgical Program (Michaux, 2019).

2.3.5.2. Caracterización Mineralógica BULK

Hay muchas ocasiones en que la medición de la mineralogía en masa es útil. En particular, la caracterización (fases minerales, por ejemplo, cuarzo) y las proporciones de la mineralogía de las gangas es útil para comprender el comportamiento del proceso. En la minería, la ganga es el material a menudo sin valor comercial que rodea o se mezcla estrechamente con un mineral deseado en un depósito de mineral. Por lo tanto, es diferente de la sobrecarga, que es la roca de desecho o los materiales que recubren un mineral o cuerpo mineral que se desplazan durante la extracción sin ser procesados, y de los relaves, que es una roca ya despojada de minerales valiosos; Una roca sin valor que contiene material valioso. Existen varios métodos de bajo costo y efectivos para lograr esto.

Figura 6

Diagrama de funcionamiento del QemScan



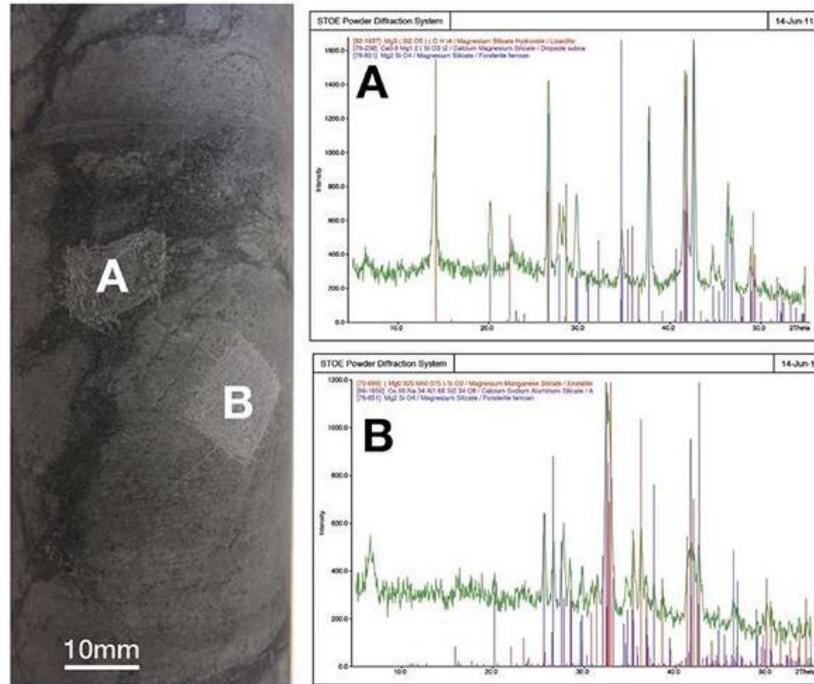
Fuente: Modificado de mineralogical, chemical and textural characterisation of the malMBERGET iron ore deposit for a geometallurgical model (Lund , 2019).

2.3.5.3. Difracción de rayos X (XRD)

Comprender la mineralogía masiva de la muestra y el depósito en sí es un paso necesario. XRD es un método analítico versátil para analizar las propiedades del material, como la composición de fases y las proporciones de una muestra de polvo. La identificación de la fase se logra comparando el patrón de difracción de rayos X obtenido de la muestra que se está midiendo con una base de datos de referencia. Con una sola medición, se pueden identificar fases minerales (cualitativas) y sus concentraciones / proporciones (cuantitativas). Los rayos X se generan en un difractómetro de laboratorio utilizando tubos de rayos X con un material de ánodo adecuado (Cu, Fe, etc.).

Figura 7

Acercamiento de una litología gris clara de grano fino (B) entremezclada con una unidad más oscura, ultramórfica y magmática (A) y las identificaciones de los minerales realizados por el analizador TERRA XRD



Fuente: Modificado de development of a correlation between mineralogy, rock strength measures, and breakage of Copper Porphyries (Gazanfer, 2018).

2.3.6. Resistencia a la rotura de la roca

2.3.6.1. Prueba de fuerza

Los métodos más comunes para determinar la resistencia de la roca son pruebas de compresión uniaxial, pruebas de tracción indirecta (prueba brasileña, prueba de viga), prueba de carga puntual (PLT), prueba de compresión triaxial, pruebas no destructivas (martillo Schmidt, pruebas ultrasónicas) y barra Hopkinson. Estas pruebas tienen sus propias aplicaciones, como determinar la resistencia a la tracción, determinar la carga puntual, que es la carga más alta que puede soportar la roca antes de que

falle, y determinar la resistencia a la compresión uniaxial (no confinada) y triaxial (confinada) rock.

En este estudio de investigación; Es importante investigar la metodología de prueba que mide el requisito de energía para romper la roca en lugar de medir la respuesta de la roca a la prueba. En otras palabras; la investigación sobre los métodos de prueba disponibles se completa en el contexto de rotura, molienda y liberación.

2.3.6.2. Prueba de resistencia a la compresión (UCS)

La resistencia a la compresión uniaxial de los materiales rocosos es relativamente fácil de determinar y los procedimientos de prueba estandarizados se utilizan ampliamente. La resistencia a la compresión del material se define por la cantidad de carga de compresión uniaxial antes de ceder o fracturarse. Los datos de resistencia a la compresión de las rocas son herramientas valiosas en el diseño de minas, control de estratos, perforación, voladura, selección de piedras de construcción y varias otras aplicaciones de ingeniería. Aunque las pruebas UCS son herramientas útiles y ampliamente utilizadas para la determinación de la resistencia de la roca, existen varios problemas causados por la naturaleza de la resistencia de la roca intacta y el uso de valores de resistencia basados en las pruebas de laboratorio UCS, tales como:

- El UCS incluye resistencia a la discontinuidad para macizos rocosos con espaciamiento de discontinuidad pequeño. La muestra de prueba UCS tiene generalmente unos 10 cm de largo y si el espaciado de discontinuidad es menor de 10 cm, el núcleo puede incluir discontinuidades.
- Es probable que las muestras para las pruebas de laboratorio sean de mejor calidad que la roca promedio porque la roca pobre a menudo no se tiene en cuenta cuando se perfora el testigo o las muestras se rompen y no se pueden analizar.

- La resistencia de la roca intacta está relacionada con la orientación de la muestra si la roca intacta muestra anisotropía.

2.3.6.3. Prueba de compresión uniaxial

La prueba de compresión uniaxial se utiliza para determinar la resistencia a la compresión no confinada (o uniaxial) de muestras de roca en forma cilíndrica. Se aplica una carga continua a una tasa de tensión constante a la muestra hasta que ocurre la falla (dentro de los 5 a 10 minutos de la carga). A través de UCS, se pueden estimar la clasificación de resistencia y las características de la roca.

Varios investigadores han recopilado los valores de resistencia a la compresión no confinada para diferentes tipos de rocas. Los valores típicos se dan en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2

Valores típicos de resistencia uniaxial (en MPa) para nueve tipos de rocas comunes

	Granito	Basalto	Gneis	Esquisto	Cuarcita	Mármol	Limonita	Arenisca
Av, Co	181.7	214.1	174.4	57.8	288.8	120.5	120.9	90.1
Max, Co	324.0	358.6	251.0	165.6	359.0	227.6	373.0	235.2
Min, Co	48.8	104.8	84.5	8.0	214.9	62.0	35.3	10.0
Rango	275.2	253.8	166.5	166.5	144.1	165.5	337.7	225.2
N.Muestras	26.0	16.0	24.0	17.0	7.0	9.0	51.0	46.0

Fuente: Modificado de rapid assessment of the sorting potential of copper porphyry ores through modelling of textures and grade distributions (Wilkie, 2021).

Tabla 3

Resistencia media a la tracción y a la compresión para determinados tipos de rocas sedimentarias

Roca	Resistencia a la tracción	Esfuerzo de Compresión
Caliza	18.00 ± 0.62 (20)	41.45 ± 3.52 (4)
Arenisca	19.17 ± 0.21 (23)	77.59 ± 1.59 (5)
Arenisca	23.10 ± 0.48 (19)	80.83 ± 2.21 (10)
Arenisca	24.21 ± 0.83 (8)	90.48 ± 3.86 (4)
Lutita	35.17 ± 3.17 (4)	50.07 ± 3.79 (4)
Caliza	36.28 ± 1.24 (24)	142.55 ± 6.14 (5)
Caliza	38.76 ± 2.69 (23)	142.97 ± 19.18 (8)
Roca de hierro	44.28 ± 4.48 (5)	190.69 ± 17.93 (4)
Arenisca	65.66 ± 0.83 (11)	167.66 ± 9.86 (5)

Fuente: Modificado de rapid assessment of the sorting potential of copper porphyry ores through modelling of textures and grade distributions (Wilkie, 2021).

El mecanismo y los requisitos de preparación de la muestra para las pruebas de compresión uniaxial se detallan en ASTM D-2938-86 y los métodos recomendados por ISRM. La elección de los platos también tiene un impacto importante en los efectos finales.

2.3.6.4. Prueba de carga puntual (PLT)

Broch y Franklin (1972) sugirieron un método de prueba denominado Prueba de carga puntual para superar algunos de los problemas asociados con la prueba de compresión no confinada. El PLT es una alternativa útil al UCS porque permite resultados de datos similares a un costo menor. El PLT implica la compresión de una muestra de roca entre platos de acero cónicos hasta que se produce la falla. La configuración para esta prueba incluye un marco rígido, platos de carga de dos puntos, un pistón de activación hidráulica con

manómetro y un dispositivo para medir la distancia entre los puntos de carga. El manómetro debe ser del tipo en el que se pueda registrar la presión de falla. Las pruebas de carga puntual se pueden dividir en tres tipos principales: axiales, diametrales y de bloque o bulto. Las pruebas axiales y diametrales se realizan en muestras de testigos de roca. En la prueba axial, el núcleo se carga en paralelo al eje longitudinal del núcleo; esta prueba es la más comparable a una prueba UCS.

La prueba de carga puntual permite la determinación del índice de resistencia a la carga puntual no corregido (I_s). Debe corregirse al diámetro equivalente estándar (D_e) de 50 mm. Si el núcleo que se está probando tiene "cerca" de 50 mm de diámetro (como el núcleo NX), la corrección no es necesaria. El procedimiento para la corrección de tamaño puede obtenerse gráfica o matemáticamente como se describe en los procedimientos ISRM. El valor de I_{50} (en psi) se determina mediante la siguiente ecuación 4:

$$I_{50} = \frac{P}{D_{e2}} \quad (4)$$

P = Carga de falla en lbf (presión x área del pistón).

D_e = Diámetro equivalente del núcleo (pulg).

Varios estudios (Bieniawski, 1975; Broch y Franklin, 1972) realizados en rocas duras y fuertes indican que la correlación entre UCS y la resistencia de la carga puntual se puede calcular como:

$$UCS = (K)I_{50} = 24I_{50} \quad (5)$$

Donde K es el "factor de conversión". Estudios posteriores han encontrado que $K = 24$ no es tan universal como se esperaba y que, en cambio, parece haber una amplia gama de factores de conversión.

2.3.7. Medidas de estrés por conminución

2.3.7.1. Prueba de Bond

El índice de trabajo de Bond es una prueba cuantitativa preferida para caracterizar un mineral en términos de cómo responderá un circuito de molienda. El Bond Index se utiliza para determinar los requisitos de energía en la molienda de un mineral hasta una distribución de tamaño objetivo que se crea como una herramienta de diseño de trituración desarrollada en 1952 por Fred Bond. Su objetivo era definir la selección de chancadores y/o molinos específicos del mineral. De acuerdo con la tercera teoría de la conminución de Bond, la entrada de trabajo es proporcional a la longitud de la punta de la grieta producida en la rotura de partículas y es igual al trabajo representado por el producto menos la alimentación, y puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$W = 10 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (6)$$

Dónde:

W = Entrada de trabajo (kwh / t)

W_i = Constante específica del material (kwh / t)

P₈₀ = Tamaño al que pasa el 80% del producto (μm)

F₈₀ = Tamaño al que pasa el 80% de la alimentación (μm)

2.3.7.2. Índice de trabajo del molino de bolas Bond (BWI)

El BWI es el factor clave para estimar los requisitos básicos de energía del circuito de trituración. Para determinar el BWI, una muestra de 15 kg de mineral representativo al 100% +3.35 mm se tritura a 100% -3.35 mm. Se selecciona una pantalla de cierre para apuntar al tamaño de producto elegido y los ciclos de molienda continúan hasta que se alcanza una carga circulante

del 250%. El promedio de los últimos tres gramos netos por revolución Gbp es la molienda del molino de bolas. El índice de trabajo de la fábrica de Bond BWI se calcula a partir de la ecuación 7:

$$W_{i,TEST} = \frac{48.95}{A^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right)} \text{ kWh/t} \quad (7)$$

Dónde:

Gbp = Molino de bolas molido en g / revolución

P = Producto P80 en micrones

F = Avance P80 en micrones

A = Tamaño de apertura en micrones del tamaño de tamiz utilizado

Quince kilogramos de núcleo de perforación de diamante representativo, cortado o sin cortar, deben triturarse gradualmente hasta 100% -3,35 mm. Los valores típicos del índice de trabajo del molino de bolas Bond para cuerpos minerales oxidados suaves tienen un rango de 5-10 kWh / t con un tamaño de producto estándar del 80% pasando 75 μm. A medida que aumente la competencia, los minerales primarios medianos tendrán BWI en el rango de 10-15 kWh / t y los minerales primarios muy duros estarán en el rango de 15-25 kWh / t (Chikochi, 2017).

2.3.7.3. Prueba de caída de peso JK (JKDWT)

La prueba de caída de peso JK (JKDWT) se desarrolló en el laboratorio del JK MRC en 1992 (Brown, 1992), para medir los parámetros de rotura de una muestra de roca en un molino AG / SAG. El aparato de prueba de caída de peso JK también se puede utilizar para pruebas de trituración de molinos SAG (SMC). La principal diferencia entre el JKDWT y el SMC es la clase de tamaño del material probado. El JKDWT se realiza en una serie de muestras en clases de tamaño que van desde 63 mm hasta 13 mm, mientras que la prueba SMC se realiza típicamente en una clase de tamaño único de -22 mm / + 19 mm. El JKDWT permite la determinación de los parámetros específicos del mineral,

que son procesados por el software JKSimMet Mineral Processing Simulator para analizar y / o estimar el rendimiento del molino AG / SAG. Los principales mecanismos de rotura en un molino AG / SAG son impactados (alta energía) y abrasión (baja energía).

2.3.7.4. Prueba de rotura por impacto

El medidor de caída rompe rocas en cinco fracciones de tamaño (-63.0 + 53.0 mm, -45.0 + 37.5 mm, -31.5 + 26.5 mm, -22.4 + 19.0 mm, -16.0 + 13.2 mm). Se rompen entre 10 - 30 partículas por cada fracción de tamaño en cada uno de los tres niveles de energía. La configuración de prueba para el comprobador de caída de peso JK implica dejar caer un peso desde una altura preestablecida sobre la roca al nivel de energía requerido hasta que se rompa (Figura 8).

Con el JKDWT, la distribución de tamaño se normaliza con respecto al tamaño de partícula original. El tamaño de partícula original se estima mediante la media geométrica del rango de tamaño.

$$t_{10} = A(1 - e(-bEcs)) \quad (8)$$

Donde t_{10} es la distribución de tamaño, A y b son los parámetros de rotura por impacto de alta energía y Ecs es la energía específica de trituración. La multiplicación de los parámetros A y b resultantes de elevarlos a una exponencial e, siendo el valor A * b, se utiliza para correlacionar la resistencia del mineral con la rotura por impacto. Los valores más bajos indican minerales más duros en términos de rotura por impacto.

Figura 8

Prueba de caída de peso



Fuente: Caracterización de rotura de mineral de depósitos de UG2 utilizando el JK RBT (Chikochi, 2017).

2.3.7.5. Prueba de rotura por abrasión

La prueba de rotura de abrasión estándar (baja energía) gira una muestra de 3 kg de partículas de -55 +38 mm durante 10 minutos en un molino de prueba de abrasión estándar. El parámetro de abrasión (t_a) se calcula de la siguiente manera:

$$t_a = \frac{t_{10}}{10} \quad (9)$$

El valor del parámetro de abrasión describe la distribución del tamaño de partículas de la muestra. Al igual que con el valor $A * b$, un valor más bajo del parámetro de abrasión indica un mineral más duro. La Tabla 4 muestra los rangos típicos para los parámetros JKDWT. Donde t_{10} es la distribución de tamaño.

Tabla 4

Rangos de dureza metalúrgica

DWT Valores Relativos	Muy Duro	Medianamente Duro				Muy Suave	
	<=====>						
A*b Impacto	<30	30-38	38-43	43-56	56-67	67-127	>127
ta Abrasión	<0.24	0.24-0.35	0.35-0.41	0.41-0.54	0.54-0.65	0.65-1.38	>1.38

Fuente: Modificada de global trends in ore hardness (Morrell, 2019).

2.3.7.6. Índice de potencia del molino semi autógeno (SPI)

El ensayo SAG Power Index (SPI) corresponde a un ensayo de moliendabilidad, realizado en un molino de trituración pequeño de laboratorio. Consiste en la medición del tiempo que demora la reducción de una roca de un tamaño de 12,7 mm a un tamaño de en promedio 1,7 mm.

El ensayo sag power index, también llamado Starkey index, fue desarrollado por Starkey en 1994, con el objetivo de poder estimar un índice que permitiese discernir sobre las rocas que tomasen un mayor tiempo de moliendabilidad versus otras que tomasen un menor tiempo de moliendabilidad en el proceso minero (Starkey, 2022)

La molienda semiautógena SAG debe su nombre al mecanismo de reducción de tamaño de las partículas, el cual pasa de ser un sistema que produce la reducción del tamaño de partículas desde solo las rocas, a rocas con bolas de acero de tamaños variables, las cuales representan entre un 4 a un 15 % del volumen total del molino. Por lo anterior, la reducción del tamaño de las partículas se debe al impacto de grandes fragmentos de rocas y de bolas de acero, impactando y friccionando rocas de menor tamaño.

Los molinos semiautógenos SAG producen la reducción del tamaño de la roca mediante 2 mecanismos:

- Molienda por impacto: esta se produce cuando los fragmentos de rocas o bolas gruesas, mediante el giro del molino, son lanzadas sobre las rocas al pie de este, impactando con gran energía y produciendo un

gran fraccionamiento de las rocas de menor tamaño al ser sometidas a energías mucho mayores que las soportadas por las rocas.

- Molienda por abrasión: esta se produce cuando la energía no es suficiente para fracturar la roca, sino que se producen fracturas localizadas, comúnmente en zonas de menor energía de cohesión como son las esquinas de las rocas. Este proceso para fragmentos grandes continua hasta que las rocas son lo suficientemente pequeñas como para ser sometidas a otro tipo de molienda.
- Para la realización de esta prueba se necesitan muestras de 2 kg las cuales se introducen en un molino de aproximadamente 30 cm de diámetro por 10 cm de largo. Luego se mide el tiempo que tardan las muestras en reducirse de tamaño desde una muestra que pasa el 80% por la malla de 12.7 mm hasta que pasa el 80% por la malla de 1.7 mm. Debido a esto se tiene que mientras más tiempo demore el 80% de la muestra en pasar por la malla de tamaño 1.7 mm mayor será la resistencia del mineral a la fractura y la abrasión, por lo que el índice SPI será mayor.

Para la realización de esta prueba deben considerarse los siguientes parámetros (Starkey, 2022):

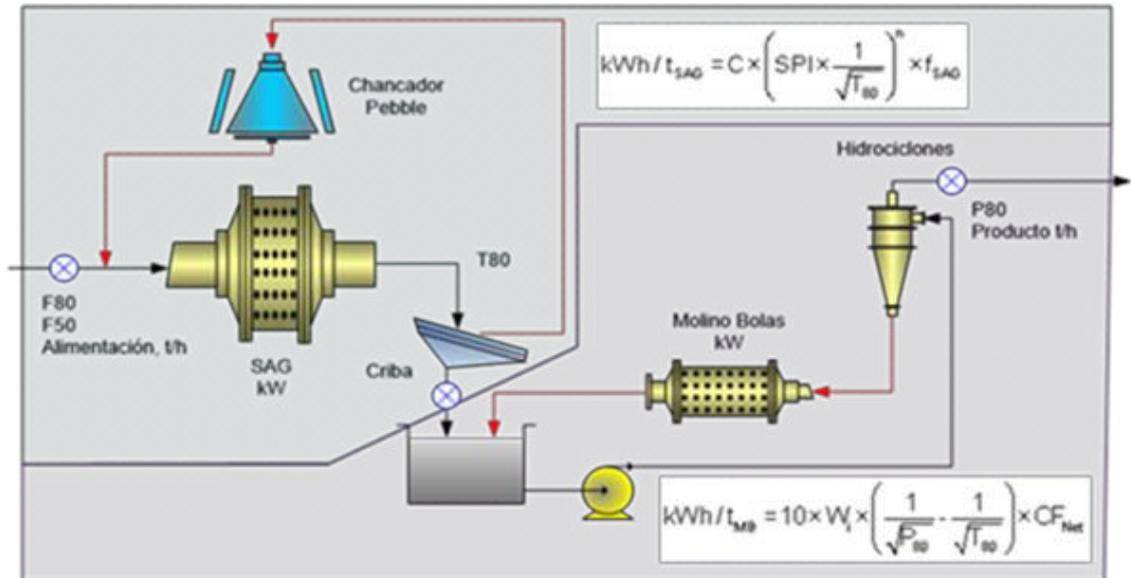
- Molino SAG de diámetro 30.5 cm y largo 10.2 cm.
- Bolas de 2.5 cm de diámetro
- Muestras secas de 2 kg con una granulometría la cual pase el 80% por un tamaño de malla 12.7 mm.
- El material resultante debe pasar el 80% por la malla de 1.7 mm.

Finalmente, el resultado obtenido por este ensayo corresponde a una cantidad en minutos, la cual representa la moliendabilidad de la roca del ensayo, esta cantidad en minutos es transformada a energía mediante una serie de ecuaciones y relaciones, como se observa en la (Figura 09).

Aquí, mediante la correlación entre el SPI, una constante de ajuste (C), el tamaño de transferencia desde el molino SAG a molino de bolas (T80), el factor de ajuste (n) y el factor de ajuste en función de los parámetros operacionales del molino industrial (SAG), se logra estimar un valor de energía requerida por los molinos semiautógenos para la operación.

Figura 9

Diagrama de flujo de circuito para el software IGS en función con los parámetros SPI y BWI



Fuente: Comparison of Ore Hardness Measurements for Grinding Mill Design for the Tenke Project (Starkey, 2022).

IGS permite conciliar el consumo específico de energía de las etapas SAG y Molinos de bolas. Cabe destacar que la gran importancia de esta prueba reside en su representatividad a gran escala, esto debido a que contempla los mecanismos de reducción de tamaño que se presentan en el molino SAG.

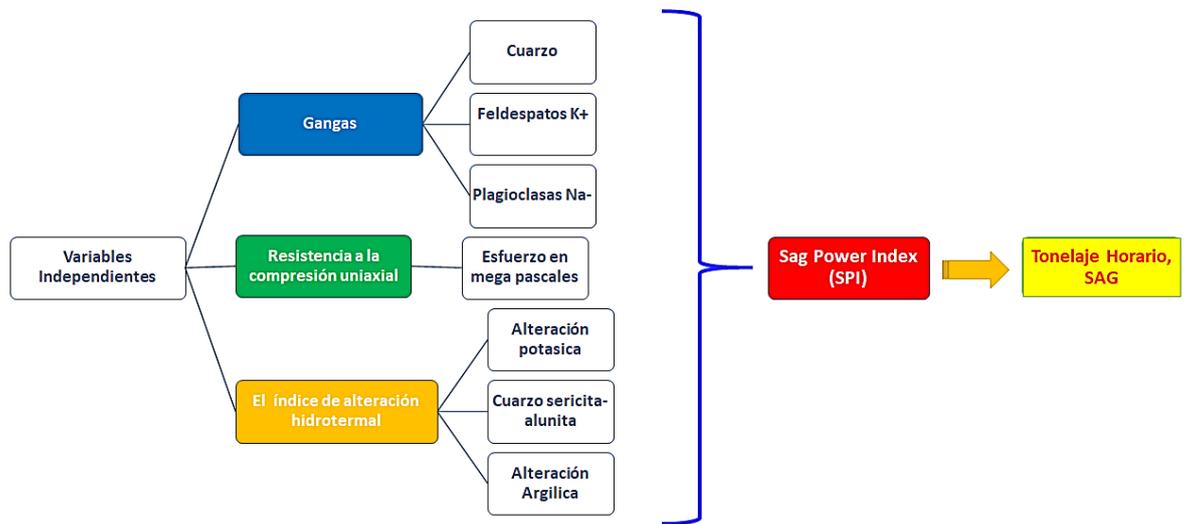
CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

Como lo señala (Dianderas Smith & Rivera León, 2018). “La investigación experimental es una serie de pasos que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento de la variable independiente, para observar las respuestas o reacciones que se producen en la variable dependiente. El tipo de investigación empleada es correlacional aplicada.

Figura 10

Flujograma de representación de variables dependientes e independientes



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

3.2. Unidad de análisis

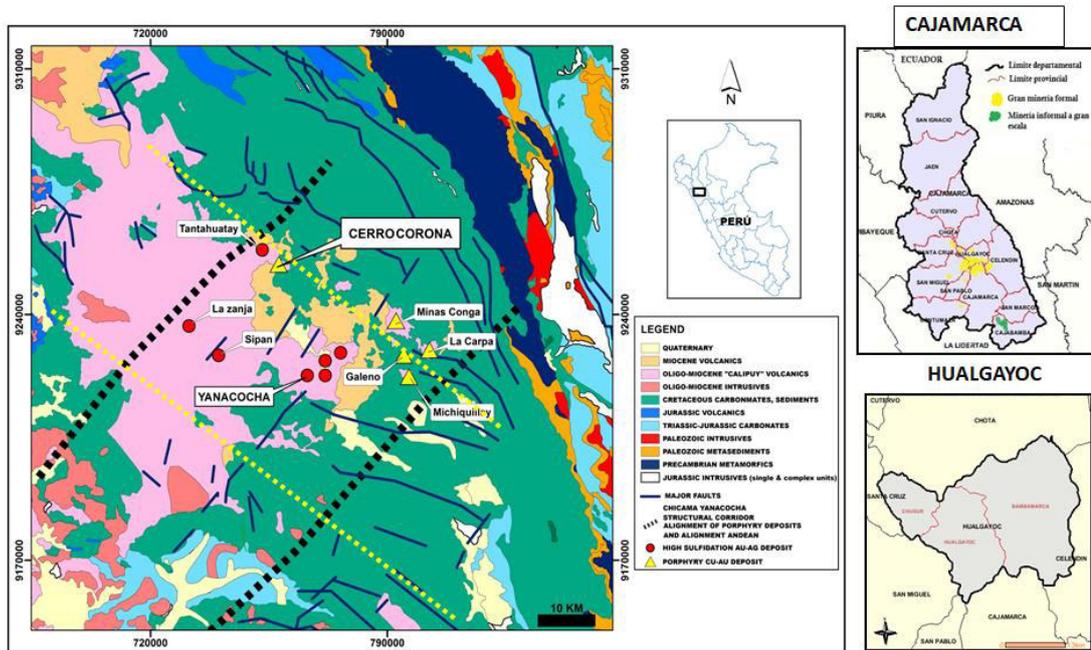
La unidad de análisis lo constituye La compañía minera Gold Fields en su unidad la Cima, ya que este constituye el objeto de interés de la investigación.

3.3. Población de estudio

La población está constituida para el yacimiento Cerro Corona el cual es una operación minera a Tajo abierto que se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca en el norte del Perú (Figura 11 y 12), se trata de un yacimiento tipo Pórfido cobre-oro desarrollado en diorita (14.4 a 13.35 millones años) que intruye a la formación calcárea Yumagual del cretácico.

Figura 11

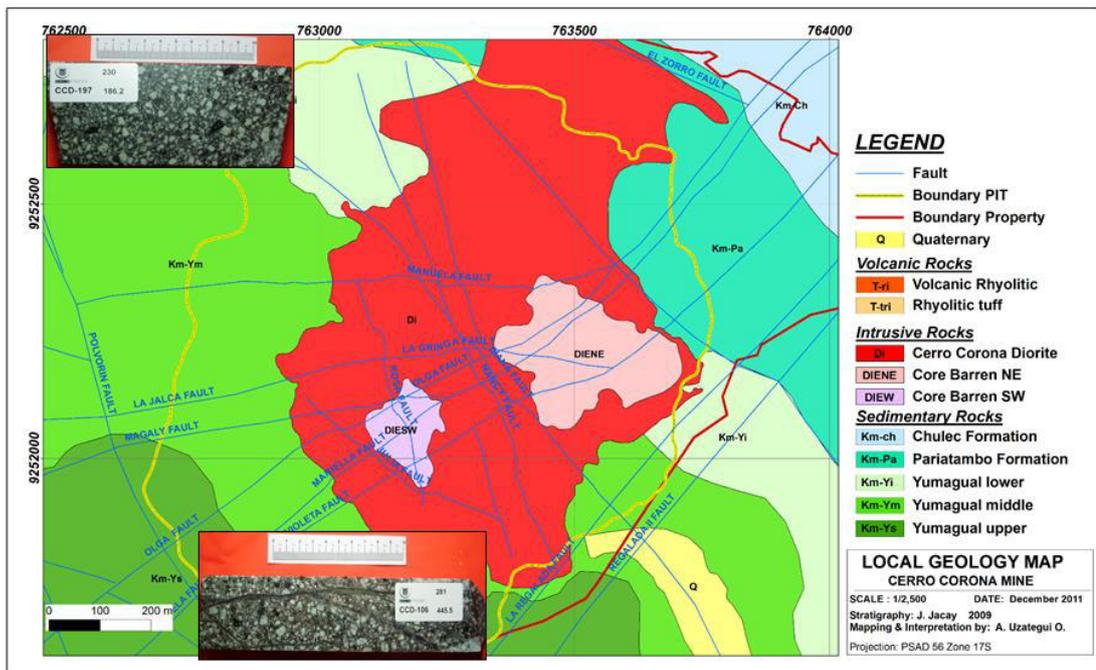
Mapa de Locación de la compañía minera Gold Fields



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 12

Ubicación de la mina Cerro Corona y la geología regional



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

3.4. Tamaño de muestra

De acuerdo a lo mencionado por (Morrell, 2019). “El tamaño de la muestra para un estudio de conminución queda determinado de acuerdo a la variabilidad de dureza en el yacimiento”. Por tal motivo se usó la ecuación 8 determinado el porcentaje de accuracy de que este dentro de los valore según estudios previos de Morrell en pórfidos de cobre.

$$\text{Accuracy (\%)} = t_{cl,n-1} \times \frac{C_{vs}}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Donde:

C_{vs} = Coeficiente de variación (% de variabilidad)

n = número de muestras de roca para test

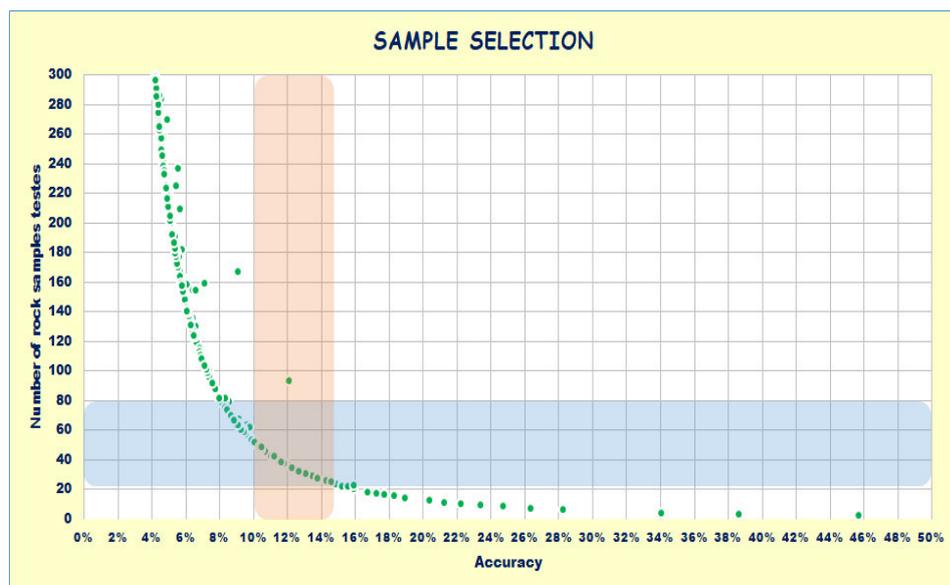
$n-1$ = Grados de libertad

CI = nivel de riesgo de la confiabilidad

De acuerdo a la variabilidad de dureza (Figura 12) del yacimiento corona se tiene un valor de 60 muestras que cumplen con el error mínimo observado en estudios pasados de pórfidos similares de cobre (Tabla 7).

Figura 13

Relación entre selección de muestras y el porcentaje de variabilidad



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Tabla 5

Tabla de porcentaje de variabilidad de dureza por etapa de proyecto (Morrell, 2019).

Required Accuracy	
*Design	
Design stage	Accuracy
Scoping / Conceptual / Identification	+/- 30-50%
Pre-feasibility / Selection	+/- 20-35%
Feasibility / Definition	+/- 10-15%

Fuente: Modificada de global trends in ore hardness (Morrell, 2019).

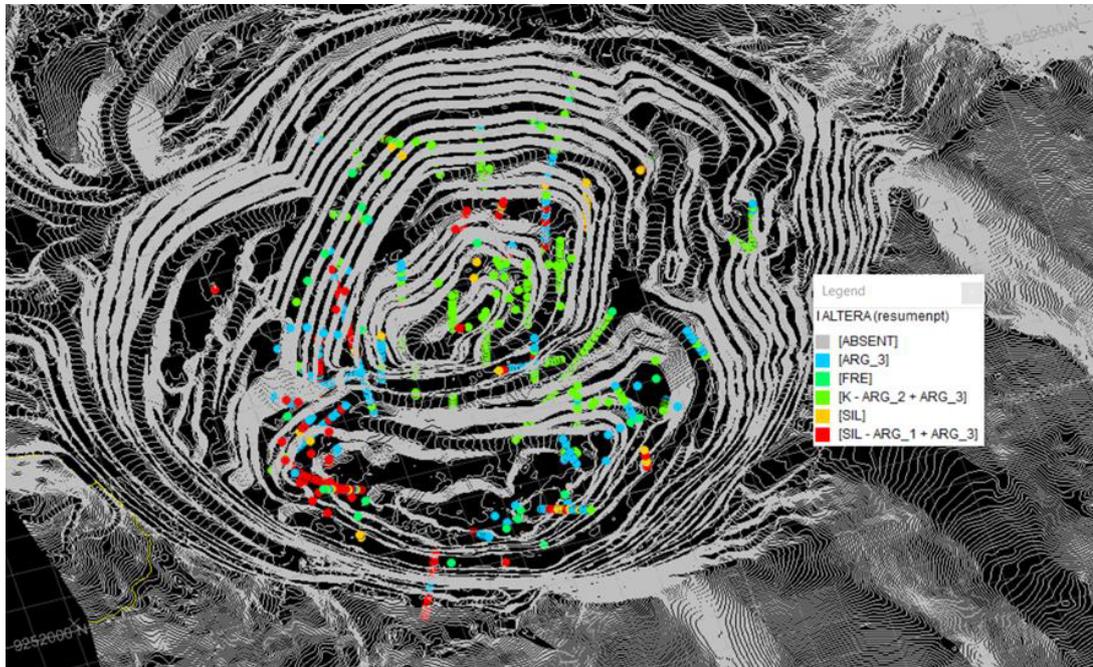
3.5. Selección de muestra

Según (Morrell, 2019), una muestra es una parte o porción extraído de un conjunto por métodos que permiten considerarlo como representativo del mismo. Por tal motivo, las muestras seleccionadas serán obtenidas de los frentes de minado de los proyectos volados del tajo corona, la cuales tendrán un peso mínimo de 50 kg de roca + $\frac{3}{4}$ " para los ensayos respectivos.

La representatividad de la variabilidad de las muestras y su proyección a futuro se están considerando por dominios de alteraciones argílica, silicífica y potasio (Ver figura 14). Es así como las muestras obtenidas tendrán valores muy aproximados a los valores de universo objetivo.

Figura 14

Plano de selección general de muestras en campo



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

3.6. Técnicas de recolección de Datos

La recolección de muestras, fueron directo en campo aplicando conocimientos de litología, alteraciones y dominios de mineralización para la caracterización del yacimiento dentro de ellas tenemos:

3.6.1. Técnicas

Se realizará a través de un logueo geológico de banco superior que serán almacenados en una base de datos, en donde describirá la dureza geológica, mineralización y tipo de alteración del banco preliminar al ser muestreado, además de contrastar con los tiempos de los taladros de perforación, para una mayor representatividad de la dureza para minerales post voladura.

3.6.2. Análisis de laboratorio

Los trabajos de laboratorio se realizarán a todas las muestras recolectadas en campo por análisis de caracterización mineralógica, pruebas de carga puntual, análisis de roca total y pruebas de conminución en molino de bolas. Esto nos permitirá identificar la variable más significativa que impactan en la dureza metalurgia del yacimiento.

3.6.3. Instrumentos

- Microscopio electrónico de barrido (QsCam)
- Molino de bolas
- Molino SGI
- Tamices # 400, #325, #200, #100
- Equipo de carga puntual
- Gps Etrex Garmín Navegatorio
- Picota de geólogo.
- Lupas de 20X y 10X.
- Lápiz metálico para determinar la dureza de las rocas y minerales.
- Lápiz magnético.
- Colores.
- Lápices HB-2H.
- Ácido clorhídrico diluido al 5%.
- Bolsas de celofán muestreo.
- Etiquetas de identificación de muestras.
- Tablero de dibujo.
- Laptop.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.1.1. Análisis e interpretación de resultados

El presente estudio se realizó en el periodo comprendido entre el mes de enero del 2018 y diciembre del 2020, los resultados de muestreos post voladura han sido procesados bajo una plataforma en Excel 2019, Python 3.9.2, loGas 7.2, Minitab 19 y Datamine Studio RM 1.6.9 diseñadas para este fin, que se da a partir del ingreso de los datos de forma manual, para la posterior generación de cuadros, gráficos e imágenes en donde se muestran los resultados obtenidos.

En cuando al contenido de gangas, esta muestra es de medida porcentual correspondiente a la microscopia electrónica mediante el equipo QEMSCAN, con una búsqueda que tienen énfasis en no metálicos.

En cuando al índice de alteración hidrotermal (IA), el resultado corresponde a un valor cualitativo obtenido del análisis químico de espectrometría de emisión atómica mediante una lógica de interpretación de árboles de decisión en machine learning.

En cuando a la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), los resultados corresponden a valores cuantitativos obtenidos mediante el equipo de carga puntual.

Para la obtención del modelo predictivo del tonelaje procesado por el molino 24' X 14.5', se elaboró estrategias de correlación no lineal de las variables de sag power index (SPI) y la conversión de sus valores a tonelaje debido a la no aditividad geoestadística. Por tal motivo para modelar el SPI en minutos, se produjo mediante el método analítico no supervisado de componentes principales, lo que permitió describir los conjuntos de datos de resistencia a la carga uniaxial, mineralogía y geoquímica en un conjunto de combinaciones

lineales de factores no correlacionados entre sí, teniendo una variabilidad cada vez más débil de los datos.

4.1.1.1. Análisis mineralógico de gangas

Debido a la formación geológica del depósito se esperaba encontrar una influencia del ensamble mineralógico de la roca encajante con la dureza metalúrgica. El análisis de los taladros se realizó a través de métodos semi cuantitativos de espectroscopia de infrarrojo cercano y análisis de microscopia electrónica. Mediante un procesamiento de datos quimiométrico (Figura 18) se puede realizar la cuantificación de las principales especies de gangas (Tabla 6) en la mineralogía, las que fueron contrastadas según QSCAM.

Tabla 6

Distribución de especies de gangas del depósito

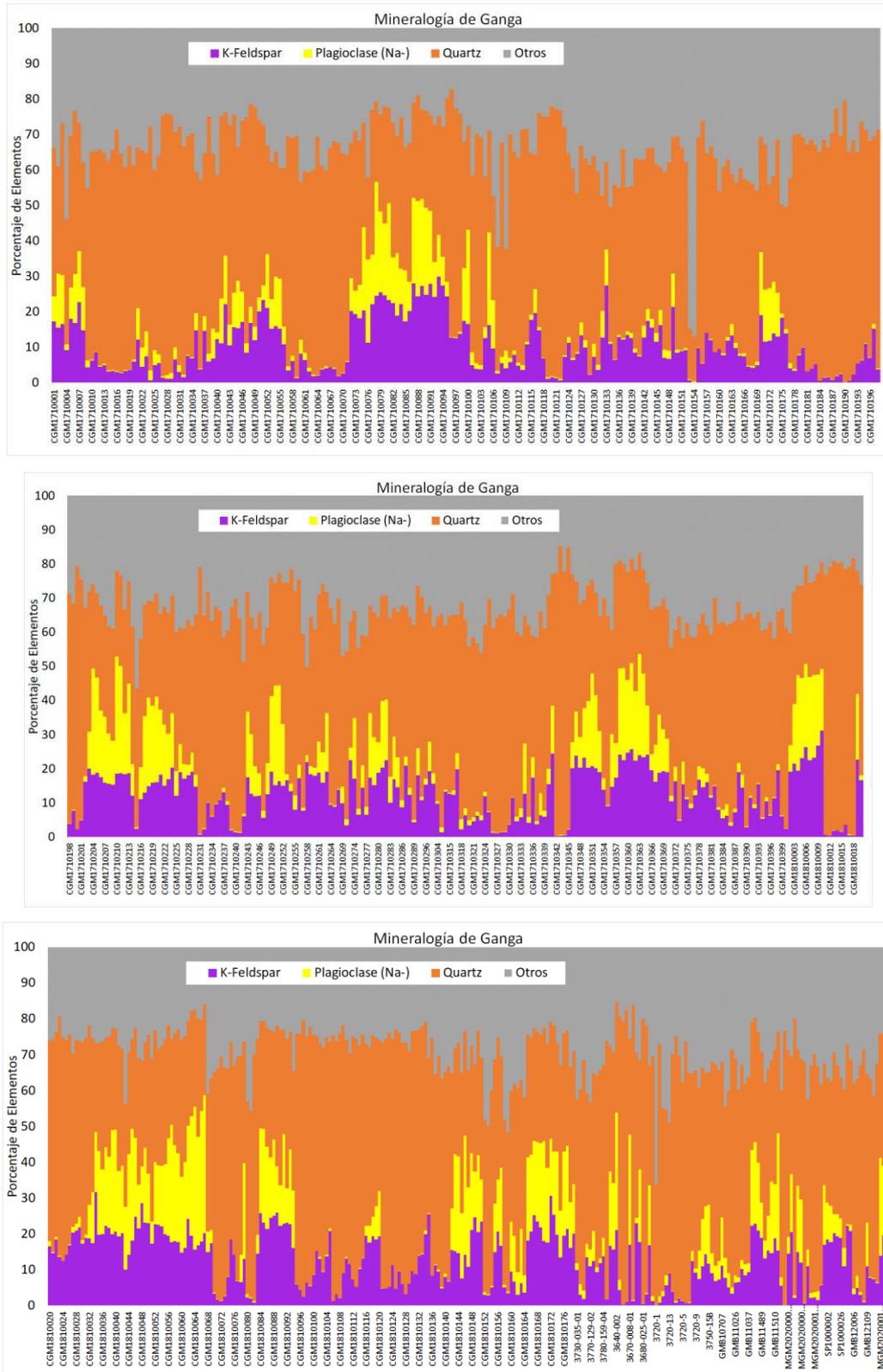
ID	Muestras	Porcentaje
1	montmorillonite+chlorite	35.53%
2	white mica+Quartz	25.82%
3	white mica+hematite	7.69%
4	kaolinite+Quartz	7.33%
5	montmorillonite+Quartz	7.33%
6	white mica+chlorite	6.96%
7	montmorillonite+hematite	4.03%
8	white mica+goethite+hematite	1.10%
9	white mica+jarosite	0.92%
10	white mica+chlorite+hematite	0.55%
11	montmorillonite+chlorite+hematite	0.55%
12	white mica+goethite	0.37%
13	kaolinite+hematite	0.37%
14	kaolinite+chlorite	0.37%
15	montmorillonite+goethite+hematite	0.37%
16	carbonate+Quartz	0.18%
17	dickite+Quartz	0.18%
18	kaolinite+goethite	0.18%
19	gypsum+Quartz	0.18%

Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El resultado de la mineralogía de gangas muestra los valores obtenidos de un conjunto de 651 muestras tomadas en los periodos del 2018 - 2020 en el open pit de cerro corona, dichas muestra fueron procesadas mediante la microscopia electrónica del QEMSCAN basado en una incidencia en no metálicos, para determinar la roca ganga generadora de una dureza metalúrgica en molienda (Ver Figura 15). A continuación, se presenta el total de muestras procesada durante dicho periodo.

Figura 15

Ocurrencia mineralógica de gangas

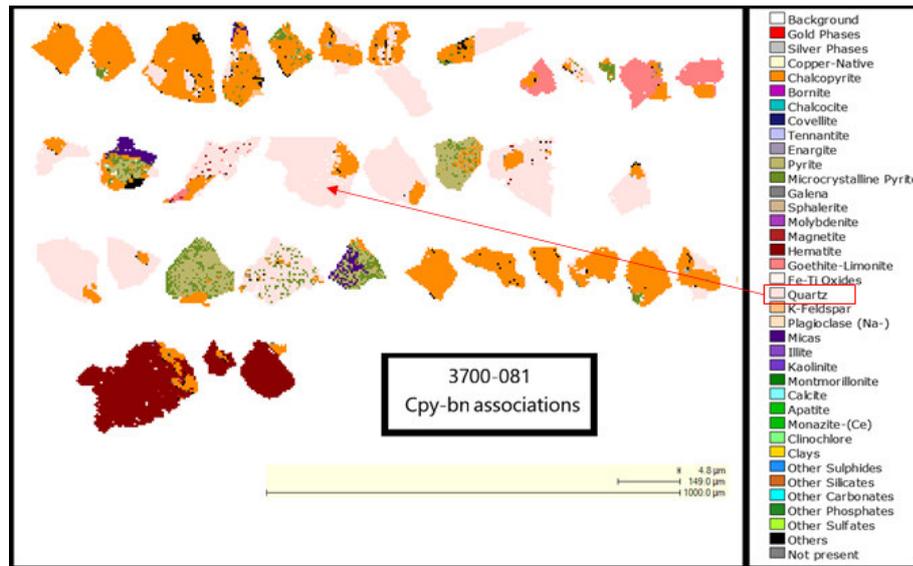


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El resultado del análisis mineralógico determina que más del 60% de las especies de gangas tienen en ensamble mineralógico de feldespatos potásicos, plagioclasas sódicas y cuarzos (Ver Figura 16 y 17).

Figura 16

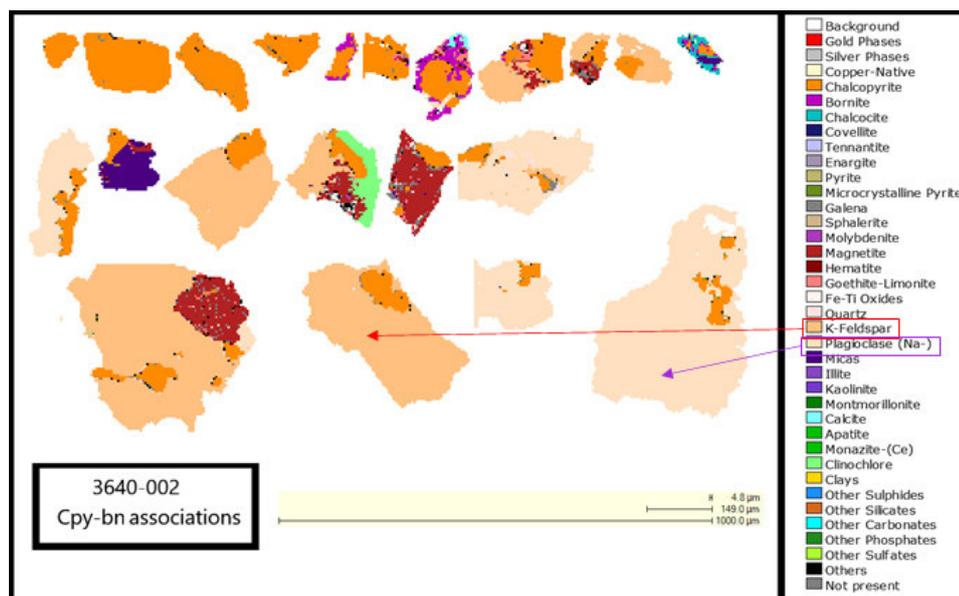
Microscopia electrónica de partícula de cuarzo



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 17

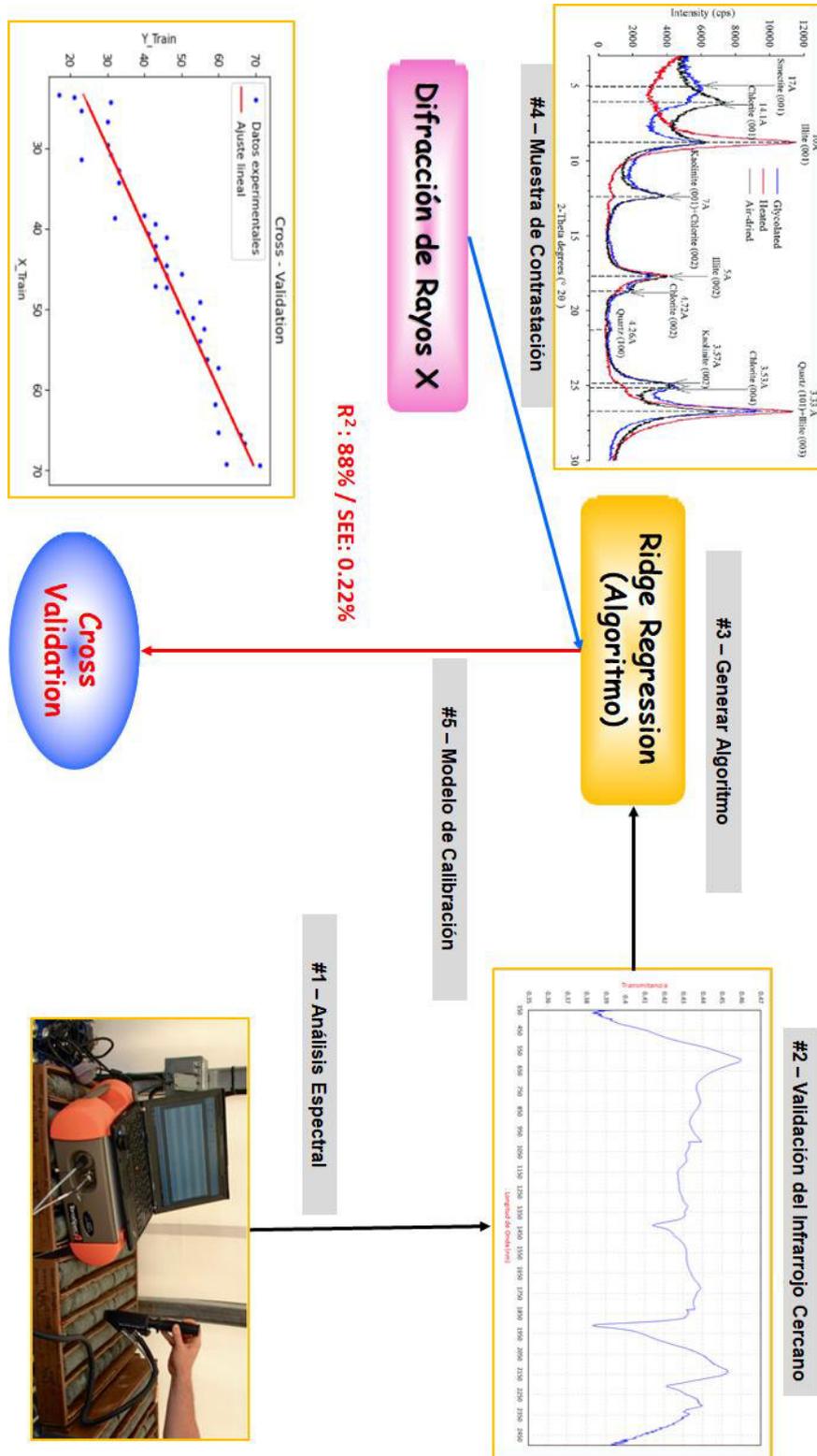
Microscopia electrónica de partícula de feldespato y plagioclasa



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 18

Marco de referencia del modelamiento de la espectroscopia de infrarrojo cercano (Estadísticos de correlación: R^2 y error promedio: SEE)



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

4.1.1.2. Índice de Alteración Hidrotermal (IA)

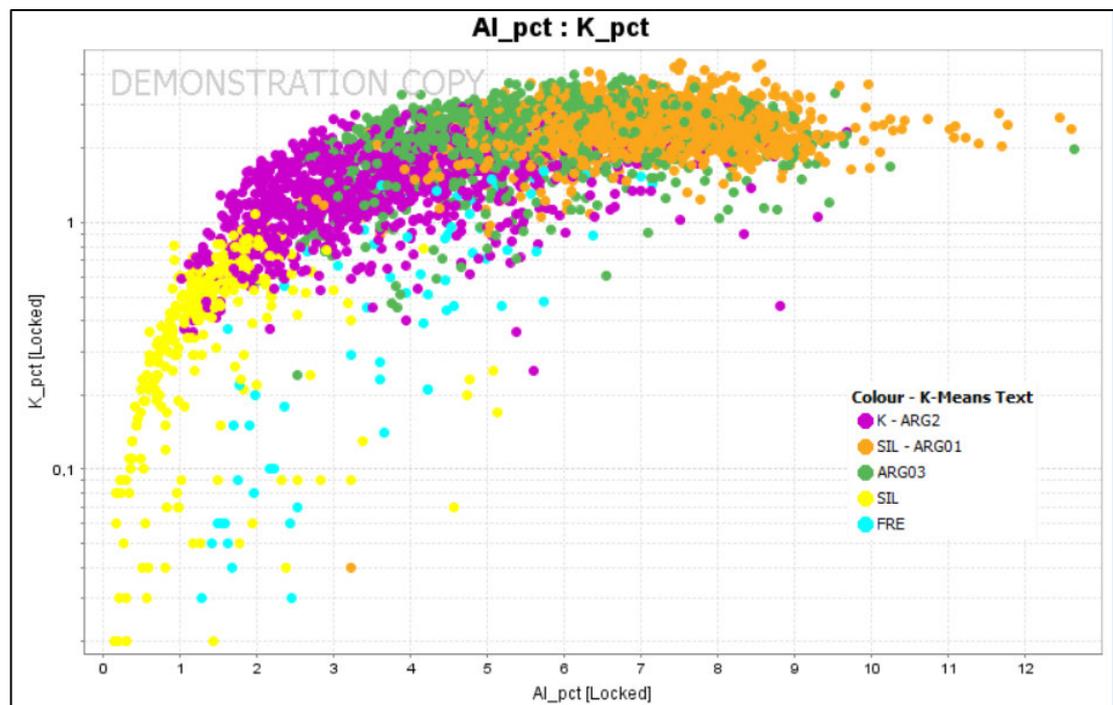
Este indicador se ha obtenido a partir de un procesamiento previo, producto de los resultados del químico de espectrometría de emisión atómica (ICP).

Mediante el uso de la geoquímica se puede obtener una clasificación cualitativa de alteraciones hidrotermales, mediante el uso del siguiente algoritmo de clusterización (ver Figura 22)

Del algoritmo de clustering para el ICP se obtuvieron una redefinición del dominio de índice de alteraciones hidrotermales (ver Figura 19) que explican en mejor medida la competencia de la roca encajante (ver Figura 20).

Figura 19

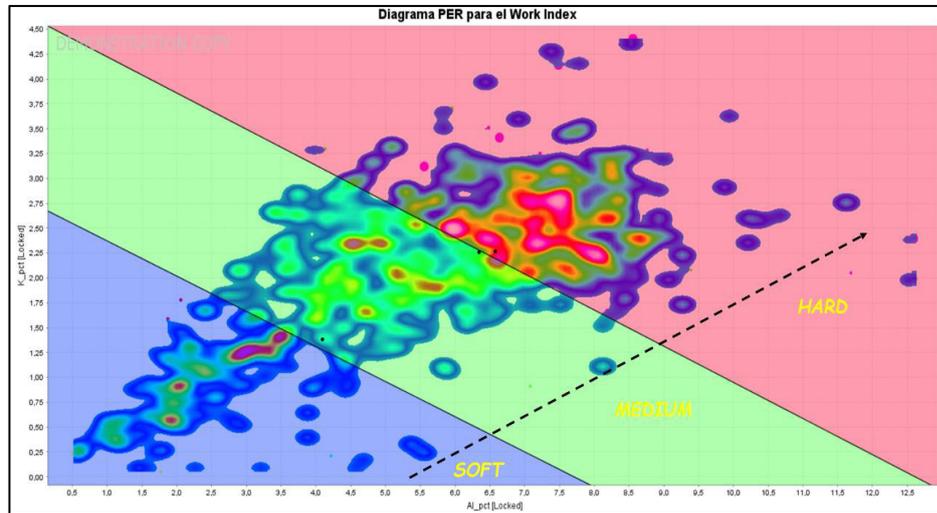
Imagen de clasificación del índice de alteración Hidrotermal



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 20

Diagrama GER/PER de los dominios de alteración respecto del Work Index

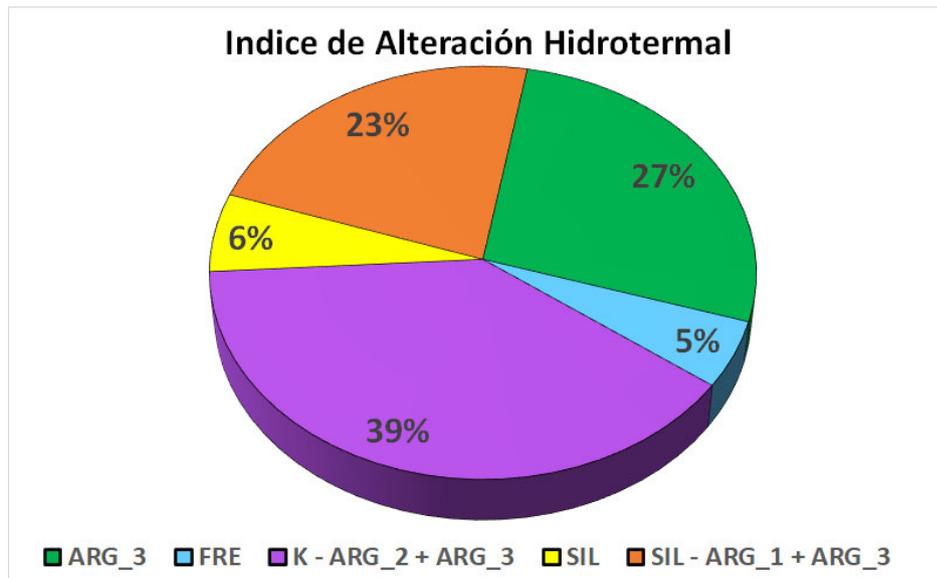


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El resultado del relevo cuantitativo del índice de alteración hidrotermal refleja la presencia de 5 tipo de dominio de alteraciones (Ver Figura 20) para la población de datos tomados en el periodo 2018 – 2020.

Figura 21

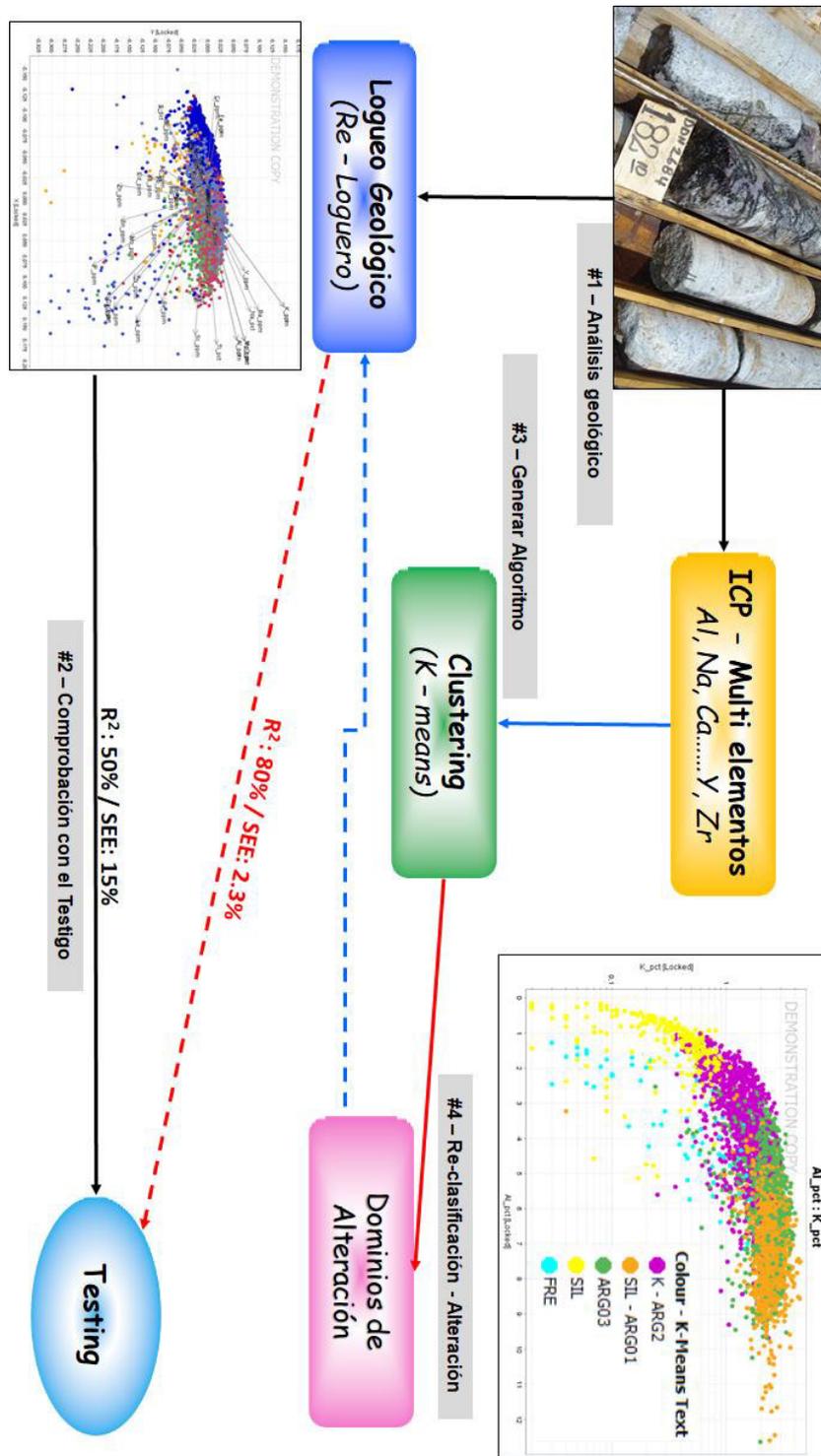
Distribución de Alteraciones Hidrotermales



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 22

Marco de referencia del modelamiento del Índice de Alteración (Estadísticos de correlación: R2 y error promedio: SEE)



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

4.1.1.3. Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS)

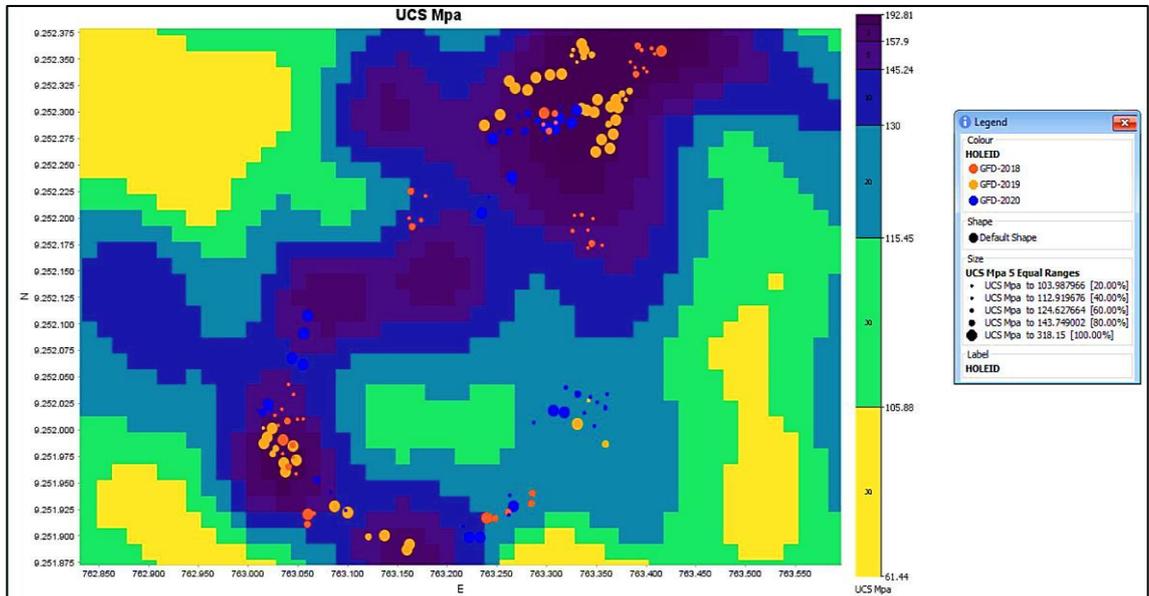
En el plano de la figura, se tienen ubicadas las 651 muestras ensayadas desde el año 2018 -2020 (Ver Figura 23), en diferentes cotas, superpuestas sobre la topografía actual del tajo corona. De esta disposición de resultados podemos identificar 4 zonas por variabilidad:

- ZONA CENTRO. - área dominada por Dureza geológica media y Dureza Crítica, representada por alteración Silicificación (SIL - ARG_1 + ARG_3) y Potásica (K - ARG_2 + ARG_3).
- ZONA SUROESTE. - Zona con mayor variabilidad en resultados UCS, mostrando Dureza geológica baja, media y Dureza Crítica. Esto obedece a la ocurrencia irregular de contactos de Silicificación (SIL - ARG_1 + ARG_3), Argílico (ARG_3) y roca fresca (FRE). Los resultados son coherentes con la geología de la zona.
- ZONA SURESTE. - Área de dureza de alta variabilidad, representada por contactos de alteración Potásica (K - ARG_2 + ARG_3) y Argílico (SIL - ARG_3), propias de la degradación total o parcial del intrusivo diorítico.
- ZONA SUR. - Área de dureza variable, representada por contactos irregulares de Silicificación (SIL - ARG_1 + ARG_3) y Argílico 3 (ARG_3), propias de la intensidad de los stockworks y matrices argílicas.

Las zonas de contacto representan zonas de alta variabilidad de dureza, debido a la ocurrencia de contactos irregulares, intensidad de stockwork en el caso de SIL -Argílico, SIL - Arcillas y nivel de degradación del intrusivo para el caso de Potásico - Argílico, dando como resultado la atribución de Dureza 4.

Figura 23

Plano de valores de Ucs para las campañas de muestreo 2018, 2019 y 2020



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Para determinar el valor en mega pascales de cada muestra, se sub dividió la roca en 10 analitos individuales para buscar el valor medio representativo (Ver Figura 24).

Figura 24

Imágenes de muestras de mano para ensayo de carga puntual

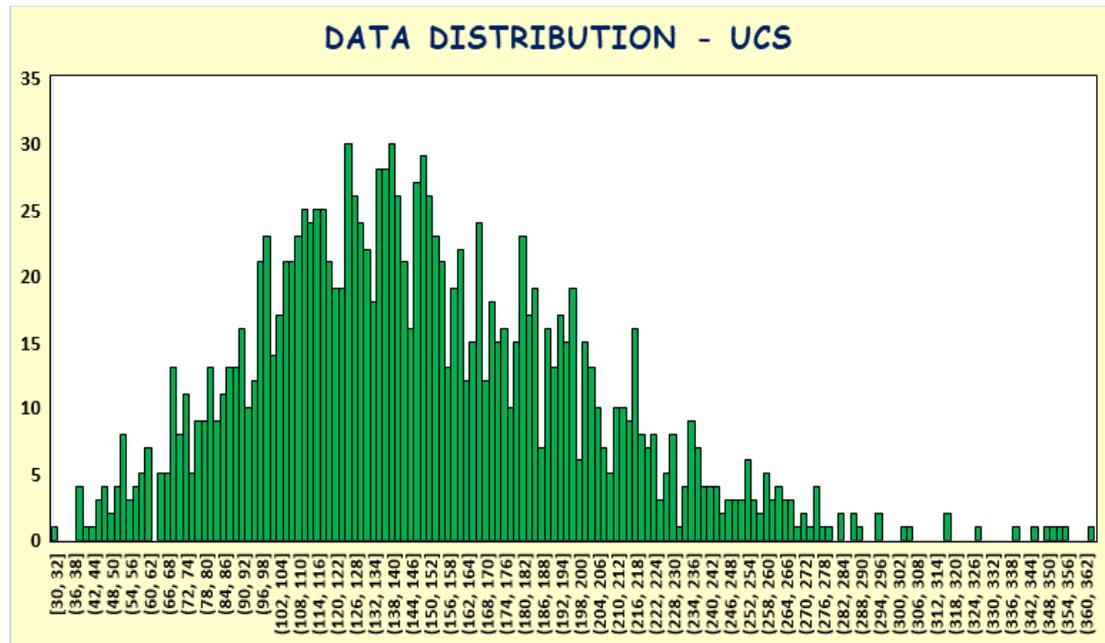


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El resultado de los ensayos de resistencia a compresión uniaxial fueron una población de datos modelados y asignados mediante vecino más cercano de la población de estudio (Ver Figura 25).

Figura 25

Distribución de ensayos de carga puntual en valores de Mega Pascales



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

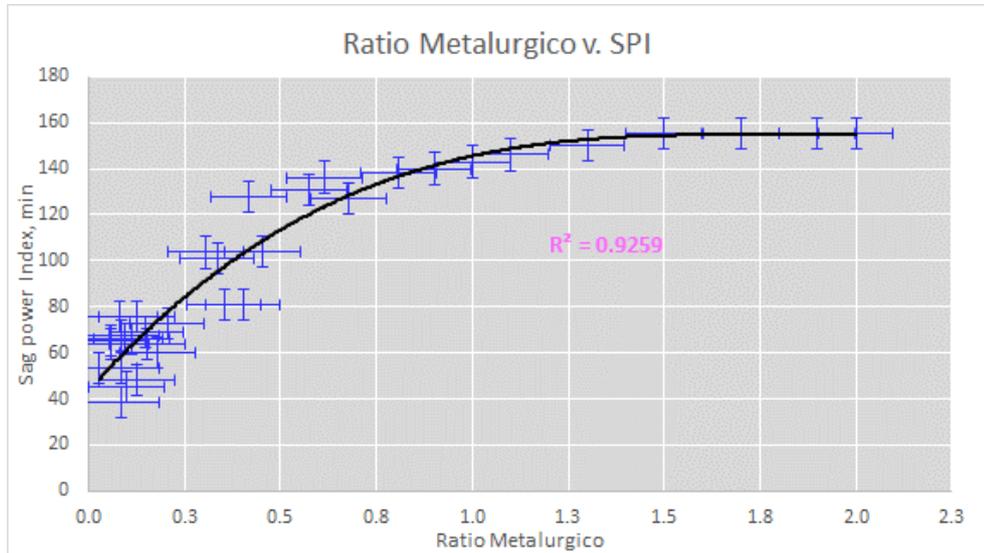
4.1.1.4. Modelamiento del Sag Power Index (SPI)

Para lograr el objetivo principal de este estudio, que era identificar las variables intrínsecas del yacimiento expresada en variables aditivas de dureza metalúrgica y su correlación con el rendimiento del circuito de molienda expresada en tonelaje horario, se consideró la metodología de modelamiento (ver Figura 29) mediante el uso de componentes principales basados en:

1. Ratio mineralógico de gangas que está en función del contenido de cuarzo, feldespatos y plagioclasas. (ver Figura 26)

Figura 26

Influencia del Ratio Metalúrgico sobre el Sag Power Index

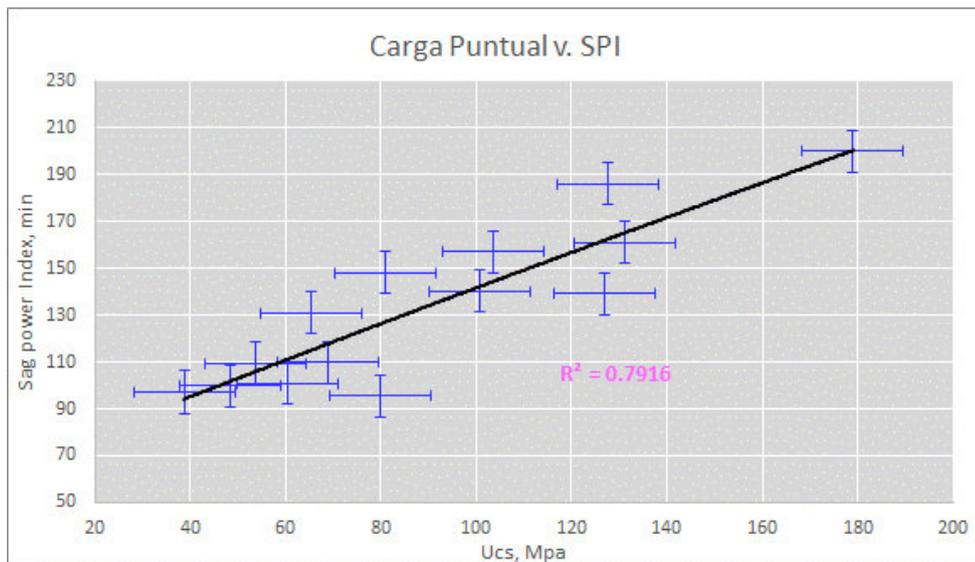


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

2. Relacionar el índice de potencia del molino sag que representa el 80% del consumo específico de la energía en molienda con la resistencia a la compresión. (ver Figura 27)

Figura 27

Influencia de la resistencia a la compresión uniaxial sobre el Sag Power Index

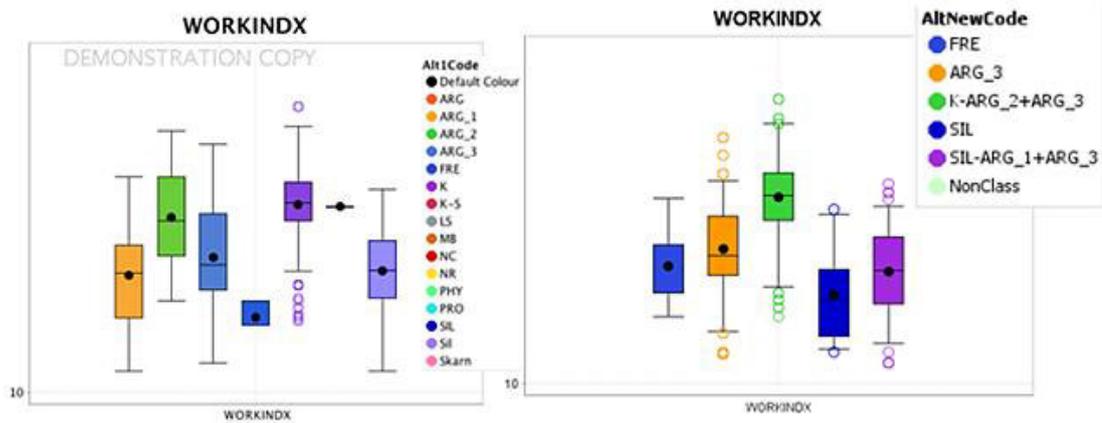


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

3. Redefinir la clasificación de alteraciones en índices de alteración en función de pruebas de conminución como el work index. (ver Figura 28)

Figura 28

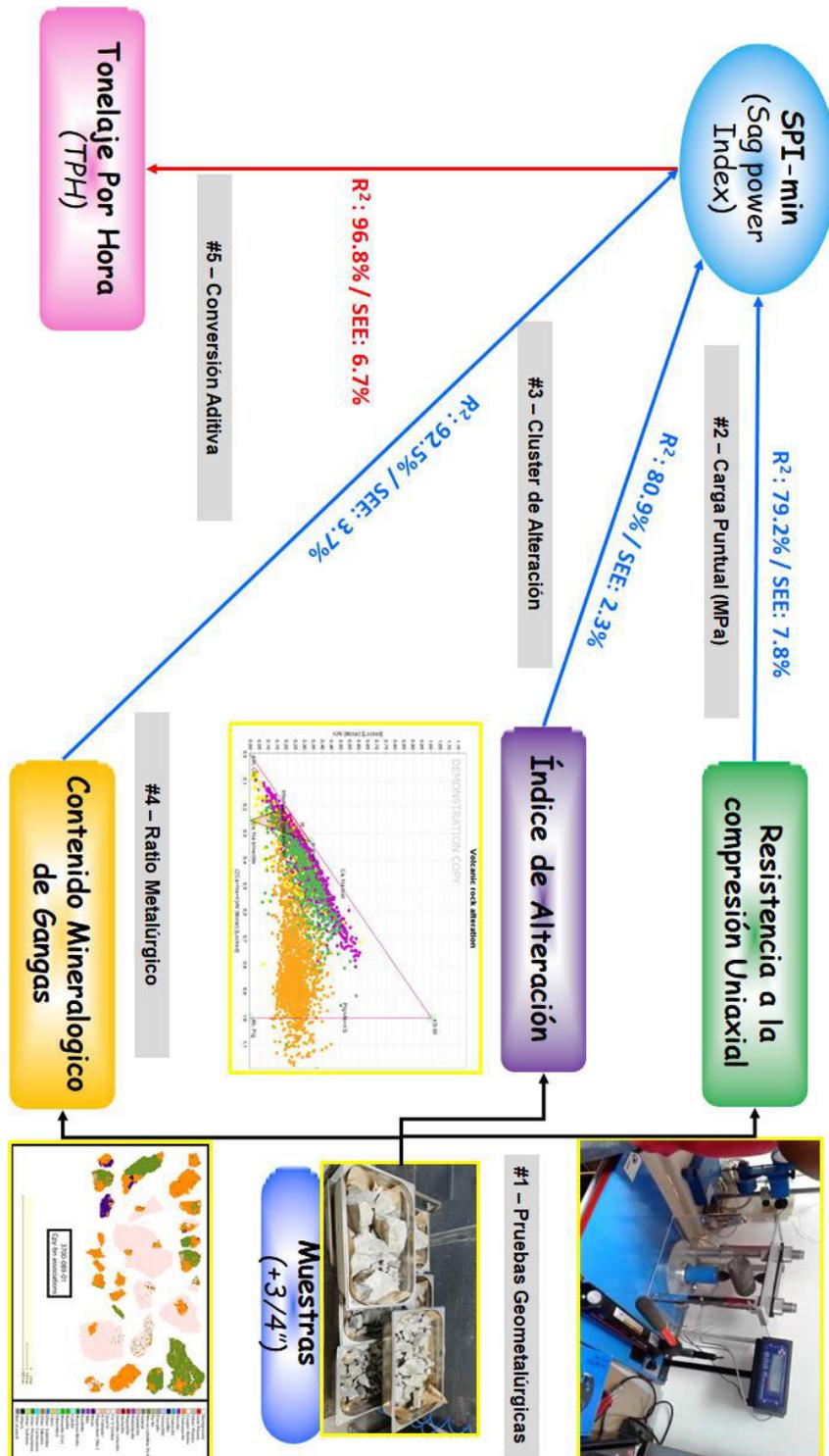
Influencia de los Dominios de Alteración sobre el Work Index



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 29

Marco de referencia del modelamiento del Sag Power Index (Estadísticos de correlación: R2 y error promedio: SEE)



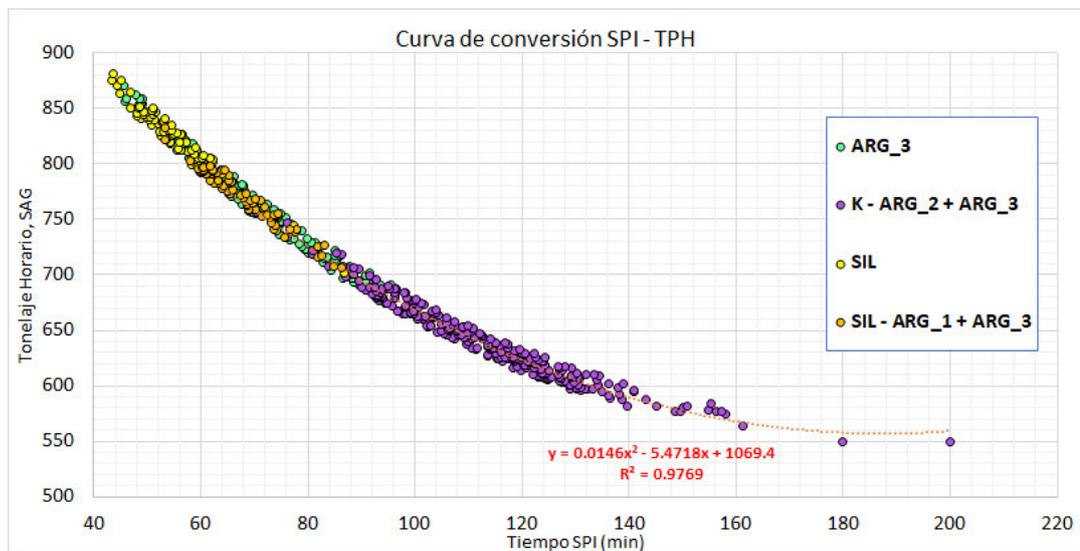
Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

4.1.1.5. Relación empírica para la conversión de tiempo del Sag power index (SPI) a Tonelaje por Hora (TPH)

En casi todas las aplicaciones geoestadísticas, las variables estudiadas deben ser aditivas. Si la variable es aditiva, el valor promedio sobre un dominio determinado corresponde a la media aritmética. Este no es el caso del tiempo en minutos de las pruebas de sag power index (SPI) lo que puede conducir a problemas en las estimaciones geoestadísticas, sobre todo en depósitos como cerro corona que tiene alta variabilidad espacial. Por tal motivo la siguiente figura adjunta una manera empírica de transformar los valores no aditivos de SPI en tonelaje (Ver Figura 30).

Figura 30

Influencia del sag power index en el tonelaje horario del molino SAG



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

4.1.2. Discusión de resultados

Conforme a las pruebas efectuadas y a los resultados obtenidos se encuentra que la mineralogía de ganga, la compresión a la carga uniaxial y el índice de alteración tienen una relación directamente proporcional con la predicción del comportamiento del tonelaje horario procesado en el molino sag como se observa en la Figura 36. La significancia de las variables de estudio queda determinada por el diagrama de Pareto presentado en la Figura 35, el cual determina a los componentes principales PC1, PC2, PC3 y PC4, pueden tener una predictibilidad de 96.80%.

Esto debido a que, la competencia del mineral depende de la característica intrínseca de las propiedades de formación del yacimiento.

El error estandarizado del modelo geometalúrgico representa aproximadamente el 4% de predictibilidad, lo que se puede atribuir a la variabilidad de granulometría de alimentación en el estudio del tonelaje horario procesado en molienda. La diferencia se debe a que las pruebas de laboratorio se realizan a 100% bajo una malla $\frac{3}{4}$, respecto de lo procesado en el tiempo, la que debido a la poca significancia de error genera una independización de esta variable respecto de la competencia metalúrgica del mineral.

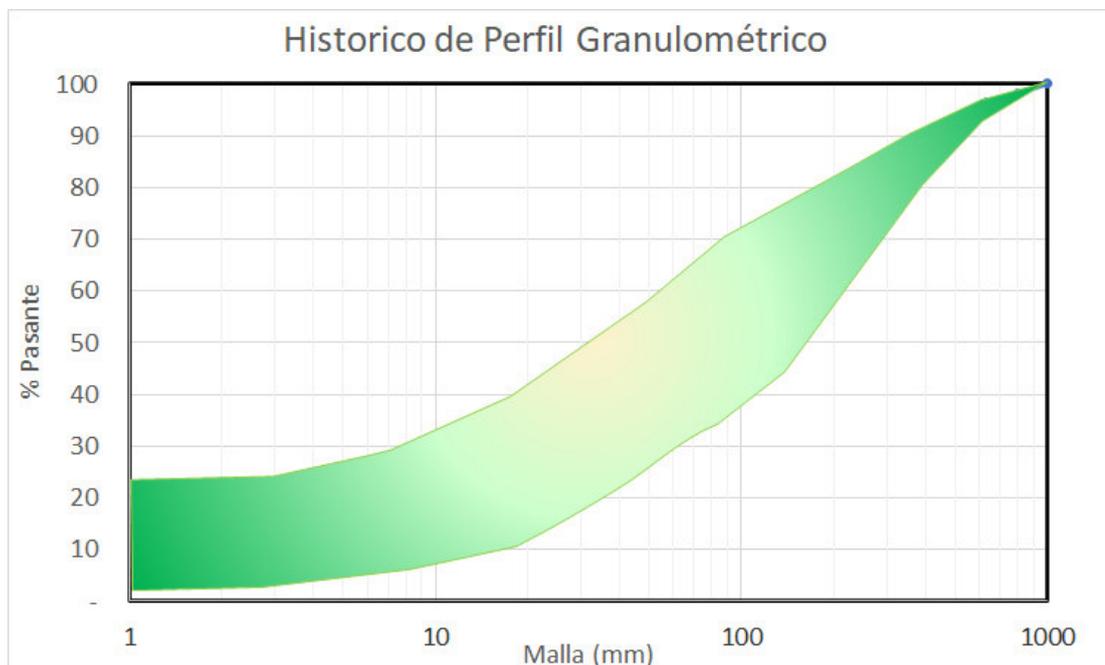
La poca variabilidad que expresan el histórico de granulométrica alimentación (ver figura 31), no impacta de manera significativa en la determinación de los resultados de la predicción del tonelaje horario de molienda (4% de error estandarizado). Debido a que la simulación de todos los escenarios realizados en las auditorias de molienda para esos rangos de trabajos es incluida en las curvas tiempo – tonelaje de la Figura 30.

Los resultados son generalizables para otros yacimientos del tipo pórfido de cobre debido a la estandarización de los circuitos cerrados de molienda para el procesamiento de minerales, además de la similitud del tipo de gangas y variables geoquímicas para el desarrollo de modelos de alteración hidrotermal.

Además, debido al uso del juicio de expertos para la toma de muestras representativas basadas en el estudio de Morrell en el 2019 para diversos pórfidos a nivel mundial en función de la covarianza (Ecuación 10), se calcularon una cantidad de 651 rocas de testeo representativo para un error menor al 10% de muestreo como menciona la Tabla 5, validando la generalización de la variabilidad que se usan en pórfidos de cobre.

Figura 31

Rango de análisis granulométrico para el periodo 2021 - 2030



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Estos resultados se respaldan con la investigación de (Gazanfer, 2018), quien afirmó que la alteración y las variabilidades litológicas son relevantes para el procesamiento utilizando proporciones de minerales clave y destrucción de textura causada por la formación de minerales debido a que el sistema de formación de mineral de pórfido de cobre tiene su propia armonía y espacio mineral. Ciertas litologías son reemplazadas por ciertos minerales de alteración que permiten las condiciones químicas adecuadas para el depósito del cobre. No es una coincidencia que la mayoría de los pórfidos de cobre estén alojados en pórfidos de feldespato de cuarzo, cuya composición

mineralógica general del pórfido consiste en cuarzo, plagioclasa, feldespato de potasio, hornblenda y biotita.

Por su parte, (Amelunxen, 2018), comprobó experimentalmente la influencia directa y significativa del sag power index (SPI), para pronosticar el rendimiento autógeno del molino. El uso de estos modelos permite predecir el comportamiento de una mezcla de minerales basándose únicamente en los modelos de sus minerales madre. Adema de que el SPI no es un parámetro aditivo. Los estudios geoestadísticos y de mezcla deben considerar la curva completa de molienda versus tiempo si se desea un parámetro aditivo.

Con la investigación de (Junhyeok & Kwangmin, 2020) se coincide en la eficiencia de la rotura de rocas durante la trituración y molienda es clave para la optimización de mina a molino. Este estudio explora el uso de datos de monitoreo durante la perforación extrayendo tasas de penetración representativas de los pozos de voladura para estimar las propiedades de la roca intacta y predecir las eficiencias de rotura que afectan directamente el consumo de energía de trituración.

Por último, (Cáceres, 2018) determino la importancia del estudio geoquímico en la generación del modelo geológico para predecir la fragmentación de las rocas mineralizadas. El análisis de cada uno de estos aspectos y una minuciosa observación de la realidad geológica en campo en base a los mapeos litológicos-mineralógicos y la descripción e interpretación de los sondajes ejecutados, permitieron elaborar un constructo general geometalúrgico.

La semejanza de esta investigación con otros autores se basa en la aplicación de la caracterización geometalúrgica para predecir el tonelaje en yacimientos del tipo pórfido de cobre en países de Latinoamérica. Los cuales son provincias metalogénicas con el Perú, por tal motivo se puede replicar algunos conceptos debido a las similitudes en su geología de formación.

El aporte de estos resultados permite validar la propuesta de una nueva metodología geometalúrgica para la predicción del tonelaje en función de la caracterización geometalúrgica y su impacto en la predicción de los

comportamientos metalúrgicos, que presentarán los materiales rocosos que serán alimentados a planta.

Contrastación, Por ejemplo: Chi cuadrado, Anova. Los niveles de confianza de perason usadas son: 90%, 95% y 99%.

A partir de estos resultados de prueba T Student realizada con el software Minitab 19 y Python 3.9.2 a niveles de confianza del 95%, confirman la influencia directa y significativamente de la mineralogía de gangas (feldespatos K, plagioclasas Na y cuarzo), la resistencia a la compresión uniaxial y la alteración sobre el tonelaje horario de molienda. En la cual, los mejores resultados de tonelaje observados son de 900 toneladas por hora según la Figura 30.

4.2. Pruebas de hipótesis

Para la predictibilidad del tonelaje horario de molienda semiautógena (TPH), se muestra lo siguiente:

Ho: μ , real = μ , modelo

H1: μ , real \neq μ , modelo

El estadístico de T de Student se realizó para verificar la hipótesis alternativa en comparación de medias con varianzas diferentes (modelo y valores reales), mediante el programa Minitab v 19.0. A continuación se muestran dichos resultados (Ver Tabla 7).

Tabla 7

Resumen de valores para la prueba T student.

Variable	N° Datos	Media	Desviación Estándar	Error estándar de la media
TPH_Real	651	692.77	103.42	4.05
TPH_Modelo	651	691.7	100.55	3.94

Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

- Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales (Ver Tabla 8).

Tabla 8

Análisis T student para varianzas diferentes.

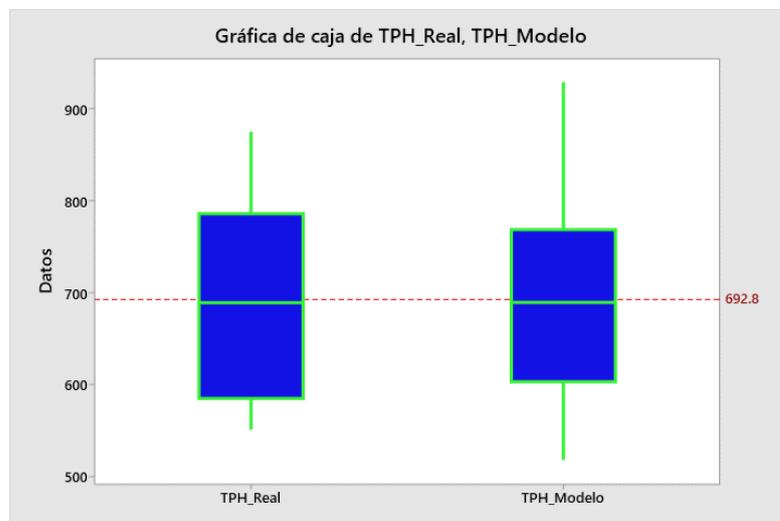
<i>Estadístico</i>	<i>TPH_Real</i>	<i>TPH_Modelo</i>
Media	692.765569	691.699586
Varianza	10695.9797	10110.2744
Observaciones	651	651
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1299	
Estadístico t	0.18855751	
P(T<=t) una cola	0.42523455	
Valor crítico de t (una cola)	1.6460275	
P(T<=t) dos colas	0.85046909	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96179189	

Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

- Con un nivel de confianza del 95%, los resultados arrojan un valor p = 0.85.
- Con el cual se acepta Ho. Esto implica que rechaza H1, que significa que el promedio obtenido con el modelo es significativo estadísticamente igual al valore real. Esta similitud se ilustra en el siguiente gráfico (Ver Figura 32).

Figura 32

Box Plot comparativo de valores reales de tonelaje horario respecto del modelo



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

4.3. Presentación de Resultados

Luego del análisis de la información obtenida mediante la recolección de muestras tomadas en campo, se procedieron a realizar pruebas de conminución, geoquímica y mineralogía. Para los valores de carga puntual se realizó su asignación de valor de acuerdo con un krigiado con las muestras de las campañas 2018 - 2020. De donde se obtuvo muestras necesarias para realizar el modelamiento sag power index indicando lo siguiente:

Los resultados de la tabulación de la información recopilada y analizada mediante el estadístico de componentes principales reflejan el impacto de la competencia metalúrgica en función de las variables de formación de roca y su composición, como se observa en la Tabla 9.

Esto significa que, si consideramos el modelamiento del tonelaje horario en relación con el modelo empírico del índice de potencia en la molienda semi autógena, puede ser predicha por el porcentaje de feldespatos potásicos, porcentaje de plagioclasas sódicas, porcentaje de cuarzo, esfuerzo de carga puntual y el índice de alteración.

Tabla 9

Matriz de correlación para componentes principales

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
K-Feldspate	0.467	0.158	0.672	0.006	-0.552
Plagioclase (Na-)	0.53	-0.16	-0.079	0.767	0.314
Quartz	-0.536	-0.098	-0.098	0.583	-0.594
UCS (MPa)	0.45	-0.307	-0.639	-0.241	-0.487
IA	-0.105	-0.92	0.352	-0.114	0.076

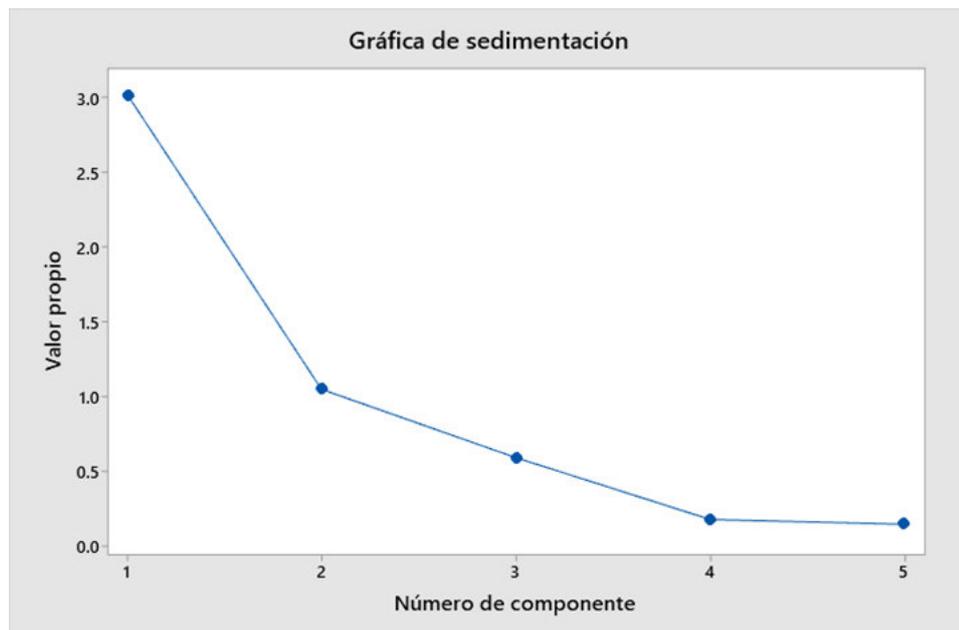
Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El modelamiento lineal del sag power index se realizó en base al número de componentes que explican la mayor parte de la variación en los datos que se interpretan a través de la gráfica de sedimentación (Ver Figura 33).

La afinidad de varianza en las variables queda corroborada visualmente con el uso del dendograma (Ver figura 34), el cual muestra conglomerados de observaciones en cada paso y sus niveles de similitud, determinando de esta manera 4 componentes principales para explicar el 97% de la variabilidad de los variables independientes.

Figura 33

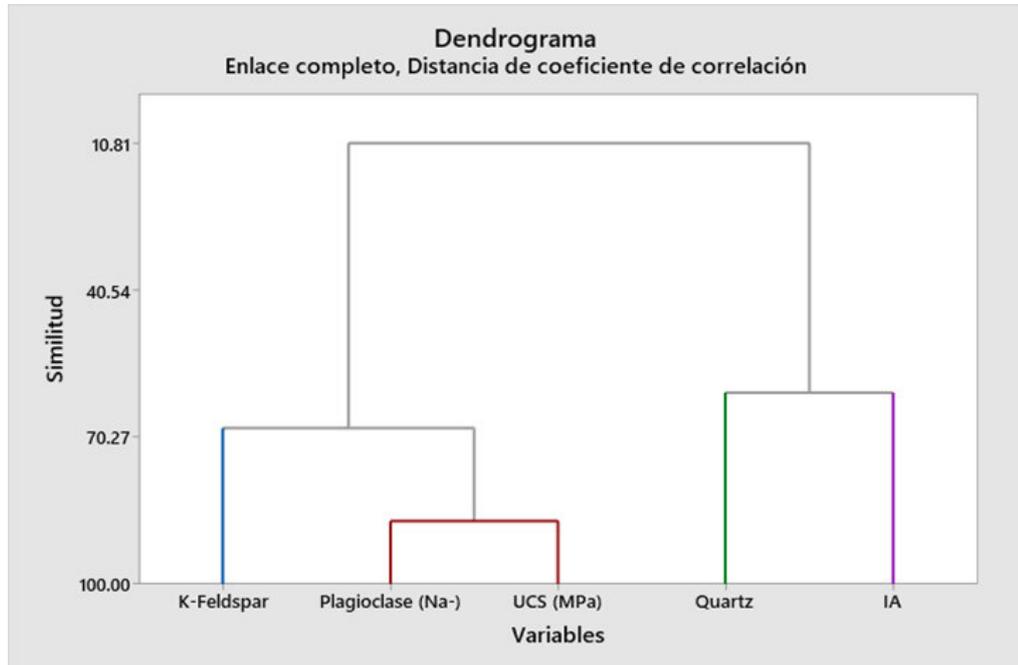
Grafica de sedimentación para componentes principales



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Figura 34

Dendrograma para componentes principales



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El resultado del modelamiento de la variable sag power index en función de los componentes principales determinaron un coeficiente de correlación lineal elevado (mayor al 95%) con una baja colinealidad como muestra la tabla 10 adjunta.

Tabla 10

Resumen de valores de correlación para modelo SPI

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
6.79667	96.89%	96.87%	96.80%

Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

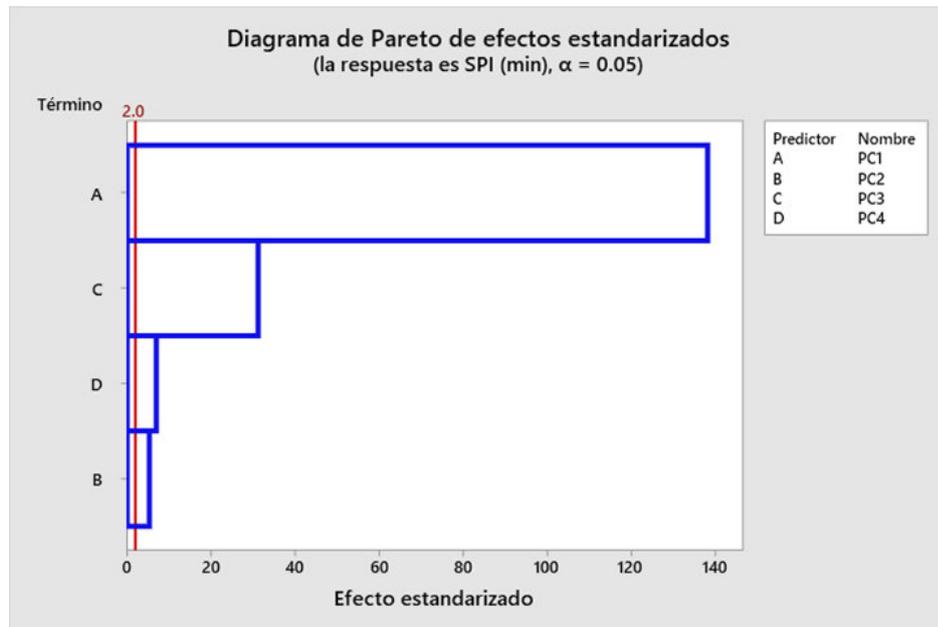
La significancia de las variables independientes es graficada mediante el diagrama de Pareto (Ver Figura 35), ordenando los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño (A, C, D y B). El diagrama también grafica una línea de referencia que indica cuáles efectos son estadísticamente significativos.

De lo anterior mencionado en la ecuación lineal de modelamiento queda determinada por las variables predictores A, B, C, D y sus componentes PC1, PC2, PC3, PC4, quedando la ecuación de la siguiente manera;

$$\text{SPI (min)} = 99.497 + 21.201 * \text{PC1} + 1.378 * \text{PC2} + 10.780 * \text{PC3} + 4.306 * \text{PC4} \quad (11)$$

Figura 35

Diagrama de Pareto para las significancias del modelo SPI



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

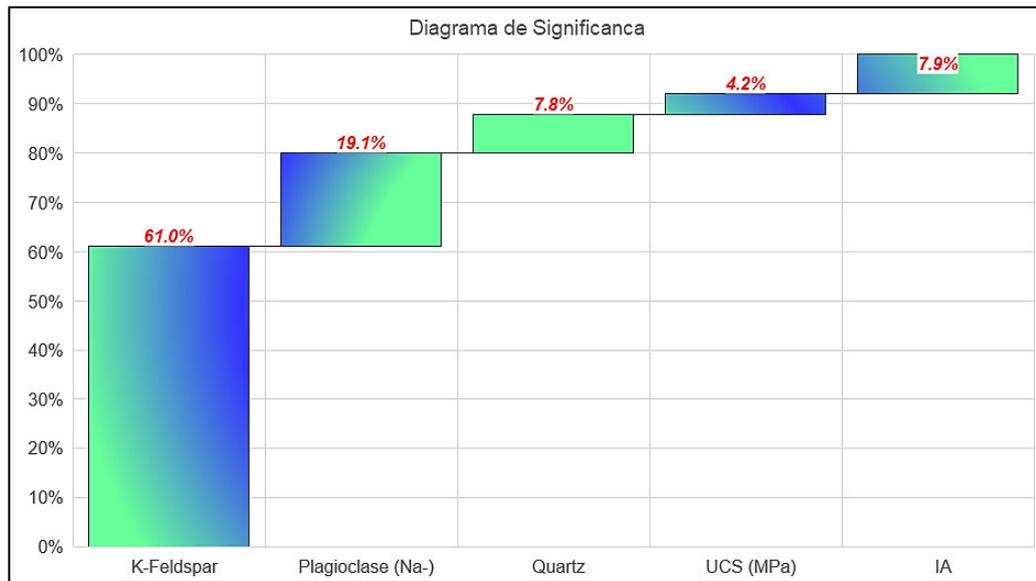
En el diagrama de significancia de la Figura 36, se observa la subdivisión de los componentes principales en las variables de mayor importancia del estudio geometalúrgico. Determinando que el peso de cada variable es:

- 61% feldespato potásico, 19.1% plagioclasa sódica y 7.8% cuarzo los cuales forman parte del conglomerado de la mineralogía de gangas que fueron determinados por microscopía electrónica y análisis espectrales infrarrojo cercano con procesamiento de datos en machine learning.
- 4.7% UCS, conglomerado de resistencia a la roca que fue determinado por ensayos de carga puntual.

- 7.9% IA, conglomerado del índice de alteración hidrotermal que fue determinado por la geoquímica y el procesamiento de datos a través de machine learnig.

Figura 36

Diagrama waterfall para la significancia de variables independientes

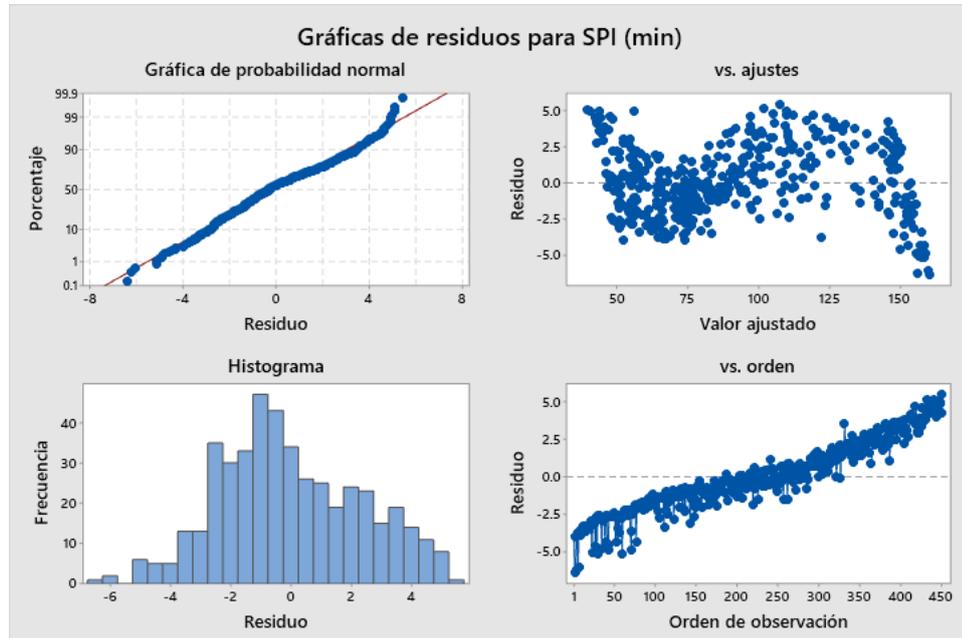


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

El ajuste del modelo se verifica con el análisis de residuos que se observa en la siguiente gráfica que se utiliza para examinar la bondad de ajuste en regresión y ANOVA. La gráfica de residuos le ayuda a determinar el cumplimiento de los mínimos cuadrados ordinarios sin sesgo con varianza mínima (Ver Figura 37).

Figura 37

Grafica de residuos del modelo SPI

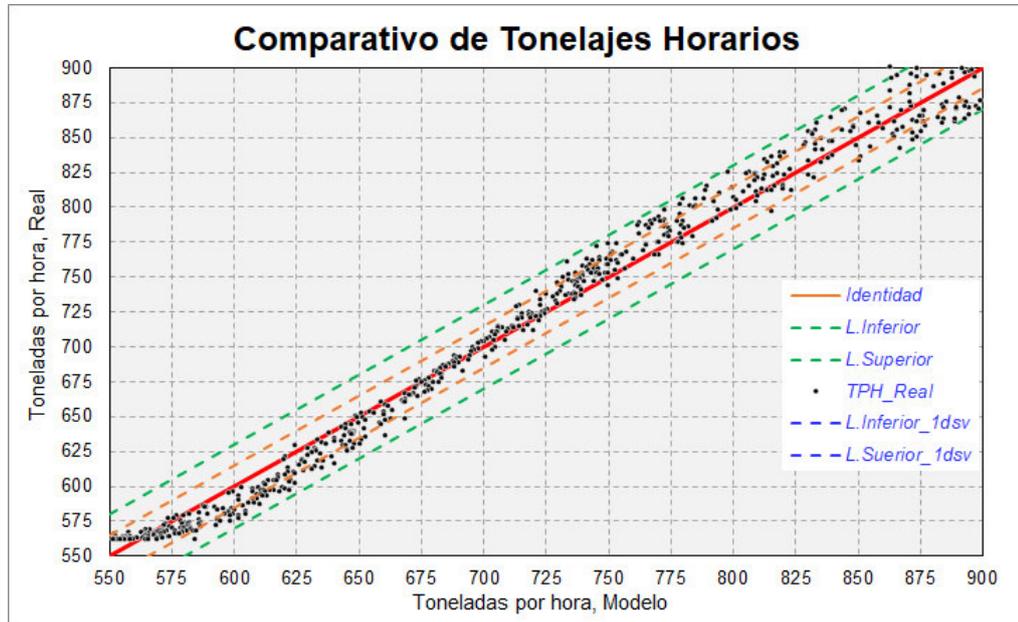


Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

Para conocer el comportamiento del modelo y la bondad de ajuste del mismo, se muestra en la figura una imagen de scatterplot para la comprobación del ajuste de la conversión del tiempo SPI en el Tonelaje Horario y su ajuste de correlación del 96.86% hasta 3 desviaciones (Ver Figura 38). A partir de la obtención de dicha información, y la interpretación correspondiente se observa que la implementación del modelo tendrá una predictibilidad ± 10 toneladas por hora.

Figura 38

Gráfico de dispersión para el modelo de tonelaje horario SAG



Fuente: Elaborado por empresa minera Gold Fields.

CONCLUSIONES

- Del análisis de los datos se demuestran que los parámetros claves de formación de mineral que incorporan la alteración hidrotermal, la resistencia a la roca y mineralogía de gangas pueden usarse para predecir el tonelaje horario, debido a que el entorno geológico impulsa el comportamiento de la competencia de roca que se ve reflejado en la moliendabilidad del material quedado demostrado estadísticamente mediante la correlación de la Figura 38.
- La microscopia de gangas sumado a la caracterización del espectro de infrarrojo cercano pudieron determinar las principales gangas en el pórfido de corona como se observa en la tabla 6, determinando de esta manera que el impacto de esta mineralogía en las gangas es debido a las plagioclasa sódica + feldespato potásico que fueron remplazadas por minerales de alteración, el cuarzo se agrega a los sistemas como vetas de cuarzo y/o mediante remplazo de minerales, además no se

llegó encontrar una alteración 100% cuarzo que fuera de una roca original.

- La compresión uniaxial en esta tesis se midió con el equipo de carga puntual, el cual proporciona la energía, la resistencia y la rigidez de la fractura de partículas. Estas mediciones se pueden realizar bajo una carga de impacto similar a las condiciones en los molinos industriales. Por lo tanto, la distribución de la resistencia de la roca para cada dominio proporciona una comprensión fundamental del conocimiento del yacimiento. Este enfoque novedoso permite vincular la energía de fractura de partículas, la resistencia y la rigidez en lugar de modelos empíricos correlacionados con el rendimiento del molino. En las pruebas señaladas en la figura 24, se determinó un rango de valores entre 20 hasta 362 mega pascales, siendo el valor de su mediana de 200 mega pascales con el que se diseñaron el circuito de molienda.
- La alteración hidrotermal se mide mediante un índice descrito en la figura 22, el cual se centra en lo que se ha perdido por acción buffer de la roca encajante (dominio de alteración) más que en el mineral de interés económico (dominio de mineralización). Por tal motivo tiene una relación directa con la competencia de roca y el tonelaje horario procesado, debido a la trazabilidad de elementos como plagioclasas y cuarzo.

RECOMENDACIONES

- El modelamiento del tonelaje horario y el rendimiento del molino depende de muchas variables, como la adecuada caracterización geometalúrgica, la planificación minera, el diseño de voladura y variables operativas. Por lo tanto, se recomienda investigar el efecto de cada una desde el punto de vista geometalúrgico.
- Se recomienda validar las metodologías de caracterización planteadas en la figura, para generar campañas de canales usando los espectros de infrarrojo cercano.
- Se recomienda tener el valor de la carga puntual modelada en bloques de acuerdo con los nuevos dominios de alteración hidrotermal.

- Se ha determinado la correcta generación de dominios de alteración hidrotermal y su impacto en conminución, los cuales deberían ser evaluados en relación con otros procesos como flotación y lixiviación.
- Se recomienda iniciar un proyecto de investigación con la finalidad de robustecer la caracterización geometalúrgica de los parámetros claves mencionados en esta tesis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

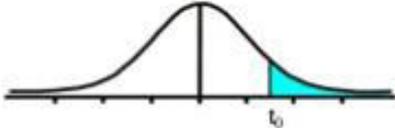
- Amelunxen, P. (15 de 10 de 2018). The Application of The Sag Power Index to Ore Body Hardness Characterization for The Design and Optimization of Autogenous Grinding Circuits. Montreal, Quebec, Canada. Recuperado el 29 de 10 de 20, de <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/5h73pw70v>
- Cáceres, S. (10 de 11 de 2018). Influencia Del Modelo Geometalúrgico Para La Optimización De Los Procesos De Explotación Y Beneficio Del Au En El Yacimiento Don Marcelo De La Provincia De Recuay, Ancash - 2017. Huancavelica, Huancavelica, Perú. Recuperado el 01 de 11 de 20, de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNH_ca341864a0270cc522b65ffc5fb8fb19
- Chikochi, C. (25 de 6 de 2017). Caracterización de rotura de mineral de depósitos de UG2 utilizando el JK RBT. Cabo, Cabo de sudáfrica, África. Recuperado el 30 de 10 de 20, de <https://open.uct.ac.za/handle/11427/27300>
- Danish, B. (24 de 10 de 2017). Geometallurgical estimation of comminution indices for porphyry copper deposit applying mineralogical approach. Luleå, Norrbotten, Suecia. Recuperado el 15 de 10 de 20, de <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1149944&dswid=-3992>
- Dianderas Smith , H., & Rivera León, F. (15 de Julio de 2018). El Requerimiento Del Marco Epistemológico En Las Tesis De Post Grado. Lima, Perú.
- Díaz, E. (20 de 07 de 2018). MODELAMIENTO GEOMETALÚRGICO DEL CONSUMO DE MEDIOS DE MOLIENDA BASADO EN TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN AVANZADA. Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147418>
- Foggiatto, B. (28 de 07 de 2019). Modelling and simulation approaches for exploiting multi-component characteristics of ores in mineral processing

- circuits. Queensland, Brisbane, Australia. Recuperado el 05 de 11 de 20, de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:673552>
- Gazanfer, B. (21 de 12 de 2018). Development of a correlation between mineralogy, rock strength measures, and breakage of Copper Porphyries. Queensland, Brisbane, Australia. Recuperado el 11 de 11 de 20, de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:413846>
- Junhyeok, P., & Kwangmin, K. (2020, 03 15). Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine. *30(2)*, 179-188. Tucson, Arizona, EE.UU: ScienceDirect. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.12.021>
- Kishida, A., & Kerrich, R. (2018). Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. doi:10.2113/GSECONGEO.82.3.649
- Lund , C. (13 de 08 de 2019). Mineralogical, Chemical and Textural Characterisation of the MalMBERGET Iron Ore Deposit for a Geometallurgical Model. Luleå, Norrbotten, Suecia. Recuperado el 11 de 11 de 20, de <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A989806&dswid=1871>
- Michaux, S. (11 de 5 de 2019). How to Set Up and Develop a Geometallurgical Program. Amira. doi:10.13140/RG.2.2.16170.24005
- Morrell, S. (06 de 10 de 2019). GLOBAL TRENDS IN ORE HARDNESS. Australia. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/292149557>
- Mwanga, A. (12 de 05 de 2020). Test Methods for Characterising Ore Comminution Behavior in Geometallurgy. Luleå, Norrbotten, Suecia. Recuperado el 01 de 10 de 20, de <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A991700&dswid=-4459>
- Sillitoe, R. (15 de 12 de 2021). Porphyry copper systems. *Economic geology*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/368217620/Sistemas-de-Porfidos-Cupriferos-richard-h-Sillitoe-2010>
- Starkey, J. (06 de 07 de 2022). Comparison of Ore Hardness Measurements for Grinding Mill Design for the Tenke Project.
- Wilkie, G. (18 de 11 de 2021). Rapid assessment of the sorting potential of copper porphyry ores through modelling of textures and grade distributions. Queensland, Brisbane, Australia. Recuperado el 15 de 09 de 20, de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:411674>

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla estadística t de student de una cola (Amelunxen, 2018)

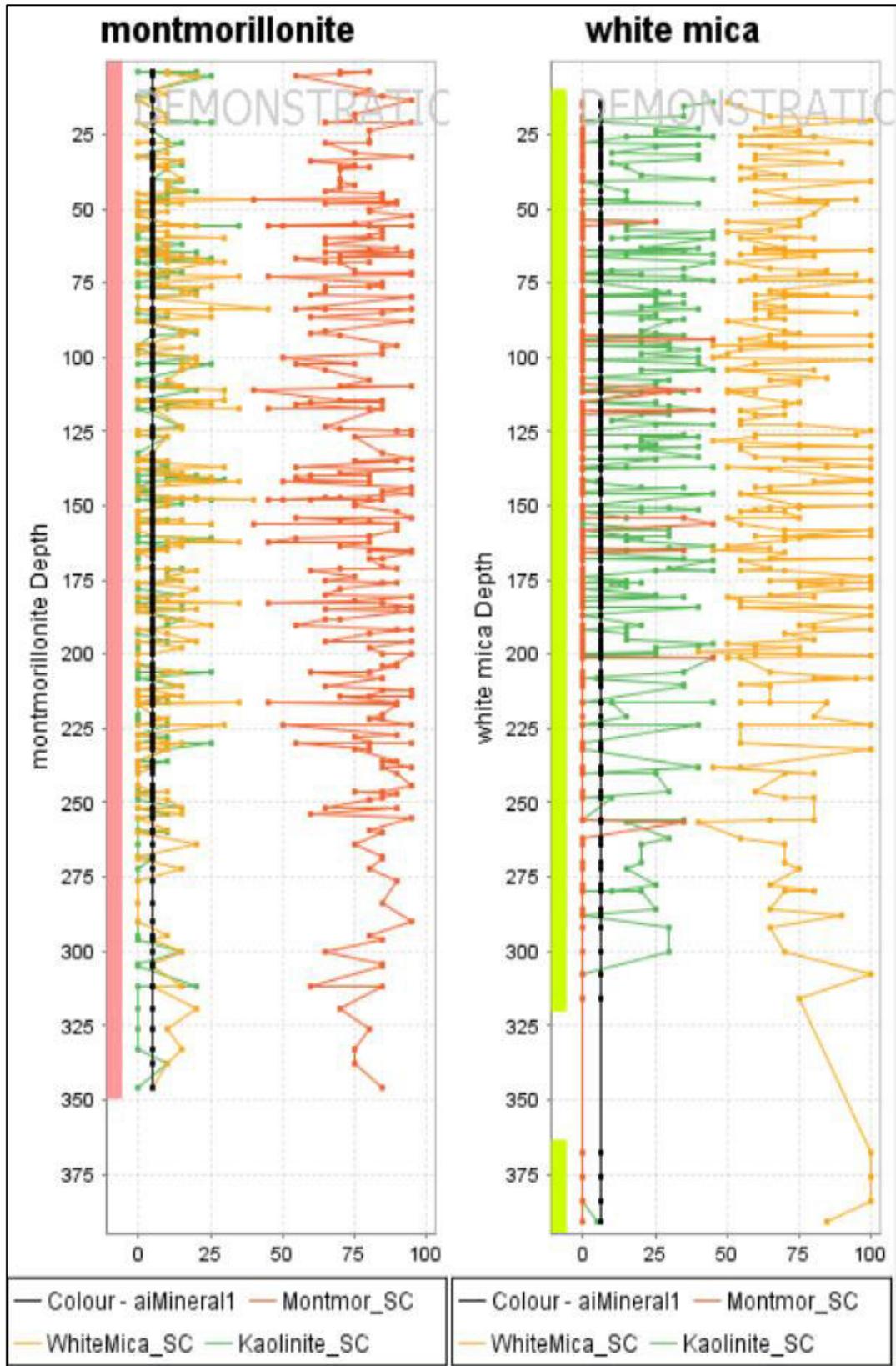


Student

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

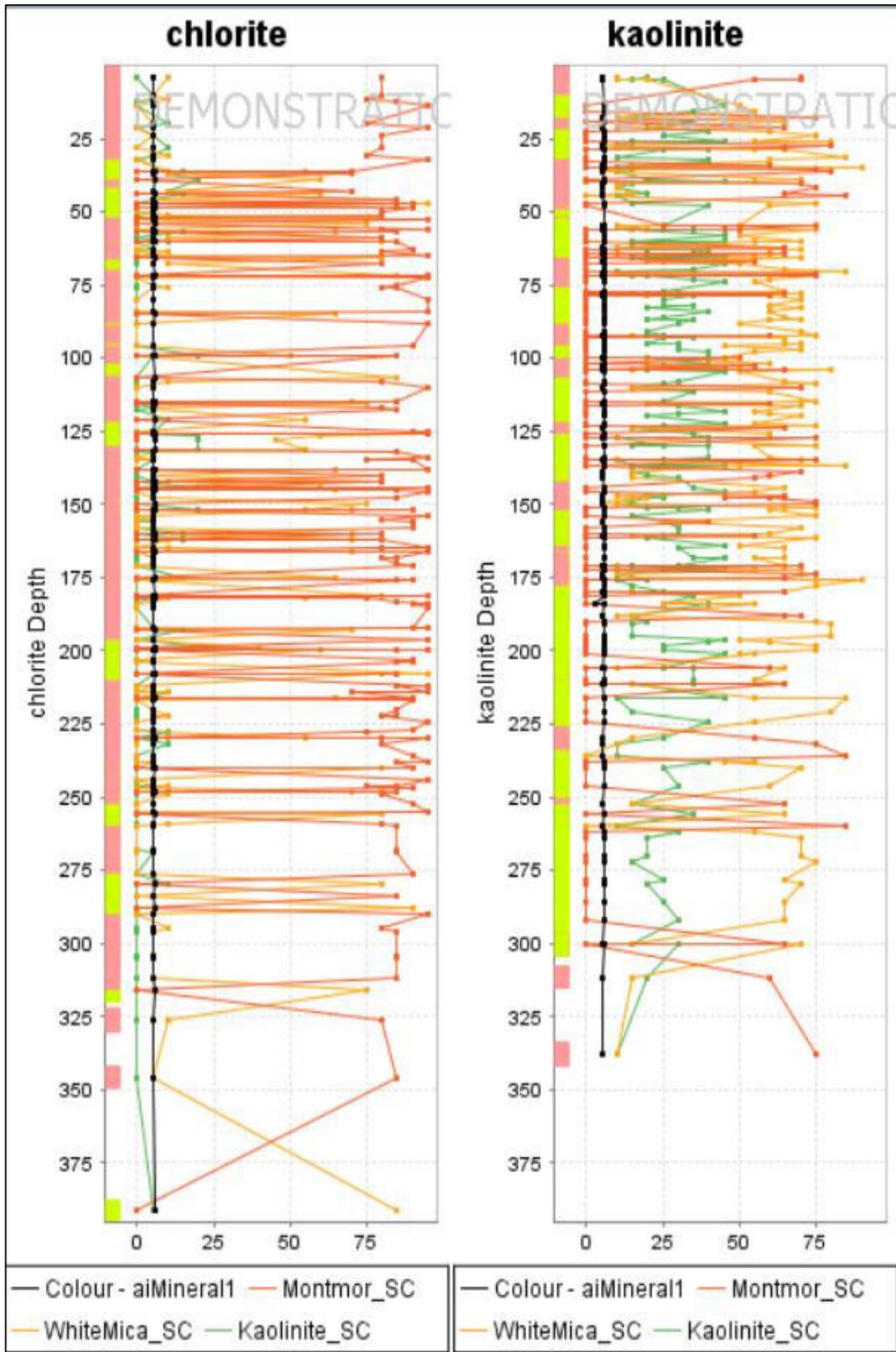
ANEXO 2

Logeo espectral del sondaje diamantino de Arcillas I



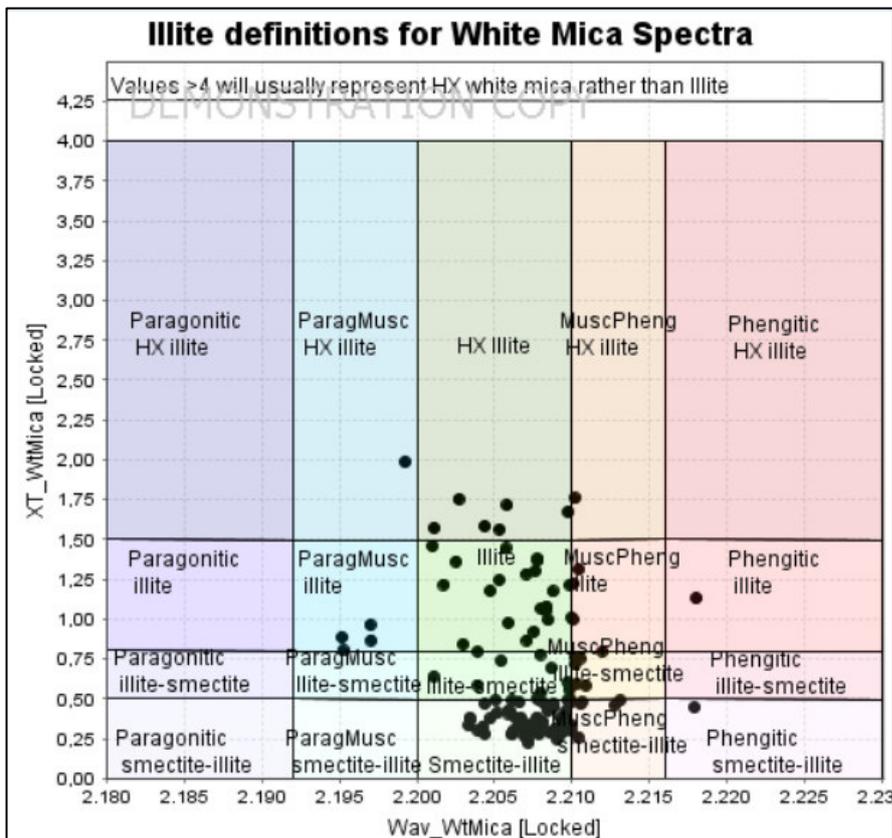
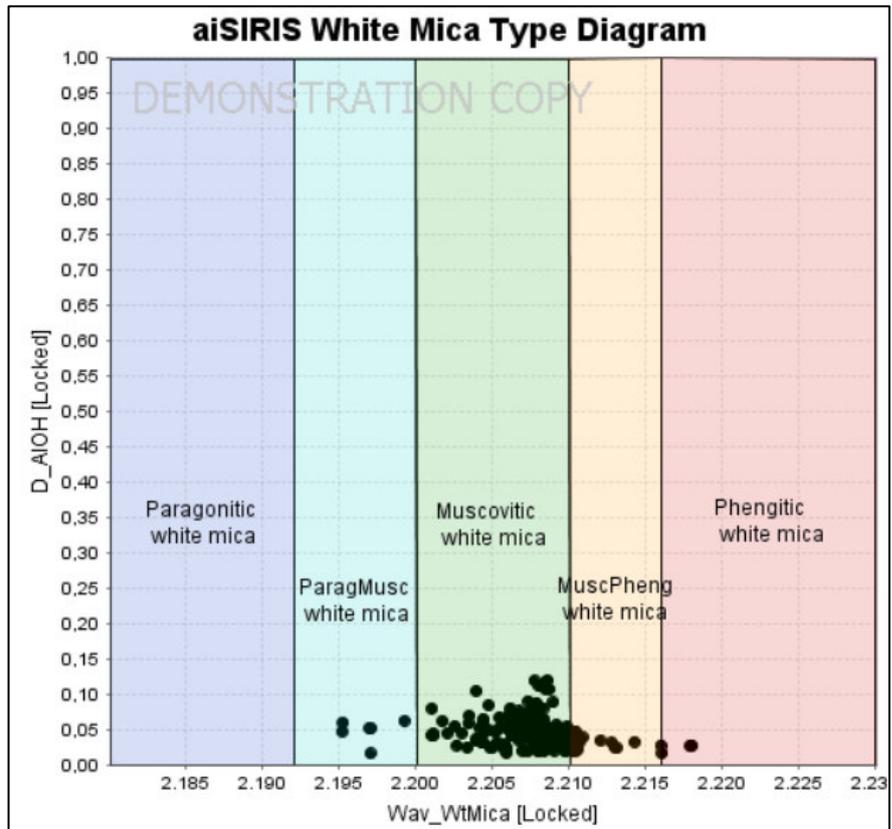
ANEXO 3

Logueo espectral del sondaje diamantino de Arcillas II



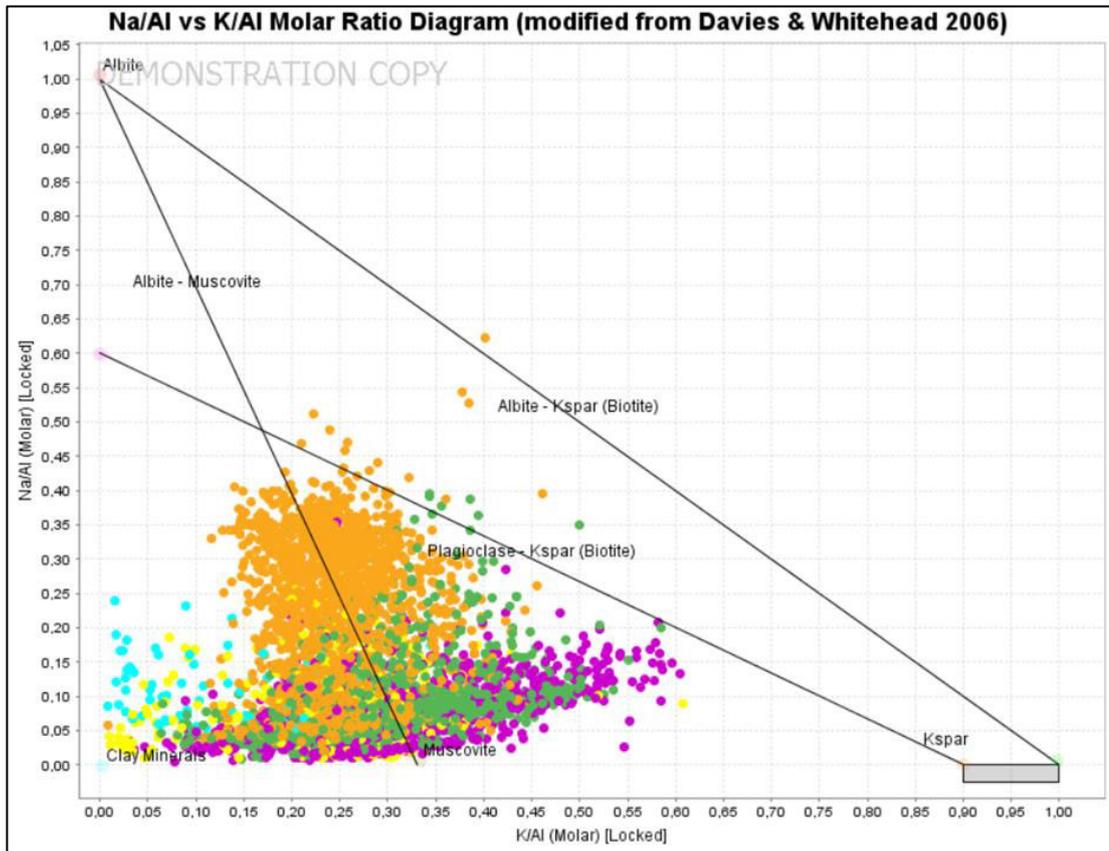
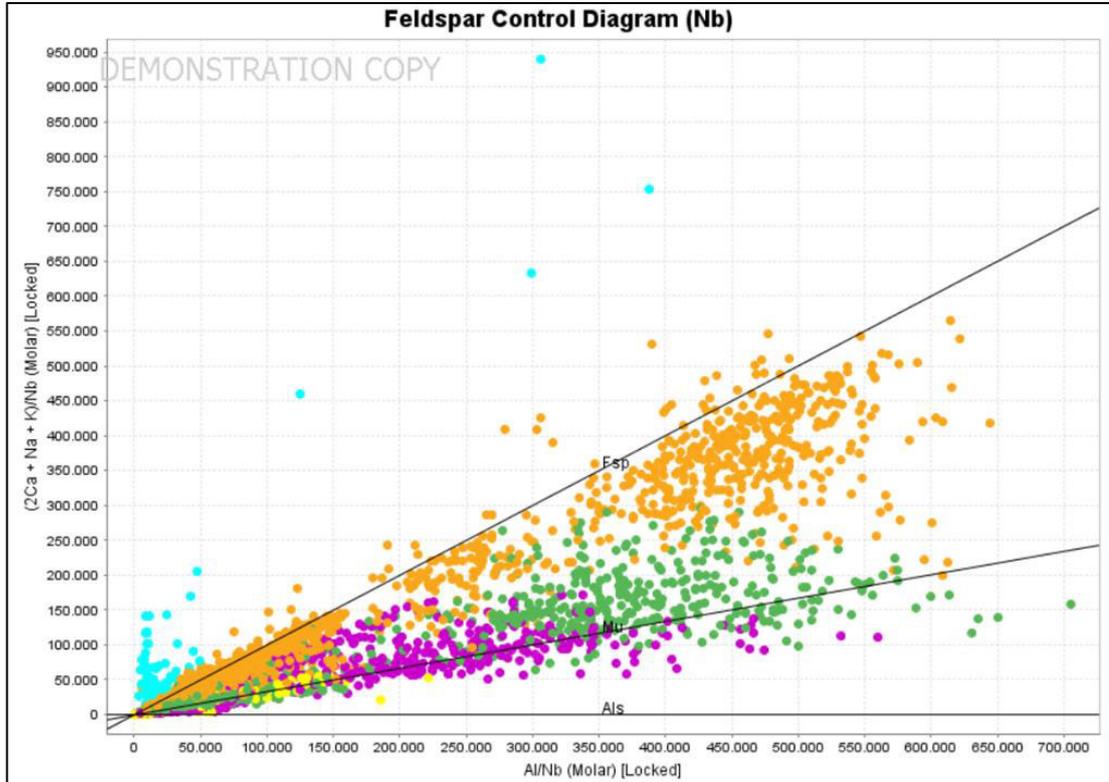
ANEXO 4

Identificación espectral de las principales arcillas blancas



ANEXO 5

Interpretación geológica de tipos de rocas basada en relaciones geoquímicas



ANEXO 6

Interpretación geológica de tipos de rocas basada en relaciones geoquímicas

