

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**EVALUACIÓN DE ÍNDICE DE TRABAJO, (WORK INDEX); EN UN
YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO DE COBRE Y SU IMPLICANCIA
GEOMETALÚRGICA**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Geólogo, que presenta el bachiller:

Jorge Daniel Rojas Lava

ASESOR: Edmundo Abdul Alfaro Delgado

Lima, noviembre de 2018

Resumen

En términos de CAPEX y OPEX los costos para la conminución mineral son los más significativos en un proceso minero, por ello es importante estudiar las características geológicas que influyen en el proceso de la conminución.

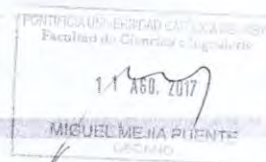
En el presente trabajo se propone una interpretación geometalúrgica basada en resultados de pruebas de Work Index y su relación con minerales presentes en un yacimiento tipo Pórfido de Cobre. Los valores de Work Index están expresados en kilowatt-hora por tonelada corta y fueron obtenidos de pruebas de laboratorio. Dichos valores fueron relacionados con el contenido porcentual de un grupo de silicatos específicos que son competentes en términos de dureza. El estudio tomó en consideración las zonas de alteración características en este tipo de yacimientos. Se concluyó que la mineralogía del yacimiento no influye en el Work Index y que se sugiere analizar el factor textural para la obtención de posibles correlaciones.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Geólogo
ALUMNO : Jorge Daniel Rojas Lava
CÓDIGO : 20037188
PROPUESTO POR : Dra. Silvia Rosas Lizárraga
ASESOR : Dr. Edmundo Alfaro Delgado
TEMA : Evaluación de Índice de Trabajo, (Work Index); en un yacimiento tipo Pórfido de Cobre y su implicancia Geometalúrgica.

No. TEMA : # 01
FECHA : 1/87/17

OBJETIVOS :



Objetivo principal

Identificar relaciones entre el Índice de Trabajo Bond Bolas, (Work Index) y las especies mineralógicas de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre en un contexto Geometalúrgico

Objetivos secundarios:

Identificar relaciones mineralógicas específicas de:

- Work Index vs Feldespatos.
- Work Index vs Cuarzo.
- Work Index vs Arcillas.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:

La Geometalurgia es una disciplina que está desempeñando un rol fundamental en la minería moderna. La tendencia a realizar trabajos multidisciplinarios entre las áreas de geología, mina y planta tiene gran relevancia actualmente, ya que el integrar todos los procesos mineros en uno solo implica la optimización del conjunto de la actividad minera y a su vez, de cada uno de ellos.

Los estudios Geometalúrgicos tienen por finalidad caracterizar mejor el yacimiento en cuanto a su litología, controles estructurales, mineralogía de mena, mineralogía de ganga, minerales de alteración y texturas minerales, de modo tal que en función a estas características intrínsecas se pueda proyectar el rendimiento en planta de los distintos procesos metalúrgicos tales como chancado, molienda, flotación y lixiviación, entre otros importantes aspectos como el mejor planeamiento de minado, el mejor control medioambiental, etc.

El presente trabajo busca encontrar y analizar una relación entre el consumo de energía que se emplea para la molienda de mineral procesado, (Work Index), y minerales competentes, en términos de dureza, provenientes de un yacimiento tipo pórfido de cobre. Con este fin se trabajará con resultados de mediciones de Work Index ensayados en taladros de perforación, de los cuales se obtendrá la composición mineralógica "cuantitativa" (expresada en términos porcentuales). Se busca entonces analizar el contenido mineralógico como variable geológica en relación al grado de dureza de un grupo de silicatos específicos (feldespatos, cuarzo y arcillas), teniendo al Work Index como respuesta metalúrgica. Los estudios se realizarán teniendo en cuenta las zonas de ubicación de los taladros de perforación, las cuales estarán caracterizadas por los diferentes tipos de alteración presentes, con la finalidad de analizar si es que ésta influye en los resultados.

Mediante el uso de herramientas estadísticas se procederá a buscar una relación lineal entre los valores de Work Index y el contenido de feldespatos, cuarzo y arcillas.

Estas relaciones serán un aporte Geometalúrgico en el tratamiento de minerales, ya que permitirán al Geólogo tener un criterio preliminar de las condiciones de dureza de mineral en el yacimiento y señalar esta condición metalúrgica de las zonas mineralizadas a ser procesadas en la planta metalúrgica.

PLAN DE TRABAJO:

- Introducción y Marco Teórico

Introducción del concepto de Geometalurgia y sus aplicaciones: un marco teórico en el cual se describirá todos los conceptos y aplicaciones de la Geometalurgia, asociados a la conminución mineral, definición de Work Index, pruebas de Work Index, concepto estadístico de regresiones lineales, definición de un yacimiento tipo pórfido de cobre, tipos de alteraciones, entre otros.

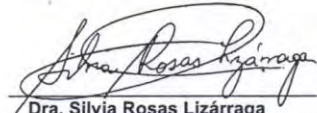
- Metodología Experimental

Análisis de datos con el uso de herramientas estadísticas para analizar la relación Work Index vs mineralogía para cada zona del yacimiento, caracterizada por un tipo de alteración, buscando encontrar correlaciones.

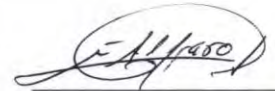
- Discusión de resultados y conclusiones

Interpretación del análisis realizado explicando causas que puedan haber influido en los resultados observados. Conclusiones de la evaluación efectuada.

Máximo 100 páginas.



Dra. Silvia Rosas Lizárraga
Coordinador
Especialidad de Ingeniería Geológica



Dr. Edmundo Alfaro
Asesor



Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Marco Teórico	4
3.1. Conminución Mineral	4
3.2. Índice de Trabajo de Bond.....	6
3.2.1. Aplicaciones de la Ley de Bond.....	7
3.2.2. Índice de Bond vs Dureza del mineral	8
3.2.3. Determinación del Work Index.....	8
3.2.3.1. Determinación del Work Index en el molino de bolas	9
3.3. Yacimientos Tipo Pórfidos de Cobre.....	13
3.3.1. Sistemas Porfiríticos.....	13
3.3.1.1. Temperatura.....	13
3.3.1.2. Contenido de Metales	13
3.3.1.3. Contenido de Azufre.....	14
3.3.1.4. Rol del Cloro	14
3.3.1.5. Fugacidad de Oxígeno	14
3.3.1.6. Contenido de Agua en Magmas	15
3.3.1.7. Componentes Volátiles	16
3.3.2. Control Estructural.....	16
3.3.3. Alteración Hidrotermal	17
3.3.3.1. Alteración Pervasiva.....	18
3.3.3.2. Alteración no Pervasiva.....	18

3.3.3.3. Alteración Asociada a Metasomatismo por H ⁺	18
3.4. Geometalurgia	22
3.5. Aplicaciones Geometalúrgicas.....	22
3.6. Diagrama de Caja.....	24
3.7. Diagrama de Dispersión	25
3.8. Correlación Lineal.....	26
4. Metodología Experimental	28
4.1. Ratio de Dureza.....	28
5. Resultados.....	30
5.1. Zona Sílice-Potásica.....	33
5.2. Zona Arcilla-Sílice-Potásica	40
5.3. Zona Arcilla-Yeso-Potásica.....	46
5.4. Zona Calcopirita-Pirita-Potásica	49
5.5. Zona Potásica.....	55
6. Discusión de Resultados	61
6.1. Work Index vs Textura.....	63
6.2. Work Index vs Profundidad.....	68
6.3. Factor Voladura	70
7. Conclusiones	71
8. Bibliografía.....	73

Lista de Figuras

Figura 1- Abrasión.....	5
Figura 2- Compresión.....	5
Figura 3- Impacto.....	6
Figura 4- Efecto del Tamaño de la Alimentación (Geometalurgia, E. Alfaro, 2017).....	7
Figura 5- Escala de Mohs.....	8
Figura 6- Circuito de Molienda.....	9
Figura 7- Molino estándar de Bond, para determinación del Work Index.....	9
Figura 8- Esquema del Proceso de determinación del Work Index con el molino estándar de Bond.....	11
Figura 9- Temperatura vs Fugacidad de Oxígeno (Ohmoto, 1986)	15
Figura 10- Tectonismo Compresivo y Extensional y su relación con los yacimientos de tipo pórfido y epitermal (Tosdal et al., 2009).....	16
Figura 11- Esfuerzo de Cizalla (Richards, 2003).....	17
Figura 12- Los diferentes tipos de alteraciones en función de T, actividades de K ⁺ y H ⁺ en un ambiente magmático-hidrotermal del tipo pórfido de cobre (según Guilbert y Park, 1985 y Burnham y Ohmoto, 1980, in Pirajno, 1992).....	19
Figura 13- Distribución Espacial de las Alteraciones Hidrotermales en un Sistema Pórfido-Skarn-Epitermal (Sillitoe, 2010).....	21
Figura 14- Concepto de Geometalurgia (Hallewell, 2009).....	22
Figura 15- Etapas para la Generación de un Modelo (Pertti Lamberg, 2011).....	23

Figura 16- Generación de Variables y sus Respuestas Metalúrgicas.....	24
Figura 17- Diagrama de Caja (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).....	25
Figura 18- Comparación de Filosilicatos (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).....	25
Figura 19- Diagrama de Dispersión positivo (a), negativo (b) y parabólico (c).....	26
Figura 20- Correlación Lineal (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).....	27
Figura 21- Relación de Variables y Respuestas Metalúrgicas (mineralogía-Work Index).....	30
Figura 22-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 1.....	33
Figura 23-Resultados Bwi vs Felds Taladro 1.....	33
Figura 24-Resultados Bwi vs Qz Taladro 1.....	34
Figura 25-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 1.....	34
Figura 26-Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 1.....	35
Figura 27-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 2.....	35
Figura 28-Resultados Bwi vs Felds Taladro 2.....	36
Figura 29-Resultados Bwi vs Qz Taladro 2.....	36
Figura 30-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 2.....	37
Figura 31- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 2.....	37
Figura 32-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 3.....	38
Figura 33-Resultados Bwi vs Felds Taladro 3.....	38

Figura 34-Resultados Bwi vs Qz Taladro 3.....	39
Figura 35-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 3.....	39
Figura 36- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 3.....	40
Figura 37-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 4.....	41
Figura 38-Resultados Bwi vs Felds Taladro 4.....	41
Figura 39-Resultados Bwi vs Qz Taladro 4.....	42
Figura 40-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 4.....	42
Figura 41- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 4.....	43
Figura 42-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 5.....	43
Figura 43-Resultados Bwi vs Felds Taladro 5.....	44
Figura 44-Resultados Bwi vs Qz Taladro 5.....	44
Figura 45- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 5.....	45
Figura 46- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 5.....	45
Figura 47-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 6.....	46
Figura 48- Resultados Bwi vs Felds Taladro 6.....	47
Figura 49-Resultados Bwi vs Qz Taladro 6.....	47
Figura 50- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 6.....	48
Figura 51- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 6.....	48
Figura 52-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 7.....	49
Figura 53- Resultados Bwi vs Felds Taladro 7.....	50
Figura 54-Resultados Bwi vs Qz Taladro 7.....	50

Figura 55- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 7.....	51
Figura 56- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 7.....	51
Figura 57-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 8.....	52
Figura 58- Resultados Bwi vs Felds Taladro 8.....	52
Figura 59-Resultados Bwi vs Qz Taladro 8.....	53
Figura 60- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 8.....	53
Figura 61- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 8.....	54
Figura 62-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 9.....	55
Figura 63- Resultados Bwi vs Felds Taladro 9.....	55
Figura 64-Resultados Bwi vs Qz Taladro 9.....	56
Figura 65- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 9.....	56
Figura 66- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 9.....	57
Figura 67-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 10.....	57
Figura 68- Resultados Bwi vs Felds Taladro 10.....	58
Figura 69- Resultados Bwi vs Qz Taladro 10.....	58
Figura 70- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 10.....	59
Figura 71- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 10.....	59
Figura 72-Correlación Work Index vs Análisis Químico (Oyarzún y Arévalo,2011).....	64
Figura 73-Correlación Work Index vs Mineralogía (Oyarzún y Arévalo,2011).....	64

Figura 74- Bwi vs Textura(a), nicoles cruzados 645 μ m x 484 μ m (Oyarzún y Arévalo,2011).....65

Figura 75- Bwi vs Textura(b), nicoles cruzados 645 μ m x 484 μ m (Oyarzún y Arévalo,2011).....65

Figura 76-Drusa de cuarzo (foto: Jorge Rojas).....67

Figura 77- Intercrecimiento de cristales mostrando superficies de contacto. (foto: Jorge Rojas).....67

Figura 78- Vacíos a rellenar generados por la diferencia de tamaños en los cristales (foto: Jorge Rojas).....68



Lista de Tablas

Tabla 1- Distribución de Bolas en el molino de Bond.....	10
Tabla 2-Resultados Prueba de Work Index (3810-C1_TALADRO 1=Cota-Compósito-Taladro).....	30
Tabla 3- Reporte de Minerales (Felds=Feldespatos, Qz=Cuarzo, Arc=Arcillas)..	31
Tabla 4- Zonas con Número de Taladros.....	31
Tabla 5- Variables Correlacionadas.....	32
Tabla 6- Resumen Correlaciones.....	40
Tabla 7-Resumen Correlaciones.....	45
Tabla 8- Resumen Correlaciones.....	48
Tabla 9- Resumen Correlaciones.....	54
Tabla 10- Resumen Correlaciones.....	59
Tabla 11-Resumen Correlaciones.....	60

1. Introducción

La Geometalurgia es una disciplina que está desempeñando un rol fundamental en la minería contemporánea. La tendencia a realizar trabajos multidisciplinarios entre las áreas de geología, mina y planta tiene mucha relevancia en la actualidad. El integrar todos los procesos mineros en uno solo implica la optimización de cada uno de ellos. El paradigma de procesar solo mineral con alta ley se está dejando de lado para trabajar bajo el concepto de roca total, el cual involucra el análisis del intercrecimiento de la mena con la ganga. Los estudios geometalúrgicos detallados tienen por finalidad caracterizar mejor el yacimiento en cuestión y en función a estas características intrínsecas como tipos de litología, controles estructurales, mineralogía, alteración, texturas, se puedan proyectar rendimientos en planta de los distintos procesos metalúrgicos tales como chancado, molienda, flotación, lixiviación entre otros.

La Geometalurgia, en términos económicos, ayuda a maximizar el VAN (Valor Actual Neto) y con ello la viabilidad y rentabilidad de un proyecto minero. La industria minera es dependiente de los precios de los metales, los cuales a su vez experimentan ciclos de altas y bajas. Esto último, es un factor externo que las empresas mineras no pueden regular, por ello surge la necesidad de tener un control de costos en cada etapa del proceso que se realiza para la extracción del mineral.

En general el costo por consumo de energía en planta, en particular por conminución del mineral, es el más significativo de todo el proceso minero siendo fundamental elaborar indicadores que influyan directamente en su control.

El presente trabajo busca encontrar una relación entre los valores de consumo de energía para disminuir la granulometría del material que ingresa a planta (*Work Index*) y minerales competentes en términos de dureza en un yacimiento pórfido de cobre. Para ello se tiene resultados de pruebas de *Work Index* obtenidos de taladros de perforación con su respectiva composición mineralógica

expresada en términos porcentuales. Se busca analizar el contenido mineralógico como variable geológica en función del grado de dureza de un grupo de silicatos específicos (feldespato, cuarzo y arcilla) teniendo al Work Index como respuesta metalúrgica.

Los estudios se realizaron en un yacimiento tipo pórfido de cobre y es importante mencionar que, por ser un pórfido de cobre, porcentualmente el cuarzo y los feldespatos son los minerales más abundantes en los reportes mineralógicos considerados. Las zonas de ubicación de los taladros de perforación están caracterizadas por un tipo de alteración hidrotermal. Mediante el uso de herramientas estadísticas como las correlaciones se procedió a buscar una relación lineal entre los valores de Work Index y el contenido de feldespatos, cuarzo y arcillas respectivamente.



2. Objetivos

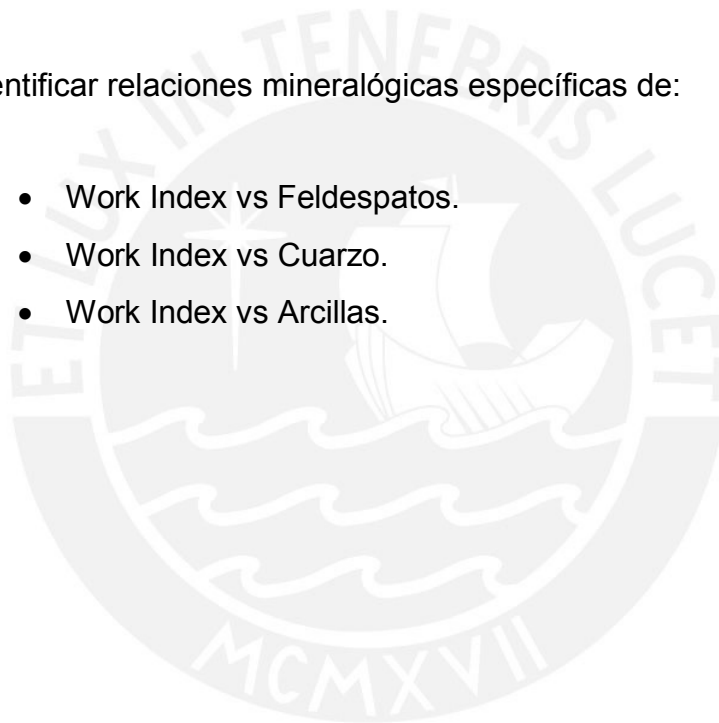
2.1. Objetivo General

Identificar relaciones entre el índice de trabajo Bond Bolas, (Work Index) y las especies mineralógicas de un yacimiento tipo Pórfido de Cobre en un contexto Geometalúrgico.

2.2. Objetivos Específicos

Identificar relaciones mineralógicas específicas de:

- Work Index vs Feldespatos.
- Work Index vs Cuarzo.
- Work Index vs Arcillas.



3. Marco Teórico

3.1. Conminución Mineral

La conminución es la primera etapa del procesamiento de minerales que tiene los siguientes objetivos:

- Disminuir la granulometría del material que ingresa a planta para mejorar los rendimientos de procesos posteriores.
- Lograr la mayor liberación entre ganga y mineral para aumentar la concentración de este último.
- Aumentar el área superficial en beneficio de los agentes químicos a utilizar.

En el proceso de conminución el principal parámetro a optimizar es la cantidad de energía requerida para la reducción del tamaño y granulometría del material en cada etapa de conminución. La energía que se consume en un proceso de conminución se distribuye de la siguiente manera:

- Deformaciones elásticas de las partículas.
- Deformaciones plásticas de las partículas antes de llegar a la fractura.
- Fricción entre las partículas.
- Vencer inercia entre las piezas de la máquina.
- Deformaciones elásticas de la máquina.
- Producción de ruido, calor y vibración de la instalación.
- Contacto entre las partículas y piezas de la máquina.
- Pérdidas de eficiencia en la transmisión de energía eléctrica y mecánica.

Para lograr la disminución de tamaño del material se necesitan varios factores a nivel macrométrico y micrométrico, dentro los cuales el más importante es la generación de fracturas. La fracturación de las partículas va depender de su naturaleza y del cómo se aplica una fuerza externa a estas. Existen diferentes mecanismos de fracturación:

- Abrasión: se produce cuando la energía aplicada es insuficiente para generar fractura a la partícula, las fracturas generadas son superficiales pequeñas y la granulometría que se obtiene es la misma que la original (figura 1).

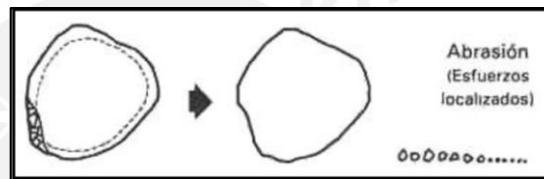


Figura 1- Abrasión.

- Compresión: ocurre cuando la energía es suficiente para generar algunas fracturas produciendo así algunas partículas que difieren en tamaño a la original (figura 2).

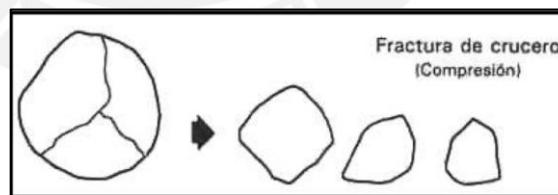


Figura 2- Compresión.

- Impacto: cuando la energía aplicada está sobre-excedida de aquella necesaria para fracturar la partícula y como resultado se obtiene una granulometría heterogénea (figura 3).

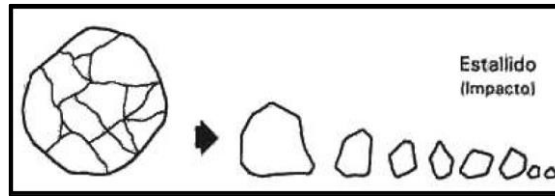


Figura 3- Impacto.

3.2. Índice de Trabajo de Bond

La tercera Teoría de la Comminución, denominada como la Teoría de Bond, fue publicada por Fred. C. Bond en 1952. Desde entonces ha sido utilizada ampliamente en la industria de la comminución para dimensionar equipos, así como para predecir y evaluar su rendimiento.

La Tercera Teoría o “Ley de Bond” se transformó en el concepto más aceptado para el dimensionamiento de nuevas unidades de molienda. El índice de trabajo es un parámetro de comminución el cual expresa la resistencia de un material a ser triturado y molido.

Numéricamente representa los kilowatts-hora por tonelada corta requerido para reducir un material desde un tamaño teóricamente infinito a un producto de 80 % menos malla 150 (100 μm), lo que equivale aproximadamente a un 67% pasante a la malla 200 (74 μm). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E = 10 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Fórmula para el Índice de Trabajo de Bond

E= Consumo Específico de Energía, kWh/st molida.

F₈₀= Tamaño 80 % pasante en la alimentación, μm .

P₈₀= Tamaño 80 % pasante en el producto, μm .

W_i= Índice de Trabajo de Bond, kWh/st.

En la expresión anterior el par (F₈₀, P₈₀) se denomina tarea de molienda y tiene como objetivo transformar partículas de tamaño característico F₈₀, en partículas de tamaño menor, P₈₀.

3.2.1. Aplicaciones de la Ley de Bond

- Para simulación, cuando se tiene que predecir el funcionamiento de un molino a partir de datos obtenidos de otro modo de funcionamiento, teniendo como variable respuesta el Work Index.
- Como parámetro de diseño, conociendo el Work Index se puede determinar la potencia del motor que accionará el equipo.

La Ley de Bond ayuda a cuantificar la relación entre el Consumo de Energía Específica, el tamaño de alimentación (F_{80}) y el tamaño de producto (P_{80}) resultante. La figura 4 muestra el consumo de energía requerido para diferentes tamaños de alimentación y para diferentes tamaños de producto, se presenta 3 diferentes granulometrías de alimentación para las cuales se obtienen diferentes tamaños de producto y su respectivo consumo de energía en donde por ejemplo un consumo de energía de 8 kWh/ton según el tamaño de alimentación puede generar un P_{80} de 118, 140 ó 168 μm .

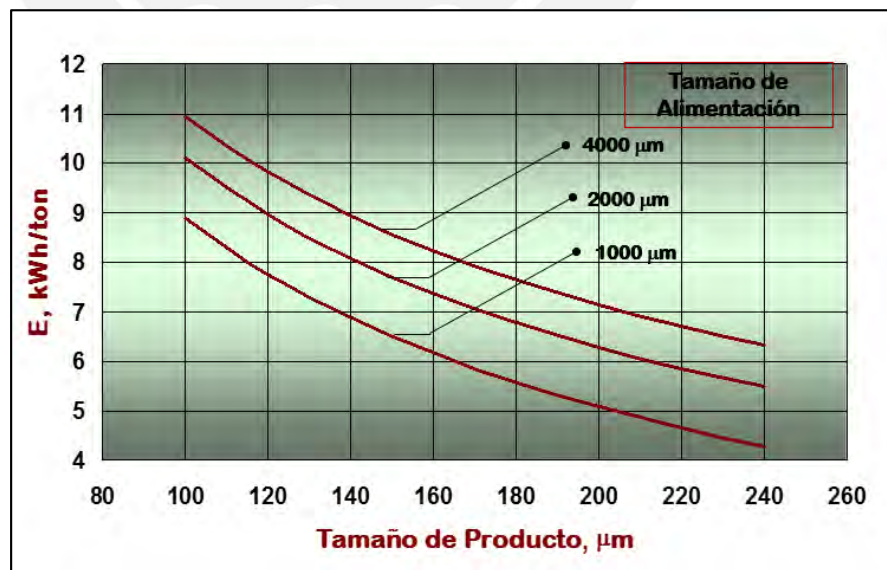


Figura 4- Efecto del Tamaño de la Alimentación (Diplomado Geometalurgia, E. Alfaro, 2017).

3.2.2. Índice de Bond vs Dureza del mineral

El Índice de Bond no se debe relacionar con la dureza del mineral, la cual es caracterizada por la Escala de Dureza de Mohs. El Índice de Bond permite estimar la energía específica requerida para una determinada tarea de molienda; no hace implicancia alguna respecto a la naturaleza del mineral. La Escala de Dureza de Mohs caracteriza la resistencia de los minerales para ser rayados y usa minerales de referencia como unidades de medida, guarda relación con las tasas de desgaste de los elementos como bolas y barras. En la figura 5 se muestra la escala de dureza de Mohs.

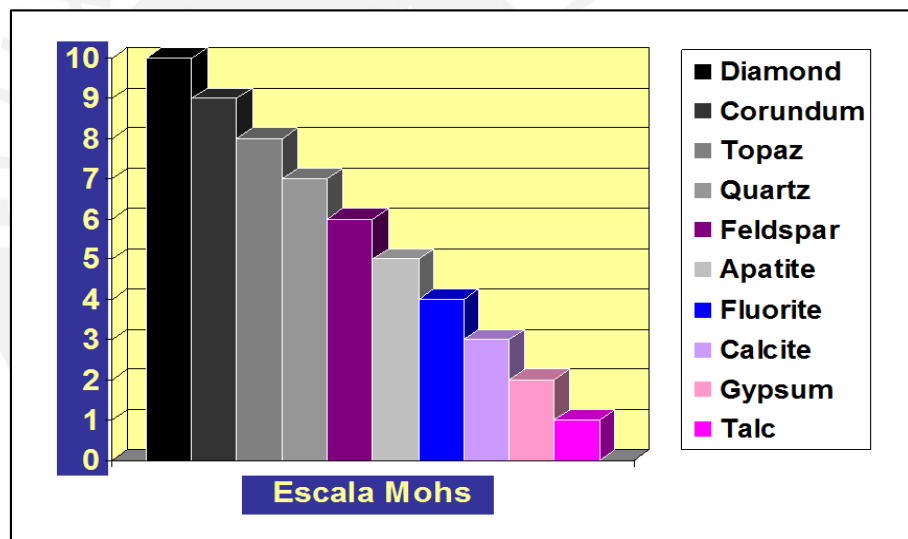


Figura 5- Escala de Mohs.

3.2.3. Determinación del Work Index

Fred Bond propuso un método estándar para la determinación del Work Index, el cual consiste en operar un circuito discontinuo de molienda (molino de laboratorio) y un tamiz. Se muestra un esquema en la figura 6.

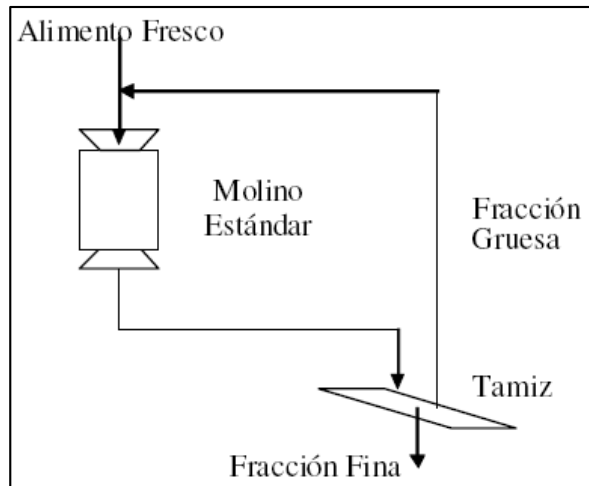


Figura 6- Circuito de Molienda.

Los molinos utilizados en el laboratorio para determinar el Work Index pueden ser de barras o de bolas.

3.2.3.1. Determinación del Work Index en el molino de bolas

Para este caso se requiere un molino de 12" x 12", para una mejor descarga del mineral molido es recomendable que los ángulos interiores del molino sean redondeados para que el material no se quede en los bordes (figura 7).



Figura 7- Molino estándar de Bond, para determinación del Work Index.

La carga de bolas del molino estándar de Bond debe ser como se indica en la tabla 1:

Tabla 1- Distribución de Bolas en el molino de Bond

Número de Bolas	Diámetro de las Bolas(mm)	Peso(kg)
36	40	8.7
76	30	7.1
11	25	0.7
66	20	2.1
80	17	1.4
9	13	0.1

El Work Index se calcula en laboratorio según la siguiente fórmula:

$$Wi = \frac{44.5}{p^{0.23} \times G_B^{0.82}} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)^{-1}$$

Fórmula para el Work Index Laboratorio.

Wi = Work Index para el molino de bolas (kWh /st).

p = Dimensión de la abertura del tamiz de corte seleccionado(µm).

G_B = Número de granos molidos por revolución.

P₈₀ = Debe ser determinado del último ciclo.

F₈₀ = Análisis granulométrico del mineral molido a – 10 mallas.

Procedimiento:

- Triturar aproximadamente 10 kg de mineral a 100% menos malla 10, se toma una muestra representativa y se realiza un análisis granulométrico completo.

Determinándose el porcentaje que pasa la malla 100, (147 μm), Ejm: 29 % pasa la malla 100, (577.52 g).

- Se toma 700 cm^3 de muestra representativa en una probeta graduada de 1 000 ml y de 57 mm de diámetro. Ejm: 700 cm^3 del mineral pesa 1,875.72 g.
- Esta muestra deberá ser colocada en un molino de bolas de 12" x 12", el cual girará a 70 rpm.
- Dado el peso de alimentación, según el ejemplo de 1,875.72 g, el balance de proceso es según la figura 8:

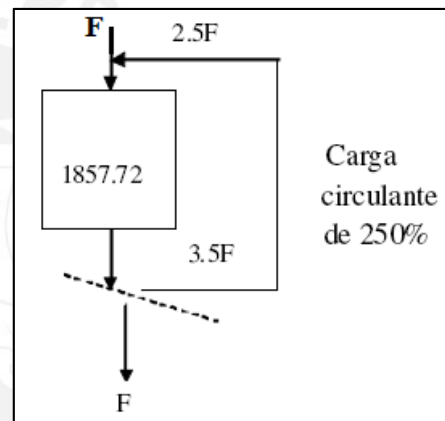


Figura 8- Esquema del Proceso de determinación del Work Index con el molino estándar de Bond.

- Donde: $F + 2.5 F = 1,875.72 \text{ g}$.
- El objetivo es que, luego de varios ciclos el alimento al molino F , debe ser igual al peso del undersize del tamiz ($F=532.92 \text{ g}$) estableciendo así una carga circulante de 250 % y manteniendo en el interior del molino 1,875.72 g.
- Luego de un primer periodo de molienda del mineral en seco, con 100 revoluciones del molino, se tamiza la totalidad del producto molido a la dimensión en donde deseamos conocer el Work Index. Para el presente

ejemplo será la malla 100, obteniendo 764.05 gramos de material pasante la malla 100 (147 μ m).

- Como en un primer momento existían 544.52 g de finos (tamaño 147 μ m), significa que ahora se tendrá 219.53 g (764.05 – 544.52) de mineral a menos 100 mallas.
- Como el molino dio 100 revoluciones entonces se ha producido 2.1953 g. de finos/revolución (219.53 g./100 rev.).
- Se estableció como valor de F = 535.92 g, pero en este primer ciclo se obtuvo 764.05 g, por lo que hay que hacer un nuevo ciclo para corregirlo. Por eso se alimenta al molino mineral de cabeza en cantidad igual al peso que se eliminó como material inferior a malla 100, es decir 764.05 gramos.
- De este material alimentado 764.05 g. x 0.2903 = 221.80 gramos son inferior a malla 100. Como se quiere llegar a 532.92 gramos de –100 mallas, y se conoce que el molino produce 2.195 g de –100 malla/rev, entonces serán necesarias (532.92 g – 221.80 g) / 2.195 g/rev. = 141.74 revoluciones del molino para producir el peso de –100 mallas.
- Se procede de esta forma hasta lograr obtener que el peso alimentado sea igual al peso producido o que el número de gramos de –100 mallas producidas por revolución se mantenga constante.
- Efectuando el cálculo se obtiene:

$$W_i = \frac{44.5}{147^{0.23} \times 2.879^{0.82}} \times \left(\frac{10}{\sqrt{122}} - \frac{10}{\sqrt{1060}} \right)^{-1} = 9.92 K_w - H/t$$

Existen otros índices de trabajo como el JK Drop Weigth Test (molinos AG/SAG), SMC, Índice de Abrasión de Bond (Ai), Prueba de Bond Impact Work Index (LEIT) que también se refieren a estimaciones energéticas pero el presente estudio solo está enfocado en el Work Index.

3.3. Yacimientos Tipo Pórfidos de Cobre

3.3.1. Sistemas Porfiríticos

Son sistemas hidrotermales relacionados al enfriamiento y a la cristalización de magmas félsicos hidratados en niveles epizonales. Para que los sistemas porfiríticos desarrollen alteraciones hidrotermales, que produzcan mineralizaciones, la fuente magmática debe reunir las siguientes características:

3.3.1.1. Temperatura

Los magmas félsicos tienen temperaturas en el rango de 700° a 900°C y deben tener suficiente energía calorífica para sostener el sistema hidrotermal. La energía proviene de una cámara magmática que se mantiene parcialmente fundida debido a la recarga de magma.

3.3.1.2. Contenido de Metales

Es posible generar un pórfido cuprífero a partir de un magma calcoalcalino sin contenido anómalo de metales, estos pueden ser incorporados en fluidos hidrotermales siempre y cuando no sean retenidos en la masa silicatada que cristaliza (Modelo de Cline & Bodnar, 1991)

3.3.1.3. Contenido de Azufre

Los pórfidos cupríferos presentan grandes anomalías de azufre, la relación azufre-metal es muy alta ($S/Cu > 10$), el magma debe tener al menos 0.2% en peso de azufre y liberarlo en la fase volátil. Los magmas félsicos contienen poco azufre a comparación de los magmas máficos.

3.3.1.4. Rol del Cloro

El cloro se comporta como elemento incompatible en la evolución del magma y se concentra fuertemente en la fase acuosa que se separa de un magma en cristalización. El cloro forma complejos iónicos estables con metales a alta temperatura. El cloro, al separarse del magma, se une a metales y los solubiliza como complejos clorurados y estos se desestabilizan a temperaturas menores de 300° centígrados.

3.3.1.5. Fugacidad de Oxígeno

- Magmas con alta fugacidad de Oxígeno

El azufre es transferido masivamente a fases acuosas liberadas del magma en cristalización y tiene tendencia a formar sulfuros de metales calcófilos como el cobre y molibdeno. Típico en magmas tipo I producidos por fusión de materiales máficos ígneos o de material mantélico.

- Magmas con baja fugacidad de Oxígeno

Bajo condiciones de baja fugacidad de oxígeno, se tiende a formar sulfuros magmáticos diseminados inhabilitando la posibilidad de formar yacimientos de sulfuros significantes. Esos

3.3.1.7. Componentes Volátiles

El agua no es el único componente volátil del magma, también contiene CO₂, H₂S, SO₂, HCl, HF y H₂. El SO₂ y el HCl son componentes importantes que se incorporan preferencialmente a fase acuosa cuando esta se exsuelve del magma.

3.3.2. Control Estructural

Existe una relación entre los yacimientos pórfidos de cobre de alta ley con marcos tectónicos compresivos con engrosamiento cortical. En general los yacimientos de pórfidos de cobre son controlados estructuralmente por sistemas de fallas regionales o por fallas locales. El comportamiento frágil es importante para la mineralización siempre y cuando los fluidos mineralizantes sean focalizados, el nivel de fracturamiento está relacionado con la alteración y mineralización. Tanto la roca intrusiva como la roca caja muestran fracturamiento intenso y pervasivo. La figura 10 muestra los tipos de tectónica.

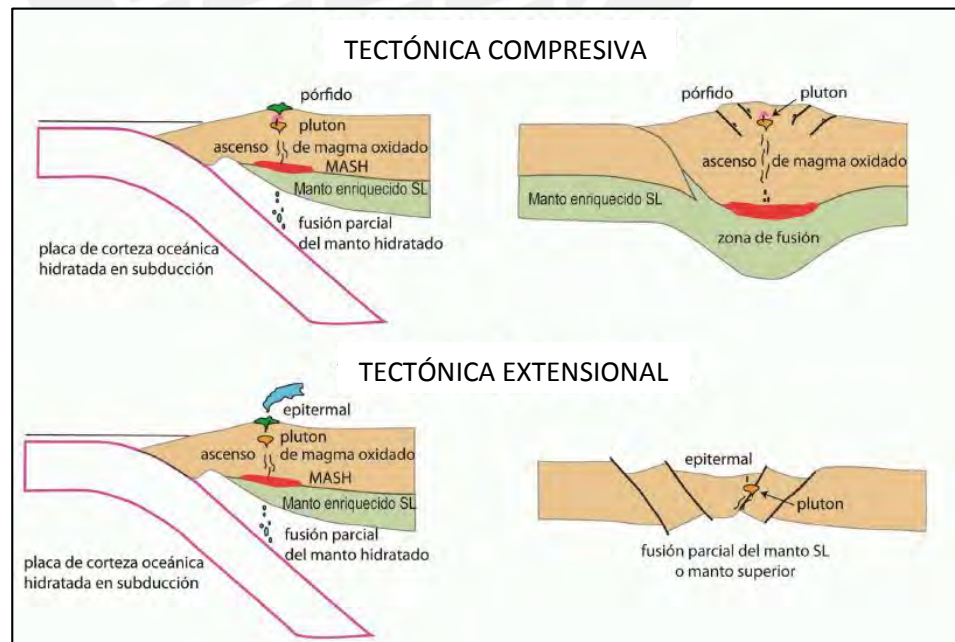


Figura 10- Tectónica Compresiva y Extensiva y su relación con los yacimientos de tipo pórfido y epitermal (Tosdal et al., 2009).

Los esfuerzos compresivos-tangenciales producen una diferencia de presión desplazando el magma a zonas de baja presión, permiten abrir ductos verticales facilitando la ascensión de magma y fluidos mineralizantes, la focalización del magma es importante para la formación de un pórfido de cobre. En la figura 11 se muestra la acción de un esfuerzo de cizalla.

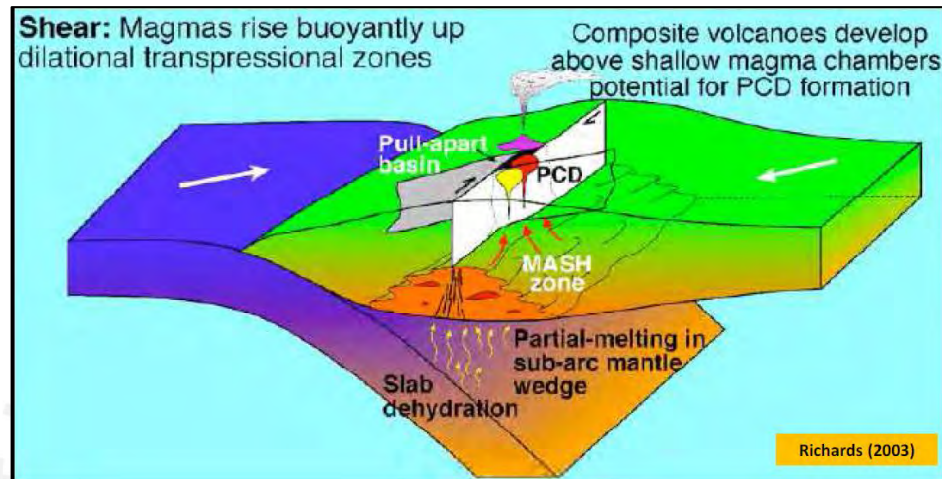


Figura 11- Esfuerzo de Cizalla (Richards, 2003).

3.3.3. Alteración Hidrotermal

La alteración hidrotermal consiste en la transformación de una asociación mineral original en una nueva que es más estable bajo las nuevas condiciones de presión y temperatura, y que tiende a alcanzar el equilibrio con el fluido hidrotermal que atraviesa la roca. Las texturas pueden ser conservadas o modificadas por el tipo de alteración, en función de su intensidad.

Las alteraciones hidrotermales son útiles como guía de exploración debido a que las modificaciones en la mineralogía y las texturas de las rocas encajonantes sobrepasan la extensión del yacimiento, ayuda a conocer el carácter químico de las soluciones hidrotermales y sus fuentes, así como también la evolución del sistema hidrotermal.

La alteración hidrotermal se considera como un tipo de metamorfismo(metasomatismo) por el proceso de recristalización que involucra hasta alcanzar un equilibrio.

3.3.3.1. Alteración Pervasiva

Alteración que afecta todo el volumen de la roca, los minerales de la roca son reemplazados y las texturas originales son parcialmente o totalmente modificadas.

3.3.3.2. Alteración no Pervasiva

El volumen de la roca no es modificado, se desarrolla en las fracturas y vetas y disminuye cuando se aleja de estas estructuras. Las texturas son preservadas y solo algunos minerales son reemplazados.

3.3.3.3. Alteración Asociada a Metasomatismo por H⁺

Cuando un sistema de alteración hidrotermal en relación con una intrusión magmática evoluciona hacia presiones y temperaturas más bajas, la acidez de la solución hidrotermal aumenta (el cociente a_{K^+}/a_{H^+} disminuye) como consecuencia de la desproporción de SO₂ por reacción con H₂O y de la liberación de HCl y otros ácidos. Los tipos de alteración asociados al proceso de metasomatismo por H⁺ son tratados en orden de acidez creciente según la figura 12:

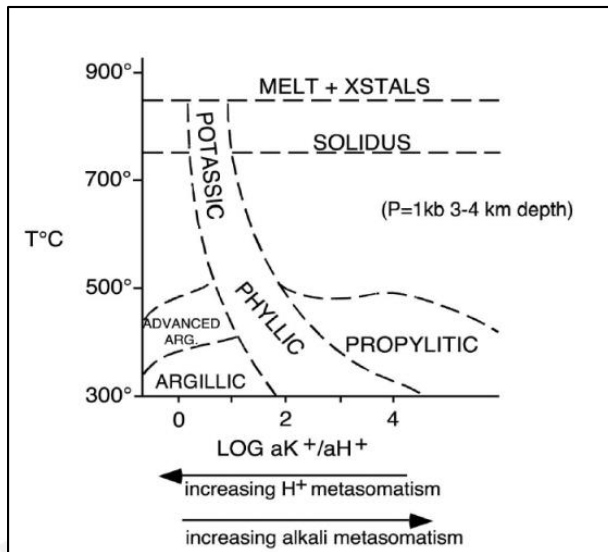


Figura 12- Los diferentes tipos de alteraciones en función de T, actividades de K^+ y H^+ en un ambiente magmático-hidrotermal del tipo pórfido de cobre (según Guilbert y Park, 1985 y Burnham y Ohmoto, 1980, in Pirajno, 1992).

- Alteración Potásica

Se caracteriza por el intercambio de potasio por calcio y sodio generando así reemplazamiento de minerales de calcio o sodio por minerales potásicos. El metasomatismo por potasio implica un fluido rico en potasio que no está en equilibrio con la roca caja, este fluido no es ácido, pero tiene una temperatura alta que va desde 500 a 600°C. El ensamble mineral típico de esta alteración está conformado por feldespato potásico (ortoclasa), biotita y plagioclasas. Esta alteración se ubica en la parte central de los pórfidos de cobre y puede ser asociado a zonas donde se deposita magnetita, pirita y calcopirita.

- Alteración Propilítica

La composición química de la roca no cambia, solo hay adición de volátiles como H_2O , CO_2 y localmente azufre. La intensidad

de esta alteración está representada por el grado de hidratación, es decir por la interacción del fluido con la roca y en términos de contenido de cationes se produce poco metasomatismo. Típicamente se forman clorita, calcita, albita, epidota y feldespato potásico.

- Alteración Sericítica (o fílica)

En esta alteración empieza la desestabilización de los feldespatos por la acidez (presencia del H^+), está presente en casi todos los sistemas hidrotermales a temperaturas de 400 a 500° Celsius y a temperaturas más bajas se forman arcillas como la illita o la caolinita. Este tipo de alteración tiene transiciones hacia la alteración potásica si hay mucho feldespato potásico (pH más alto) y hacia la alteración argílica si hay arcillas (incremento de acidez y/o bajada de temperatura). Si hay cuarzo, muscovita de grano grueso, topacio y turmalina se tiene una transición hacia la greisenización. El ensamble mineral típico es sericita (muscovita de grano muy fino), cuarzo, pirita y en algunos casos clorita o illita.

- Alteración Argílica

Se caracteriza por la formación de minerales de la familia de las arcillas como producto de un intenso metasomatismo por H^+ , a temperaturas entre 100 y 300°C. Está definida por la presencia de minerales del grupo de la caolinita como dickita, montmorillonita, illita y pequeñas cantidades de sericita.

- Alteración Argílica Avanzada

La alteración argílica avanzada es típica de los sistemas de alta sulfuración y las parte más superficiales de los pórfidos de cobre. Se caracteriza por un ataque ácido intenso que destruye todos los feldespatos y minerales máficos quedando aluminio liberado para formar minerales del grupo de la caolinita, alunita y diasporo. Se forma a temperaturas entre 100 y 600° Celsius.

En la figura 13 se muestra un esquema generalizado de zonamiento de alteraciones.

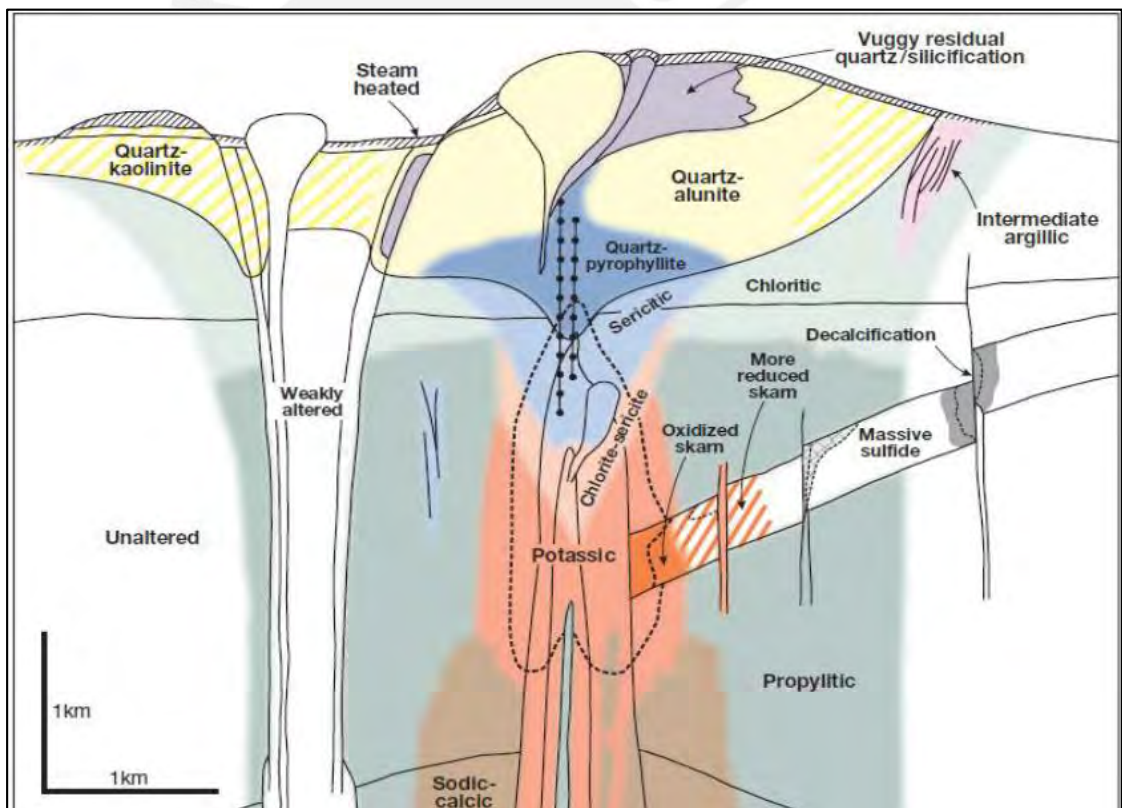


Figura 13- Distribución Espacial de las Alteraciones Hidrotermales en un Sistema Pórfido-Skarn-Epitermal (Sillitoe, 2010).

3.4. Geometalurgia

La Geometalurgia es una disciplina científica en la cual la información geológica, minera y metalúrgica es usada para mejorar la comprensión de un determinado yacimiento y optimizar la rentabilidad del recurso mineral. En la Figura 14 se describe gráficamente el concepto de la Geometalurgia como herramienta multidisciplinaria que está en cada etapa de desarrollo de un proyecto minero.

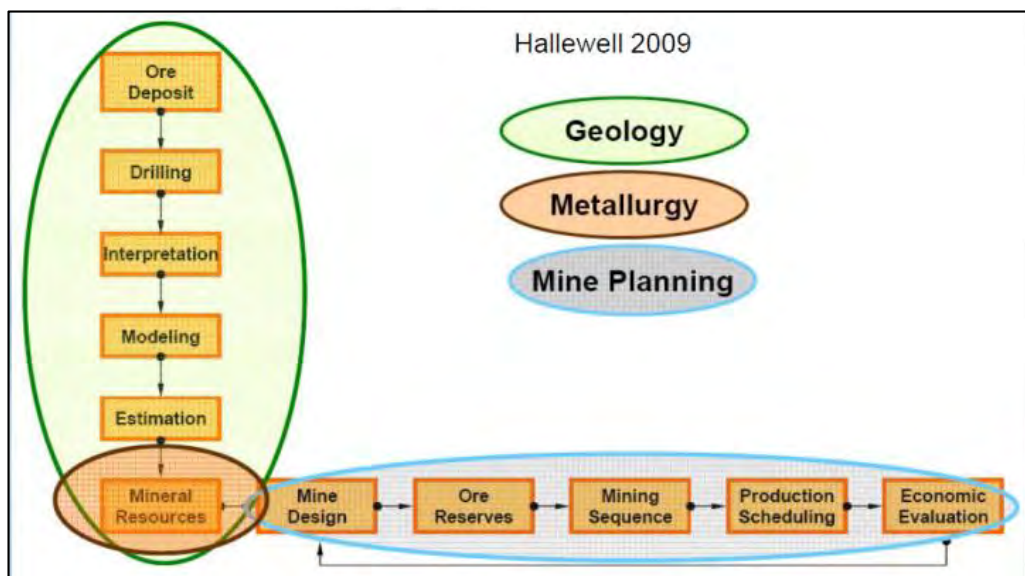


Figura 14- Concepto de Geometalurgia (Hallewell, 2009).

3.5. Aplicaciones Geometalúrgicas

Los rendimientos de los procesos metalúrgicos dependen de las características geológicas del yacimiento. Para esto es necesario describir el yacimiento en función de variables, cada una de las cuales genera una respuesta metalúrgica que se debe simular y modelar. La cantidad de variables a generar dependerá de la naturaleza y complejidad del yacimiento (variabilidad), es importante mencionar que cada variable está soportada por una cantidad determinada de muestras

representativas que han pasado por protocolos de QA/QC (Aseguramiento y Control de Calidad).

En la Figura 15 se presenta un esquema de la secuencia de etapas que se requieren para la generación de un modelo geometalúrgico:

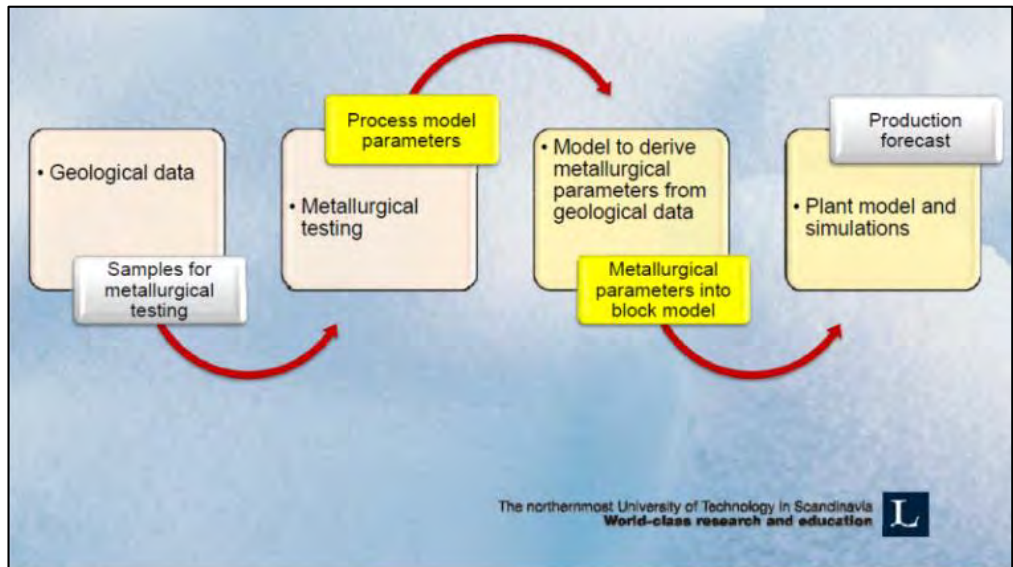


Figura 15- Etapas para la Generación de un Modelo Geometalúrgico (Pertti Lamberg, 2011).

En la Figura 16 se muestra un ejemplo de cómo se pueden generar variables geológicas en función de un ensamble de menas y gangas en un yacimiento, la intercepción de dichos ensambles en la matriz mostrada genera una variable geológica (X_i : variable primaria) y a partir de esta, se obtiene una respuesta metalúrgica (Y) que está en función de la primera. Es así que para la variable X_1 en la cual se relaciona a la calcopirita (C_p) con las gangas pirita, muscovita y cuarzo ($P_y+M_u+Q_z$) se obtiene una cierta viabilidad del concentrado en términos de recuperación y procesamiento; en el caso de la variable X_5 la permeabilidad será una respuesta metalúrgica a tener en cuenta debido a la presencia de arcillas mientras que para la variable X_8 la respuesta metalúrgica a considerar será los criterios de conminución debido a la presencia de minerales de dureza alta en skarn (granates, piroxenos, entre otros). Los casos X_3 , X_6

y X_9 (resaltados en rojo) son situaciones no deseadas puesto que los procesos metalúrgicos asociados a estas variables se verán afectados por la presencia del arsénico de la enargita (En).

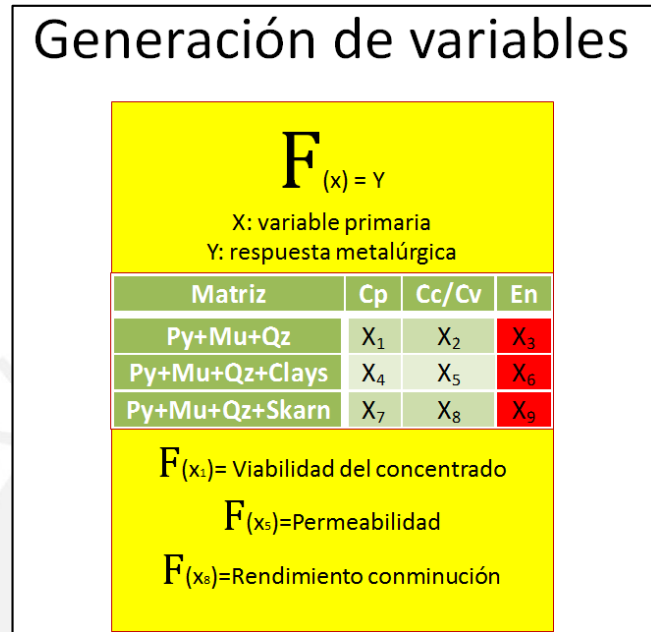


Figura 16- Generación de Variables y sus Respuestas Metalúrgicas.

3.6. Diagrama de Caja

El diagrama de caja es una herramienta estadística con la cual se puede visualizar características importantes de un conjunto de datos. Mediante un diagrama de caja se puede observar la dispersión y desviación de la simetría de los datos. El diagrama presenta en un rectángulo los tres cuartiles y los valores mínimos y máximos de los datos, el rectángulo delimita el rango intercuartil con la arista inferior ubicada en el primer cuartil y la arista superior en el tercer cuartil. Se dibuja una línea a través del rectángulo en la posición que corresponde al segundo cuartil o mediana y de las aristas del rectángulo se extiende una línea que va hacia los valores extremos (figura 17). Los diagramas de caja son muy útiles para hacer comparaciones gráficas entre conjuntos de datos, en la figura 18 se muestra el contenido porcentual en masa de 3 filosilicatos en una

chancadora terciaria, en donde se puede comparar los contenidos de pirofilita (Prf), motmorillonita (Mmt) y caolinita (Kao).

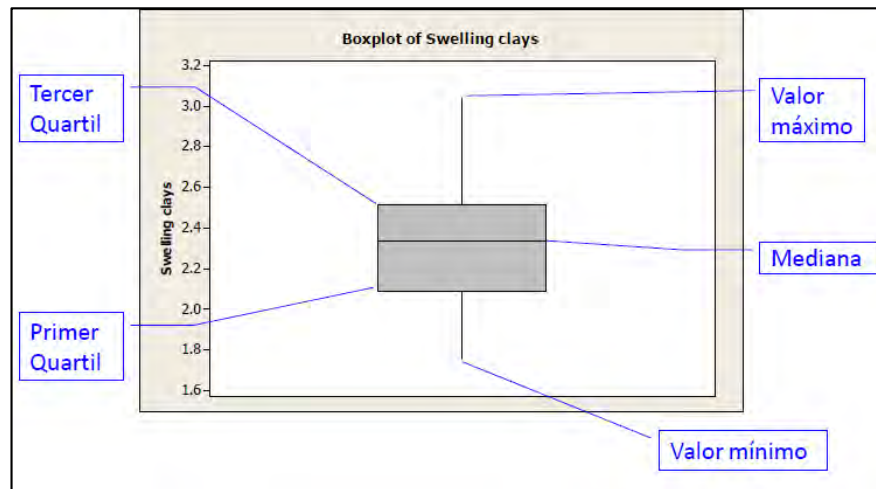


Figura 17- Diagrama de Caja (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).

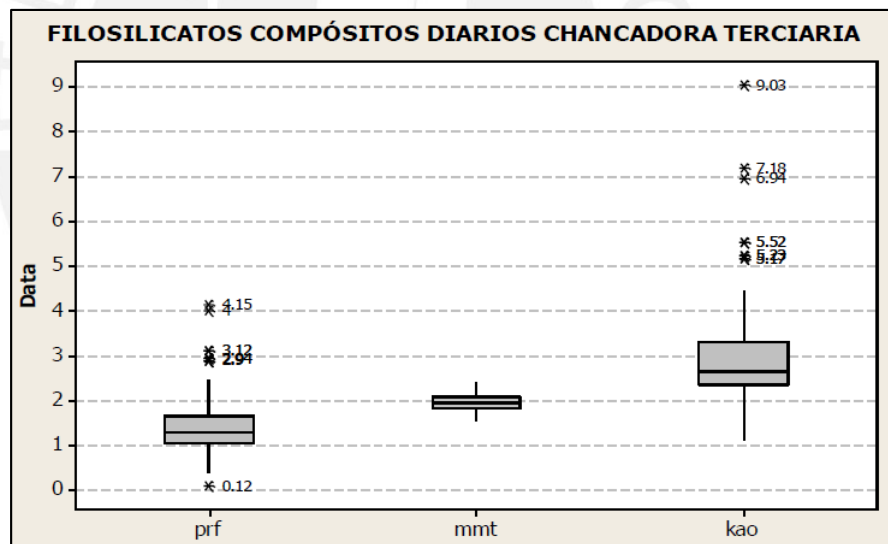


Figura 18- Comparación de Filosilicatos (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).

3.7. Diagrama de Dispersión

Para estudiar la relación entre dos variables primero se debe representar los pares de valores (x,y) como puntos en un sistema de ejes cartesianos. Los puntos estarán dispersos debido a la variación del muestreo dando como resultado un diagrama de dispersión. Si los puntos muestran una

tendencia lineal positiva o negativa, se puede ajustar una línea recta, que servirá para predecir valores de "y" correspondientes a valores de "x". La figura 19 representa diagramas de dispersión.

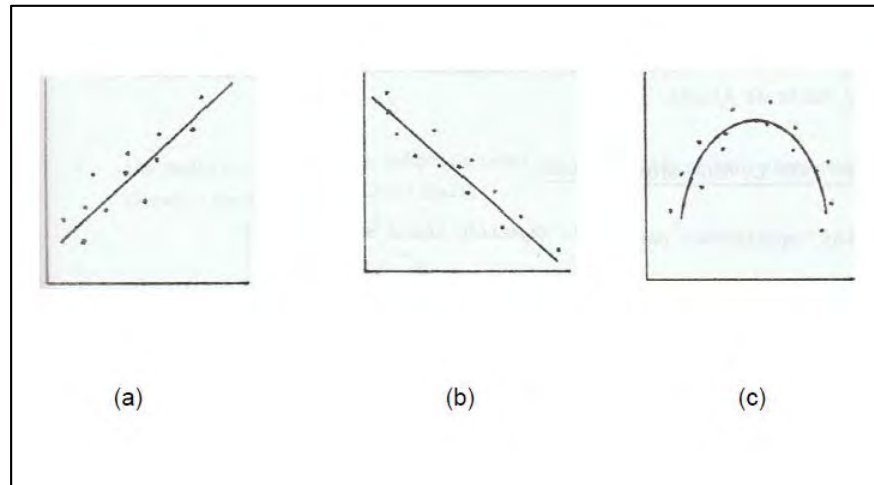


Figura 19- Diagrama de Dispersión positivo (a), negativo (b) y parabólico (c).

3.8. Correlación Lineal

La correlación entre dos variables es el tipo de asociación que existe entre ambas y que puede ser cuantificada por el coeficiente de correlación "r" mediante la siguiente fórmula:

$$r = \frac{Cov(x, y)}{S_x * S_y}$$

Donde:

- Cov es la covarianza: $Cov(x, y) = (1/n) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
- S_x, S_y son las desviaciones estándar de x y y respectivamente

$r \in [-1, +1]$

Fórmula para el Coeficiente de Correlación (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).

Para relacionar la varianza total se usa el "r²" el cual corresponde al ajuste lineal, es decir un r²=0.85 significa que el 85% de la varianza total se puede explicar por una relación lineal. La figura 20 muestra una de correlación lineal entre dos filosilicatos, la caolinita (Kao) y la pirofilita (Prf). Se puede observar cómo hay una relación directa entre ambos

minerales, es decir el contenido de caolinita aumenta a medida que la pirofilita también aumenta.

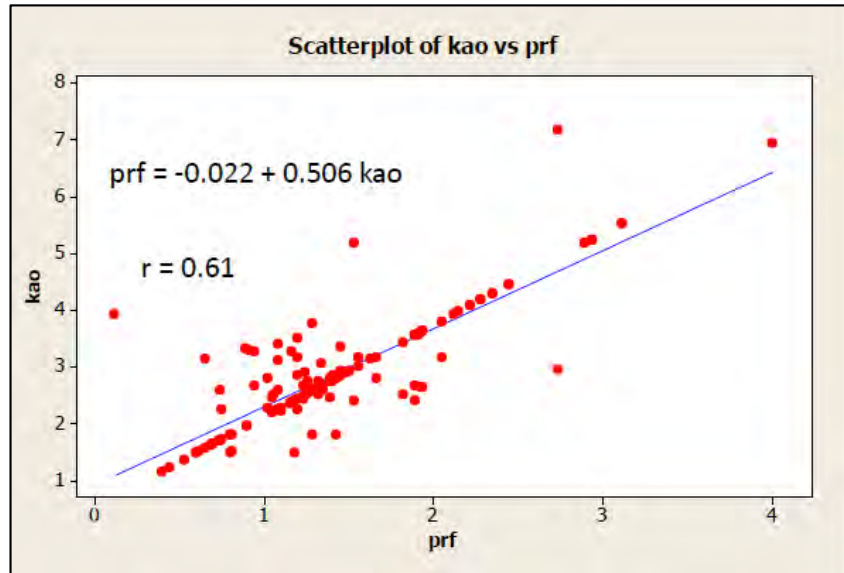
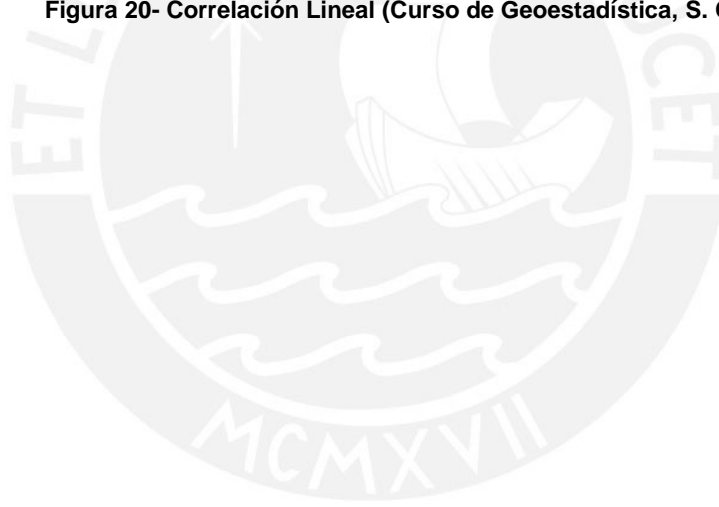


Figura 20- Correlación Lineal (Curso de Geoestadística, S. Canchaya, 2017).



4. Metodología Experimental

Para poder estimar rendimientos en los procesos metalúrgicos se tiene que identificar primero las variables geológicas que incidan en los resultados de dichos procesos (ver punto 3.5 Aplicaciones Geometalúrgicas). Para la realización del presente trabajo se analizó los resultados de Work Index obtenidos en pruebas de laboratorio, y se los relacionó con su respectiva información mineralógica con el objetivo de establecer el nivel de dependencia, mineralogía-Work Index, en términos de correlaciones lineales. Se trabajó con contenidos porcentuales de cuarzo, feldespato y arcillas; los 2 primeros son minerales competentes en términos de dureza (escala de mohs) mientras el contenido de arcillas se utilizó para la generación de un ratio de dureza. Es importante mencionar que, porcentualmente el cuarzo y los feldespatos son los minerales más abundantes en los reportes mineralógicos considerados. Todo el análisis se realizó en base a resultados obtenidos de la evaluación de la perforación de 10 taladros en los cuales los valores de Work Index han sido medidos cada 15 metros (altura de banco de explotación) en un yacimiento tipo pórfido de cobre, en total el presente trabajo tiene 165 valores de Work Index distribuidos en los taladros estudiados. Para cada uno de los taladros se dispuso de su contenido porcentual de cuarzo, feldespato y arcillas, luego con toda esta información se procedió a realizar el análisis de correlación.

4.1. Ratio de Dureza

Para el análisis de correlación no solo se relacionó el Work Index con los contenidos de feldespatos y cuarzo, sino también se utilizó una variable adicional que es el ratio de dureza, el cual mide la relación entre el contenido de feldespato más cuarzo y el contenido de arcillas. Se vio conveniente la generación de este parámetro puesto que al tratarse de un yacimiento tipo pórfido de cobre se debe considerar la presencia de las

arcillas en el yacimiento. El ratio de dureza establece una relación entre minerales competentes en términos de dureza (feldespato más cuarzo) con los menos competentes (arcillas) para luego analizar cómo varía dicho ratio con los valores de Work Index obtenidos en laboratorio. Para el cálculo se usó la siguiente fórmula:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Felds} + \text{Qz}}{\text{Arc}}$$

Felds: Feldespato

Qz: Cuarzo

Arc: Arcillas

Ratio: Ratio de Dureza

Fórmula para calcular el Ratio de Dureza (Contenidos en %).



5. Resultados

La figura 21 muestra la generación de variables realizadas para el presente trabajo.

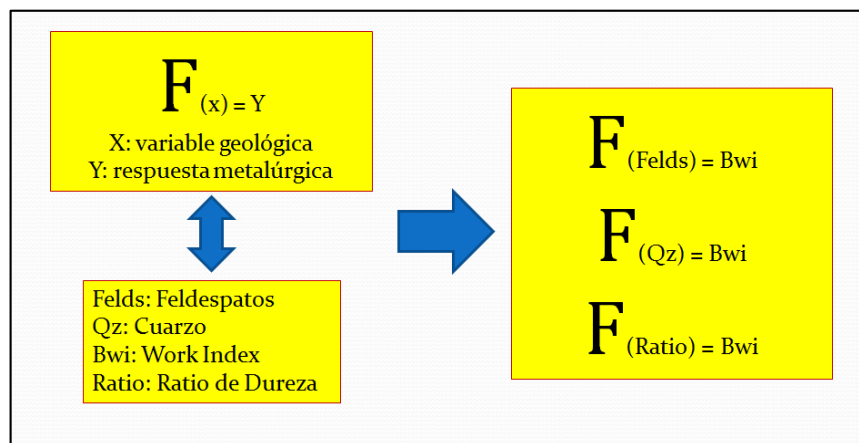


Figura 21- Relación de Variables y Respuestas Metalúrgicas (mineralogía-Work Index).

La Tabla 2 muestra los resultados de Work Index para el Taladro 1.

Tabla 2-Resultados Prueba de Work Index (3810-C1_TALADRO 1=Cota-Compósito-Taladro)

Muestra	P1, μm	GBP, g/rev	P80, μm	F80, μm	Bwi, kWh/st	Bwi, kWh/mt
3810-C1_TALADRO 1	150	1.53	119	1802	14.58	16.08
3795-C2_TALADRO 1	150	1.50	118	1998	14.45	15.93
3780-C3_TALADRO 1	150	1.44	111	1976	14.37	15.84
3765-C4_TALADRO 1	150	1.48	111	1942	14.11	15.56
3750-C5_TALADRO 1	150	1.61	117	1687	13.96	15.39
3735-C6_TALADRO 1	150	1.62	129	2004	14.42	15.90
3720-C7_TALADRO 1	150	1.52	129	1727	15.63	17.23
3705-C8_TALADRO 1	150	1.49	130	1884	15.65	17.25
3690-C9_TALADRO 1	150	1.52	126	1774	15.23	16.79

Donde:

P1	=	100% tamaño pasante del producto
GBP	=	Gramos producidos por revolución
P80	=	Tamaño pasante del 80% del producto
F80	=	Tamaño pasante del 80% de la alimentación
Bwi	=	Índice de trabajo de Bond

*Los valores de Bwi se trabajaron en toneladas cortas (kWh/st)

En la tabla 3 se muestra el contenido mineralógico para el taladro 1 expresado en porcentaje.

Tabla 3- Reporte de Minerales (Felds=Feldespato, Qz=Cuarzo, Arc=Arcillas)

Composito	Felds(%)	Qz(%)	Arc(%)
3810-C1_TALADRO 1	55	12	6.66
3795-C2_TALADRO 1	50	15	10
3780-C3_TALADRO 1	55	10	10
3765-C4_TALADRO 1	50	5	8
3750-C5_TALADRO 1	45	5	8.6
3735-C6_TALADRO 1	45	3	8
3720-C7_TALADRO 1	45	3	8
3705-C8_TALADRO 1	60	2	7.3
3690-C9_TALADRO 1	60	3	8.6

Los estudios se realizaron según las zonas de ubicación de los taladros, Las cuales están clasificadas según los minerales que las caracterizan y su tipo de alteración. En la tabla 4, se presenta las zonas y la cantidad de taladros analizados.

Tabla 4- Zonas con Número de Taladros

ZONA	TALADROS
Sílice-Potásica	Taladro 1
	Taladro 2
	Taladro 3
Arcilla-Sílice-Potásica	Taladro 4
	Taladro 5
Arcilla-Yeso-Potásica	Taladro 6
Calcopirita-Pirita-Potásica	Taladro 7
	Taladro 8
Potásica	Taladro 9
	Taladro 10
Total	10

Para cada zona presentada de la tabla 4 se realizaron pruebas de Work Index a partir del material obtenido de sus respectivos taladros y se relacionó los valores obtenidos con el contenido porcentual de feldspatos y cuarzo de

cada taladro con el objetivo de ver en qué medida se pueden correlacionar. También se calculó el ratio de dureza (ver punto 4.1 Ratio de Dureza) para cada taladro y se lo relacionó con el Work Index para ver en qué medida el contenido de arcillas influyen en este valor.

Según los datos de la tabla 5 se procedió a realizar los análisis de correlación para cada una de las variables en cada zona con sus respectivos taladros. También se hizo un análisis de la variación del Work Index respecto a la profundidad en cada taladro.

Tabla 5- Variables Correlacionadas

Composito	Felds(%)	Qz(%)	Arc(%)	Ratio de Dureza	Bwi(kWh/st)
3810-C1_TALADRO 1	55	12	6.66	10.06	14.58
3795-C2_TALADRO 1	50	15	10	6.50	14.45
3780-C3_TALADRO 1	55	10	10	6.50	14.37
3765-C4_TALADRO 1	50	5	8	6.88	14.11
3750-C5_TALADRO 1	45	5	8.6	5.81	13.96
3735-C6_TALADRO 1	45	3	8	6.00	14.42
3720-C7_TALADRO 1	45	3	8	6.00	15.63
3705-C8_TALADRO 1	60	2	7.3	8.49	15.65
3690-C9_TALADRO 1	60	3	8.6	7.33	15.23

5.1. Zona Sílice-Potásica

En la figura 22 se observa la distribución porcentual de los minerales estudiados en donde se aprecia el mayor contenido porcentual de feldespato respecto al cuarzo y las arcillas. En las figuras 23, 24 y 25 se observa el comportamiento lineal Work Index vs los minerales estudiados con su respectivo factor de correlación (r^2). En la figura 26 se muestra cómo aumenta el Work Index con la profundidad.

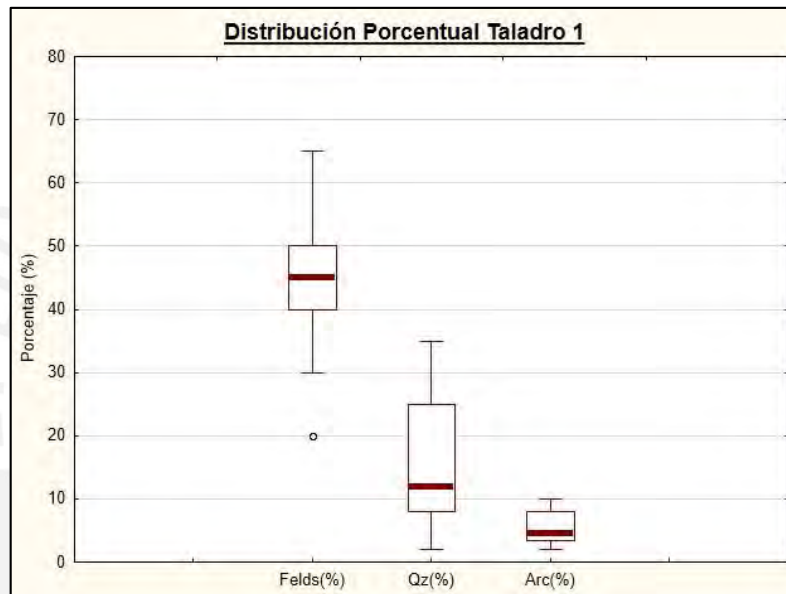


Figura 22-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 1.

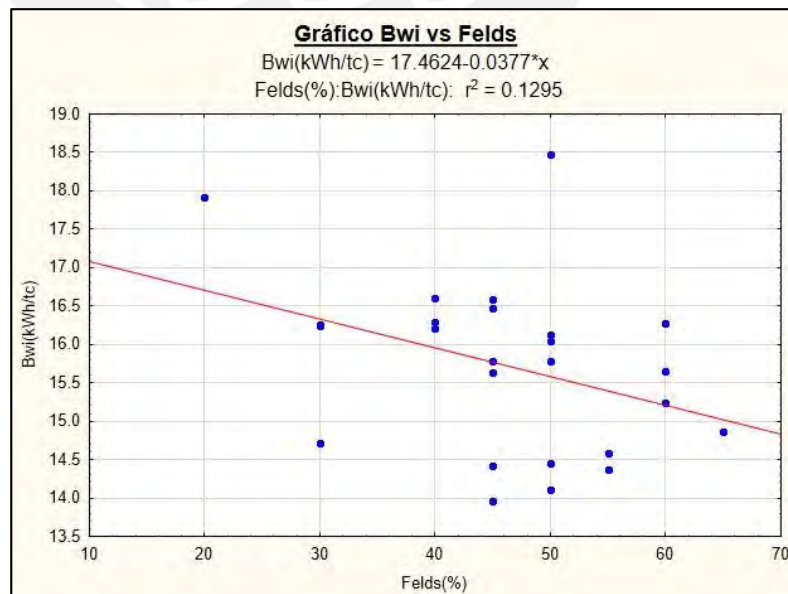


Figura 23-Resultados Bwi vs Felds Taladro 1.

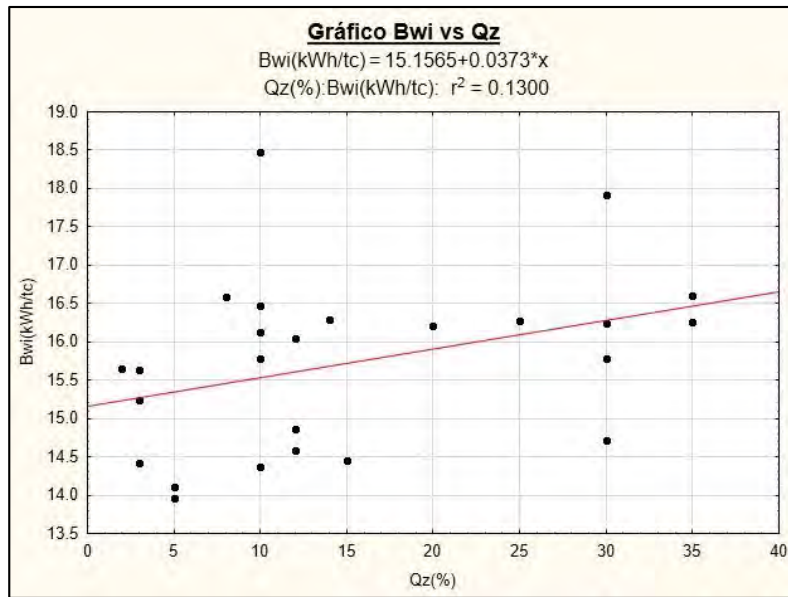


Figura 24-Resultados Bwi vs Qz Taladro 1.

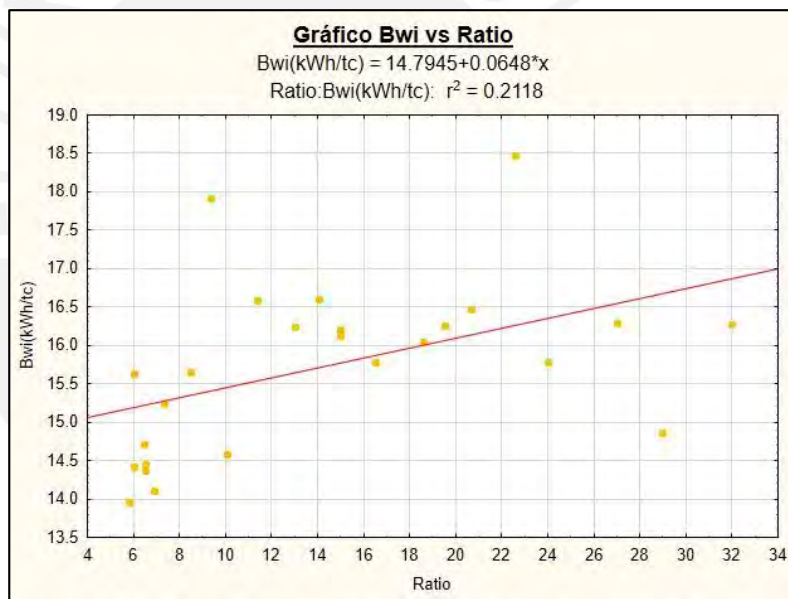


Figura 25-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 1.

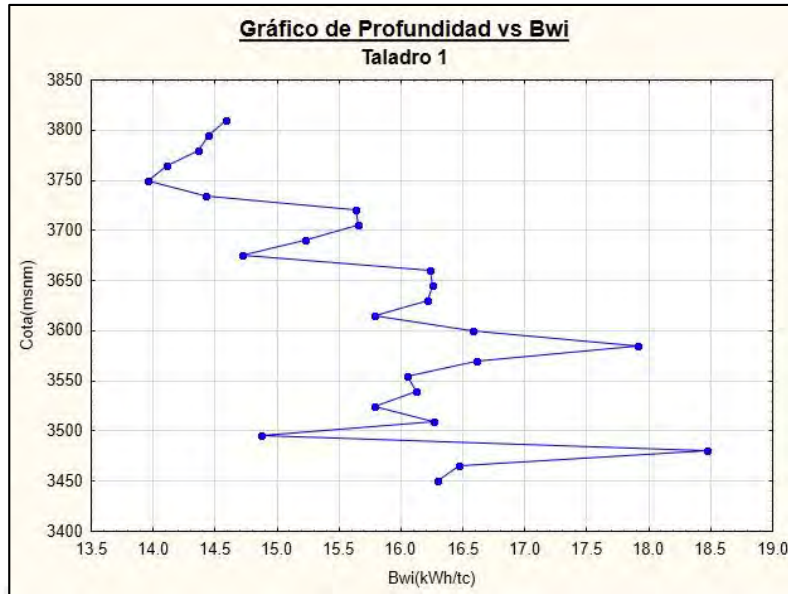


Figura 26-Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 1.

Para el taladro 2 se puede apreciar diferentes valores de Work Index para el mismo valor porcentual de feldespato (figura 28) y cuarzo (figura 29) siendo más significativo el caso del feldespato en el cual para un contenido de 55% se obtiene un rango de Work Index variando entre 13.5 y 15.5 kWh/tc. En la figura 31 se puede apreciar cómo disminuyen los valores de Work Index por debajo de los 3600 msnm.

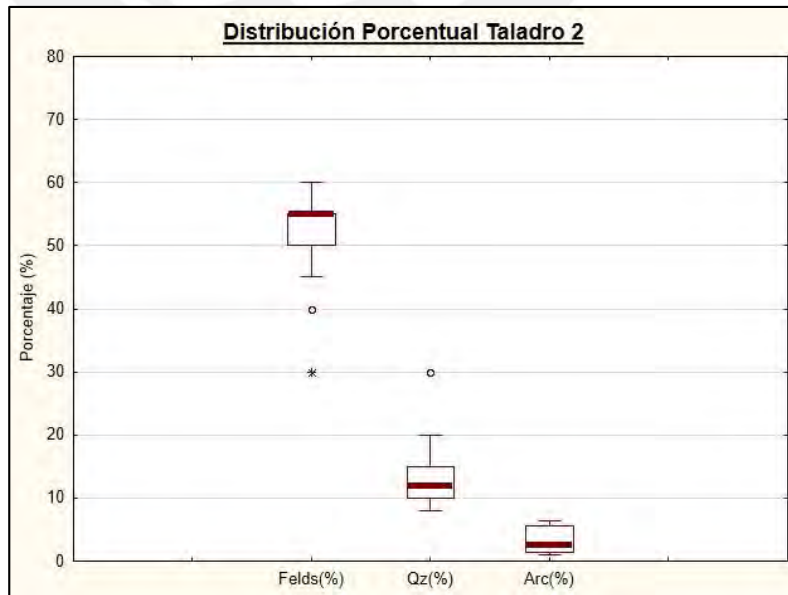


Figura 27-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 2.

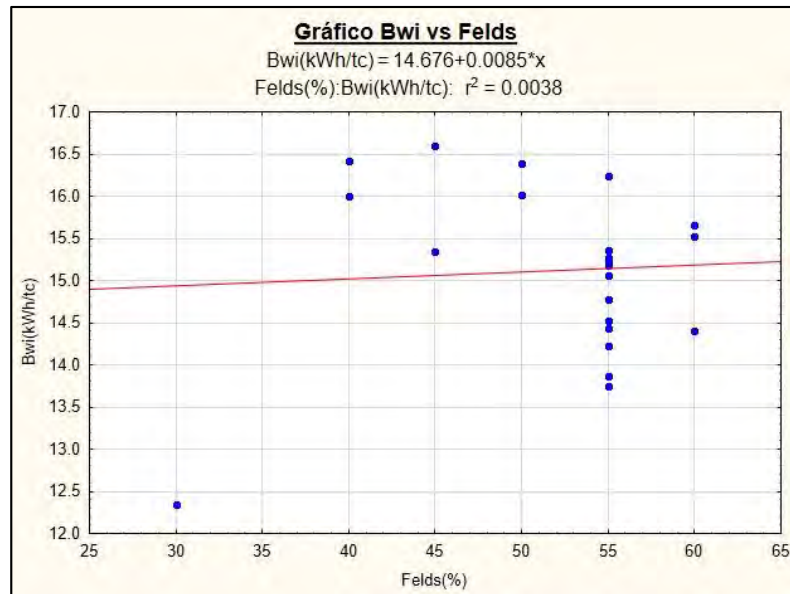


Figura 28-Resultados Bwi vs Felds Taladro 2.

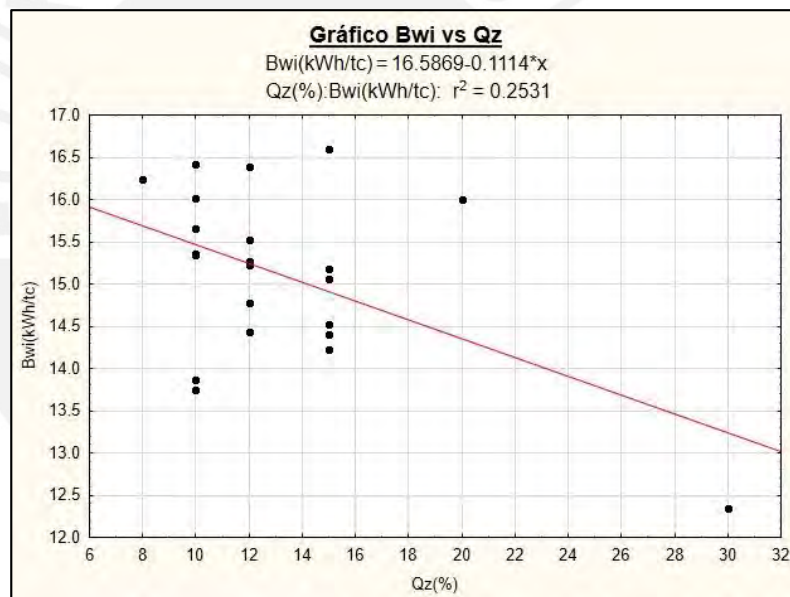


Figura 29-Resultados Bwi vs Qz Taladro 2.

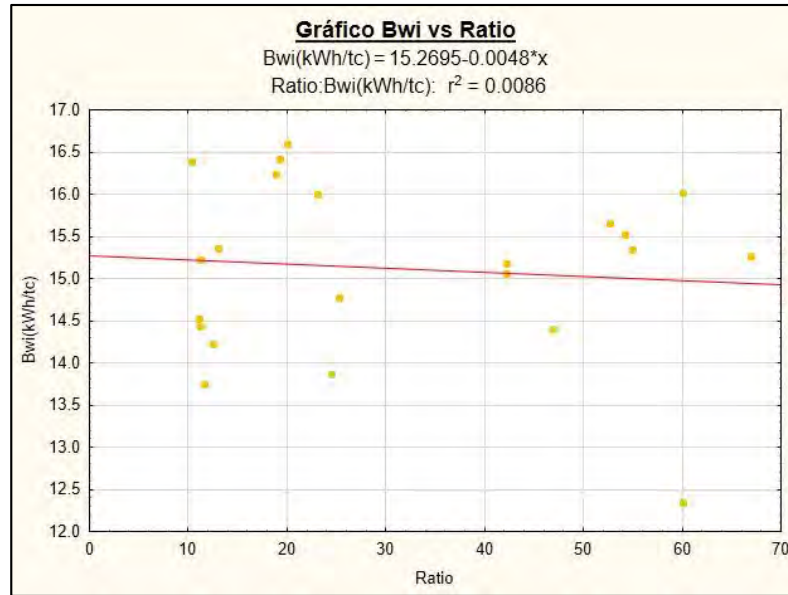


Figura 30-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 2.

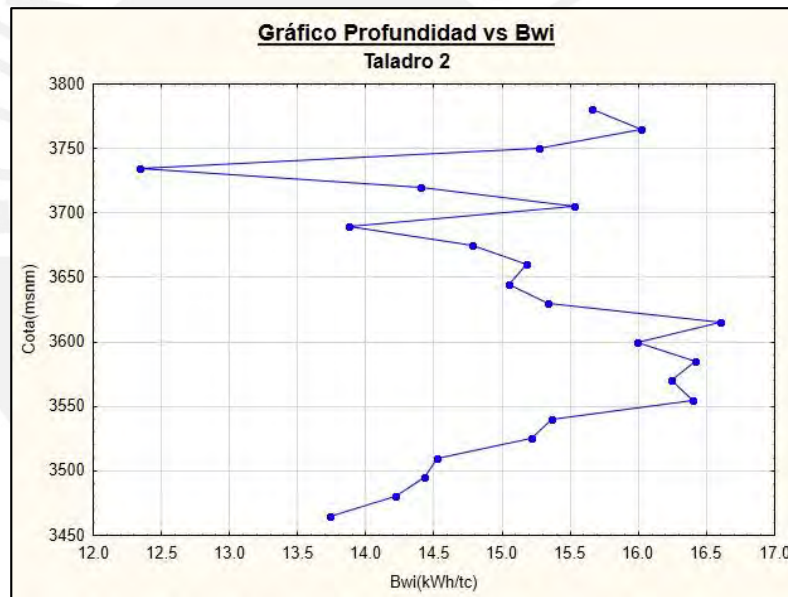


Figura 31- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 2.

Para el taladro 3, se observa una amplia variabilidad en el contenido de cuarzo y feldespato con respecto a los taladros 1 y 2 (figura 32). En la figura 36 se aprecia un comportamiento irregular del Work Index según la profundidad.

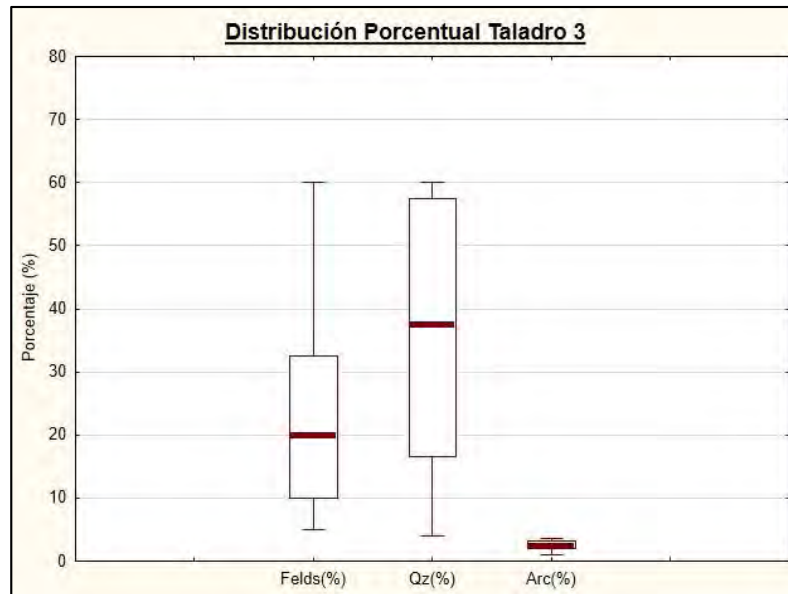


Figura 32-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 3.

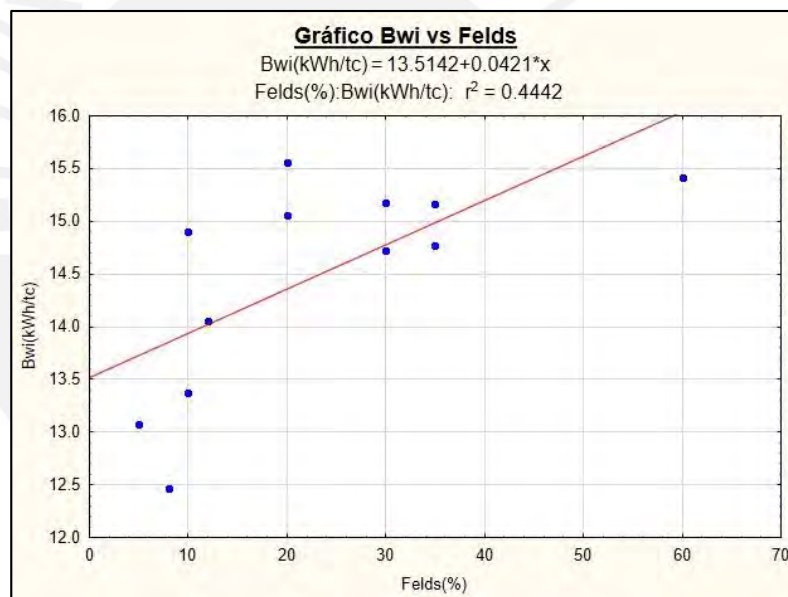


Figura 33-Resultados Bwi vs Felds Taladro 3.

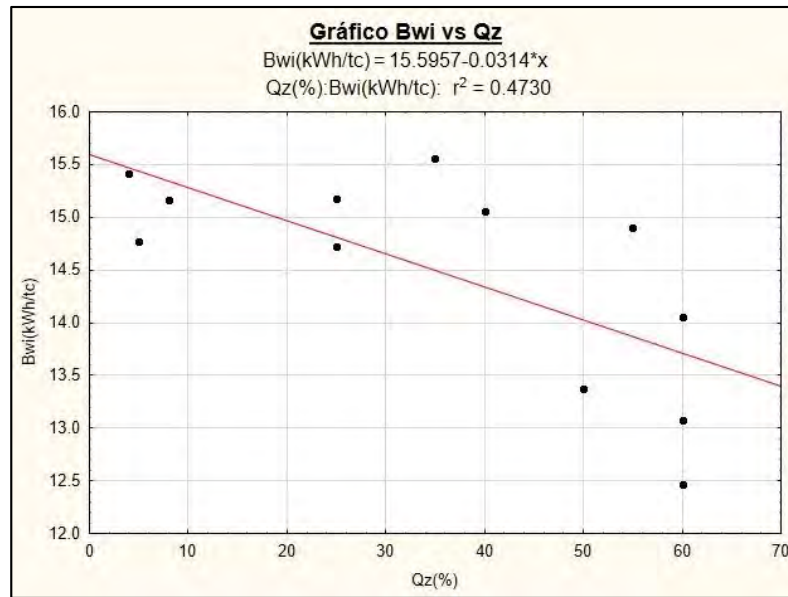


Figura 34-Resultados Bwi vs Qz Taladro 3.

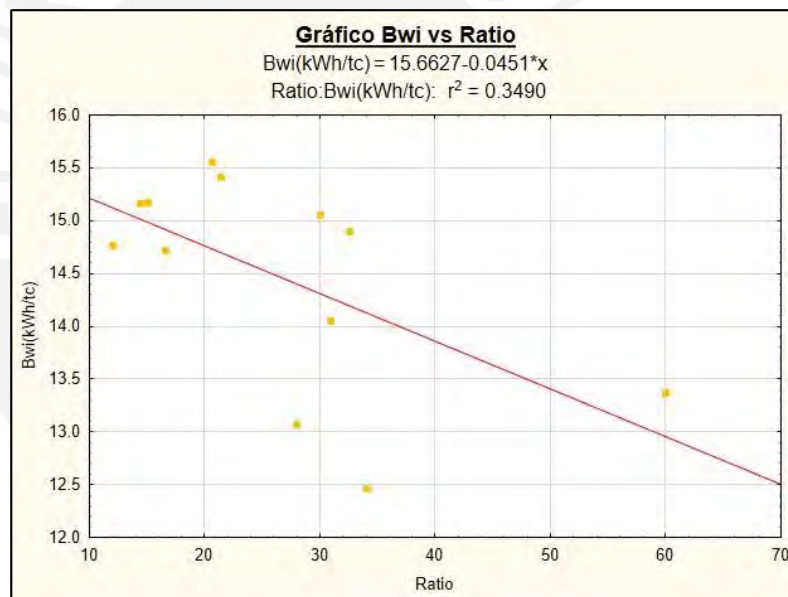


Figura 35-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 3.

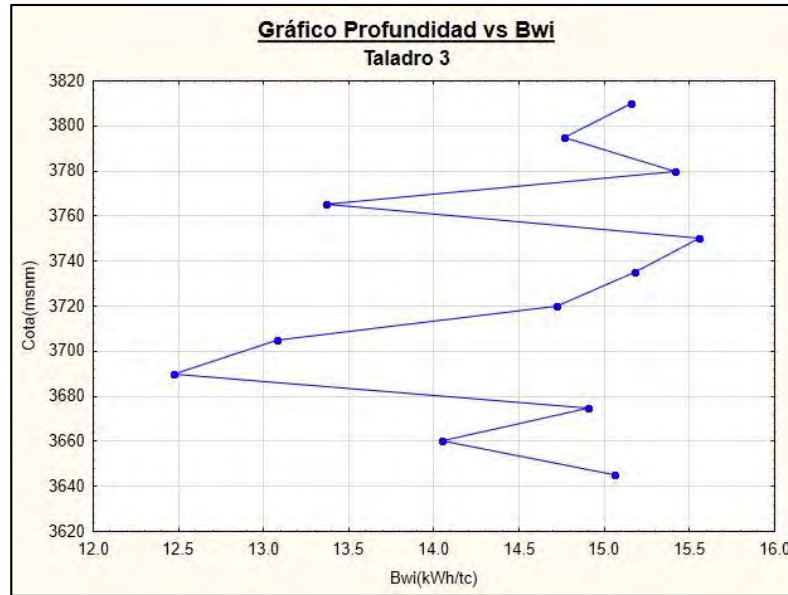


Figura 36- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 3.

La Tabla 6 muestra el resumen de las correlaciones obtenidas:

Tabla 6- Resumen Correlaciones

Zona Sílice-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 1	0.13	0.13	0.21
Taladro 2	0.01	0.25	0.01
Taladro 3	0.44	0.47	0.35

5.2. Zona Arcilla-Sílice-Potásica

En el taladro 4 se observa el alto contenido de feldespato respecto al cuarzo y arcillas (figura 37) así mismo se puede apreciar los diferentes valores de Work Index obtenidos para los mismos valores porcentuales de feldespato de 60% y 70% respectivamente (figura 38). El cuarzo también presenta diferentes valores de Bwi para valores porcentuales de 8% y 10% (figura 39). En la figura 41 se muestra el incremento del Work Index por debajo de los 3780 msnm y su disminución entre los 3700 y 3600 msnm.

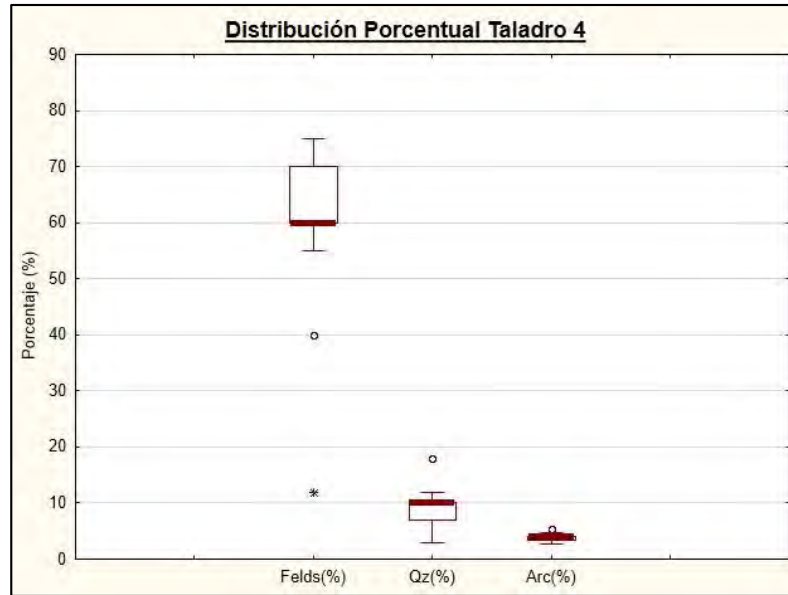


Figura 37-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 4.

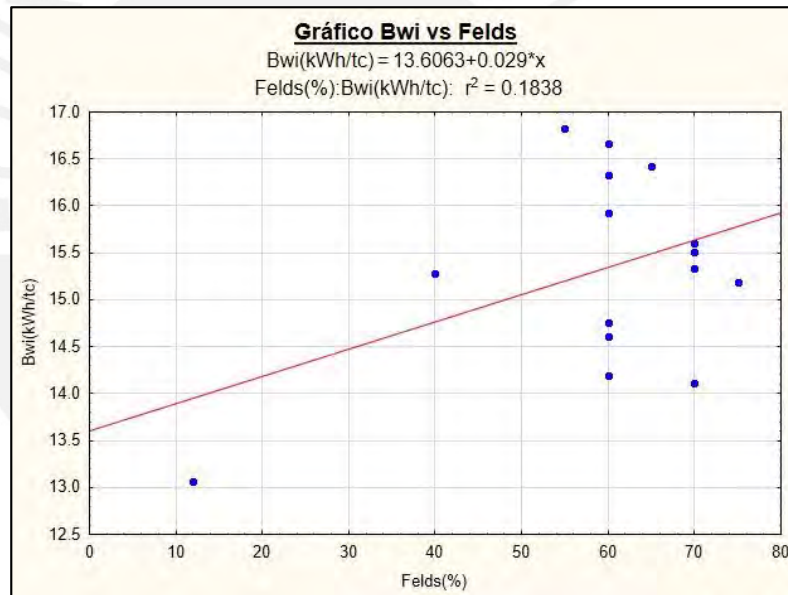


Figura 38-Resultados Bwi vs Felds Taladro 4.

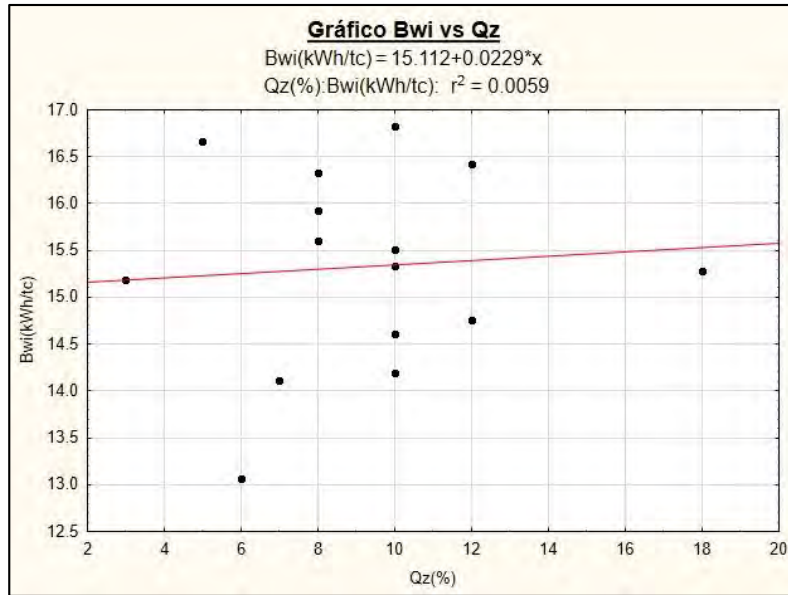


Figura 39-Resultados Bwi vs Qz Taladro 4.

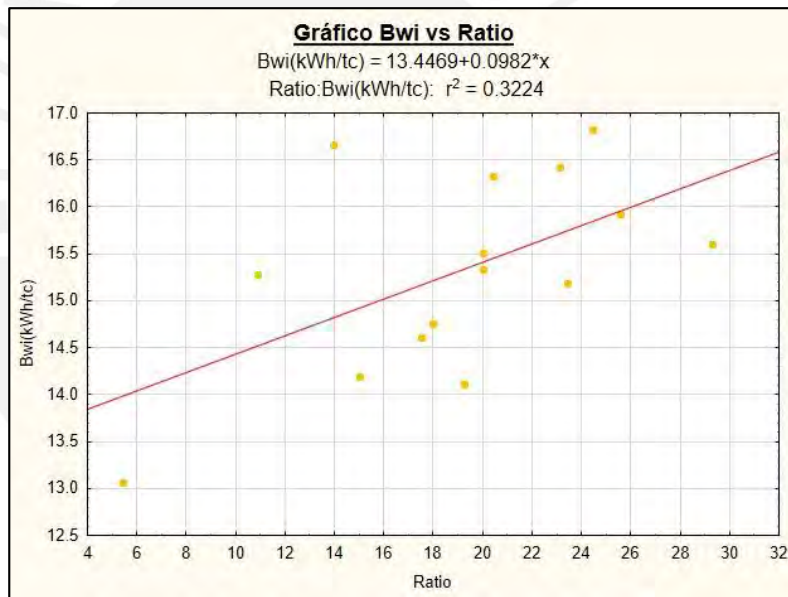


Figura 40-Resultados Bwi vs Ratio Taladro 4.

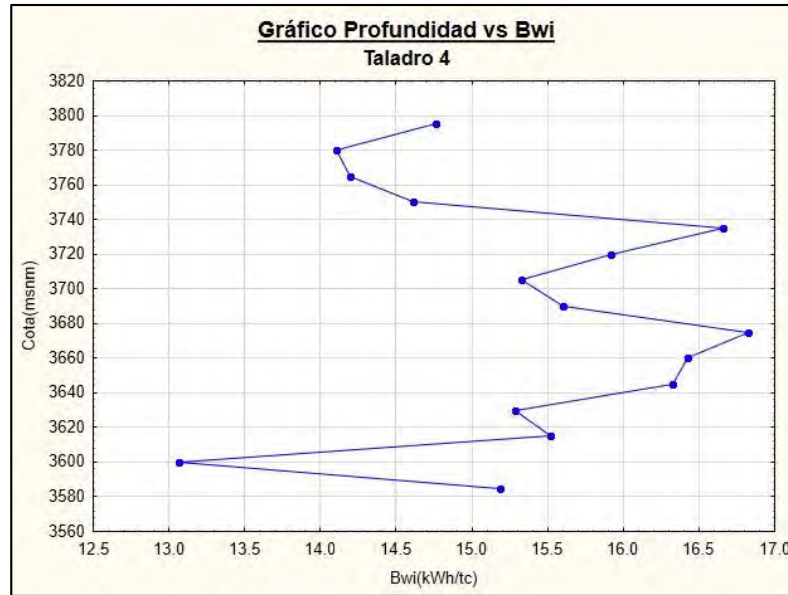


Figura 41- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 4.

En el taladro 5 se observa diferentes valores de Work Index para el mismo valor porcentual de cuarzo de 10% (figura 44) y los factores de correlación (r^2) al igual que en la zona Sílice-Potásica registran valores bajos inclusive llegando a valores de 0. En este taladro el Work Index aumenta con la profundidad hasta los 3550 msnm luego disminuye notoriamente (figura 46).

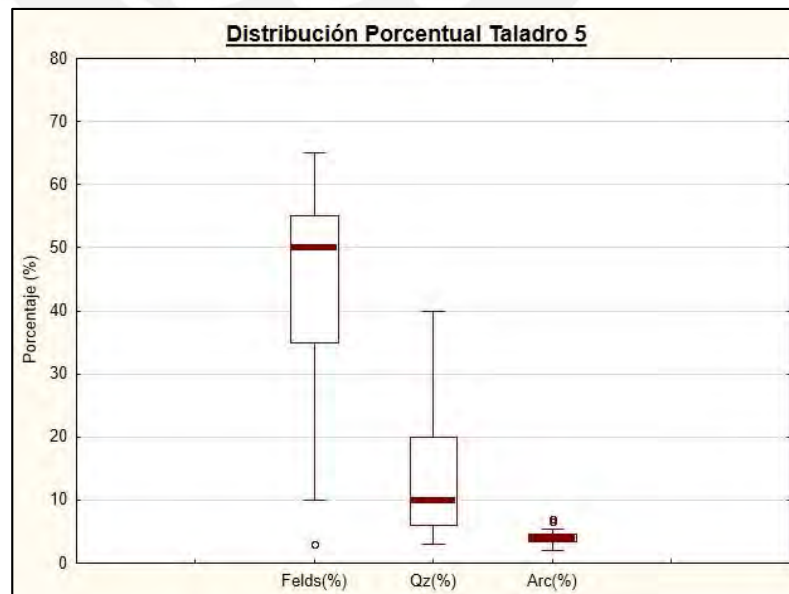


Figura 42-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 5.

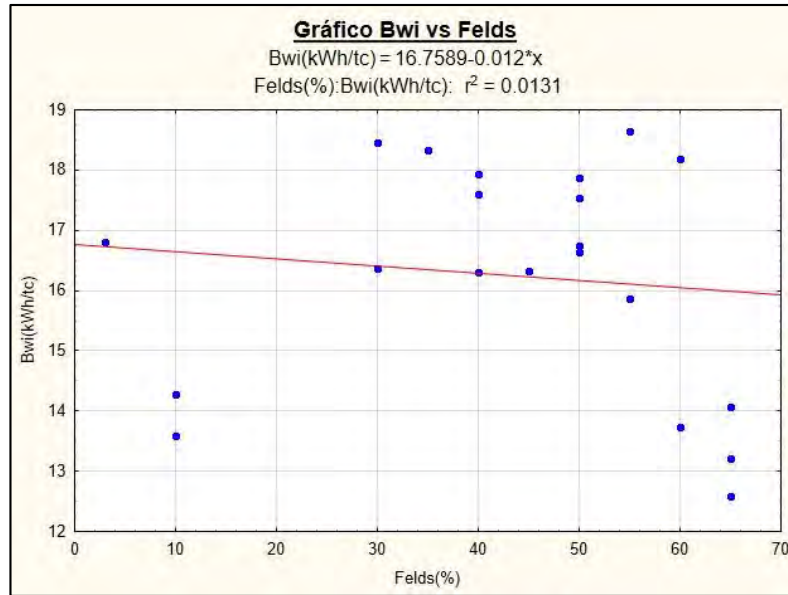


Figura 43-Resultados Bwi vs Felds Taladro 5.

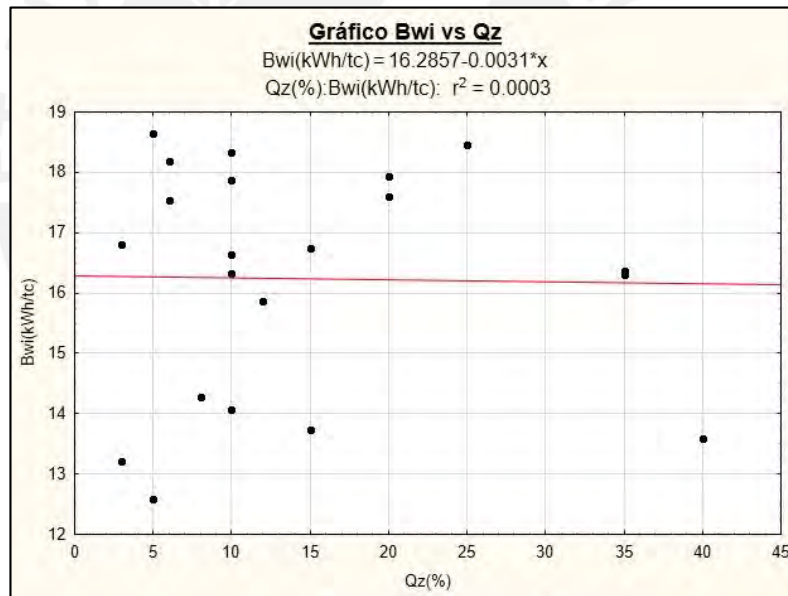


Figura 44-Resultados Bwi vs Qz Taladro 5.

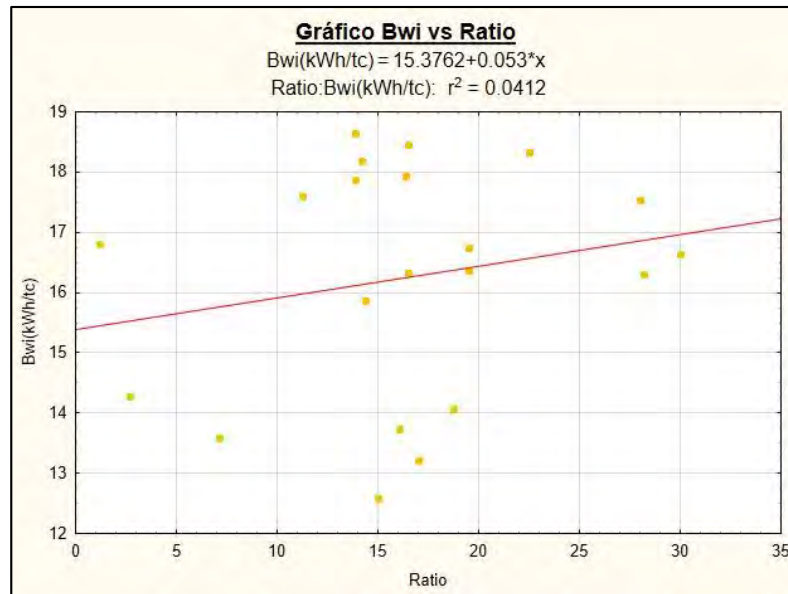


Figura 45- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 5.

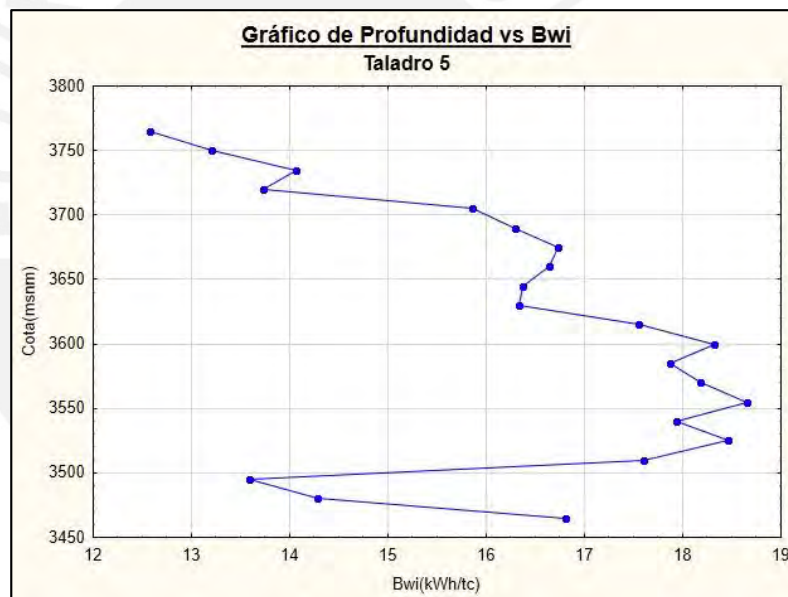


Figura 46- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 5.

La Tabla 7 muestra el resumen de las correlaciones obtenidas:

Tabla 7-Resumen Correlaciones

Zona Arcilla-Sílice-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 4	0.18	0.01	0.32
Taladro 5	0.01	0.00	0.04

5.3. Zona Arcilla-Yeso-Potásica

Para la zona Arcilla-Yeso-Potásica en el taladro 6 se presentan diferentes valores de Work index para el mismo valor porcentual de feldespato de 40% (figura 48). Para el cuarzo se presenta la misma condición para valores de 15% y 20% respectivamente (figura 49). Los factores de correlación son cercanos a 0. En la figura 51 se observa cómo el Work Index aumenta por debajo de la cota 3700 msnm.

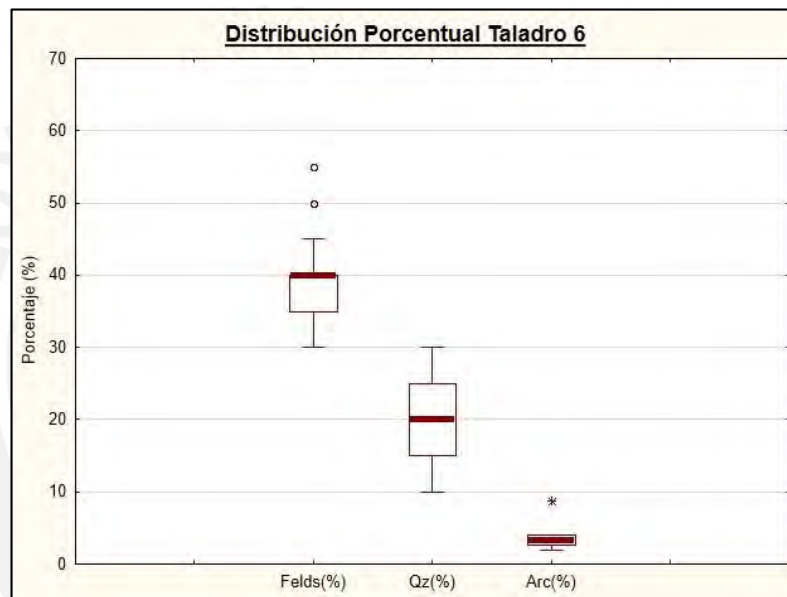


Figura 47-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 6.

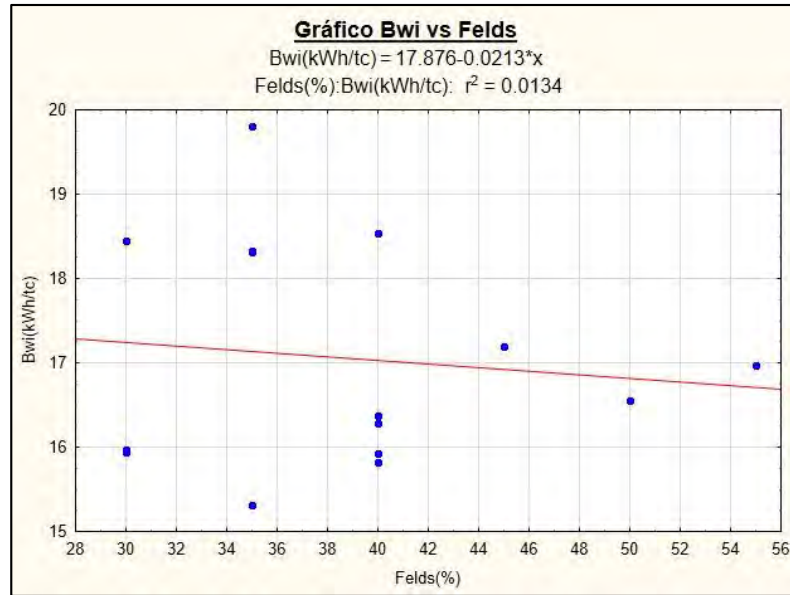


Figura 48- Resultados Bwi vs Felds Taladro 6.

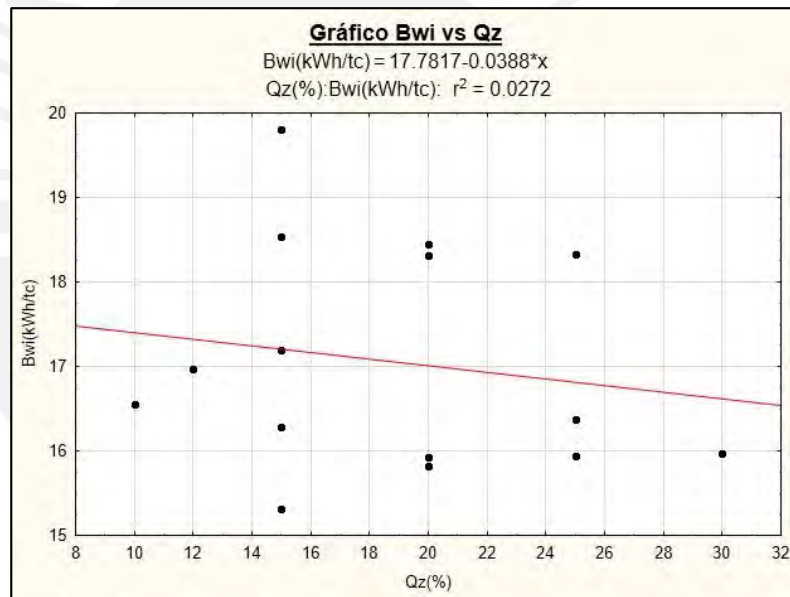


Figura 49-Resultados Bwi vs Qz Taladro 6.

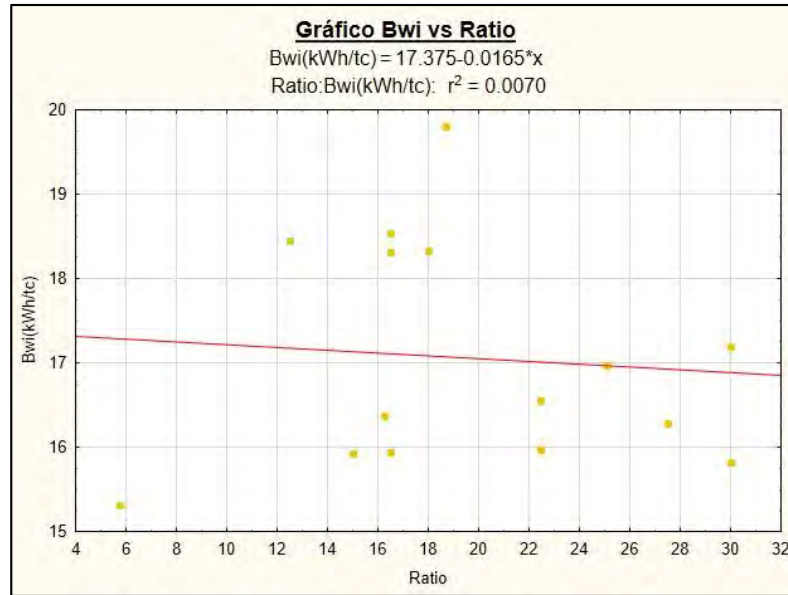


Figura 50- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 6.

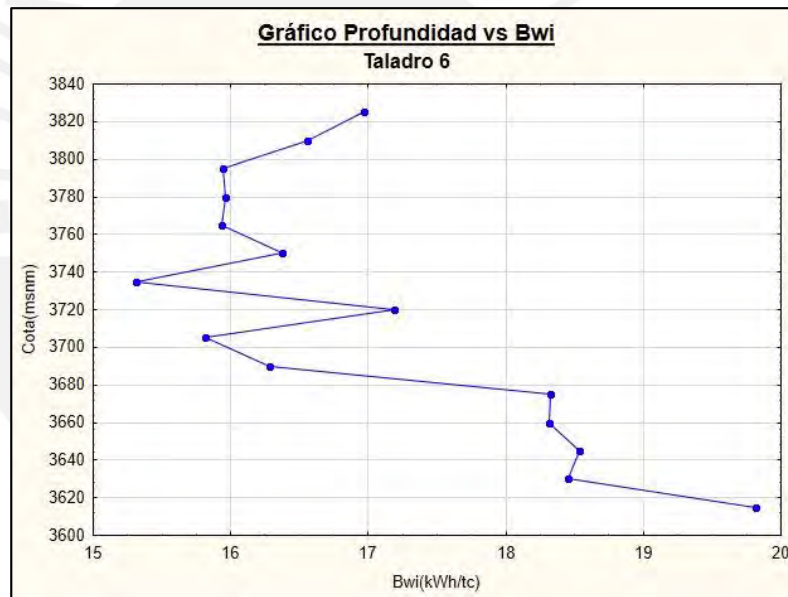


Figura 51- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 6.

La Tabla 8 muestra el resumen de las correlaciones obtenidas:

Tabla 8- Resumen Correlaciones

Zona Arcilla-Yeso-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 6	0.01	0.03	0.01

5.4. Zona Calcopirita-Pirita-Potásica

Para la zona Calcopirita-Pirita-Potásica en el taladro 7, se presentan diferentes valores de Work index para el mismo valor porcentual de feldespato de 40% (figura 53). Lo mismo aplica en el caso del cuarzo para valores de 12%, 15% y 20% respectivamente (figura 54). Se puede apreciar que el Work Index presenta un rango de valores de entre 13.5 y 17 kWh/tc para valores de ratio de dureza cercanos a 30 (figura 55). Para el taladro 7 se observa una disminución muy notoria del Work Index por debajo de los 3800 msnm (figura 56).

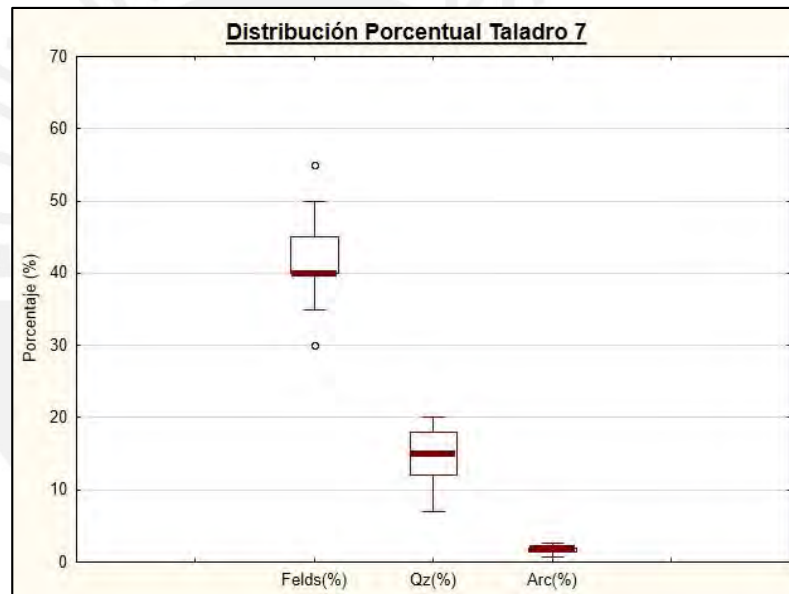


Figura 52-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 7.

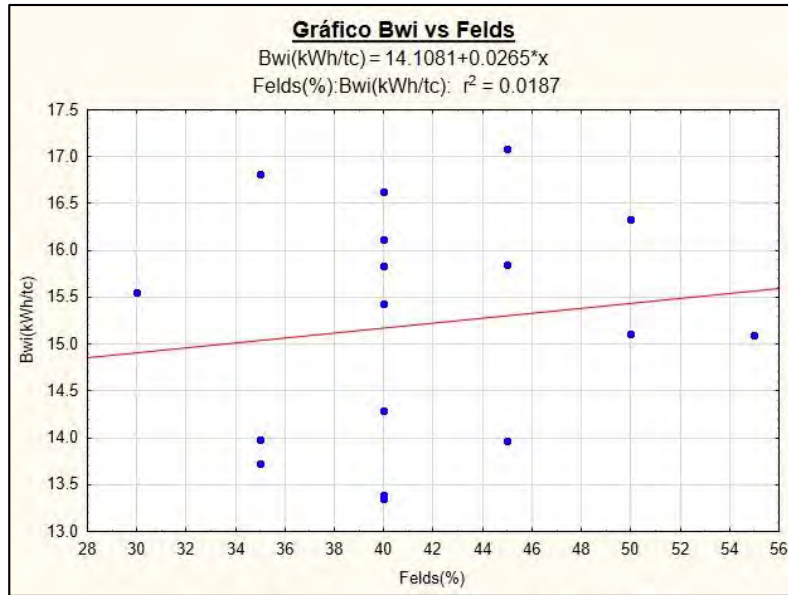


Figura 53- Resultados Bwi vs Felds Taladro 7.

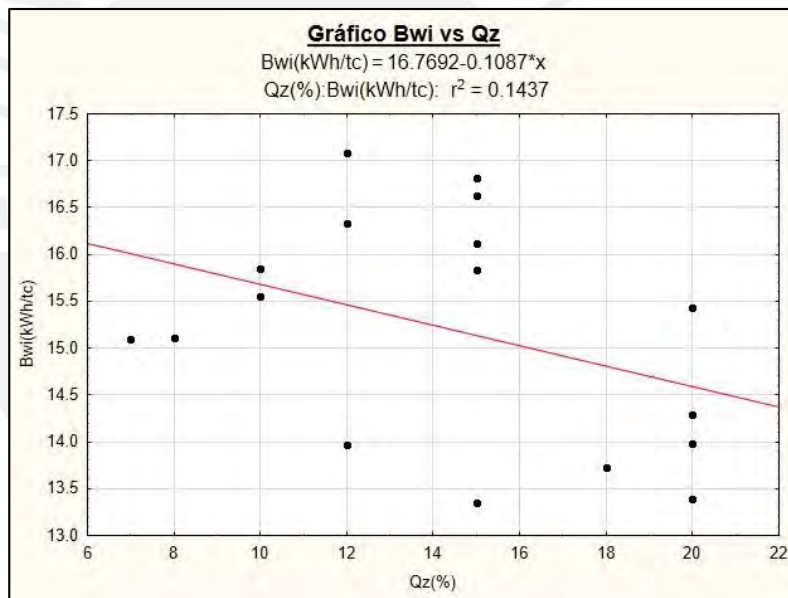


Figura 54-Resultados Bwi vs Qz Taladro 7.

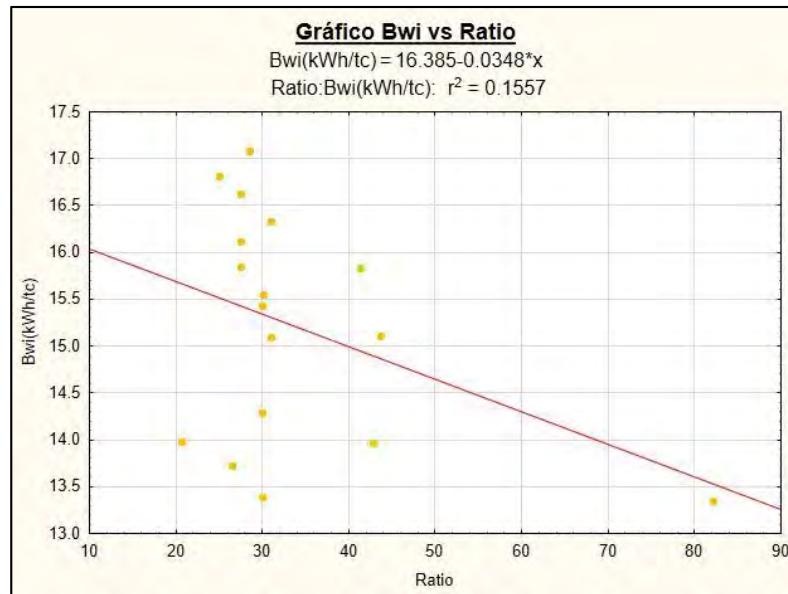


Figura 55- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 7.

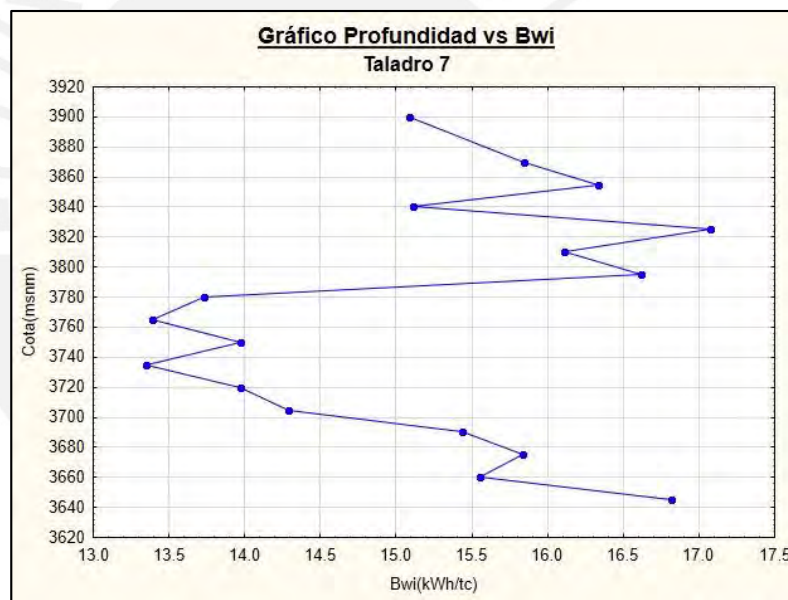


Figura 56- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 7.

En el taladro 8 el comportamiento lineal tiene pendiente negativa indicando la disminución del Work Index a medida que aumenta porcentualmente los contenidos de los minerales en estudio y el mayor valor del factor de correlación (r^2) se presenta en el cuarzo con un valor de 0.5 (figura 59). En la figura 61 se observa cómo disminuyen los valores de Work Index en las cotas 3870 msnm y 3780 msnm.

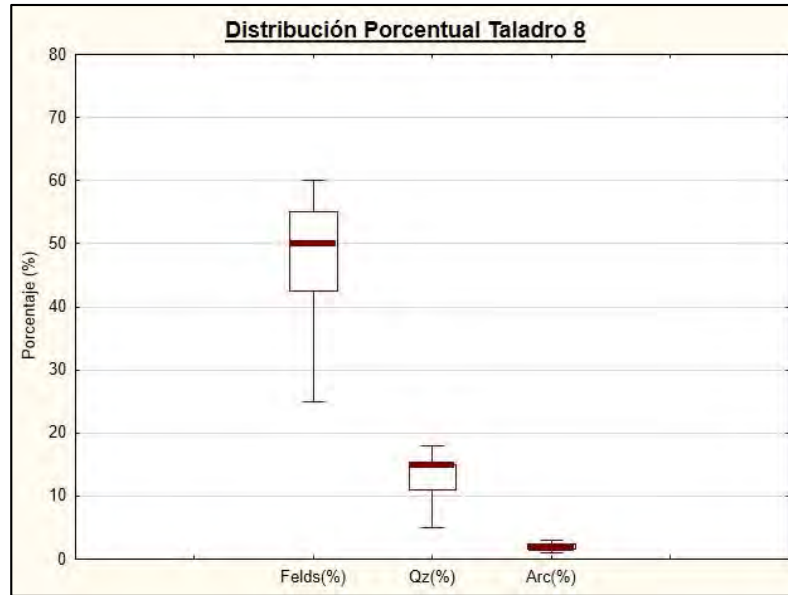


Figura 57-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 8.

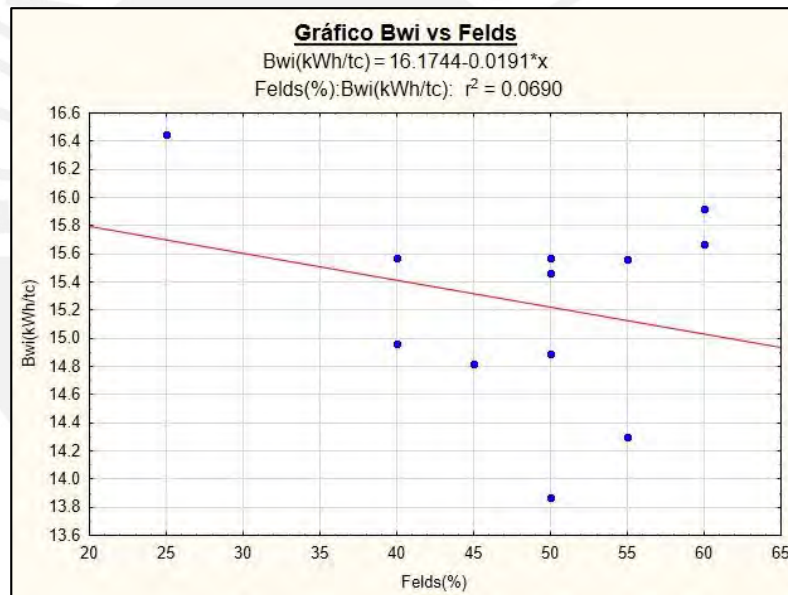


Figura 58- Resultados Bwi vs Felds Taladro 8.

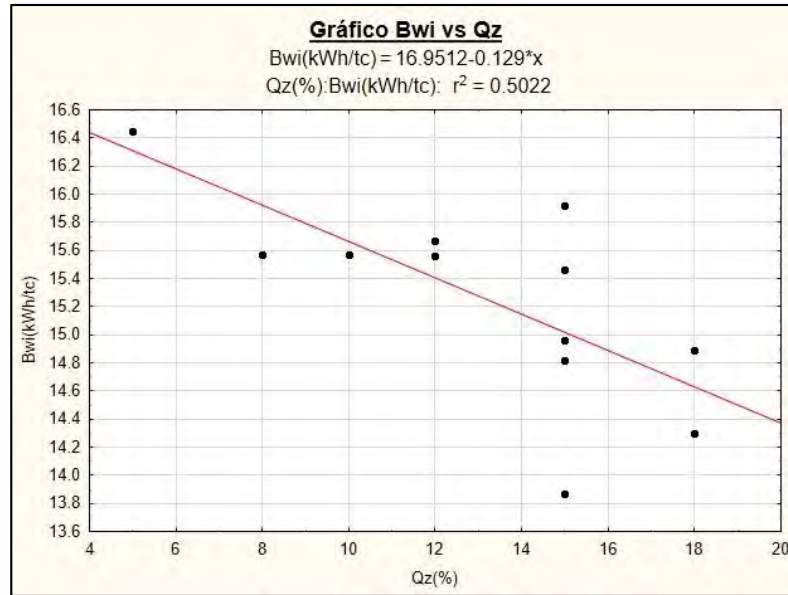


Figura 59-Resultados Bwi vs Qz Taladro 8.

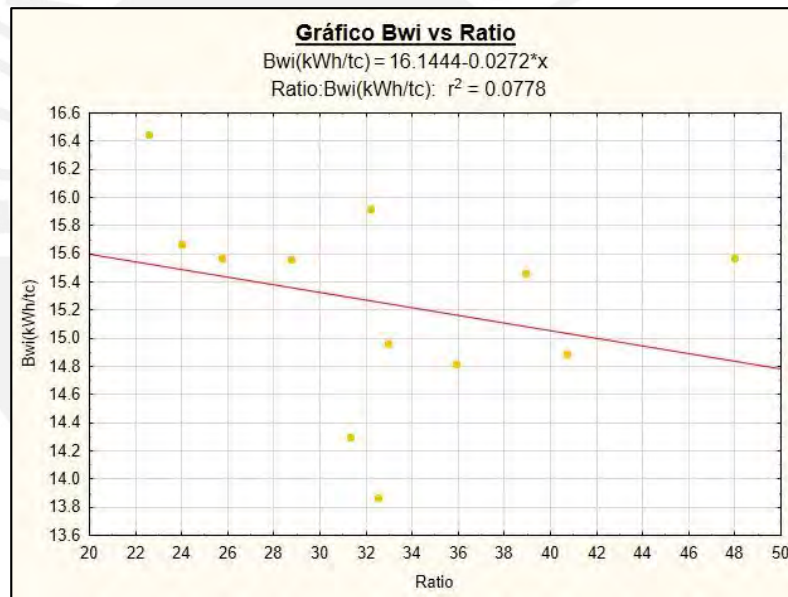


Figura 60- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 8.

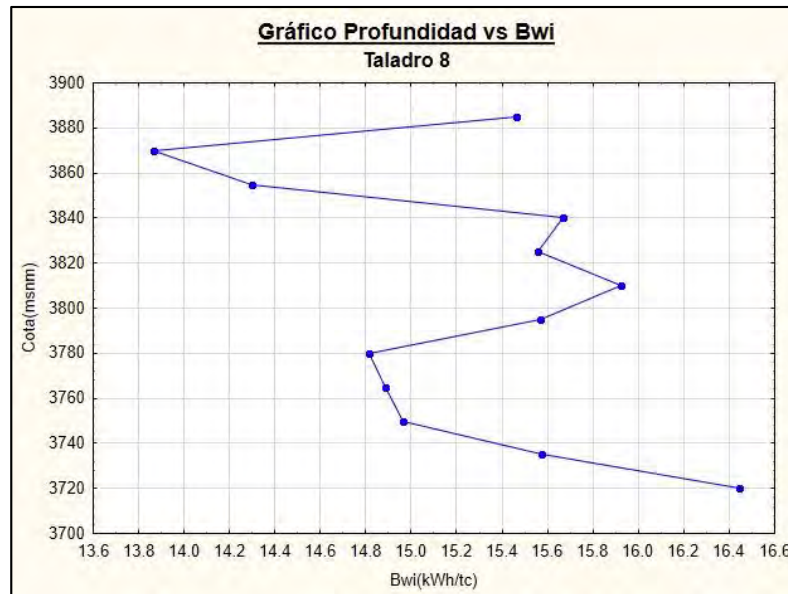


Figura 61- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 8.

La Tabla 9 muestra el resumen de las correlaciones obtenidas:

Tabla 9- Resumen Correlaciones

Calcopirita-Pirita-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 7	0.02	0.14	0.16
Taladro 8	0.07	0.50	0.08

5.5. Zona Potásica

El taladro 9 presenta comportamientos lineales con pendientes positivas, pero con factores de correlación cercanos a 0. En la figura 66 se aprecia a partir de la cota 3840 msnm una disminución del Work Index hasta los 3750 msnm.

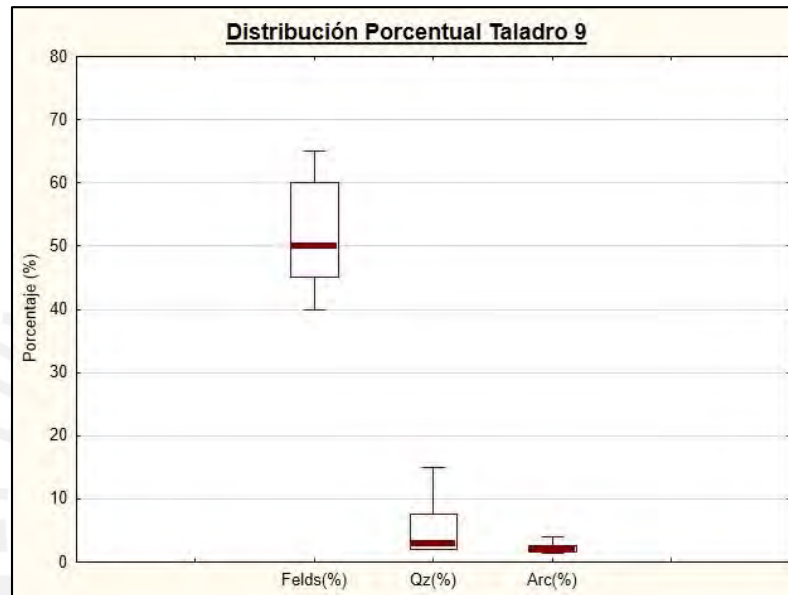


Figura 62-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 9.

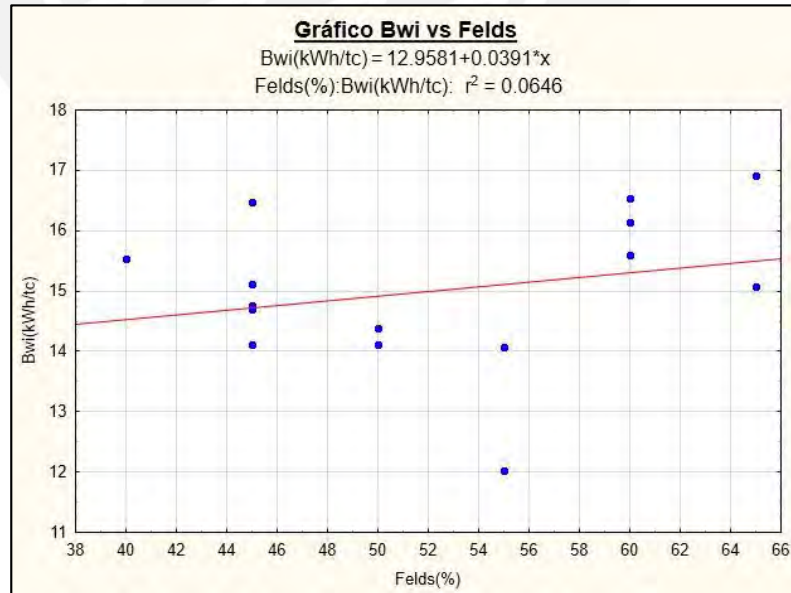


Figura 63- Resultados Bwi vs Felds Taladro 9.

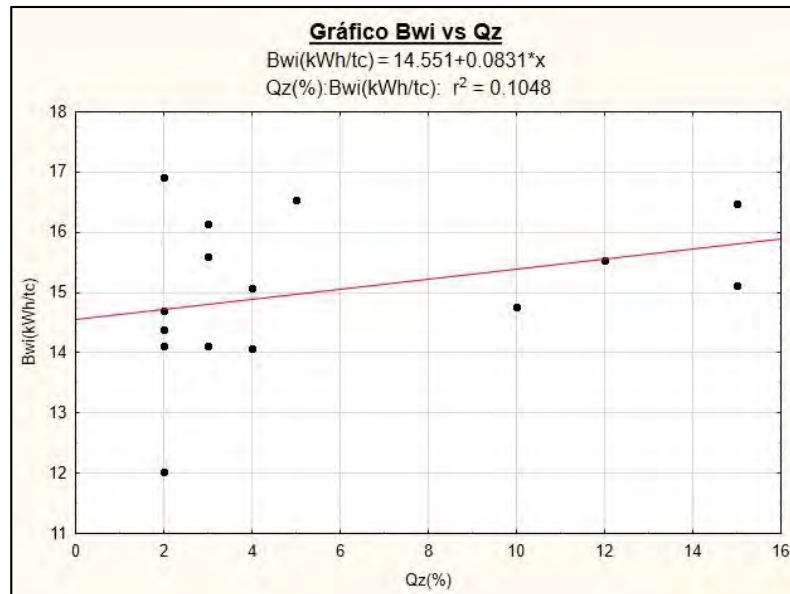


Figura 64-Resultados Bwi vs Qz Taladro 9.

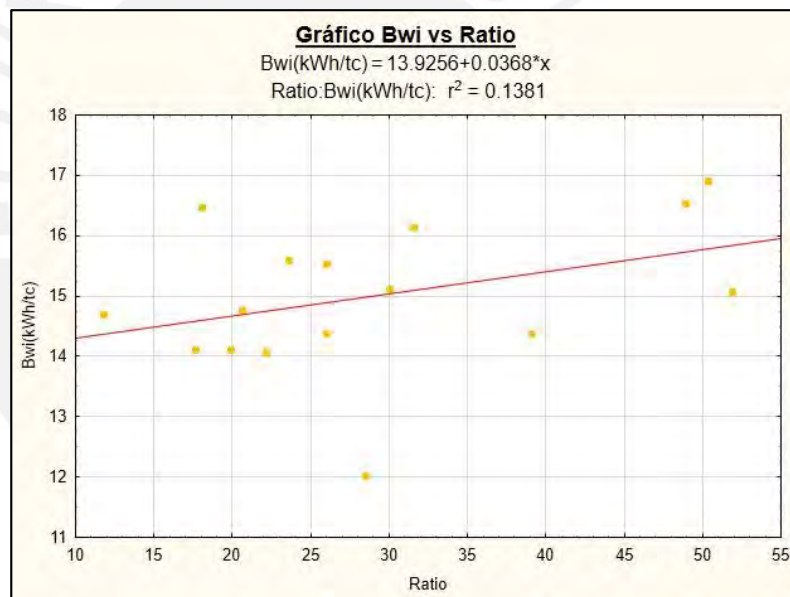


Figura 65- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 9.

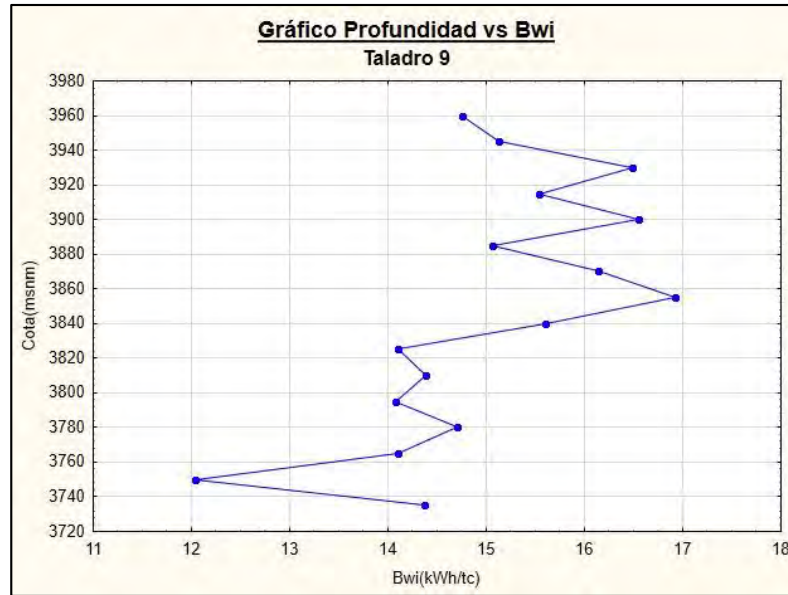


Figura 66- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 9.

Para el taladro 10 de la zona Potásica, el mayor factor de correlación (r^2) obtenido es de 0.43 y corresponde a la relación Bwi vs Ratio de dureza (figura 70). En la figura 71 se muestra cómo disminuye el Work Index con la profundidad.

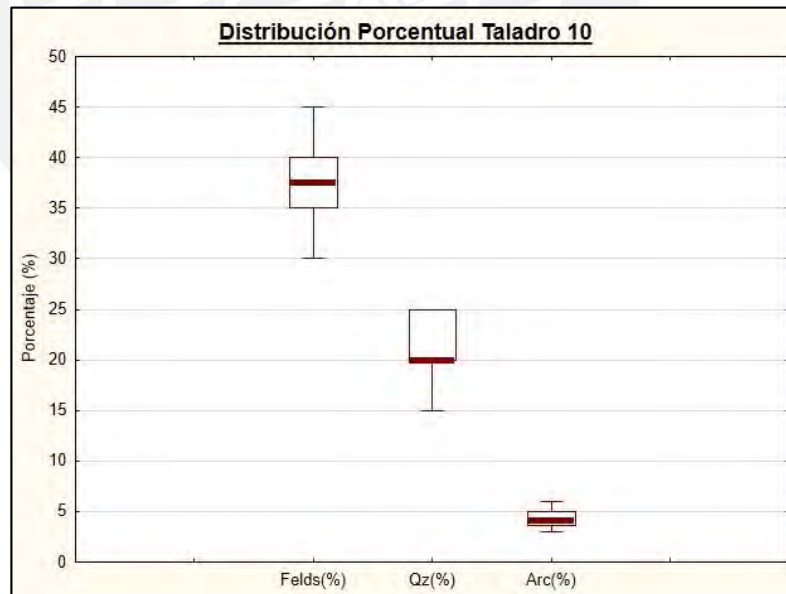


Figura 67-Resultados Distribución Porcentual Mineralógica Taladro 10.

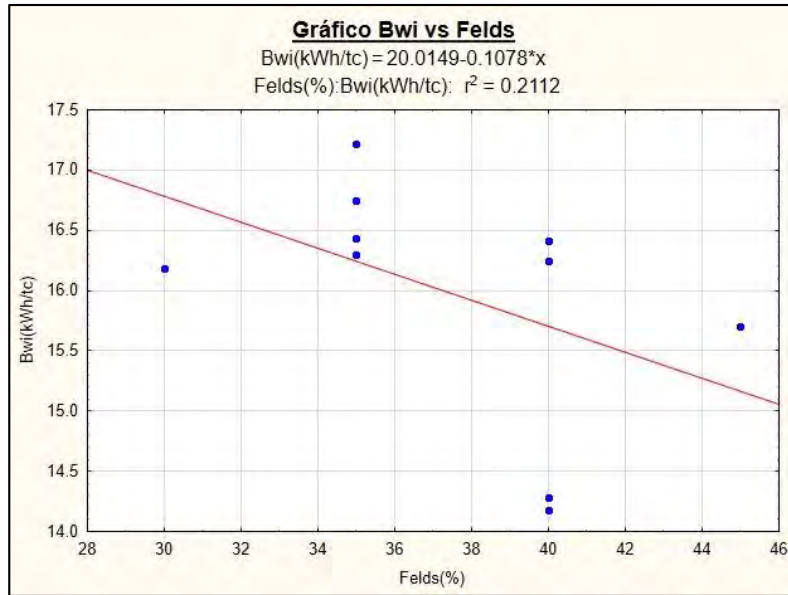


Figura 68- Resultados Bwi vs Felds Taladro 10.

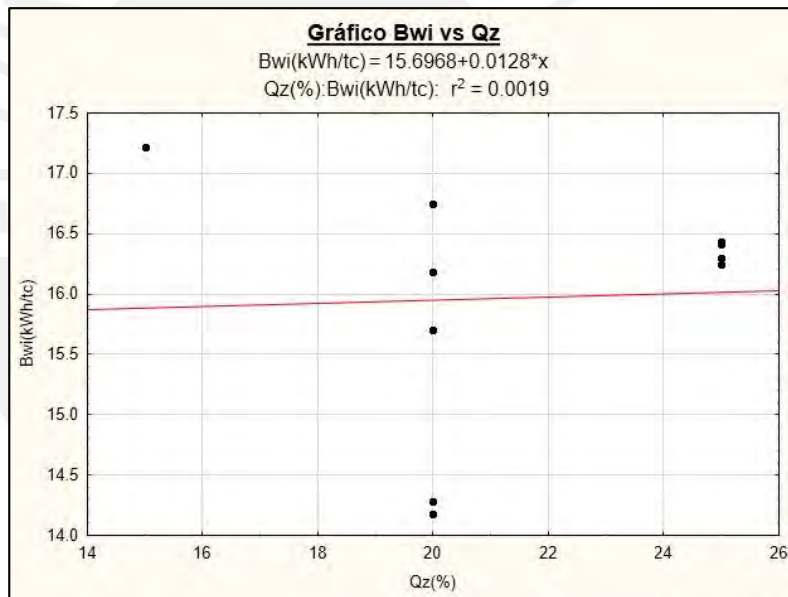


Figura 69- Resultados Bwi vs Qz Taladro 10.

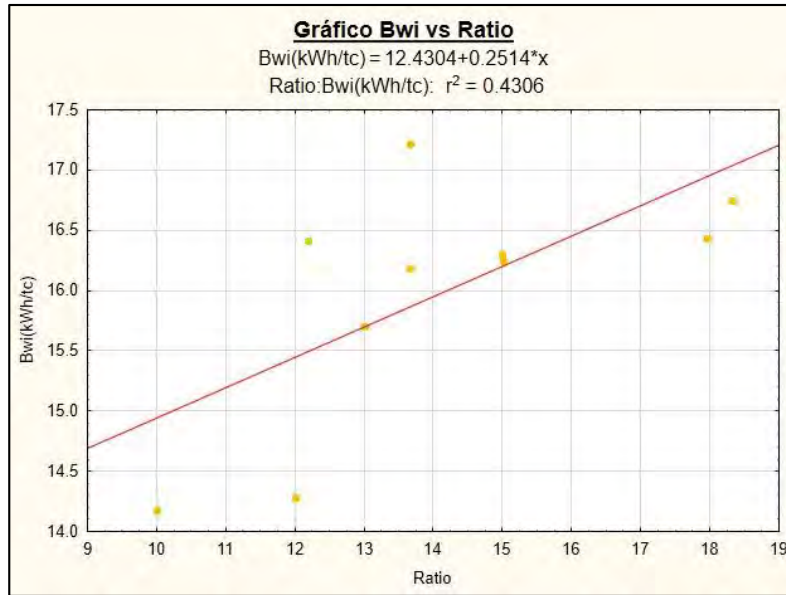


Figura 70- Resultados Bwi vs Ratio Taladro 10.

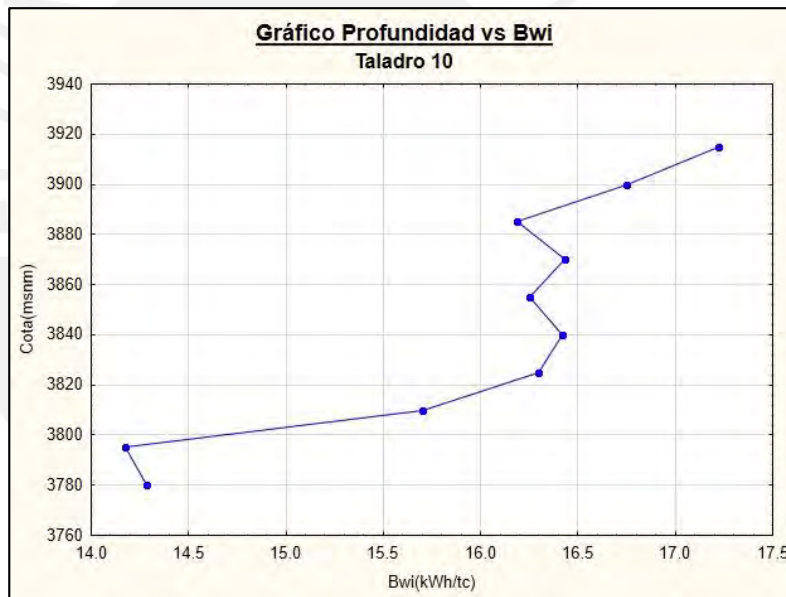


Figura 71- Resultados Profundidad vs Bwi Taladro 10.

La Tabla 10 muestra el resumen de las correlaciones obtenidas:

Tabla 10- Resumen Correlaciones

Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 9	0.06	0.10	0.14
Taladro 10	0.21	0.00	0.43

La tabla 11 muestra los resultados de las correlaciones obtenidas para todos los taladros del estudio realizado. Se puede observar que en todas las zonas estudiadas los valores de las correlaciones son bajas llegando inclusive a registrar valores cercanos a 0, así mismo el comportamiento esperado para las variables analizadas era que conforme los contenidos de feldespato o cuarzo aumenten los valores de Work Index sigan también dicha tendencia, sin embargo, solo los taladros 4 y 9 cumplen dicha tendencia y con valores de correlaciones bajos ya mencionados.

Tabla 11-Resumen Correlaciones

Zona Sílice-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 1	0.13	0.13	0.21
Taladro 2	0.01	0.25	0.01
Taladro 3	0.44	0.47	0.35
Zona Arcilla-Sílice-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 4	0.18	0.01	0.32
Taladro 5	0.01	0.00	0.04
Zona Arcilla-Yeso-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 6	0.01	0.03	0.01
Calcopirita-Pirita-Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 7	0.02	0.14	0.16
Taladro 8	0.07	0.50	0.08
Potásica	Correlación(r2)		
	Bwi-Felds	Bwi-Qz	Bwi-Ratio
Taladro 9	0.06	0.10	0.14
Taladro 10	0.21	0.00	0.43

6. Discusión de Resultados

Para los taladros estudiados en las distintas zonas se encontraron comportamientos diferentes respecto al Work Index:

En la zona Sílice-Potásica (taladro 1, taladro 2 y taladro 3) se pudo apreciar que los valores de Work Index aumentan conforme el contenido de feldespato aumenta a excepción del taladro 1, esto se puede deber al grado de alteración de los feldspatos en dicho taladro, lo que afecta la competencia mecánica de los mismos al estar alterándose a otros minerales. Respecto a la relación de los valores del Work Index con el contenido de cuarzo en los taladros 2 y 3 estos disminuyen a medida que el cuarzo aumenta, esto se puede deber a que dicho mineral tiende a formar cristales bien desarrollados y facilita el trabajo de los elementos de molienda (bolas) del molino, puesto que a mayor contenido de cristales se generan mayores superficies de contacto y en consecuencia posibles planos de fractura ocasionando un menor consumo de energía. Para esta zona también los valores de Work Index disminuyen a medida que el ratio de dureza aumenta, este a su vez varía de forma inversamente proporcional al contenido de arcillas, para los taladros estudiados se puede inferir que el Work Index disminuye cuando el contenido de arcillas disminuye, esto se podría deber al comportamiento plástico de estos minerales, propiedades expansivas que dificultan la generación de posibles planos de fractura y como la zona en estudio no está caracterizada por la presencia de arcillas los valores de Work Index disminuyen.

En la zona Arcilla-Sílice-Potásica el taladro 4 presenta un contenido de feldespato que en promedio es mayor a 50% y los valores de Work Index aumentan conforme este mineral aumenta, para el caso del cuarzo hay un comportamiento opuesto a la zona anterior (zona Sílice-Potásico) puesto que el Work Index aumenta con el contenido de cuarzo y esto se puede deber a

su bajo contenido (menor a 25%) y a la influencia del grado de alteración de los feldespatos.

La zona Arcilla-Yeso-Potásica se caracteriza por la presencia de arcillas, lo que indica un grado de alteración Argílica y al analizar el taladro 6 se puede apreciar la disminución del contenido de feldespato (menor a 40%) y cómo los valores de Work Index disminuyen con el aumento de este mineral, esto se debe a que el grado de alteración afecta la competencia mecánica del mismo y no se necesita consumir mucha energía para la generación de fracturas a pesar de que su contenido esté aumentando.

Tanto para la zona Potásica como para la zona Calcopirita-Pirita-Potásica se registraron los mismos valores de Work Index a distintos porcentajes de composición mineral, a partir de estos resultados se podría inferir que la composición mineralógica no influye directamente en el Work Index.

En general para los taladros estudiados, y en base a los factores de correlación obtenidos, no se puede inferir una relación directa entre el Work Index y el contenido mineralógico de la roca, puesto que en algunos casos no existe correlación alguna ($r^2=0$). Por lo tanto, la composición mineral no es la mejor variable geológica a estudiar para el Work index o en todo caso no es la única variable a considerar.

Según los resultados obtenidos, el contenido de cuarzo, feldespato o arcilla, independiente de la cantidad en la que se presenten, no influye en el Work Index como respuesta metalúrgica. En el presente estudio se han encontrado casos en los cuales para la misma cantidad de feldespato, cuarzo o arcilla se han registrado diferentes valores de Work Index independiente de la zona de alteración, es decir la dureza del mineral (escala de mohs) a procesar no influye en la cantidad de energía que requiere dicho mineral para llevarlo a una granulometría inferior (P_{80}).

6.1. Work Index vs Textura

La textura de una roca se refiere a la apariencia física de la misma en función del tamaño, forma y ordenamiento de los cristales que la componen tanto a nivel macroscópico como a nivel microscópico. Dicha textura puede cambiar por procesos de alteración en los cuales los minerales presentes se adaptan a las nuevas condiciones de presión y temperatura (ver punto 3.8.3 Alteración Hidrotermal). Se han realizado estudios empíricos en los cuales se analiza la textura de la roca como variable primaria y al Work Index como respuesta metalúrgica, asociando rango de valores de Work Index a determinadas texturas. Dicho estudio se realizó en la mina El Teniente en Chile (Oyarzún y Arévalo, 2011) y se basó en el análisis de los intercrecimientos de los cristales observados en láminas de sección delgada. Para cada tipo de litología se generaron láminas de sección delgada y se realizaron pruebas de Work Index estableciendo rango de valores según la distribución de los cristales y el grado de interferencia de estos. En las siguientes figuras se observa la poca correlación del Work Index con los análisis químicos (figura 72) y la mineralogía (figura 73) en la mina El Teniente con lo cual se buscó relacionar al Work Index con otras características geológicas como la textura.

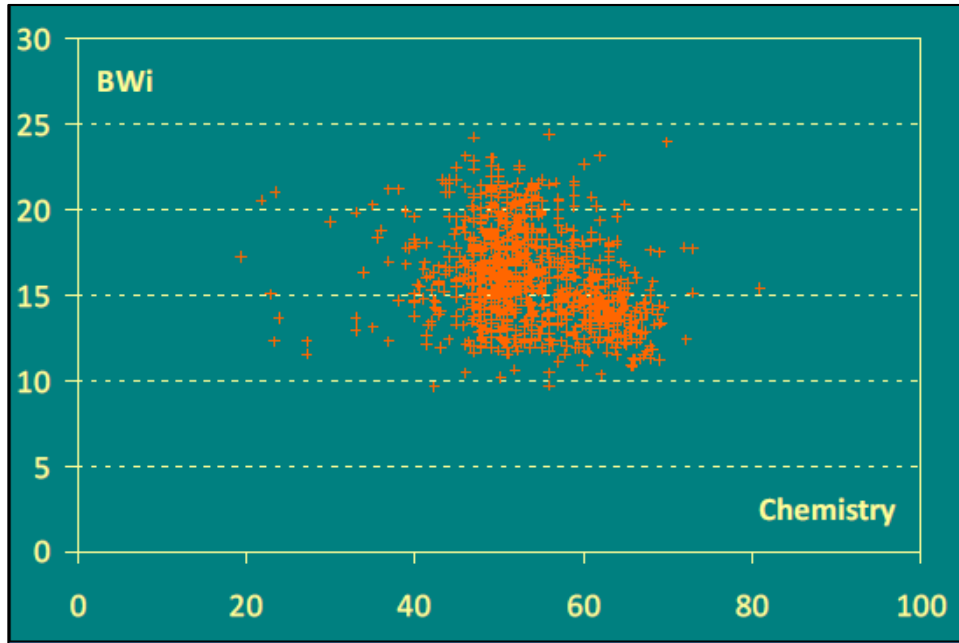


Figura 72-Correlación Work Index vs Análisis Químico (Oyarzún y Arévalo,2011).



Figura 73-Correlación Work Index vs Mineralogía (Oyarzún y Arévalo,2011).

A continuación, se muestra los rangos de valores de Work Index asociados a sus respectivas láminas de sección delgada para distintos tipos de litologías en la mina El Teniente en Chile (Figura 74,75):

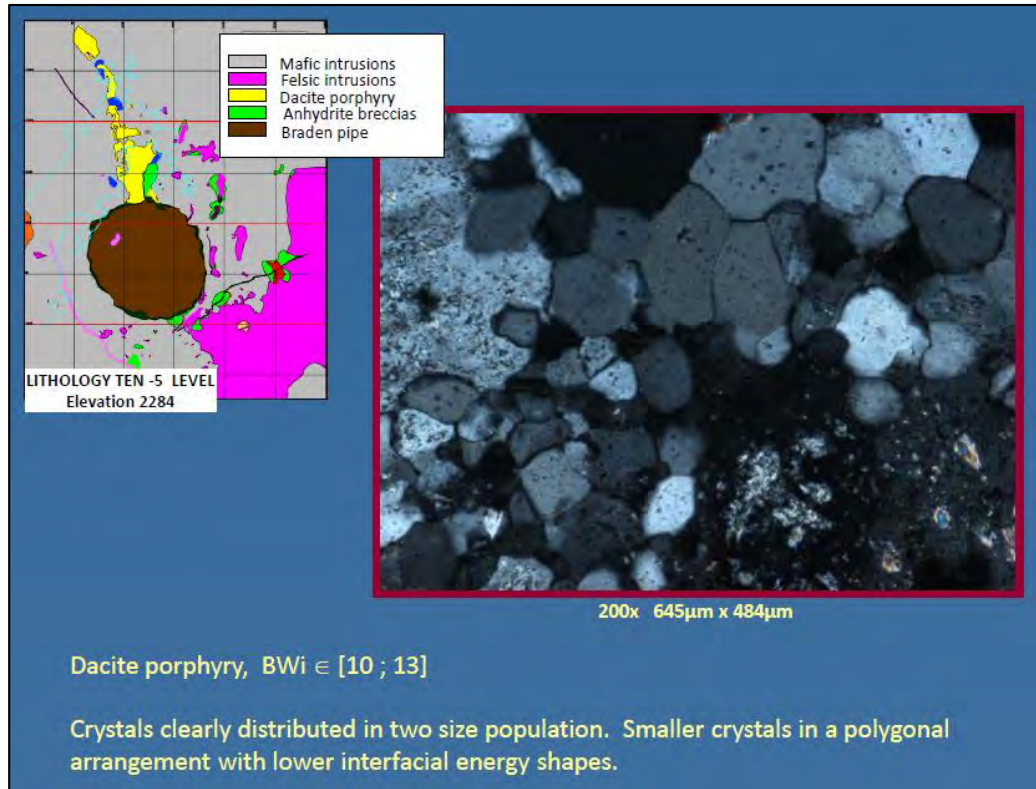


Figura 74- Bwi vs Textura(a), nicoles cruzados 645µm x 484µm (Oyarzún y Arévalo,2011).

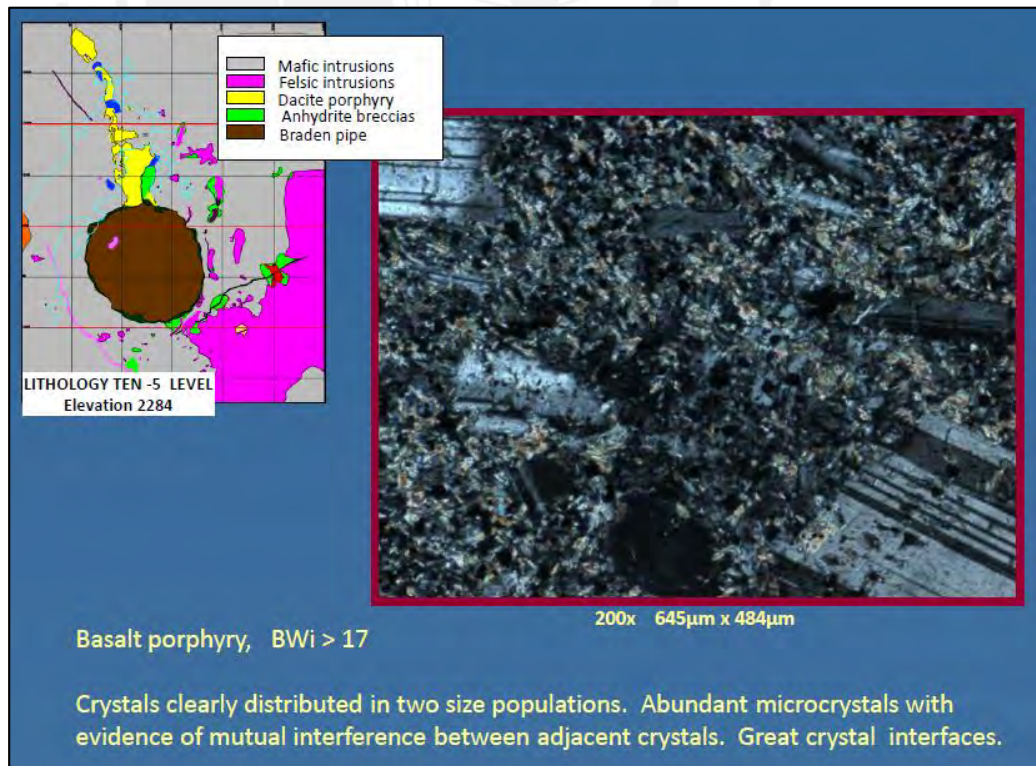


Figura 75- Bwi vs Textura(b), nicoles cruzados 645µm x 484µm (Oyarzún y Arévalo,2011).

Para entender mejor el estudio realizado en la mina El Teniente en la figura 76 se presenta una muestra de cuarzo (15cm x 10cm) con cristales muy bien desarrollados. En la muestra se observa cómo los cristales se han desarrollado a lo largo de una superficie (drusa de cuarzo) y cómo el intercrecimiento entre ellos genera a su vez superficies de contactos (figura 77) y al ser una muestra unimodal (solo cuarzo) produce también vacíos generados por la diferencia de tamaño de los cristales que pueden ser rellenados por otros minerales (figura 78), este comportamiento se repite a diferentes escalas tanto en muestra de mano como en microscopio (secciones delgadas), se debe considerar la forma del borde de unión entre minerales adyacentes, los contactos rectos son de fácil separación (textura granoblástica), contactos irregulares dificultan la separación.

El estudio realizado en la mina El Teniente estableció que el grado de intercrecimiento de los cristales que se da a través de superficies de contacto sumado a la interacción de estos con otros cristales que rellenan espacios vacíos (interferencia) generan determinados rangos de valores de Work Index, los cuales aumentan cuando el intercrecimiento y la interferencia es mayor.

La intensidad y tipo de vetilleo es un factor que también se debe tener en consideración, ciertas vetillas como las de tipo A y B no debilitan la resistencia de la roca caso contrario sucede con las vetillas tipo D que tengan cuarzo con textura drúsica y sulfuros al centro.



Figura 76-Drusa de cuarzo (foto: Jorge Rojas).



Figura 77- Intercrecimiento de cristales mostrando superficies de contacto. (foto: Jorge Rojas).



Figura 78- Vacíos a rellenar generados por la diferencia de tamaños en los cristales (foto: Jorge Rojas).

6.2. Work Index vs Profundidad

Para la Zona Sílice-Potásica en los taladros 1 y 2 se pudo observar cómo el Work Index aumenta con la profundidad, para el taladro 2 dicho aumento empieza a disminuir por debajo de los 3550 msnm esto se puede deber a un cambio de litología o a la presencia de una falla. Para el taladro 3 los valores de Work Index son más erráticos lo que se puede deber a una transición en la zona de alteración del taladro.

Para la Zona Arcilla-Sílice-Potásica en los taladros 4 y 5 el Work Index aumenta con la profundidad y este aumento presenta valores superiores a 15 kWh/tc llegando hasta inclusive alcanzar valores cercanos a 19 kWh/tc esto se puede deber a la alteración que está caracterizada por la presencia de arcillas, el comportamiento plástico de las mismas puede influir en el consumo de energía para la conminución mineral.

En la zona Arcilla-Yeso-Potásica se encontró un aumento significativo del Work Index por debajo de los 3700 msnm, en el taladro 6 se pudo

observar, al igual que la zona anterior (Zona Arcilla-Sílice-Potásica), que la presencia de arcillas aumenta el consumo de energía y que es un aumento constante.

Para la zona Calcopirita-Pirita-Potásica en los taladros 7 y 8 entre los 3780 y 3720 msnm hay una disminución muy significativa en los valores del Work Index, esto se puede deber a la presencia de una falla a lo largo de esos 60 metros.

Para los taladros 9 y 10 de la Zona Potásica el taladro 9 tiene un comportamiento errático en los valores de Work Index, el taladro 10 presenta una disminución significativa a lo largo de toda su longitud (140 metros). Los comportamientos anteriores de pueden deber a una transición en la zona de alteración.

La distribución del Work Index respecto a la profundidad en general presenta un comportamiento creciente, es decir a mayor profundidad los valores de Work Index aumentan y en los casos en los cuales hay una disminución se puede inferir la presencia de zonas de falla o cambios litológicos, también las alteraciones presentes en el taladro de perforación influyen en el Work Index, menos circulación de agua superficial genera menos alteración supergénica, es importante mencionar que cada taladro está direccionado con cierta inclinación (Rumbo y Buzamiento). Los resultados obtenidos se podrían complementar con información geomecánica para poder tener una mejor interpretación, parámetros geomecánicos como el RQD (Rock Quality Designation), el cual es un valor que cuantifica el grado de fracturación que tiene la roca, brinda información in situ de la competencia mecánica del material y es un tipo de información que siempre está disponible en una operación minera.

6.3. Factor Voladura

El proceso de conminución empieza desde la voladura en donde la energía generada por el uso de explosivos es usada para arrancar el mineral para su posterior traslado a la planta metalúrgica. En el presente trabajo se han utilizado muestras provenientes de perforaciones diamantinas, el material con el cual se han realizado las pruebas de Work Index es un material que no ha pasado por el proceso de voladura, por lo tanto se debe considerar el efecto voladura sobre el Work Index puesto que así ocurre en una operación real, realizar futuros trabajos de Work Index considerando pruebas obtenidas de perforaciones diamantinas y comparar los resultados respecto a material que ha pasado por el proceso de voladura, debido a que esta influye en la resistencia al impacto de los minerales.



7. Conclusiones

1. Según el estudio realizado y las correlaciones obtenidas en cada zona de análisis se puede inferir que no hay una relación directa entre el Work Index y la mineralogía del yacimiento, se deben considerar más variables geológicas que puedan complementar el estudio realizado.
2. Se realizó el estudio en base a la competencia mecánica del material sustentada en la escala de dureza de Mohs, pero se debe tener en cuenta que en un yacimiento pórfido de cobre las rocas presentan grados de alteración en los cuales la competencia mecánica de la roca se ve afectada según la textura, y en consecuencia se debe considerar este factor.
3. El estudio se realizó con la información de 10 taladros de perforación distribuidos en distintas zonas del yacimiento caracterizadas por el tipo de alteración, para la confirmación de los resultados obtenidos se necesita una mayor cantidad de taladros (soporte).
4. Los resultados obtenidos son para un yacimiento tipo pórfido de cobre el cual tiene características intrínsecas bien definidas tales como controles estructurales y alteraciones que difieren con otros tipos de yacimientos, es decir cada yacimiento tiene su propia variabilidad y no se puede esperar los mismos resultados en configuraciones distintas como por ejemplo en un yacimiento epitermal de alta sulfuración o en un yacimiento de oro orogénico.
5. El material con el cual se realizaron las pruebas de Work Index proviene directamente de perforaciones diamantinas y no ha pasado por el proceso de voladura como sucede en las operaciones mineras,

se debe considerar el efecto que produce la energía de los explosivos en los resultados obtenidos.

6. Para el estudio del Work Index vs la profundidad se observa un aumento del consumo de energía con respecto a la profundidad y en algunos casos esta tendencia disminuye en tramos cortos para luego volver a incrementarse, los comportamientos irregulares de disminución y aumento pueden atribuirse a cambios en las litologías de la columna del taladro de perforación, así como también la presencia de fallas y el grado de alteración. Se debe tener en cuenta la dirección del taladro con su respectiva inclinación.
7. El presente estudio puede servir de referencia para futuros trabajos en los cuales se relacione al Work Index con la textura de la roca, se podrían realizar trabajos en base a pruebas de Work Index y microscopía óptica (láminas de sección delgada) en donde se analice las texturas involucradas o si se requiere de un estudio más a detalle se puede usar la microscopía electrónica de barrido.
8. La tasa de desgaste de elementos de molienda como bolas y barras guarda relación con la dureza de los minerales, es importante analizar esta característica con pruebas metalúrgicas que involucren conceptos de abrasión.

8. Bibliografía

1. Alfaro, E. (2016). Procesos Metalúrgicos. Diplomado de Especialización en Geometalurgia. Lima-Pucp.2016.
2. Alruiz, O.M., Morrell, S., Suazo, C.J., Naranjo, A. (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. Minerals Engineering journal 22, 1060-1067.
3. Ashley, K.J., Callow, M.I (2000). Ore variability: Exercises in geometallurgy. Engineering & Mining Journal 201 (2), 24-28.
4. Barry A. Wills (2006). Wills' Mineral Processing technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (seventh edition). Comminution (p.108). Australia: Tin Napier-Munn.
5. Barry A. Wills (2006). Wills' Mineral Processing technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (seventh edition). Crushers (p.118). Australia: Tin Napier-Munn.
6. Baumgartner, R. (2016). Yacimientos, Génesis y Características. Diplomado de Especialización en Geometalurgia. Lima-Pucp.2016.
7. Bond, F.C. (1952). The Third Theory of Comminution, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers 193. 484-494.
8. Burnham, C.W., Ohmoto, H. (1980). Late-Stage Processes of Felsic Magmatism. Mining Geology Special Issue 8, 1-11.
9. Canchaya, S. (2016). Geoestadística. Diplomado de Especialización en Geometalurgia. Lima-Pucp.2016.
10. Cline, J.S. Bodnar, R.J (1991). Can Economic Porphyry Copper Mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? Journal of Geophysical Research 96, 8113-8126.
11. Dzvinamurungu, T., Viljoen, K.S., Knoper, M.W., Mulaba-Bafubiandi, A. (2013). Geometallurgical characterisation of Merensky Reef and UG2 at the Marikana Mine, Bushveld Complex, South Africa. Minerals Engineering journal 52, 74-81.

12. Enders, M.S. (2014). Applied Geometallurgy: A Common Sense Approach. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88 (2), 1272.
13. Hallewell, M. (2009). Designing Plant Economies Around the Variability of Ore. *Mines and Money Conference*, London, 1-2 December 2009.
14. Lamberg, P. (2011). Geometallurgy – what, why and how? 8th Fennoscandian Exploration and Mining – FEM 2011, Levi, Finlandia, 1-3 November 2011.
15. Lund, C., Lamberg, P. (2014). Geometallurgy – A tool for better resource Efficiency. *European Geologist Journal* 37, 39-43.
16. Mwanga, A., Rosenkranz, J., Lamberg, P. (2015). Testing of Ore Comminution Behavior in the Geometallurgical Context--A Review. *Minerals journal* 5 (2), 276-297.
17. Ohmoto, H. (1986). Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Reviews in mineralogy and geochemistry* 16, 491-559.
18. Oyarzún, M.; Arévalo, A. (2011). Rock Texture and BWi Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. *The First Ausimm International Geometallurgy Conference*, Brisbane, Queensland, 5-7 September 2011.
19. Richard, J.P. (2003). Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology* 98, 1515-1533.
20. Sillitoe R.H. (2010). Porphyry Cooper Systems. *Economic Geology* 105, 3-41.
21. Universidad Arturo Prat Iquique (2010). Preparación mecánica de minerales. *Fundamentos de conminución* (cap 4).
22. Walker, S. (2014). Understanding Geological Influence. *Engineering & Mining Journal* 215 (9), 74-77.