



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales

No Renovables

Maestría en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

Caracterización técnica de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto mina Mirador Norte, provincia de Zamora Chinchipe, cantón El Pangui, parroquia de Tundayme.

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva.

AUTOR:

Ing. Carlos Israel Samaniego Ordoñez

DIRECTOR:

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 30 de junio de 2023

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Caracterización técnica de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto mina Mirador Norte, provincia de Zamora Chinchipe, cantón El Pangui, parroquia de Tundayme.,** previo a la obtención del título de **Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva.**, de la autoría del estudiante **Carlos Israel Samaniego Ordoñez**, con **cédula de ciudadanía Nro. 1104091572**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Carlos Israel Samaniego Ordoñez**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1104091572

Fecha: 30 de junio de 2023

Correo electrónico: sanisrael@hotmail.com

Teléfono: 0991262526

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total, y publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Carlos Israel Samaniego Ordoñez**, declaro ser el autor del Trabajo de Titulación denominado: **Caracterización técnica de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto mina Mirador Norte, provincia de Zamora Chinchipe, cantón El Pangui, parroquia de Tundayme.**, como requisito para optar el título de **Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los treinta días del mes de junio de dos mil veintitrés.

Firma:

Autor: Carlos Israel Samaniego Ordoñez

Cédula: 1104091572

Dirección: Antonio José de Sucre entre Azuay y Alonso de Mercadillo

Correo electrónico: sanisrael@hotmail.com

Teléfono: 0991262526

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo Mg. Sc.

Dedicatoria

Queridos Familiares, amigos y docentes.

Quiero dedicar mi maestría a todos ustedes, que han sido mi apoyo incondicional en este camino. Gracias por estar ahí en los momentos difíciles, por brindarme palabras de aliento y por creer en mí cuando a veces yo mismo dudaba.

Esta maestría no hubiera sido posible sin su amor y apoyo. Agradezco a mis padres por su constante sacrificio y por inculcarme valores que hoy me hacen ser una mejor persona. También agradezco a mi hermana y cuñado, que siempre han estado ahí para mí, a pesar de la distancia.

A mis docentes, Gracias por ser una red de apoyo y por acompañarme en este camino. A mis colegas de trabajo, por su amistad y colaboración en el ámbito profesional.

Finalmente, dedico mi maestría a mis tres hermosos hijos Matías, Sophia y Teo quienes son mi soporte emocional y fortaleza para continuar; a mi amada esposa por su cariño y apoyo ante las dificultades.

Esta maestría es el resultado de un esfuerzo en conjunto y espero seguir contando con su apoyo en el futuro. ¡Gracias por ser parte de mi vida!

Carlos Israel Samaniego

Agradecimiento

Agradezco los consejos y afecto que no solo fue el trabajo sino de amistad y solidaridad que se mantuvo firme conmigo en esta maestría incluyo en este equipo aquellos colegas, compañeros amigos y amigas que hicieron lo propio.

A toda la comunidad académica Universitaria, Autoridades, Catedráticos quienes con su trabajo y dedicación forjaron para que nuestra universidad Nacional de Loja, brille con luz propia.

A la empresa Ecuacorriente SA. quienes brindaron todo el apoyo logístico para que se pueda culminar con esta investigación.

Muy en especial al Sr. Ing. Stalin Iván Puglla Arevalo Mg. Sc: Director de Trabajo de Titulación en esta maestría, por su orientación y especial dedicación, en fin, a todas y todos quienes de una manera u otra manera aportaron con su cariño afecto y dedicación para que el presente trabajo de investigación culmine, con las expectativas planteadas.

Carlos Israel Samaniego

Índice de contenido

Portada...	i
Certificación	ii
Autoría...	iii
Carta de autorización.	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	ix
Índice de figuras:	x
Índice de anexos:	xi
1. Título	12
2. Resumen	13
2.1. Abstract	15
3. Introducción	16
Objetivos	18
4. Marco teórico	19
4.1. Estimación de reservas y recursos	19
4.2. Conminución de minerales	19
4.3. Trituración y molienda	20
4.4. Reducción de tamaño	21
4.5. Teorías de conminución	22
4.5.1. Ley de Rittinger	23
4.5.2. Ley de Kick	23
4.5.3. Ley de Bond	24
4.5.4. Ley de Charles-Holmes	25
4.6. Mecanismos de fractura	26
4.7. Métodos para pruebas de impacto	27
4.7.1. Bond Low Energy Impact Test – LEIT	27
4.8. Molienda SAG	29
5. Materiales y métodos	31
5.2.1. Referencia de coordenadas	32
5.2.2. Rutas de acceso	32
5.3.1. Metodología para el primer objetivo:	34
5.3.2. Metodología para el segundo objetivo:	39

5.3.3.	Metodología para el tercer objetivo:	39
6.	Resultados	42
6.1.1.	Geología del depósito.....	42
6.1.2.	Reservas	44
6.3.	Proceso de conminución	45
6.2.1.	Análisis mineralógico.....	49
6.4.1.	Composición química del mineral.....	49
6.4.2.	Peso específico aparente:	50
6.4.3.	Peso específico real:	50
6.4.4.	Resistencia:.....	50
6.3.1.	Trituración	51
6.3.2.	Molienda.....	54
6.4.1.	Prueba de trituración y molienda	56
6.5.1.	Según las condiciones de ocurrencia del yacimiento	63
6.5.2.	Según las condiciones hidrogeológicas.....	64
6.5.3.	Según condiciones ambientales.....	65
6.5.4.	Ubicación de la escombrera	65
6.5.5.	Ubicación de la relavera	66
7.	Discusión	68
8.	Conclusiones	71
9.	Recomendaciones	73
10.	Bibliografía	74
11.	Anexos	76

Índice de tablas:

Tabla 1. Materiales de campo y de oficina.....	31
Tabla 2. Rutas de acceso al área de estudio.	33
Tabla 3. Formaciones geológicas principales en la zona de emplazamiento del Proyecto Mirador.....	43
Tabla 4. Resumen de recursos utilizados en el área minera en este diseño	44
Tabla 5. Composición mineral y contenido relativo de la mina Mirador Norte.....	49
Tabla 6. Resultados del análisis de los elementos múltiples de la mena.....	49
Tabla 7. Resultados de todo el análisis químico de la mina Mirador Norte.....	49
Tabla 8. Resultados del peso específico aparente	50
Tabla 9. Resultados peso específico real	50
Tabla 10. Resultados porosidad.....	50
Tabla 11. Resultados de prueba de trituración y molienda	57
Tabla 12. Resultados de prueba de finura de molienda.....	57
Tabla 13. Prueba de finura de molienda.....	58
Tabla 14. Comparación integral de los procesos de trituración y molienda	60
Tabla 15. Equipos de trituración y molienda SABC	62
Tabla 16. Equipos de trituración para molienda convencional	62

Índice de figuras:

Figura 1. Operaciones unitarias de reducción de tamaño	22
Figura 2. Comparación grafica de las leyes de la fragmentación	26
Figura 3. Equipo de Impacto de Bond.	27
Figura 4. Diagrama de Proceso Planta Molienda SAG.....	29
Figura 5. Mapa de ubicación.....	32
Figura 6. Rutas de acceso al área de estudio	33
Figura 7. Peso de las muestras	35
Figura 8. Peso específico aparente	35
Figura 9. Peso de la muestra triturada.....	36
Figura 10. Peso del picnómetro con agua y muestra.....	37
Figura 11. Cubo de roca.....	38
Figura 12. Ensayo de resistencia.....	38
Figura 13. Tajo mina Mirador en producción	42
Figura 14. a) Trituradora giratoria, b) molino de bolas, c) molino SAG, d) celdas de flotación	45
Figura 15. Circuito de molienda.....	46
Figura 16. Muestra 1 granodiorita.....	47
Figura 17. Muestra 2 granodiorita.....	48
Figura 18. Muestra 3, brecha intrusiva.....	48
Figura 19. Resultados resistencia a la compresión simple.....	51
Figura 20. Análisis entre trituradoras giratorias y mandíbulas	52
Figura 21. Índice de trabajo de Bond	53
Figura 22. Secuencia del proceso de trituración	53
Figura 23. Circuito de molienda convencional	54
Figura 24. Molinos autógenos.....	55
Figura 25. Circuito de conminución.....	56
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de la prueba de finura de molienda	58
Figura 27. Mapa Geológico Topográfico del Yacimiento Mirador Norte	64
Figura 28. Escombrera Norte	66
Figura 29. Relaver Tudayme.....	67

Índice de anexos:

Anexo 1. Análisis químico de Mena Mirador Norte	76
Anexo 2. Análisis física mecánica de rocas	77
Anexo 3. Indicadores de concentrado de cobre.....	78
Anexo 4. Pruebas de Trituración y molienda	79
Anexo 5. Diagrama de flujo del proceso de beneficio	81
Anexo 6. Ubicación de equipos en la planta de beneficio.....	82
Anexo 7. Ubicación de equipos en la planta de beneficio.....	83
Anexo 8. Autorización de empresa ECSA	84
Anexo 9. Certificado de traducción del resumen	84

1. Título

Caracterización técnica de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto Mina Mirador Norte, provincia de Zamora Chinchipe, cantón El Pangui, parroquia de Tundayme.

2. Resumen

La ampliación de la planta Mirador Norte considera la producción de 60000 t/d (20 millones de t/a) de la planta Mirador I, aumentando 80000 t/d (26.2 millones de t/a). Después de la ampliación, la producción total de la mina de cobre Mirador será de 140000 t/d (46.2 millones de t/a). Tanto la fase I Mirador como la fase II Mirador Norte utilizarán la misma planta de beneficio y las mismas instalaciones para la gestión de relaves.

En la industria minera, la conminución es una unidad de operación importante en el procesamiento de minerales, cerámica, electrónica y otros campos, realizados con muchos tipos de molinos. La conminución es la etapa del proceso más intensiva en energía en la industria minera, esta representa hasta el 40 por ciento de la energía total utilizada en las operaciones de procesamiento de minerales.

Se ejecutó la investigación de campo a partir de la observación directa en la planta de beneficio Mirador en funcionamiento, inspección, medición de equipos, cálculos de flujo; evidenciando así, los antecedentes más relevantes de la conminución y trituración en estudio como son la alimentación, el consumo energético (kW.h/ton); trituración y molienda y manejo de relaves, entre otros; se estima que por lo menos el 50% de la energía consumida en un complejo metalúrgico es utilizada para la reducción de tamaño. El estado actual del uso de modelos en los procesos de trituración y molienda se evalúa en función de la resistencia a la moliendabilidad que presenta el mineral.

El alcance de funcionamiento del proyecto Mirador Norte incluye el incremento de capacidad de producción del tajo de la fase I Mirador, y la construcción de nueva infraestructura para Mirador Norte: explotación, beneficio y manejo ambiental, instalaciones auxiliares de producción, oficinas y campamentos. Después de la construcción de la fase II, la mina de cobre Mirador tiene capacidad de producción total de 46.2 millones de t/a.

Los resultados de la prueba de circuito cerrado del proceso del laboratorio de la mina "Mirador Norte": ley de concentrado de cobre 27.27%, ley de oro 2.06g/t, ley de plata 45.6 g/t; tasa de recuperación de concentrado de cobre de 90.69%, tasa de recuperación del oro 31.57% y tasa de recuperación de plata 35.65%. Los indicadores de beneficio del mineral primario de Mirador Norte son relativamente ideales, para continuar con el proceso de producción de cobre, oro y plata en la planta de beneficio ampliada y unificada.

Palabras claves: Proceso de conminución, trituración y molienda, consumo energético, complejo metalúrgico, mena, escombreras, relaveras.

2.1. Abstract

The expansion of the Mirador Norte plant considers the production of 60,000 t/d (20 million t/a) from the Mirador I plant, increasing it by 80,000 t/d (26.2 million t/a). After the expansion, the total production of the Mirador copper mine will be 140,000 t/d (46.2 million t/a). Both Mirador Phase I and Mirador Norte Phase II will use the same beneficiation plant and tailings management facilities.

In the mining industry, comminution is an important unit of operation in mineral processing, ceramics, electronics and other fields, performed with many types of mills.

Comminution is the most energy intensive process step in the mining industry, accounting for up to 40 percent of the total energy used in mineral processing operations.

Field research was carried out based on direct observation at the Mirador beneficiation plant in operation, inspection, equipment measurement, flow calculations; thus, evidencing the most relevant background of comminution and crushing under study such as feeding, energy consumption (kW.h/ton); crushing and grinding and tailings management, among others; it is estimated that at least 50% of the energy consumed in a metallurgical complex is used for size reduction. The current status of the use of models in the crushing and grinding processes is evaluated based on the resistance to grindability of the ore.

The scope of operation of the Mirador Norte project includes the increase in production capacity of the Mirador Phase I pit, and the construction of new infrastructure for Mirador Norte: mining, beneficiation and environmental management, auxiliary production facilities, offices and camps. After the construction of Phase II, the Mirador copper mine has a total production capacity of 46.2 million tons per year.

The closed-circuit test results of the Mirador Norte mine laboratory process: copper concentrate grade 27.27%, gold grade 2.06g/t, silver grade 45.6 g/t; copper concentrate recovery rate of 90.69%, gold recovery rate 31.57% and silver recovery rate 35.65%. The beneficiation indicators of the Mirador Norte primary ore are relatively ideal, to continue with the copper, gold and silver production process in the expanded and unified beneficiation plant.

Keywords: Comminution process, crushing and grinding, energy consumption, metallurgical complex, ore, slagheap, tailings.

3. Introducción

Bajo el principio de: "Planificación general, conexión mutua, optimización razonable, desarrollo sustentable y compensación de deficiencias", aprovechar completamente las experiencias de construcción y resultados de investigación de la fase I de la mina de cobre Mirador, para resolver los problemas encontrados en la construcción de la fase I y evitar los riesgos de forma eficaz. El proyecto de ampliación Mirador Norte debe tomar en cuenta el proyecto de fase I, considerar la conexión razonable con el proyecto existente, y el uso racional de las instalaciones y equipos existentes.

La empresa minera Ecuacorriente S.A. (ECSA), el 15 de agosto de 2019, difunde la Licitación del Diseño y del Estudio de Factibilidad del Proyecto Mirador de Fase II (Mirador Norte), en este año, empezó los estudios y diseño del proyecto Mirador de fase II; que es parte de los estudios en esta maestría.

Es de fundamental importancia para el país, la ampliación de fase II de Mirador considera la producción de 60000 t/d (20 millones de t/a) de la fase I, aumentando 80000 t/d (26.2 millones de t/a). Después de la ampliación, la producción total de la mina de cobre Mirador será de 140000 t/d (46.2 millones de t/a). Tanto la fase I Mirador como la fase II Mirador Norte utilizarán la misma planta de beneficio y las mismas instalaciones para la gestión de relaves.

Los resultados de las pruebas de circuito cerrado del proceso de optimización del laboratorio de la mina "Mirador" son: ley de mena 0.634%; ley de concentrado de cobre 26.69%, ley de oro 6.35 g/t, ley de plata 65.1g/t; tasa de recuperación de del concentrado de cobre 92.5%, tasa de recuperación del oro 50.06% y tasa de recuperación de plata 60.98%. La naturaleza del mineral es simple, tiene buena selectividad de mineral útil, y el valor de desarrollo y utilización.

El objeto de la conminución es la reducción de tamaño de un material de dimensiones de partícula promedio a un tamaño de partícula inclusive más pequeño, mediante de trituración, chancado, molienda y otros. Esto puede ser aplicado sin importar el mecanismo de fractura involucrado.

La conminución es la etapa del proceso más intensiva en energía en la industria minera, esta representa hasta el 40 por ciento de la energía total utilizada en las operaciones de procesamiento de minerales. Si bien los grados de voltaje disminuyen constantemente, se requieren tecnologías y soluciones más sostenibles para procesar cuerpos de minerales duros,

variables y de baja ley; ahora bien, la trituración de materiales sólidos excede siempre la energía que se utiliza para dividir el sólido en pedazos más pequeños.

El alcance de esta investigación es extraer metales cupríferos de sus menas, refinarlos y prepararlos; para su uso, se debe triturarlos y molerlos y beneficiarlos, el proceso consiste en modificar la naturaleza química de los minerales para separar el metal de sus compuestos sulfúricos, óxidos, silicatos o carbonatos. Estos métodos dependen mucho del tipo de mena y de su composición química que se presenta en el proyecto Mirador Norte.

La operación de molienda es una de las etapas más críticas del procesamiento de minerales, en esta se tiene como objetivo la reducción de tamaño de mineral hasta la liberación del mineral a coleccionar; por ello, al no tener la granulometría de liberación determinada en las pruebas metalúrgicas, los resultados finales del beneficio pueden fallar y no ser económicamente rentables; situación que debe ser investigada en este proyecto.

El diseño minero del depósito “Mirador” (fase I de Mirador) fue completado en el año 2014, este diseño es la base principal para el análisis de la mecánica de rocas del depósito “Mirador Norte”, debido a que la litología de los dos depósitos tiene cierta similitud.

El propósito de la investigación es diseñar y formular las características técnicas de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto mina Mirador Norte.

La literatura consultada ha sido fundamentada en la explotación y beneficio del yacimiento Mirador, especialmente en el diseño de la fase I del proyecto Mirador lo realizó la empresa: “China ENFI Engineering Co., Ltd”, y se completó el informe de estudio de factibilidad del proyecto en octubre de 2010.

El 15 de agosto de 2019, ECSA emitió la Licitación del Diseño y del Estudio de Factibilidad del Proyecto Mirador de Fase II (Mirador Norte), en el año, empezó los estudios y diseño del proyecto Mirador de fase II; que es parte de los estudios en esta maestría.

También se ha tomado como referencia los trabajos técnicos realizados en las plantas de beneficio de las diferentes minas que explotan minerales metálicos, especialmente cobre, oro y plata en los países sudamericanos como Perú y Chile fundamentalmente.

La fuente principal de información para este proyecto fue proporcionada por la empresa minera Ecuacorriente S.A. del año 2019 y 2021; ya que en calidad de funcionario público me

ha tocado interactuar con los técnicos de dicha empresa; para tomar decisiones que han permitido el desarrollo productivo de Mirador y posteriormente de Mirador Norte.

3.1. Objetivos

3.1.1. *Objetivo General*

Diseñar y formular las características técnicas de mineralización para el proceso de conminución en el aumento de la producción de la planta de beneficio del proyecto mina Mirador Norte.

3.1.2. *Objetivos Específicos*

- Evaluar diferentes métodos de reducción de tamaño de partícula de la materia prima considerando las propiedades físico químicas, mineralógicas y geo mecánicas de los minerales cupríferos.
- Comparar métodos de reducción de tamaño de partícula desde el punto de vista energético y determinar cuál resulta tener un menor consumo.
- Diseñar las condiciones de construcción y técnicas de infraestructura como ocurrencia del yacimiento, condiciones hidrogeológicas, ambientales, para el proceso de conminución.

4. Marco teórico

4.1. Estimación de reservas y recursos

Uno de los principales problemas con respecto a la valoración de recursos y reservas es que algunos evaluadores no comprenden suficientemente la variabilidad de los datos de entrada en los modelos financieros ni adoptan un enfoque holístico para la valoración. Los modelos de recursos de entrada, como geología, leyes, ingresos \$/ton y densidad tienen incertidumbres asociadas. (Y. Vilca. 2018).

Cada uno de estos modelos comprende una serie de variables, que son inciertas y pueden estar correlacionadas con una o más variables de otros modelos. Estas variables de recursos se utilizan para compilar planes de mina con los cuales se realizan análisis de sensibilidad que no capturan el rango de variación asociado con el efecto de composición de las incertidumbres de los recursos.

Los procesos de estimación que utilizan técnicas de kriging y / o simulación requieren datos de entrada precisos y una comprensión de las incertidumbres asociadas con el modelado de estos datos. En esta investigación no se profundiza en las técnicas de estimación, sino que se enfoca en algunas de las incertidumbres asociadas con los datos de entrada en los cálculos financieros, comenzando con el muestreo a modelos de recursos, geológicos, de densidad, grado, ingresos, geotécnicos, geohidrológicos y geometalúrgicos. Impactos de estas incertidumbres combinadas en los planes y reservas de la mina. (Y. Vilca. 2018).

4.2. Conminución de minerales

El circuito de trituración es un área de la planta que a menudo se pasa por alto o no se comprende muy bien. Si se cumplen los objetivos de producción, todo se considera correcto. Sin embargo, los circuitos de trituración consumen una cantidad significativa de energía que equivale aproximadamente al 50% del costo operativo de muchas plantas concentradoras.

Estos costes suelen estar relacionados con el consumo de energía y medios de trituración. Si no se cumplen los objetivos de producción, existe un impacto significativo en el costo operativo por tonelada de la concentradora.

El funcionamiento óptimo del circuito de trituración puede parecer una tarea difícil si no tiene los conocimientos adecuados para seguir adelante con la operación. Este trabajo se

centra en el conocimiento práctico y la comprensión del proceso necesario para maximizar la producción y alcanzar una eficiencia óptima.

4.3. Trituración y molienda

a. Trituración: Es una reducción de tamaño en el rango más grueso, es decir, materiales más gruesos de malla 10. La trituración se lleva a cabo en equipos pesados, de movimiento lento, en los cuales las superficies trituradoras están prevenidas mecánicamente antes de entrar en contacto entre ellas. Dado que las maquina llamadas chancadoras, tratan fragmentos de gran tamaño, entonces la magnitud de la fuerza es usualmente muy grande. (V. Aramburú, 2003).

b. Molienda: Es una operación de reducción de tamaño en el rango fino, es decir, material más fino que la malla 10. En la molienda el único objetivo es que previene el contacto entre los medios de molienda. En vista que en la molienda tratan fragmentos de tamaños pequeños la magnitud de las fuerzas aplicadas es mucho menor que las fuerzas aplicadas en el chancado. (V. Aramburú, 2003).

Para lo cual los parámetros a ser controlados en la etapa de molienda son los siguientes:

- Dureza mineral.
- Nivel de stock pile.
- Rendimiento instantáneo.
- Nivel de ruido.
- Energía
- Granulometría de alimentación SAG.
- Reología al interior del molino SAG.
- Velocidad de rotación
- Estado de revestimientos.
- Presión de descansos.
- Nivel de llenado de bolas/carga.

- Factores de restricciones de equipos periféricos que afectan al rendimiento del molino SAG; como son la disponibilidad de bombas de impulsión, circuito de evacuación de pebbles, disponibilidad de celdas de flotación, entre otras.

4.4. Reducción de tamaño

Se denomina reducción de tamaño a una serie de operaciones unitarias y procesos mediante los cuales una cantidad de mineral se reduce de tamaño hasta lograr un tamaño específico, se logra a través de la aplicación de energía necesaria para romper las partículas.

Dependiendo de la forma de aplicación de la carga y de la mecánica de la fractura de las partículas, se obtendrá un mecanismo de falla característico y una distribución granulométrica propia.

Es primordial tener conocimiento de la forma y el grado de diseminación del mineral explotado, ya que indica el tamaño a ser molino el mineral para que las especies mineralógicas de interés sean liberadas de la ganga que la acompañan, donde el grado de liberación de las especies útiles es el requisito fundamental para aplicar el método físico de concentración. Los objetivos de la reducción de tamaño son:

- Generar partículas de tamaño y forma adecuada para los procesos posteriores, ya sea transporte, apilamiento o separación física o química.
- Liberar los materiales valiosos de la ganga de modo que ellos puedan ser concentrados.
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química o física.

En general, la reducción de tamaño se rige por el diagrama secuencial apreciado en la figura 1 (Delgado, C. 2013).

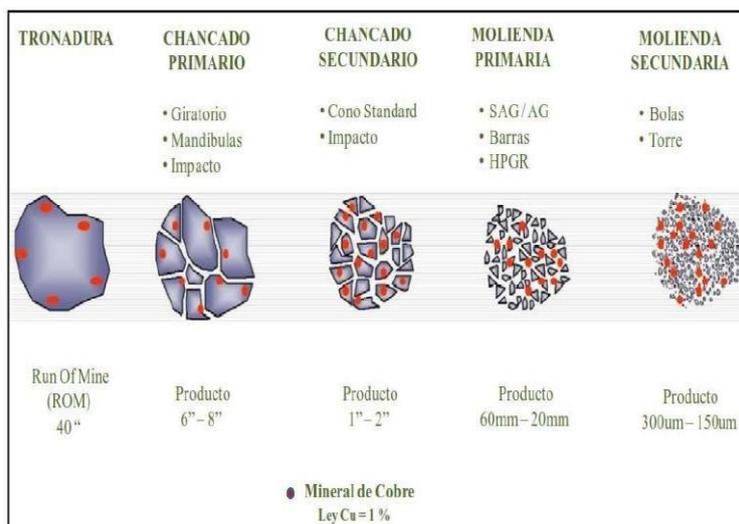


Figura 1. Operaciones unitarias de reducción de tamaño

El proceso normalmente implica reducir rocas de hasta 1 [m] hasta partículas de 25[μ m] o menores, sin embargo, la mayor parte de la energía (aproximadamente el 90%) se utiliza cuando se reduce de 20 [mm] a 100[μ m]. Es decir, si nos remitimos a esa granulometría, mostrada en la Tabla 1, podemos observar que este rango de partícula de alto consumo energético está asociado a la etapa de molienda (Delgado, C. 2013).

Tabla 1. Tamaño característico de partículas en alimentación y producto de acuerdo con etapas de reducción de tamaño

Etapa de reducción de tamaño	Tamaño de alimentación	Tamaño de producto
Voladura	Infinito	1 (m)
Trituración primaria	1 (m)	100 (mm)
Trituración secundaria	100 (mm)	10 (mm)
Molienda primaria	10 (mm)	1 (mm)
Molienda secundaria	1 (mm)	100 (μ m)

Fuente: Delgado, C. 2013

4.5. Teorías de conminución

La teoría de la conminución se ocupa de la relación entre la energía consumida y el grado de reducción de tamaño obtenido.

Se han propuesto varias teorías, pero ninguna de ellas es enteramente satisfactoria. Todas las teorías de conminución suponen que el material es frágil de modo que no se absorbe energía en procesos como elongación y deformación. (D. Zumaran, 2017).

4.5.1. Ley de Rittinger

Rittinger postulo en 1867, que la energía consumida en la reducción del tamaño es proporcional a la nueva superficie producida, el área superficial de un peso conocido de partículas de diámetro uniforme es inversamente proporcional al diámetro. (D. Zumaran, 2017).

Este postulado considera solamente la energía necesaria para producir la ruptura de cuerpos sólidos ideales (homogéneos, isotrópicos y sin fallas), una vez que el material ha alcanzado su deformación crítica o límite de ruptura.

$$ER=KR[(1/P80) - (1/F80)]$$

Donde:

ER = Energía específica de conminución (kWh/ton)

KR = Constante de Rittinger

$P80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto

$F80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación

Aun cuando el postulado de Rittinger carece de suficiente respaldo experimental, se ha demostrado en la práctica que dicha teoría funciona mejor para la fracturación de partículas gruesas; es decir, en la etapa de chancado del material.

4.5.2. Ley de Kick

Kick postulo en 1885, que la energía requerida para reducir el tamaño de un material es directamente proporcional a la relación de reducción de tamaño.

Esto significa que iguales cantidades de energía producirán iguales cambios geométricos en el tamaño de un sólido. Kick consideró que la energía utilizada en la fractura de un cuerpo sólido ideal (homogéneo, isotrópico y sin fallas), era sólo aquella necesaria para deformar el sólido hasta su límite de ruptura; despreciando la energía adicional para producir la ruptura del mismo.

$$EK=KK\log(F80/P80)$$

Donde:

EK = Energía específica de conminución (kWh/ton)

KK = Constante de Kick

$P80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto

$F80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación

Aun cuando el postulado de Kick carece de suficiente respaldo experimental; se ha demostrado en la práctica, que su aplicación funciona mejor para el caso de la molienda de partículas finas.

4.5.3. Ley de Bond

Bond concluyo en 1952, que la energía consumida para reducir el tamaño 80% de un material, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño 80%; siendo éste último igual a la abertura del tamiz en micrones que deja pasar el 80% en peso de las partículas.

$$EB=KB[(1/P80) - (1/F80)]$$

F. Bond definió el parámetro KB en función del Work Índice, WI (índice de trabajo del material), que corresponde al trabajo total (expresado en kWh/ton. corta), necesario para reducir una tonelada corta de material desde un tamaño teóricamente infinito hasta partículas que en un 80% sean inferiores a 100 micras (aproximadamente 67% - 200 mallas), entonces:

$$Wi = KB[(1/100)^{1/2} - (1/\alpha)^{1/2}] = KB/10$$

De donde:

$$KB=10*Wi$$

Finalmente remplazando

$$EB=W=10Wi[(1/\sqrt{P80}) - (1/\sqrt{F80})]$$

Donde:

$EB = W$ = Energía específica de conminución (kWh/ton)

Wi = Índice de trabajo del material (Kwh/ton corta)

$P80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto, μm

$F80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación, μm

El parámetro W_i (Índice de Trabajo de Bond) depende tanto del material (resistencia a la conminución) como del equipo de conminución utilizado (incluyendo la malla de corte empleada en el clasificador, para circuitos cerrados de conminución – clasificación), debiendo ser determinado experimentalmente (a escala estándar de laboratorio) para cada aplicación requerida.

Durante el desarrollo de su tercera teoría de la conminución, Fred Bond considero que no existían rocas ideales ni iguales en forma, y que la energía consumida era proporcional a la longitud de las nuevas grietas creadas. La correlación empírica efectuada por F.Bond, de varias miles de pruebas estándar de laboratorio con datos operacionales de Planta, le permitió ganar ventaja con respecto a la controversia Kick-Rittinger, haciendo que su teoría funcionara tanto para chancado como para la molienda, con un error promedio del $\pm 20\%$ para la mayoría de los casos estudiados. (D. Zumaran, 2017).

4.5.4. Ley de Charles-Holmes

En 1957, de manera independiente, el americano Charles y el británico Holmes propusieron una generalización de las leyes anteriores, resumiéndolas en una sola, que según Hukki (1975) podría expresarse así:

$$dW = -C * dx/x^n$$

En la que “C” es una constante, y “n” toma los valores de 1 para la Ley de Kick, 2 para la Ley de Rittinger y 1.5 para la Ley de Bond.

Según el propio Hukki, la Ley de Kick resulta adecuada para partículas de tamaño superiores a 1 cm, lo que corresponde con el ámbito de la trituración. La Ley de Bond sería aplicable con mayor precisión en el rango correspondiente a la molienda convencional en molinos de barras y de bolas; finalmente la Ley de Rittinger se aplicaría en el rango de la molienda fina. Lógicamente, hay un solapamiento de rangos entre cada dos leyes, de forma que, a determinados tamaños, en teoría, podría aplicarse cualquiera de ambas con igual validez. (D. Zumaran, 2017).

En la Fig. N° 2. se realiza una representación comparativa de la ley diferencial general y las tres leyes clásicas.

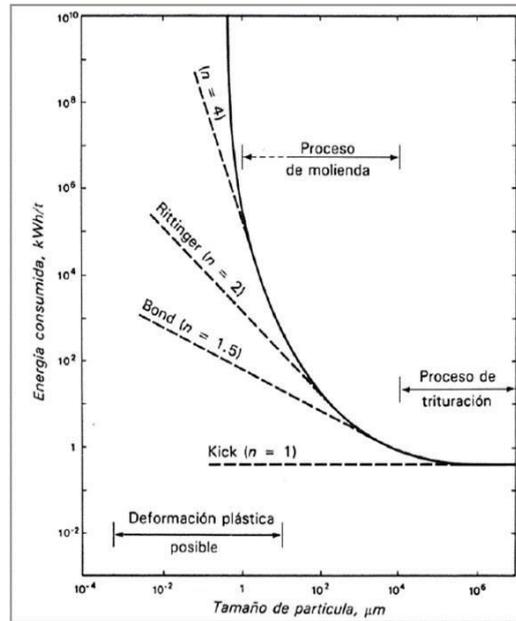


Figura 2. Comparación gráfica de las leyes de la fragmentación

4.6. Mecanismos de fractura

En la región inferior se produce la ruptura por impacto, depende de la frecuencia que carga de la vuelta y de la energía que se genere con el impacto. La otra región corresponde a la que se mueve por la rotación del molino. La carga no se comporta como un sólido, son capas que se deslizan una sobre otra, dando lugar a un gradiente de velocidad en la carga.

La metodología de la prueba de impacto se verá en la sección siguiente, para comprender la forma en la que se lleva a cabo la estimación de los parámetros que intervienen. Así el objetivo de la prueba se simplifica a estimar los parámetros “A” y “B” para la prueba de impacto. Una vez estimados estos parámetros es posible encontrar la curva de Ecs (energía específica de conminución) versus el porcentaje del pasante de 1/10 del tamaño de la partícula original (t10). (K. Pinto & J. Escudero, 2019).

Nosotros nos enfocaremos en la prueba de impacto pues en el molino SAG el mecanismo de fractura que predomina es el de impacto por diversos factores mineralógicos y operacionales.

- A es el valor máximo de t10 alcanzado. Esto es significativo para roturas de energía más altas. El valor absoluto de A por sí solo no es tan crítico en un molino SAG porque es una medida de la rotura del mineral a niveles de energía más altos que los que generalmente se logran, pero A es importante en el papel que juega en la caracterización del mineral. curva de rotura general.

- El parámetro B es la pendiente general de la curva t_{10} versus Ecs en las energías más bajas.

4.7. Métodos para pruebas de impacto

4.7.1. Bond Low Energy Impact Test – LEIT

También conocido como Test de baja energía de impacto de Bond o Test de Impacto de Bond, es un equipo que consiste en dos martillos tipo péndulos montados en dos ruedas de bicicleta, con el fin de lograr igualdad de golpes simultáneamente o en lados opuestos de cada muestra mineral.

Inicialmente impacta a las rocas con un nivel bajo de energía, y se incrementa progresivamente elevando el nivel del péndulo, que cada uno pesa 13,6 [kg], hasta lograr la energía suficiente para romper la roca. La energía medida en el momento de la ruptura, en conjunto con el espesor y la gravedad específica de la roca permite determinar el Índice de Chancabilidad o Índice de Trabajo de Impacto (Crusher Work Index – CWI [kWh/t]). (B. Olmos, 2018).

El test generalmente se realiza con 20 rocas en la fracción de tamaño [- 76,2; +50,8] [mm], para lo cual se requiere de 10 [kg] de muestra. Uno de los tópicos importantes de la prueba es su capacidad para medir la dispersión natural de la muestra. Otra ventaja es que el test se realiza con fracciones gruesas de tamaño, lo que lo hace único en la serie de Bond. El test requiere de rocas de tamaño $>76,2$ [mm] o una perforación. (B. Olmos, 2018).



Figura 3. Equipo de Impacto de Bond.

La energía para lograr la rotura de la partícula viene dada por:

$$Eb=K(1-\cos\alpha)$$

$$CWI=53.49 (E/t)/SG$$

Donde:

Eb = Energía de Chancabilidad de Bond para rocas individuales, [J], promedio de 10 fracturas.

K = Constante del equipo.

α = El ángulo de caída del péndulo, [grado].

SG = Gravedad específica de la roca individual.

t = Espesor de la roca, [mm].

El CWI, se emplea en la Tercera Ley de la Conminución, para estimar los requerimientos energéticos necesarios para dimensionar diversos equipos de chancado alcanzando un tamaño P80 determinado. También puede ser empleado para determinar los ajustes de dimensión de lado abierto (para chancadores de mandíbula y giratorios) o los ajustes de abertura de lado cerrado (chancadores de cono) para un tamaño de producto dado. La Tabla 2. indica los rangos de dureza según el Índice de chancabilidad. (B. Olmos, 2018).

Tabla 2. Rango de Dureza según Valor del Índice de Chancado

Propiedades	CWi,(kWh/t)
Suave	Menor 8
Moderadamente duro	8 – 13,5
Duro	13,5 .20
Muy duro	Mayor 20

Fuente: B. Olmos. (2018)

El test principalmente se usa para el diseño de Chancadores, pero también se puede usar, junto con los otros test de Bond (BWI y CWI), para diseñar molino SAG.

4.8. Molienda SAG

En este trabajo se ha considerado el esquema de molienda SAG utilizado en la línea “SAG1” del Concentrador Colón de la División El Teniente de CODELCO. Este esquema contempla una etapa de Molienda SAG primaria y una Molienda Secundaria Convencional que se encuentra en circuito cerrado directo, además este esquema posee una etapa de clasificación intermedia luego del harnero vibratorio con una variante opcional de recirculación de pulpa al molino SAG, esta se representa con la línea segmentada en la figura 4. (C. Garrido, 2004)

El mineral proveniente de chancado es llevado mediante una correa transportadora al stock pile desde el cual se alimenta el molino SAG mediante alimentadores y una correa transportadora, este mineral es conocido como Alimentación Fresca del Molino. En la entrada del molino SAG se agrega agua para maximizar la velocidad de fractura del mineral, manteniendo una densidad de la pulpa (% de sólidos) de alimentación en un rango determinado dependiendo de las características del mineral y del conocimiento del operador. (C. Garrido, 2004).

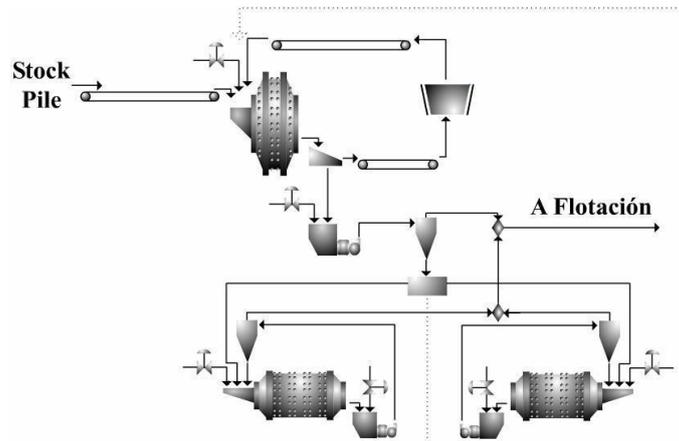


Figura 4. Diagrama de Proceso Planta Molienda SAG

La pulpa producto del molino SAG es clasificada en un harnero vibratorio el cual separa las partículas de tamaño fino de los Pebbles. En la práctica, es necesario disminuir el tamaño de estas colpas en una segunda etapa de chancado para su posterior recirculación al molino SAG y evitar el sobrellenado.

El producto de bajo tamaño del harnero es enviado a un pozo donde nuevamente se agrega agua a la pulpa. Mediante la acción de una bomba se conduce la pulpa hacia una batería de hidrociclones la cual clasifica el mineral para ser enviado a la etapa de flotación (rebalse) o

a un cajón repartidor (descarga). Desde el Cajón Repartidor se distribuye la pulpa hacia los Molinos de Bolas los cuales operan en “Circuito Cerrado Directo”, esto significa que la pulpa producto del molino de bolas es clasificada por una batería de hidrociclones para ser enviada a flotación (rebalse) o recirculada a la entrada del molino (descarga). (C. Garrido, 2004).

5. Materiales y métodos

5.1. Materiales

Los materiales utilizados para la presente investigación se agrupan en dos categorías materiales de campo y materiales de oficina, la Tabla 1 muestran los mismos:

Tabla 1. Materiales de campo y de oficina

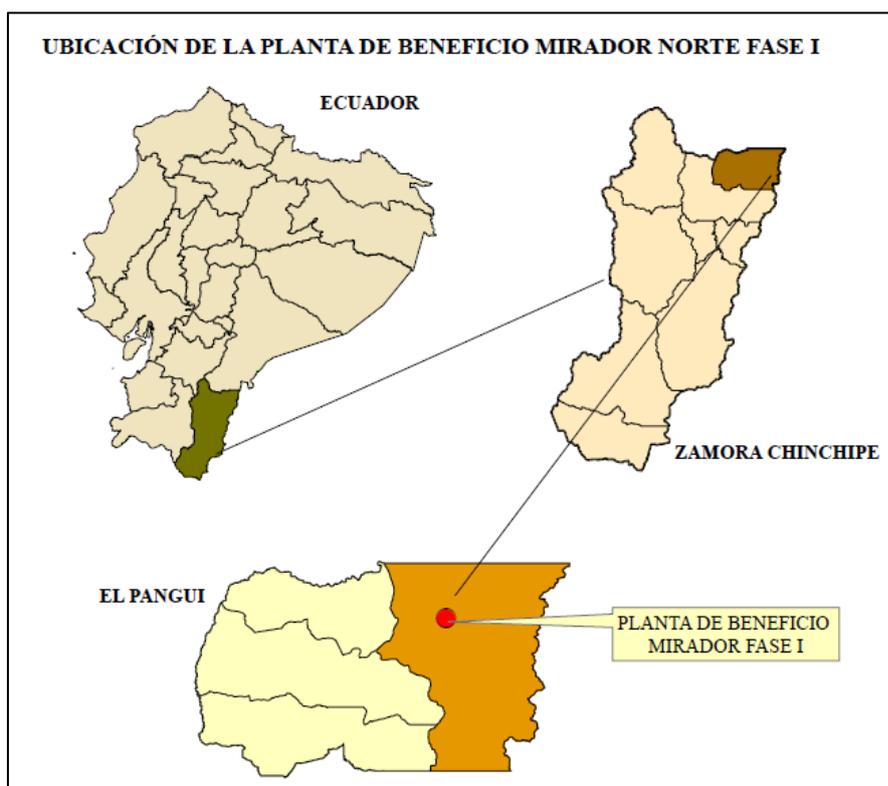
Materiales de campo	Materiales de oficina
Libreta de campo	Software Arcgis 10.5
Dron	Software Autocad 2018
GPS	Documentos Bibliográficos
Martillo geológico	Software Modsim
Cinta métrica	
Brújula Brunton	
Equipo de protección personal	
Cámara fotográfica	
Fundas plásticas	
Pala	
Hojas geológicas	

Fuente: Elaborado por El Autor

5.2. Área de estudio

El proyecto Mirador Norte, se encuentra a escasos 2 km. del proyecto Mirador; se ubica en la provincia de Zamora Chinchipe, cantón El Pangui, parroquia Tundayme, aproximadamente a 545 km al sur de Quito y a 167 km de Cuenca. Ubicado al sureste de Ecuador, el proyecto constituye un gran depósito de cobre que forma parte del cinturón de cobre localizado en la cordillera Oriental de Los Andes.

Figura 5. Mapa de ubicación



Fuente: Elaborado por el Autor, (2023)

5.2.1. Referencia de coordenadas

Las coordenadas UTM del centro del área minera Mirador (tajo) son N9604200 y E785000 (referencia sudamericana UTM Zona 17S, 1956); y las coordenadas UTM del centro del área minera Mirador Norte (tajo norte) son N9604000 y E780500 (referencia sudamericana UTM Zona 17B, 1956). La concesión minera que abarca estos dos proyectos se denomina “Mirador 1 Acumulada”, código 500807.

5.2.2. Rutas de acceso

Para acceder al área de estudio existen tres rutas desde la ciudad de Quito, de Guayaquil y de Loja, de forma general se toma la ruta uta Panamericana/Troncal amazónica/E45 hacia Paso Lateral y se dirige al cantón Yantzaza en la provincia Zamora Chinchipe.

La Tabla 2 señala las rutas de acceso antes mencionadas:

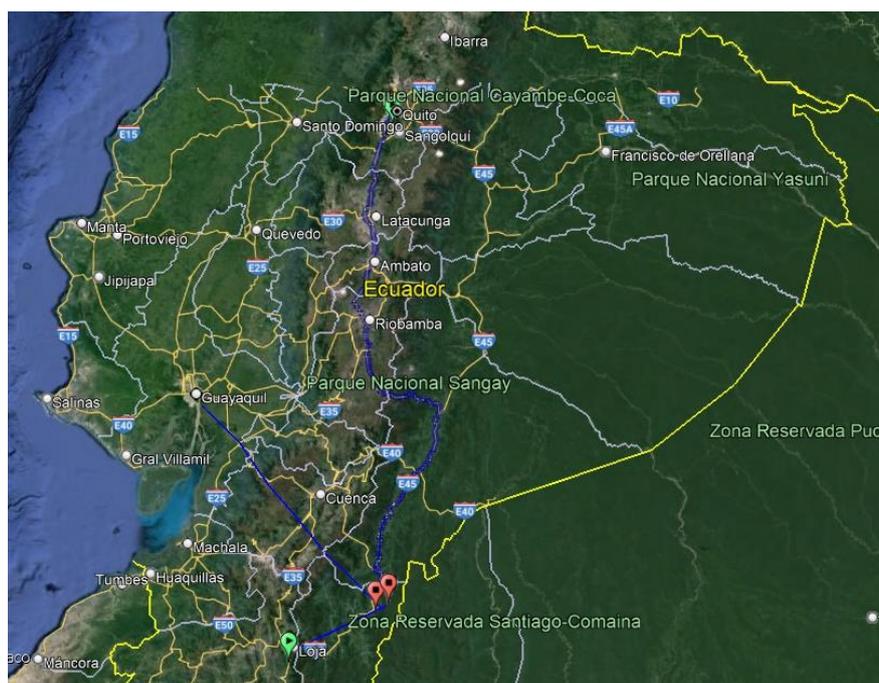
Tabla 2. Rutas de acceso al área de estudio.

Ruta	Tiempo	Distancia
Quito-Gualaquiza Ruta Panamericana/Troncal Amazónica/E45	10 h 47 min	606 km
Guayaquil-Gualaquiza Troncal de la Costa/E25, E582, Carr. Panamericana/Troncal de la Sierra/E35 y /Ruta Panamericana/Troncal Amazónica	7 h 27 min	308 km
Loja-Zamora Troncal Amazónica/E45	2h 44 min	142 km

Fuente: Elaborado por el Autor, (2023)

La Figura 6, señala las rutas de acceso al área de estudio.

Figura 6. Rutas de acceso al área de estudio



Fuente: Recuperado de Google Earth, (2023)

5.3. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se empleó el método científico-experimental que se basa en la observación, experimentación y formulación de ensayos y pruebas para adquirir cálculos y nuevos conocimientos, integrar o corregir los conocimientos

previos; para determinar las características técnicas mineras de mineralización que se utilizaran en el proceso de conminución provenientes del tajo del proyecto minero Mirador Norte.

- **Fase de campo:** Esta fase comprende la descripción general de la zona de estudio del proceso de trituración y molienda, así como la descripción de los equipos y maquinaria que contiene la planta, además, abarcó la toma de muestras en la pila de stock.
- **Fase de laboratorio:** En este punto se determinaron las propiedades físico-mecánicas de las rocas, adicional se determinaron los análisis de laboratorio para control de leyes, ensayos de tiempo de trituración y molienda mismos que fueron proporcionados por la empresa y constan en los estudios de factibilidad.
- **Fase de oficina:** En esta fase se registró, organizó y analizó todos los datos obtenidos donde se realizó el informe final basado en metodologías de cálculo aplicable para una planta de concentración de minerales para minería a gran escala. Se recopiló información acerca de varias plantas con acceso de la información, con respecto a establecer una comparativa específicamente de trituración y molienda.

5.3.1. Metodología para el primer objetivo:

“Evaluar diferentes métodos de reducción de tamaño de partícula de la materia prima considerando las propiedades físico químicas, mineralógicas y geomecánicas de los minerales cupríferos”

En primera instancia se realizó una inspección general del área de estudio con el fin de caracterizar las actividades que se vienen desarrollando en la fase de conminución (trituración y molienda).

5.3.1.1. Determinación de las propiedades físico mecánicas: fueron determinadas en el laboratorio de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la UNL, los procedimientos se basaron en las normas ASTM D420, tomando como guía el manual de prácticas de laboratorio de Vásquez (2019, p. 29,42).

A continuación, se detallan los análisis y pruebas realizadas.

- **Análisis petrológico:**

Se realizó el análisis de las muestras con la finalidad de identificar el tipo de roca para ello se utilizó el microscopio para observar los minerales que la componen.

- **Propiedades físicas:**

Peso específico aparente: El proceso ejecutado se describe a continuación

1. Se tomó un fragmento de muestra y se pesó utilizando la balanza analítica, como se observa en la siguiente figura.



Figura 7. Peso de las muestras

Fuente: Elaborado por el Autor

2. Para obtener el peso saturado, se sumergió la muestra en agua por 24 horas en un vaso de precipitación, como se observa en la siguiente Figura.



Figura 8. Peso específico aparente

Fuente: Elaborado por el Autor

3. Se retiró la muestra del agua y se secó su superficie con un paño húmedo, teniendo cuidado de sólo retirar el agua de la superficie y asegurándose de que no se pierdan fragmentos de la muestra; en este punto se utilizó la balanza para registrar la masa saturada.
4. El peso sumergido se obtuvo al sumergir la muestra dentro de un vaso precipitado con agua, suspendiéndola de una cuerda.
5. Se secó la muestra a una temperatura de 105°C y se dejó enfriar, de esta manera se obtuvo el peso seco.

Una vez obtenidos todos los parámetros, se calculó el peso aparente por medio se la siguiente expresión.

$$\rho_a = \frac{W_{seco}}{W_{saturado} - W_{sumergido}} \times \rho_w$$

Donde:

W_{seco} : Peso seco de la muestra luego de haber pasado por el horno

$W_{saturado}$: Peso saturado

$W_{sumergido}$: Peso sumergido

ρ_w : Peso específico del agua; se consideró la temperatura ambiente de 18° C equivalente a 0.9986 gr/cm³

Peso específico real: El proceso realizado se describe a continuación

1. Para la medición del peso en esta sección se trituró la muestra a un grado de finura elevado de 75 μm utilizando el tamiz #200. Una vez reducida la muestra de tamaño, se utilizó el horno para secarla hasta alcanzar una masa constante.
2. Se obtuvo los pesos del picnómetro y del picnómetro lleno con agua como se observa en la siguiente figura.
3. Para el ensayo se utilizó una fracción de 50gr de la muestra triturada seca, medida haciendo uso de la balanza, como se observa en la siguiente figura



Figura 9. Peso de la muestra triturada
Fuente: Elaborado por el Autor

4. Se mezcló con agua dentro de un picnómetro, se agitó ligeramente el picnómetro para evitar que parte de la muestra quede pegada en las paredes.
5. Se utilizó la bomba al vacío para eliminar burbujas de aire que puedan afectar los pesos de las muestras.
6. Con el líquido en reposo, se midió el volumen nuevamente.

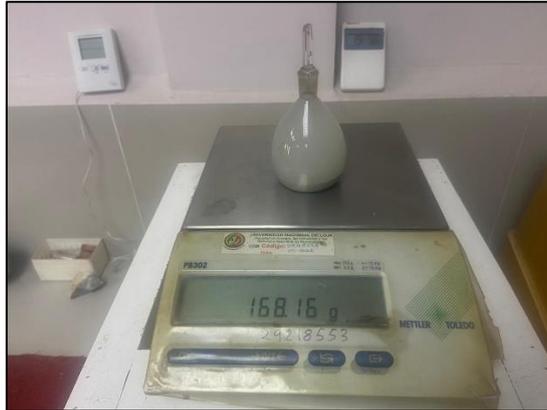


Figura 10. Peso del picnómetro con agua y muestra

Fuente: Elaborado por el Autor

Se aplicó la siguiente expresión para obtener el peso específico real.

$$\rho_r = \frac{W_{pulverizada}}{W_2 + W_{pulverizada} - W_1} \times \rho_w$$

Donde:

W_2 = Peso del picnómetro + agua [gr/cm³]

W_1 = Peso del picnómetro + agua + muestra pulverizada [gr/cm³]

Porosidad: Se utilizó los pesos aparentes y reales obtenidos anteriormente y se aplicó la siguiente expresión.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100$$

Donde:

ρ_a : Es el peso aparente [gr/cm³]

ρ_r : Es el peso real [gr/cm³]

- **Propiedades mecánicas:**

Resistencias a la compresión simple: Las probetas fueron cubos de 50 mm de lado así como se observa en la siguiente figura.



Figura 11. Cubo de roca
Fuente: Elaborado por el Autor

a. Se colocó el testigo en la prensa hidráulica, considerando la anisotropía de la muestra. La carga se aplica continuamente de forma tal que la rotura se produzca entre los 0 y los 10 min; la velocidad de carga debe estar comprendida dentro de los límites de 0,5 y 1,0 MPa/s (Ver Figura 12)



Figura 12. Ensayo de resistencia
Fuente: Elaborado por el Autor

b. Se comprobó utilizando la siguiente expresión.

$$\sigma_c = \frac{F_t}{A} = \frac{\text{Fuerza de tracción aplicada}}{\text{Área-sección de la probeta}} \text{ [MPa]}$$

5.3.1.2. Evaluación de técnicas de reducción de tamaño: se recopiló información bibliográfica acerca de los métodos de reducción de tamaño y se evaluó tomando en consideración la mineralogía y las propiedades índices de las rocas.

• **Trituración (primaria, secundaria y cónica):** Es importante mencionar que hasta la fecha no se podido desarrollar un equipo capaz de realizar todo el proceso de trituración de una sola vez, para todos los tipos de materiales. Por esto, en la mayoría de las aplicaciones son necesarias varias etapas de fragmentación y más de un equipo es por ello que se considera una trituración primaria, secundaria y terciaria. Asimismo, se plantea los equipos a utilizar entre ellos trituradoras de mandíbulas y cónicas.

• **Molienda:** La otra etapa del proceso de conminución después de la trituración, aquí se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm).

Existen varios circuitos de molienda para este trabajo se van analizar tres que son

- **Molienda convencional:** La principal ventaja de este circuito reside en el menor consumo de energía respecto a los procedimientos no convencionales (molienda autógena, molienda semiautógena).
- **Molienda SAG:** La molienda autógena se produce cuando no se utiliza ningún medio de molienda externo y es el propio mineral el que actúa como tal. El molino semiautógeno es una variante del mismo molino autógeno, pero que utiliza una carga mínima de bolas en un porcentaje entre el 6 y 15%.
- **Molienda SABC:** Se realiza mediante la inclusión de dos equipos adicionales al SAG, que corresponden al chancador de pebbles y al harnero que separa el mineral que ya tiene la granulometría requerida para pasar a la etapa de molienda secundaria en el molino de bolas del que debe tener una etapa extra de conminución en el chancador.

Es importante mencionar que en la molienda mientras más fina la malla es mayor la recuperación, es por que ello que la empresa Ecuacorriente S.A, realizó una prueba de finura a fin de determinar cual es la que mayor grado de liberación tiene.

5.3.2. Metodología para el segundo objetivo:

“Comparar métodos de reducción de tamaño de partícula desde el punto de vista energético y determinar cuál resulta tener un menor consumo”

Las operaciones unitarias de conminución reducen el tamaño de partículas son procesos industriales de gran importancia, ya que en las mismas se concentra el mayor consumo energético (kW-h/ton) llegando hasta el 50% de todo el proceso y de igual manera el consumo de acero (kg de acero/ton).

En este estudio se presentan diferentes muestras de mineral proveniente de Mirador Norte que serán evaluadas en un equipo estimador de competencia para molienda SAG a través de los parámetros de fractura: Índice de competencia, índice de finura “t10” que es el % pasante de 1/10 de la partícula inicial, utilizados en los modelos que describen procesos de trituración y molienda AG/SAG y que finalmente estos pueden optimizarse con el uso de estos parámetros de fractura y conminución a utilizarse.

Los métodos anteriormente planteados fueron evaluados a fin de determinar cual es el que menor consumo energético presente de esta manera para los procesos de conminución se determinó:

5.3.2.1. Trituración: En esta fase se determinó:

- Grado de reducción de tamaño y acondicionamiento al ingreso de la planta
- Volumen de la cámara de trituración
- Potencia
- Consumo energético según Bond, considerando el work index y material de ingreso-salida. (μm)

5.3.2.2. Molienda: En esta fase se determinó:

- Grados de reducción total y por etapas.
- Volumen geométrico y volumen real basado en grado de llenado J.
- El grado de llenado (porcentaje).
- Cálculo de energía por el método de Bond

5.3.3. Metodología para el tercer objetivo:

“Diseñar las condiciones de construcción y técnicas de infraestructura como ocurrencia del yacimiento, condiciones hidrogeológicas, ambientales, para el proceso de conminución”

Para la ampliación de la Mina Mirador se lo realizó en función a la capacidad de la planta que es 46.2 millones de t/a, en este punto se abordó todas las condiciones necesarias para

estructurar la planta de tratamiento en la fase de construcción, tomando en consideración la ocurrencia del yacimiento, la hidrogeología y el factor ambientes, asimismo, se analizó los equipos y distribución espacial de los mismos.

El diseño de una planta de tratamiento requiere de un conocimiento previo del funcionamiento de los equipos y unidades situadas de forma armónica en las diferentes fases del circuito que recorre el mineral, para ello se lo realizó en base a una planificación integral, considerando la relación con las instalaciones de la primera fase, tomando completamente la experiencia de construcción y producción de la primera fase y aprovecha al máximo las instalaciones auxiliares de la primera.

Los parámetros más importantes que definen el dimensionamiento de un equipo dentro de un diagrama de proceso están afectados por su utilización, flujos instantáneos, cargas circulares, parámetros del mineral como dureza, granulometría, tasas de espesamiento y filtrado. En este contexto se elaboró un flujograma y una planimetría de la distribución y secuencia del proceso de beneficio mismo a fin de establecer las bases para la construcción este proceso pretende servir de guía para continuar con el proceso de ampliación.

6. Resultados

6.1. Descripción del área de estudio

La Mina de Cobre Mirador está ubicada en la parroquia de Tundayme, cantón de El Pangui, provincia de Zamora-Chinchipe, en la parte sureste de la República del Ecuador. Los recursos estimados de la mina de cobre Mirador son de 860 millones de toneladas, la ley geológica de Cu es de 0.525% y el contenido de metal de Cu es de 4.516 millones de toneladas. La cantidad total de mineral y roca dentro del límite diseñado es de 1,4 mil millones de toneladas, de las cuales: 585 millones de toneladas de mineral (ley de corte $Cu \geq 0,3\%$) y 817 millones de toneladas de roca estéril (Ecsa, 2023).

En la Figura 13. se observa el tajo Mirador actualmente en plena producción y los diferentes tipos de mineral que se aprovechan para el beneficio de minerales.



Figura 13. Tajo mina Mirador en producción
Fuente: Elaborado por el Autor

6.1.1. Geología del depósito

Dentro de la concesión minera “Mirador Unificada”, se exploraron detalladamente y se descubrieron dos depósitos cupríferos; Mirador que actualmente está en proceso de producción y Mirador Norte que entrará en los próximos años a su etapa de producción.

La geología del depósito “Mirador Norte” es similar a la del depósito “Mirador”, y las alteraciones de los bordes de los dos depósitos casi se superponen. La parte sur del depósito

“Mirador Norte” se encuentra en el valle del río Wawayme, cubierta por los depósitos aluviales de arena gruesa y guijarros, con espesores de hasta 30 m. de espesor.

Las rocas mineralizadas del depósito de cobre “Mirador” son de composición granodiorítica y asociados a una brecha intrusiva, la roca caja del yacimiento son rocas de composición granodiorítica y granítica pertenecientes al batolito de Zamora. Es un depósito típico de pórfido de cobre y oro de composición calco-alcalino. El batolito de Zamora forma parte de la roca de caja del sistema de pórfido de cobre y oro “Mirador”; también como roca de caja podemos observar en las zonas circundantes al depósito la arena silíceo compacta de la formación Hollín del Cretácico que cubre en forma no integra la roca intrusiva del Jurásico del batolito de Zamora y el extremo sur de la zona de alteración de mineralización Mirador.

A manera de resumen (Ver Tabla 3) se detallan las formaciones que abarcan el proyecto Mirador:

Tabla 3. Formaciones geológicas principales en la zona de emplazamiento del Proyecto Mirador

Era	Período	Formación/Unidad	Características principales
Cenozoico	Cuaternario	Depósitos Aluviales Recientes (QA)	Rocas clásticas no consolidadas o sedimentos clásticos consolidados.
		-- Unidades de Alta Permeabilidad (P1)	Rocas clásticas no consolidadas. Acuíferos superficiales con profundidades piezométricas entre los 2.0 y 8.1 m. Valores de permeabilidad entre 1.0×10^{-3} y 1.5×10^{-4} cm s ⁻¹ (0.8640 y 0.1296 m d ⁻¹).
		-- Unidades de Permeabilidad Media (P2)	Sedimentos clásticos consolidados (areniscas). Acuíferos locales, muy discontinuos, de bajo rendimiento, que descargan mediante vertientes, generalmente perennes.
	Terciario		
Mesozoico	Cretáceo	Hollín (KH)	Cuarzo arenitas, más o menos puras, de grano fino, masivas y bien cohesionadas.
	Jurásico	Zamora	Abarca la mayor parte del proyecto. Rocas del Batolito de Zamora (diorita, monzonita, granodiorita) y rocas relacionadas al conjunto Mirador (granitos gráficos, aplogranitos). Las rocas presentan textura granofídica de grano medio. Sus principales componentes son: plagioclasas, feldespato y en menor porcentaje cuarzo. El mineral máfico dominante es la hornblenda (anfíboles). En general, las distintas litologías presentan permeabilidad muy baja bien sea en forma de roca fisurada o bien como roca meteorizada (saprolito: entre 1.0×10^{-4} y 2.0×10^{-4} cm s ⁻¹ ; 0.0864 y 0.1728 m d ⁻¹).
		-- Brechas Tardías - Postmineral (Cuarzomonzonita)	
		-- Pórfidos Tardíos - Postmineral (Cuarzomonzonita)	
		-- Zamora Brechada (Crackel Breccia)	
		-- Brecha Hidrotermal Silíceo (Brecha Intrusiva)	
		-- Pórfidos Intraminerales Diques	
-- Pórfidos Tempranos (Dioríticos)			

Fuente: Adaptado de Ecuacorriente SA, (2010)

6.1.2. Reservas

El proyecto de “Mirador Norte” está proyectado en base a reservas probadas. Al 30 de junio de 2025, deduciendo las reservas explotadas y que se espera explotar, se calcula que la cantidad de mineral medido + indicado del depósito Mirador en este diseño es de 509.2 Mt, la ley promedio del mineral principal Cu es de 0.53%, y la cantidad de metal Cu es de 2698.8 kt.

La cantidad de mineral medido del depósito “Mirador Norte” utilizado en este diseño es de 291.2 Mt, la ley promedio del mineral principal Cu es de 0.46% y la cantidad de metal Cu es de 1345.4 kt. La cantidad de mineral de recurso medido + indicado utilizado del área minera en este diseño es de 800.4 Mt, la ley promedio del mineral principal Cu es de 0.50% y la cantidad de metal Cu es de 4044.2 kt. Los resultados resumidos se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Resumen de recursos utilizados en el área minera en este diseño

Nombre del área minera	Categoría de recurso	Cantidad de mineral	Ley de Cu	Ley de Au	Ley de Ag	Cantidad de metal Cu	Cantidad de metal Au	Cantidad de metal Ag
	Unidad	(Mt)	(%)	(g/t)	(g/t)	(kt)	(kg)	(kg)
Mirador	Medido + Indicado	509.2	0.53	0.170	1.41	2698.8	86564	717972
Mirador Norte	Medido	291.2	0.46	0.084	/	1345.4	24461	/
Total	Medido + Indicado	800.4	0.51	0.139	/	4044.2	111025	/

Fuente: Ecuacorriente SA (2019)

6.2. Proceso de beneficio actual

La mina adopta un sistema de trabajo continuo de 330d/a, 2 turnos/d, 12h/d.

La ampliación de fase II de Mirador considera la producción de 60000 t/d (20 millones de t/a) de la fase I, aumentando 80000 t/d (26.2 millones de t/a). Después de la ampliación, la producción total de la mina de cobre Mirador será de 140000 t/d (46.2 millones de t/a). Tanto la fase I como la fase II utilizan la misma planta de beneficio y las mismas instalaciones para la gestión de relaves.

- **Vida útil:** La vida útil total calculada de la mina será de 17.2 años. Entre ellos: La vida útil del tajo “Mirador” será de aproximadamente 21 años, con una duración de producción estable de 14 años y la duración de producción no alcanzada o la producción reducida de 7 años; en tanto que la vida útil del tajo “Mirador Norte” será de aproximadamente 16 años, con una duración de producción estable de 13 años, y una duración de producción no alcanzada o producción reducida de 3 años.

6.3. Proceso de conminución

La planta de beneficio del Proyecto Minero Mirador se encuentra en la cuenca baja del río Wawayme, en la actualidad la planta de beneficio tiene una capacidad productiva de 20 millones de toneladas por año y está conformada por dos líneas paralelas, cada una tiene la capacidad de procesar 10 Mt/pa. Esta planta inició operaciones en julio de 2019. El sistema de producción está compuesto por un área de molienda SABC (molino SAG, un molino de bolas y un molino de guijarros), un área de flotación y un sistema de espesadores y filtros prensa para deshidratar el concentrado.



Figura 14. a) Trituradora giratoria, b) molino SAG, c) Trituradora de guijarros, d) Molino a bolas e) celdas serranas de flotación

Fuente: Ecuacorriente S.A. (2023)

La mena triturada será molida en los dos molinos hasta obtener un producto apto para el proceso de flotación. El molino SAG descarga a una criba vibratoria, los gruesos que no pasan la criba serán conducidos a través de bandas transportadoras hasta la trituradora de guijarros, ubicada en un edificio independiente cerca a la pila de acopio, y luego ingresarán nuevamente al molino SAG. Los finos que atraviesan la criba pasan a los nidos hidrociclones para clasificar el material, el flujo inferior se dirige al molino de bolas, mientras que el flujo superior con partículas de 120 μm o menos, pasan al proceso de flotación. La Figura 6, muestra la secuencia de beneficio.

La siguiente figura muestra el circuito de molienda SABc

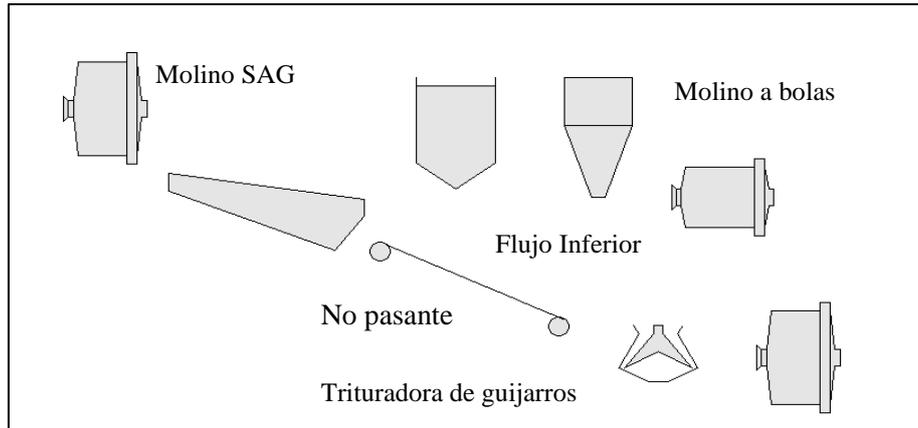


Figura 15. Circuito de molienda
Fuente: Elaborado por el Autor

6.4. Determinación de las propiedades físico mecánicas de las rocas

En este apartado se incluye los análisis petrológicos, los ensayos de rocas como peso específico real, aparente y porosidad. Se trabajaron con un total de tres muestras las cuales se mencionan a continuación:

- **M1:** Granodiorita
- **M2:** Granodiorita
- **M3:** Pórfido andesítico

6.2. Características del mineral

El principal mineral que contiene cobre de la mina Mirador es la calcopirita, otros minerales metálicos incluyen la pirita y una pequeña cantidad de molibdenita. El cobre de las muestras en la parte profunda del yacimiento mineral se encuentra en la forma de calcopirita, y los minerales de cobre secundarios tales como la covelina y la calcosina (calcosina o azul de cobre) aparecen gradualmente en la superficie.

Los minerales de cobre secundarios en la superficie representan el 30% de la cantidad total de los minerales de cobre. La pirita es el mineral de sulfuro principal además de los minerales de sulfuro de cobre, su contenido es aproximadamente tres veces mayor que el de la calcopirita; el contenido de otros minerales de sulfuro es muy pequeño. Los principales minerales de vetas son el cuarzo, el feldespato y la mica, que representan el 95.4% del total de los minerales no sulfurados. El contenido de los minerales arcillosos es de aproximadamente el 2% y el contenido de carbonato es de aproximadamente el 1%.

A continuación, se describen las muestras:

- **Muestra 1:** Granodiorita ver Figura 16.

Minerales principales: Cuarzo y feldespato

Minerales secundarios: Hornblenda y biotita

Minerales accesorios: Feldespato potásico, cuarzo, pirita

Tipo: Ígneo intrusivo

Textura: Fanerítica

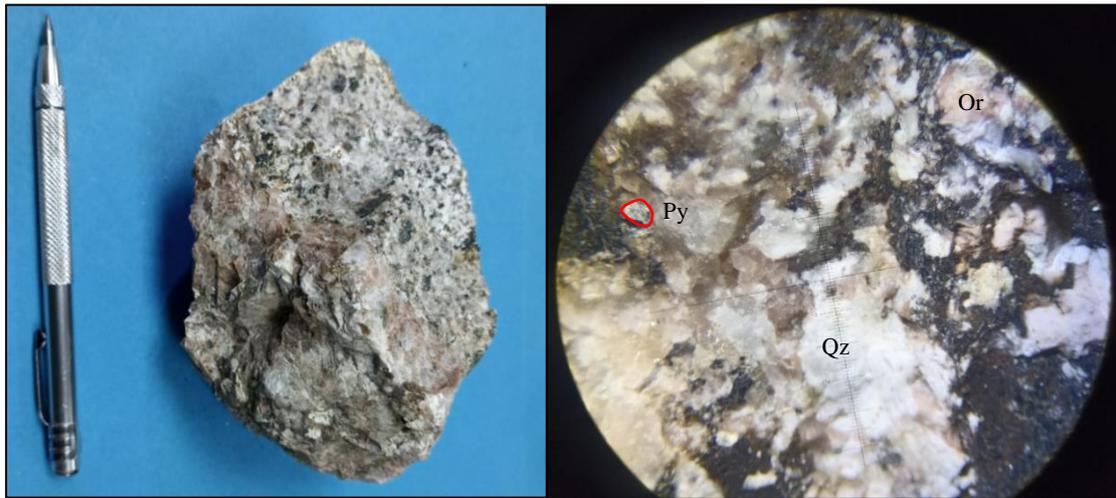


Figura 16. Muestra 1 granodiorita

Fuente: Elaborado por el Autor

- **Muestra 2:** Granodiorita ver Figura 17.

Minerales principales: Cuarzo y feldespato

Minerales secundarios: Hornblenda y biotita

Minerales accesorios: Pirita y calcosina, calcopirita y galena

Tipo: Ígneo intrusivo

Textura: Fanerítica



Figura 17. Muestra 2 granodiorita
Fuente: Elaborado por el Autor

- **Muestra 3:** Pórfido andesítico ver Figura 14, con clastos de rocas andesíticas
Minerales principales: Cuarzo y feldespato
Minerales secundarios: Hornblenda y biotita
Minerales accesorios: Feldespato potásico, pirita, calcopirita, clorita y galena.
Tipo: Ígneo intrusivo
Textura: Fanerítica

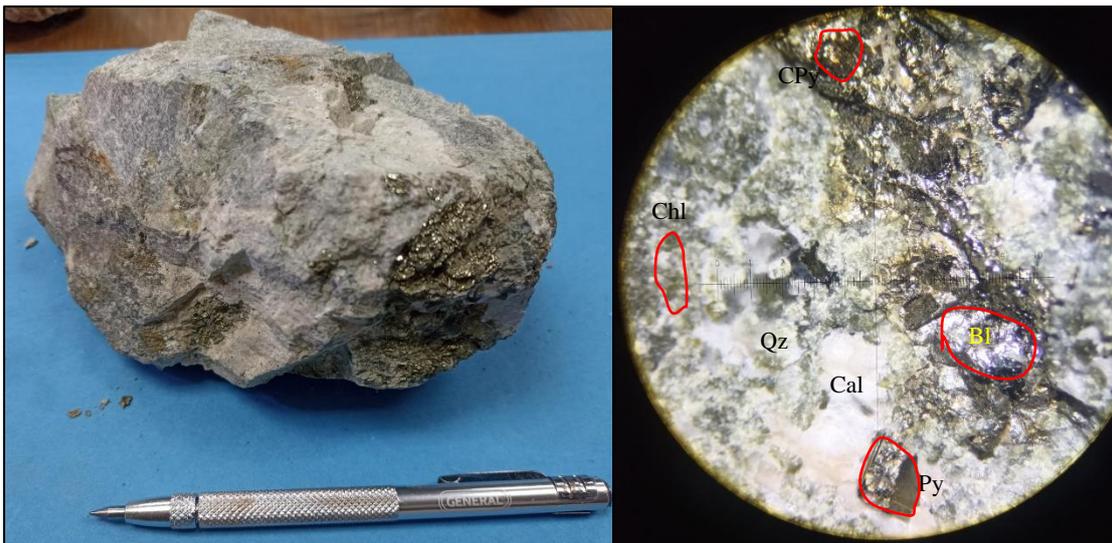


Figura 18. Muestra 3, brecha intrusiva
Fuente: Elaborado por el Autor

6.2.1. Análisis mineralógico

Los minerales de cobre en la mina de Mirador Norte son principalmente la calcopirita, y en algunas zonas se observa tetraedrita. Otros minerales metálicos son principalmente la pirita, también hay pocas cantidades de: blenda, molibdenita, magnetita, galena, wolframita, scheelita, hematita, ilmenita, limonita, pirrotita, lillianita. Los minerales en las vetillas son principalmente el feldespato de potasio, seguido de plagioclasa y cuarzo, y pequeña cantidad de: clorita, biotita y calcita, y poca cantidad de: esfena, barita, ankerita, apatita, rútilo, wollastonita, zircón, etc. La composición mineral y el contenido del mineral se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Composición mineral y contenido relativo de la mina Mirador Norte

Nombre del mineral	Contenido (%)	Nombre del mineral	Contenido (%)
Calcopirita	1.44	Plagioclasa	25.81
Tetraedrita	0.08	Cuarzo	17.28
Pirita	1.63	Clorita	6.14
Blenda	0.01	Biotita	5.65
Magnetita	0.14	Calcita	1.00
Esfena	0.69	Barita	0.08
Feldespato de potasio	39.62	Otro	0.43
Total		100.00	

Fuente: Adaptado de Eucorriente. S.A (2022)

6.4.1. Composición química del mineral

El análisis de los elementos múltiples de la mena de la mina Mirador se muestra en la siguiente tabla. A partir del análisis de los elementos múltiples y el análisis de la composición mineral, se sabe que los elementos actualmente reciclables en el mineral son: cobre, oro y plata.

Tabla 6. Resultados del análisis de los elementos múltiples de la mena

Elemento	Cu	S	Fe	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Au (g/t)	Ag (g/t)
Contenido (%)	0.548	3.33	4.06	1.42	1.34	13.31	67.58	0.38	3.1

Fuente: Adaptado de Eucorriente. S.A (2022)

Los resultados del análisis de la composición química de los minerales de la mina Mirador Norte se muestran en la Tabla 7. Los elementos valiosos del mineral son principalmente cobre y el elemento oro cumple con los requisitos de los indicadores de recuperación integral.

Tabla 7. Resultados de todo el análisis químico de la mina Mirador Norte

Elemento	Cu	Au (g/t)	Ag (g/t)	TFe	Zn	Pb	S	SiO ₂
Contenido (%)	0.53	0.11	2.46	2.72	0.01	<0.005	1.43	63.90
Elemento	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	C	Ti	

Contenido (%)	15.50	1.62	1.75	2.36	5.24	0.12	0.17
---------------	-------	------	------	------	------	------	------

Fuente: Adaptado de Ecurriente. S.A (2022)

6.4.2. *Peso específico aparente*

La Tabla 8, muestra el peso específico aparente.

Tabla 8. Resultados del peso específico aparente

Peso aparente				
COD	W. saturado	W. sumergido	W. seco	W. aparente gr/cm³
M01	180.85	111.72	179.84	2.596
M02	78.985	48.868	78.55	2.603
M03	261.26	181.157	260.31	3.243

Fuente: Elaborado por el Autor

6.4.3. *Peso específico real*

La Tabla 9, muestra el peso específico real

Tabla 9. Resultados peso específico real

Peso específico real				
COD	W. agregado	W. recip. Lleno H2O	W. agre.+ H2O	Peso Especifico gr/cm³
M01	30	147.22	165.67	2.597
M02	20	147.22	159.64	2.639
M03	30	147.22	168.15	3.308

Observaciones: Ensayo realizado por el método del picnómetro

Fuente: Elaborado por el Autor

6.4.4. *Porosidad*

La Tabla 10, muestra la porosidad de las muestras.

Tabla 10. Resultados porosidad

Porosidad	
COD	Porosidad %
M01	0.044
M02	1.348
M03	1.948

Fuente: Elaborado por el Autor

6.4.5. *Resistencia*

La mina de cobre Mirador con sus yacimientos “Mirador” y “Mirador Norte” son depósitos de pórfido de cobre en roca de composición granodiorítica. La distancia entre los dos

depósitos es de unos 2 km. y ambos yacimientos utilizaran el método de extracción a cielo abierto (open pit). El diseño minero del depósito “Mirador” (fase I de Mirador) fue completado en el año 2014, este diseño es la base principal para el análisis de la mecánica de rocas del depósito “Mirador Norte”, debido a que la litología de los dos depósitos tiene cierta similitud.



Figura 19. Resultados resistencia a la compresión simple

Fuente: Elaborado por el Autor

En las imágenes presentadas anteriormente equivale a rocas del tipo granodioritas con resistencias de 37.33 MPa y 23. 50 MPa, en total se tiene 30.42 MPa.

6.3. Evaluación de técnicas de reducción de tamaño

En trituración se definió el circuito considerando los equipos de la misma manera se seleccionaron tres técnicas de reducción de tamaño en molienda que son las más trabajadas a nivel de minería a gran escala:

6.3.1. Trituración

En este apartado se analiza la secuencia de trituración:

Trituración primaria: En primera instancia se receipta el material desde la plataforma de stock y se alimenta a la trituradora giratoria (P80 = 800 mm) lo más factible por economía y transporte es colocarla dentro del tajo.

Para definir los equipos se lo realizó en función a la producción futura del tajo de 140 000 ton al día, se analizaron dos equipos, las trituradoras giratorias y las trituradoras de mandíbulas.

Se debe considerar el tipo de alimentación a la molienda, en todos los circuitos típicos de una o dos etapas de trituración alimentando a un molino SAG, es así que el equipo seleccionado para trituración primaria es la giratoria, debido a su capacidad de volumen, las

trituradoras de mandíbulas se trabajan en volúmenes pequeños y las giratorias pueden trabajar con mayores volúmenes. La siguiente Figura, analiza la comparación de las mismas.

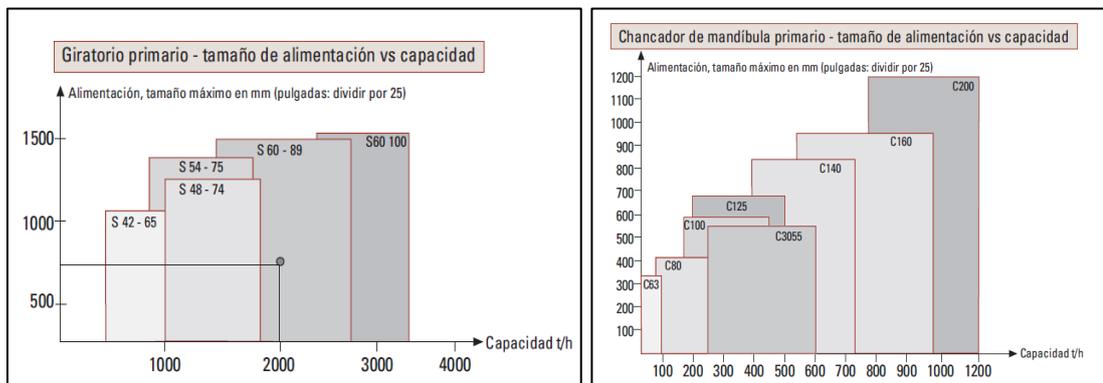


Figura 20. Análisis entre trituradoras giratorias y mandíbulas
Fuente: (Portal Minero S.A, 2006)

Cálculos para el proceso de trituración

- **Reducción de tamaño:**

$$i = \frac{D80}{d80} = \frac{800}{300} = 2.67$$

Trituración secundaria

De la trituradora sale con un tamaño de partícula (D80) de 200 mm

- **Energía de Bond (E_B)**

$$E_B = 10 * wi \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right) = E_B = 10 * 12.72 \left(\frac{1}{\sqrt{240\ 000}} - \frac{1}{\sqrt{640\ 000}} \right)$$

$$= 0.10 \text{ kwh/ton}$$

Donde:

E = Consumo Específico de Energía, Kwh/ton molida.

F80 = Tamaño 80% pasante en la alimentación: 640 000 μm

P80 = Tamaño 80% pasante en el producto: 240 000 μm

Wi = Índice de Trabajo de Bond, indicador de la tenacidad del mineral, Kwh/ton, mineral de cobre 12.72 (Ver Figura 21)

TABLA 2.1 Trituración - Índice de trabajo Bond			
Sólidos	Wi [kWh/ton corta]	Sólidos	Wi [kWh/ton corta]
Andesita	18,25	Gneiss	20,13
Aceite de esquistos	15,84	Hematita	12,84
Arcilla	6,30	Magnetita	11,13
Arena de sílice	14,10	Magnetita	9,97
Baritina	4,73	Materia prima de cemento	10,51
Basalto	17,10	Mineral de cobre	12,72
Bauxita	8,78	Mineral de estaño	10,90
Caliza	12,74	Mineral de manganeso	12,20
Carbón de piedra	13,00	Mineral de níquel	13,65
Carburo de sílice	25,87	Mineral de oro	14,93
Coque	15,13	Mineral de pirita	8,93
Cuarcita	9,58	Mineral de plomo	11,90
Cuarzo	13,57	Mineral de plomo-zinc	10,93
Diorita	20,90	Mineral de potasa	8,05
Dolomita	11,27	Mineral de pyrrhotita	9,57
Escoria	10,24	Mineral de rutilo	12,68
Escoria de cemento	13,45	Mineral de spodumeno	10,37
Esmeril	56,70	Mineral de titanio	12,33
Esquisito	15,87	Mineral de zinc	11,56
Feldespato	10,80	Molibdeno	12,80
Ferro-cromo	7,64	Pedral	26,16
Ferro-manganeso	8,30	Pizarra	14,30
Ferro-silicona	10,01	Rocka de fosfato	9,92
Fluoro natural	8,91	Rocka de trapeana	19,32
Gabro	18,45	Roca de yeso	16,06
Grafito	15,13	Sienita	13,13
Granito	20,13	Silicato de sílice	13,40
Gravilla	43,56	Taconita	14,61
		Vidrio	12,31

Figura 21. Índice de trabajo de Bond
Fuente: Portal Minero S.A, (2006)

Trituración secundaria

$$i = \sqrt{2.67} = 1.63$$

El material es llevado a la planta de tratamiento en este punto se debe ubicar una clasificadora que ordene las partículas y las que no cumplen con el tamaño adecuado, serán enviadas nuevamente a trituración, que será una trituradora de guijarros.

La secuencia de trituración para Mirador Fase II es la siguiente (Ver Figura 22):

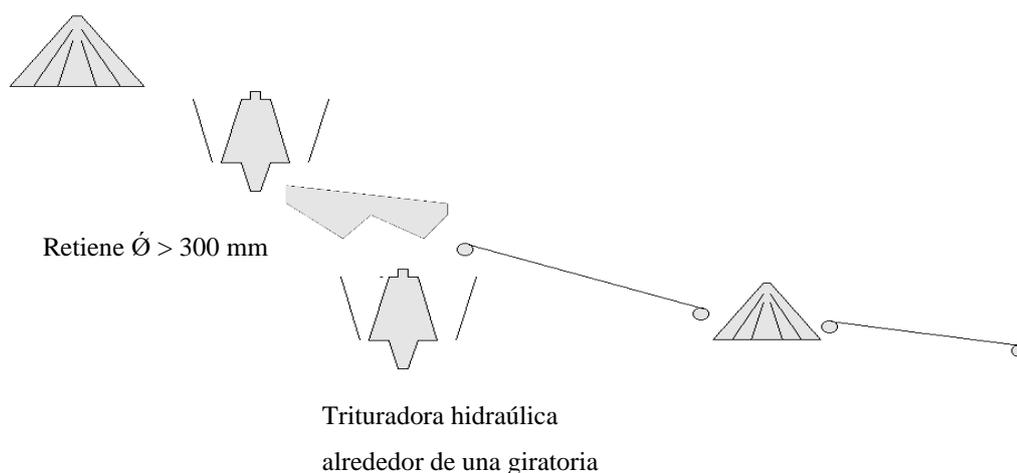


Figura 22. Secuencia del proceso de trituración
Fuente: Adaptado de Ecsa, (2023)

6.3.2. Molienda

En casi la totalidad de las faenas mineras de gran tamaño, las plantas de trituración y molienda ocupan el mayor espacio y requieren de mayor consumo de energía que las demás etapas del proceso productivo. Para molienda se realiza un análisis entre tres tipos de molienda la molienda convencional SAG y la actual.

Molienda convencional

Para este tipo de molienda se requiere de tres etapas de trituración para que se ajuste al diámetro de entrada de la molienda.

La molienda convencional se realiza en dos etapas; en la primera de ellas se utiliza un molino de barras y en la segunda, molino de bolas (aunque en las plantas modernas solo se utiliza molino de bolas). Dentro de ellos el mineral se mezcla con agua para conseguir una molienda homogénea y eficiente. La pulpa obtenida se lleva a la siguiente etapa, la Flotación.

La Figura 23, muestra el circuito de molienda convencional.

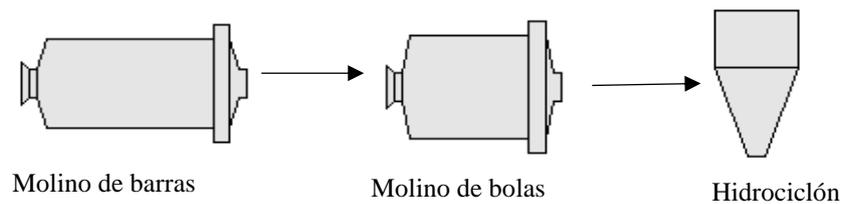


Figura 23. Circuito de molienda convencional

Fuente: Elaborado por El Autor, (2023)

Molienda SAG

La instalación de un molino SAG (Semiautógeno) constituye una innovación en algunas plantas. Son equipos de mayores dimensiones (11 m de diámetro por 4,6 m de ancho) y más eficientes que los anteriores. Gracias a su sistema y gran capacidad acortan, no solo el proceso de Molienda, sino también el de trituración ya que el mineral que muelen proviene directamente del triturador primario.

El mineral que proviene del triturador primario (no del terciario como en la Molienda convencional) con un tamaño cercano a 8 pulgadas (20 cm, aproximadamente), se mezcla con agua y cal. Este material es reducido gracias a la acción de las mismas rocas (de ahí su nombre semiautógena) que chocan con las numerosas bolas de acero presentes en el molino, de 5 pulgadas de diámetro y que ocupan el 12% de su capacidad.

La mayor parte del material molido en el SAG va directamente a la etapa siguiente, la Flotación, gracias a que tiene la granulometría requerida bajo los 180 micrones. Solo una pequeña porción debe ser enviada a un molino de bolas para continuar con la tritución.

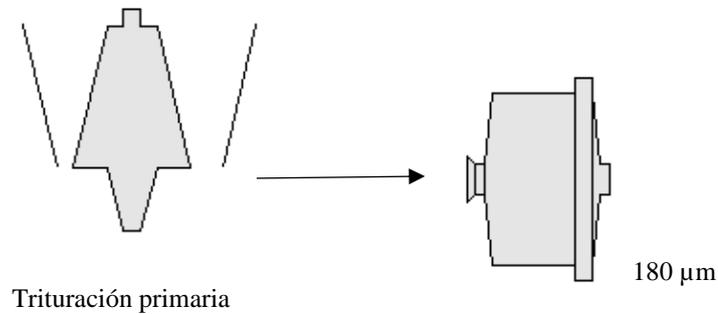


Figura 24. Molinos autógenos
Fuente: Elaborado por el Autor, (2023)

Molienda SABC

La capacidad de la planta en función de los límites máximos de capacidad individual del equipo, así como la influencia de las características del mineral en la selección de circuitos flexibles y viables con los requisitos de tamaño del producto. Se consideran los elementos primarios claves y principales que impulsan a la selección del circuito de trituración y molienda SABC más óptimo y factible en términos técnico y económicos de proceso.

El proceso de molienda SABC se encuentra descrito en el apartado 6.3.

Cálculo de consumo energético para molinos

$$E_B = 10 * wi \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right) = E_B = 10 * 12.72 \left(\frac{1}{\sqrt{96}} - \frac{1}{\sqrt{1600}} \right) = 9.80 \text{ kwh/ton}$$

El circuito de conminución es como se muestra en la Figura 25.

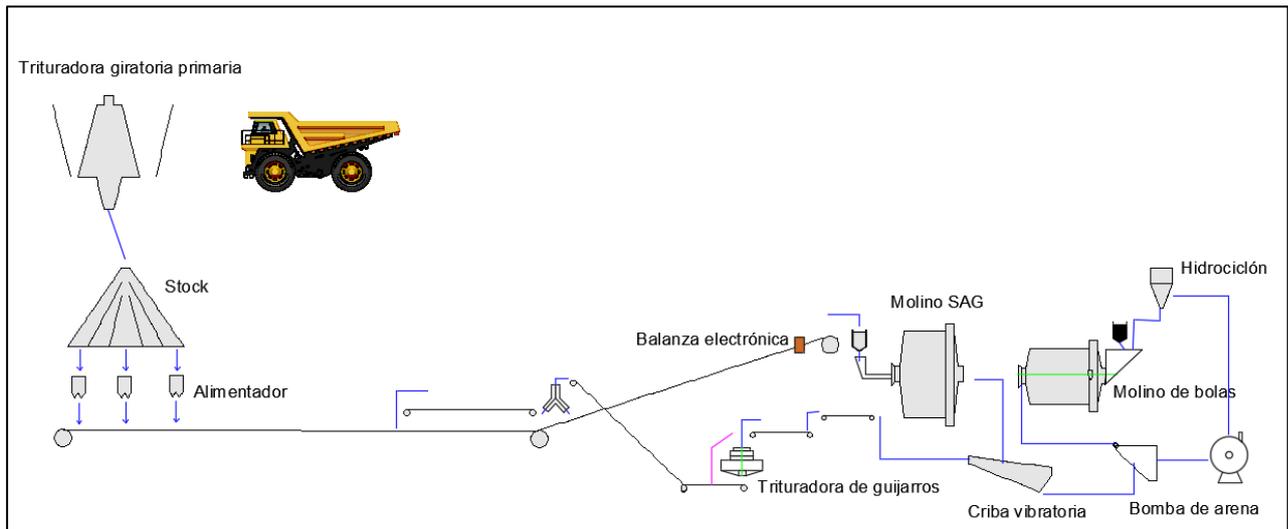


Figura 25. Circuito de conminución
Fuente: Elaborado por el Autor, (2023)

6.4. Comparación de las técnicas de reducción de tamaño

En este apartado se muestran los resultados de la comparación entre las técnicas previamente descritas

6.4.1. Prueba de trituración y molienda

La determinación del proceso de trituración y molienda es un aspecto importante en el diseño del proceso de la planta de beneficio. La operación de trituración y molienda requiere una gran inversión en la construcción de infraestructura, su consumo de energía representa el 50-70% del consumo total de toda la planta. La optimización de la trituración y molienda es un requisito para mejorar los índices técnicos y económicos de flotación, lo que determina en gran medida la estabilidad y el costo de producción. Actualmente, existen dos tipos de procesos de trituración:

- El primero es el proceso de trituración y molienda convencional en el cual se usa la trituración en dos o tres etapas, la granulometría de productos triturados finales se controla por el cribado.
- El segundo proceso es el de molienda autógena o molienda semi-autógena más molienda de bolas.

Ecuacorriente S.A. llevó a cabo un estudio de prueba de trituración y molienda en el tajo Mirador Norte y obtuvo una gran cantidad de datos, que incluyen los siguientes:

- Índice de trabajo de Bond para molino de varilla (BRWI o RWI);

- Índice de trabajo de Bond para molino de bolas (BBWI o BWI);
- Índice de abrasión A_i ;
- Índice de trabajo Bond con Trituración (CWI);
- Índice de trabajo de Bond para molino SAG (SPI);
- Prueba de caída de peso JK y prueba SMC.

En la tabla 11 se puede observar los resultados de las pruebas principales. Estos datos muestran que el mineral tiene una dureza media y una molturabilidad media.

Tabla 11. Resultados de prueba de trituración y molienda

No.	Ítem	A×b	CWI(kwh/t)	BWI(kwh/t)
1	Valor promedio	43.9	6.16	14.4
2	Valor medio	41.5	6.48	14.9
3	Valor máximo	63.1	7.58	16.3
4	Valor mínimo	35.2	4.05	10.9

Fuente: Ecuacorriente SA. 2019

6.4.1.1. Prueba de finura de molienda: Para determinar la influencia de la finura de molienda en el índice de Cu, se utilizó temporalmente un proceso de flotación de tres etapas. Ver tabla 12 para ver los resultados de prueba.

Tabla 12. Resultados de prueba de finura de molienda

No.	-0.074mm (%)	Producto	Tasa de producción (%)	Ley (%)		Recuperación (%)	
				Cu	S	Cu	S
1	55 ($P_{80}=150\mu\text{m}$)	Concentrado	9.94	4.50	29.94	87.34	94.29
		Relaves	90.06	0.072	0.20	12.66	5.71
		Crudo	100	0.51	3.16	100	100
2	59.9 ($P_{80}=138\mu\text{m}$)	Concentrado	11.17	4.20	27.34	91.67	96.63
		Relaves	88.83	0.048	0.12	8.33	3.37
		Crudo	100	0.51	3.16	100	100
3	67.6 ($P_{80}=113\mu\text{m}$)	Concentrado	10.54	4.56	27.88	92.75	97.05
		Relaves	89.46	0.042	0.10	7.25	2.95
		Crudo	100	0.52	3.03	100	100
4	70.5 ($P_{80}=105\mu\text{m}$)	Concentrado	10.63	4.49		93.19	
		Relaves	89.37	0.039		6.81	
		Crudo	100	0.51		100	
5	74.5 ($P_{80}=93\mu\text{m}$)	Concentrado	11.15	4.32	27.16	94.43	96.33
		Relaves	88.85	0.032	0.13	5.57	3.67
		Crudo	100	0.51	3.14	100	100
6	79.1 ($P_{80}=82\mu\text{m}$)	Concentrado	10.31	4.78		94.99	
		Relaves	89.69	0.029		5.01	
		Crudo	100	0.52		100	

Fuente: Ecuacorriente SA. 2021

Los resultados de la prueba de finura de molienda muestran que la recuperación de cobre aumenta con el aumento de la finura de molienda. Teniendo en cuenta tanto los aspectos técnicos como económicos, la finura de molienda recomendada en la prueba es de -0.074 mm, lo que representa el 70.5% promedio.

- **Prueba de finura de molienda del mineral primario**

Para la prueba se utilizó el proceso de flotación rougher de tres etapas diseñado para la fase I de la planta de beneficio. Consulte la figura para observar el proceso de prueba y sus condiciones y la figura 21 para ver los resultados de prueba.

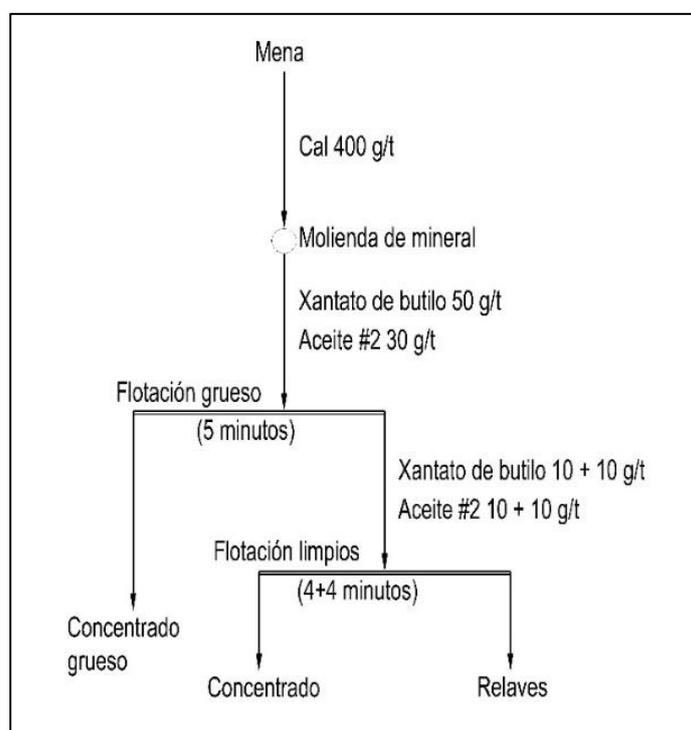


Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de la prueba de finura de molienda

Fuente: Elaborado por el Autor

Los resultados de la prueba de finura de molienda, son descritos en la Tabla 13.

Tabla 13. Prueba de finura de molienda

No	Finura de molienda P80%	Producto	Productividad (%)	Ley de Cu (%)	Recuperación de Cu (%)
1	59.8%	Concentrados gruesos de cobre	4.08	10.81	84.25
1	59.8%	Minerales intermedios	3.29	1.38	8.67
1	59.8%	Relaves	92.63	0.040	7.08
1	59.8%	Total	100.00	0.524	100.00

2	64.4%	Concentrados gruesos de cobre	6.25	7.78	92.09
2	64.4%	Minerales intermedios de cobre	2.74	0.66	3.43
2	64.4%	Relaves	91.01	0.026	4.48
2	64.4%	Total	100	0.528	100.00
3	68.0%	Concentrados gruesos de cobre	6.16	7.99	93.50
3	68.0%	Minerales intermedios de cobre	3.26	0.41	2.54
3	68.0%	Relaves de cobre	90.58	0.023	3.96
3	68.0%	Total	100	0.526	100.00
4	73.8%	Concentrados gruesos de cobre	7.86	6.28	93.86
4	73.8%	Minerales intermedios de cobre	3.35	0.38	2.42
4	73.8%	Relaves	88.79	0.022	3.72
4	73.8%	Total	100	0.526	100.00
5	77.4%	Concentrados gruesos de cobre	6.72	7.36	93.33
5	77.4%	Minerales intermedios de cobre	3.17	0.49	2.93
5	77.4%	Relaves	90.11	0.022	3.74
5	77.4%	Total	100.00	0.53	100.00

Fuente: Ecuacorriente SA. 2021

Los resultados de prueba muestran que el mineral de cobre tiene una buena flotabilidad y una rápida velocidad de flotación. A medida que aumenta la granulometría de la molienda, aumentará la tasa de recuperación de cobre. Cuando la finura de molienda es -0.074 mm y el contenido es 64.4%, el concentrado grueso contiene un 7.78% de cobre, la tasa de recuperación de cobre es 92.09% y la tasa de pérdida de cobre en los relaves es 6.81%. Cuando la finura de molienda es -0.074 mm y el contenido es 73.8%, el concentrado grueso contiene un 6.82% de cobre, la tasa de recuperación de cobre es 93.86%, la amplitud de aumento de la tasa de recuperación de cobre es pequeña. La finura de molienda temporalmente definido es -0.074 mm y el contenido es del 64.4%.

6.4.1.2. Comparación entre tipos de molienda

En los últimos años, dado que las plantas de beneficio continúan mejorando la eficiencia de la producción y el rendimiento de los equipos, y considerando los requisitos sobre la protección del medio ambiente y la conservación de la tierra, cada vez más plantas de beneficio

utilizan el proceso de molienda semi-autógena y molienda de bolas. En comparación con el proceso convencional de trituración, molienda en tres etapas y molienda de bolas, las principales ventajas del proceso de molienda semi-autógena son las siguientes: el proceso es simple, la configuración es conveniente, la inversión es baja, y evita la producción del polvo y la obstrucción de los enlaces intermedios, a la vez, reduce la trituración excesiva de materiales, mejora la distribución de la granulometría de los productos de molienda, disminuye la contaminación de minerales debido al hierro y crea condiciones más favorables para la flotación. Al mismo tiempo, este proceso es mejor en cuanto a aspectos de producción y operación, inversión en infraestructura, gastos de operación e índices de separación. Ha sido ampliamente utilizado en grandes plantas de beneficio internacionalmente.

Ver la Tabla 14 para ver los detalles de la comparación integral de los procesos de trituración y molienda.

Tabla 14. Comparación integral de los procesos de trituración y molienda

Ítem	Unidad	Alternativa I Trituración y molienda SABC	Alternativa II Trituración y molienda convencional
1. Datos de producción			
Capacidad de procesamiento	10000 t/a	2310	2310
Días de funcionamiento / año	d	330	330
Horas de funcionamiento / día:		18	18
Trituración y cribado	h	16	18
Molienda de mineral	h	24	24
2. Datos integrales			
Peso del equipo	t	5210	5884
Potencia instalada	kW	62680	65609
Número de operadores y trabajadores de mantenimiento	Persona	24	38
3 Uso de energía eléctrica, bolas de acero, etc.			
Consumo de energía eléctrica por unidad de mineral	kWh/t	13.84	14.49
Consumo de energía eléctrica anual	10000 kWh	31967	33461
Consumo unitario de placa de revestimiento	kg/t	0.2	0.25
Consumo anual de placa de revestimiento	t/a	4620	5775
Consumo de acero por unidad de mineral	kg/t	0.93	1.5
Consumo anual de bolas de acero	t/a	21483	34650

Fuente: Ecuacorriente SA, (2021)

A continuación, se realiza un análisis de acuerdo a la inversión y a los gastos de producción y operación:

- **De acuerdo a la inversión en equipos:** En la alternativa I, es relativamente mayor la inversión en los molinos SAG y otros equipos principales, pero no se consideró la planta de trituración media y fina, la planta de cribado, el silo de mineral fino y otras estructuras en esta alternativa, además la cantidad de equipos de esta alternativa es menor, por lo tanto, es relativamente menor la inversión en la infraestructura. Por tanto, en cuanto a los costos de equipos e infraestructura, la alternativa I sigue siendo la alternativa con la menor inversión total.
- **De acuerdo a los gastos de producción y operación:** El costo total de trituración y molienda incluye principalmente la tarifa de energía eléctrica, el consumo de acero, banda transportadora y malla y el costo de mano de obra. El costo de operación integral de la alternativa I (proceso SABC) es el más bajo.
- **Ahorro energético:** El Proyecto Minero Mirador opera actualmente con una subestación reductora 230 kV que fue licenciada en el “Proyecto para la Construcción, Operación-Mantenimiento y Retiro de la Línea de Transmisión a 230 kV Subestación Bomboiza-S/E Mirador de 17.59 km; conexión entre las Subestaciones Santa Cruz y Mirador de 15896 km y construcción, operación y retiro de la Subestación Mirador”, la cual tiene dos transformadores de 230/36/14.5 kV, 80 MVA. Para la fase II Mirador Norte se requerirá repotenciar los dos transformadores originales y añadir uno más de 100 MVA. La capacidad de los equipos se selecciona de acuerdo con las necesidades futuras del proyecto. La tasa de carga de los tres transformadores será de aproximadamente 62.1%. En caso de falla de uno de los transformadores, los otros dos pueden llevar la carga completa con una tasa de carga de aproximadamente 93.1%. Para ahorrar inversiones, reducir costos y mejorar la eficiencia económica de la empresa, se presta mucha atención al ahorro de energía y reducción de consumo. Se optimiza el límite de consumo de energía en el tajo a cielo abierto, con el software Gemcom Whittle se seleccionará razonablemente el avance de la ejecución del método de explotación y el sistema de transporte. Se selecciona la tecnología de beneficio como el sistema de trituración y molienda de alta eficiencia y ahorro de energía según la naturaleza del mineral. También se utilizan los equipos de ahorro de energía a gran escala y de alta eficiencia, para lograr la reducción del consumo. Después de la ampliación del proyecto, desde el primer año al séptimo año, la capacidad instalada de todos los equipos eléctricos de la mina será de 289430kw, la potencia activa calculada será de 172943kw y el

consumo de energía anual es de $102311.0 \times 10^4 \text{ kWh}$. A partir del octavo año, la capacidad instalada de todos los equipos eléctricos de la mina será de 311386 kW , la potencia activa calculada es de 184629 kW y el consumo de energía anual será de $109096.4 \times 10^4 \text{ kWh}$. El consumo total anual de diésel del proyecto será de $46011,00 \text{ t}$, que se utiliza principalmente por los vehículos de transporte en el tajo. Los indicadores integrales de consumo de energía por unidad de mineral calculado para explotación, beneficio y transporte de relaves se muestran en la tabla 21.

Finalmente, en el presente diseño se recomienda la alternativa I: el proceso de trituración y molienda SABC, es decir, el proceso de molienda semi-autógena, molienda de bolas y un molino de guijarro.

6.4.2. Comparación entre equipos y maquinaria

Para los diferentes tipos de molienda se requiere de ciertos equipos los cuales se mencionan en las tablas 15 y 16.

Alternativa I: Proceso de trituración y molienda SABC

Tabla 15. Equipos de trituración y molienda SABC

Molienda semi-autógena:	Molino SAG de $\Phi 10.97 \times 5.4 \text{ m}$	2 unidades
Trituración de roca dura:	Trituradora de cono hidráulica de varios cilindros de cabeza corta HP500	2 unidades
Cribado:	Cribadora vibratoria lineal de $3.0 \text{ m} \times 7.3 \text{ m}$	4 unidades
Molienda de bolas:	Molino de bolas de desbordamiento de $\Phi 7.9 \times 13.6 \text{ m}$	2 unidades
Clasificación:	Grupo de ciclones 18- $\Phi 660$ 4 grupos	

Fuente: Elaborado por el Autor

Alternativa II: Proceso de trituración y molienda convencional

Tabla 16. Equipos de trituración para molienda convencional

Trituración media:	Trituradora de cono MP1000 STD	2 unidades
Trituración fina:	Trituradora de cono MP1000 SH	4 unidades
Pre-cribado:	Cribadora vibratoria circular 2YAH2460	4 unidades
Cribado de circuito cerrado:	Zaranda de banana MF3673SD	12 unidades
Molienda de bolas:	Molino de bolas de desbordamiento de $\Phi 7,9 \times 16 \text{ m}$	2 unidades
Clasificación:	18- $\Phi 660$	Ciclón (4 grupos)

6.5. Diseño de las condiciones de construcción e infraestructura

La vida útil del tajo Mirador es de aproximadamente 21 años y del tajo Mirador Norte será de aproximadamente 17.2 años. Para procesar el volumen de mineral que se prevé producir en la fase II, será necesario ampliar la capacidad de las dos líneas existentes en la planta de beneficio, de 30 ktpd a 35 ktpd, además de instalar dos líneas adicionales de procesamiento con los mismos sistemas de molienda y flotación que las dos primeras y con capacidades de 35 ktpd. Al final se contará con 4 series de molienda y flotación instaladas donde cada serie tendrá una capacidad de producción de 35 ktpd (11.55 Mtpa).

Por otro lado, se continuará con el uso de las instalaciones de relaves existentes Quimi y Tundayme, y que se encuentran en operación.

En los Anexos 5 y 6, se describe la ubicación de los equipos y máquinas para la mina Mirador Fase II. Adicionalmente el diseño de las condiciones de construcción e infraestructura según la ocurrencia del yacimiento, las condiciones hidrogeológicas y ambientales se mencionan a continuación:

6.5.1. Según las condiciones de ocurrencia del yacimiento

El yacimiento mineral del depósito Mirador tiene la forma de una enorme columna elíptica, con dirección sur-norte, de unos 1400 m de largo en esta dirección, y 1200 m de ancho de este a oeste. El espesor del yacimiento mineral actualmente es de 500 m, y la elevación de ocurrencia principal del yacimiento mineral es de 850 ~ 1580 msnm.

El yacimiento mineral del depósito “Mirador Norte” es una enorme elipse achatada, con una longitud de 1960 m en dirección, un ancho de 500-850 m y un espesor de 300-600 m. El yacimiento mineral es muy poco profundo, está debajo de la capa de cobertura superficial. El espesor promedio de la capa de cobertura es de 45 m, el espesor máximo es de 121 m y el espesor mínimo es de 0.23 m. La elevación de ocurrencia principal del yacimiento mineral es de 540- 1035msnm, como se observa en la siguiente Figura.

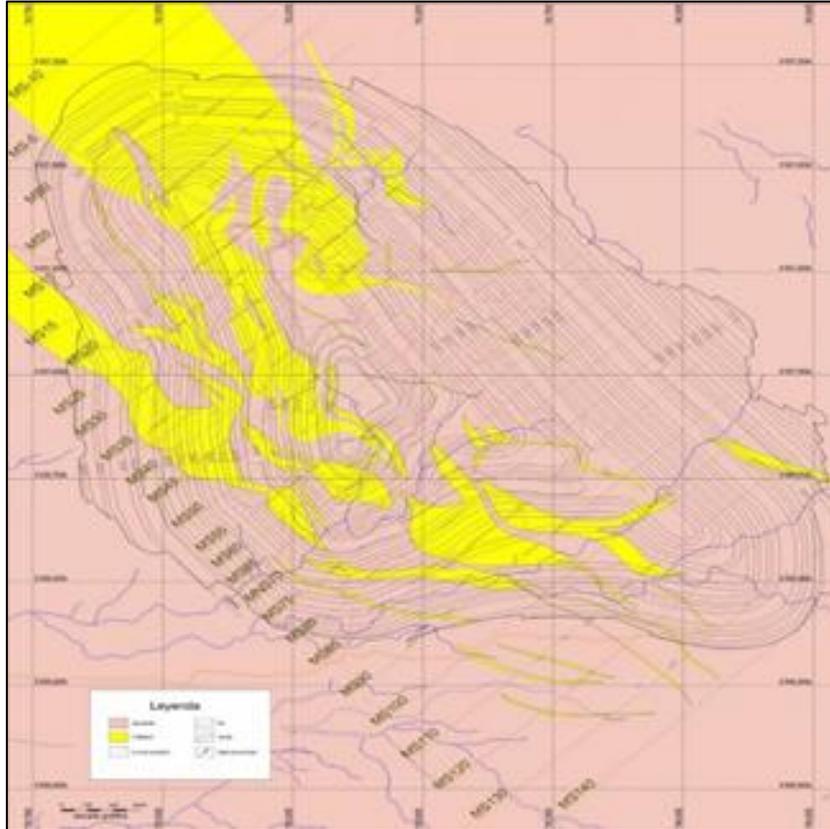


Figura 27. Mapa Geológico Topográfico del Yacimiento Mirador Norte
Fuente: Ecuacorriente SA, (2021)

Por otro lado, para lo construcción no se han evidenciado grandes fallas en el área minera; las juntas y fisuras del yacimiento mineral no están desarrolladas, la estabilidad de la roca mineral es relativamente buena. Pero la roca circundante y el suelo superficial en la parte superior del yacimiento mineral son relativamente fracturados y suaves, tiene mala estabilidad debido a la influencia de lixiviación de agua pluvial y efluencia.

6.5.2. Según las condiciones hidrogeológicas

El área minera Mirador Unificada tiene un clima ecuatorial húmedo, con mucha lluvia y un sistema hidrológico denso. El río Quimi y el río Tundayme están ubicados en los lados noroeste y suroeste del área minera, y se unen en el oeste, fluyen hacia el oeste hasta su desembocadura en el río Zamora.

El río Wawayme fluye entre los cuerpos mineralizados Mirador y Mirador Norte, desemboca en el río Quimi. La cuenca del río Wawayme cubre toda el área minera Mirador, su corriente principal fluye por el borde norte del área y algunos afluentes fluyen sobre el yacimiento mineral.

El río Wawayme fluye directamente por encima del borde Sur del yacimiento mineral Mirador Norte. Teniendo en cuenta los sitios industriales existentes y las políticas de protección del ambiente y otros factores, se requiere el control y manejo de posibles impactos sobre la delimitación del tajo a cielo abierto del yacimiento mineral Mirador Norte, lo que influye la determinación del ángulo final del talud.

La capa acuífera principal del área minera es el agua de fisura en la zona de meteorización. El acuífero no se ve afectado por la estructura, el flujo de agua en la roca mineral es muy débil y es básicamente una capa impermeable. La principal fuente de agua en el tajo es la precipitación atmosférica, y la fuente secundaria es la capa acuífera de la zona de fisura de meteorización. Las condiciones hidrogeológicas del área minera son relativamente simples.

6.5.3. Según condiciones ambientales

El depósito está ubicado en una zona sísmica de mediana a baja magnitud. Se han registrado fuertes terremotos en Ecuador y sus alrededores durante 400 años, a pesar de esto en los últimos años en esta zona suroriental no se han reportado sismos de magnitud y que afecten la infraestructura de la zona.

La roca circundante tiene la tendencia a producir acidez, generando agua ácida, por lo que se debe tomar ciertas medidas para tratarla y evitar fuentes de contaminación a los medios físicos, bióticos y antrópicos.

El gradiente geotérmico del depósito es normal, no se encuentran materiales radiactivos, ni hay grandes fuentes de contaminación cercanas. El entorno acuático de las aguas superficiales y subterráneas es bueno, presentando agua de buena calidad.

6.5.4. Ubicación de la escombrera

La escombrera norte se utilizará para descargar la roca estéril y los minerales de baja ley extraídos del tajo Mirador Norte. Se encuentra ubicada aproximadamente a 800m hacia el este del tajo Mirador Norte y 700m al norte de la escombrera sur, en el noreste del valle del río Wawayme (ver figura 18).

Se extraerá un total aproximado de 269.35 millones de toneladas de roca estéril y minerales de baja ley en el tajo Mirador Norte, alrededor de 111.14 millones de m³. Con un coeficiente de esponjamiento de 1,35 la escombrera necesitará un volumen de 150.04 millones de m³.

Se ha planificado un área total de la escombrera norte y con sus obras auxiliares, de aproximadamente 394 ha, incluyendo la escombrera, el muro de escollera, el canal interceptor, la banda transportadora, la piscina de sedimentación, el dique de agua ácida, etc., de los cuales la escombrera ocupará aproximadamente 274 ha como se observa en la siguiente figura 19, y una capacidad total aproximada de 215 millones de m³.

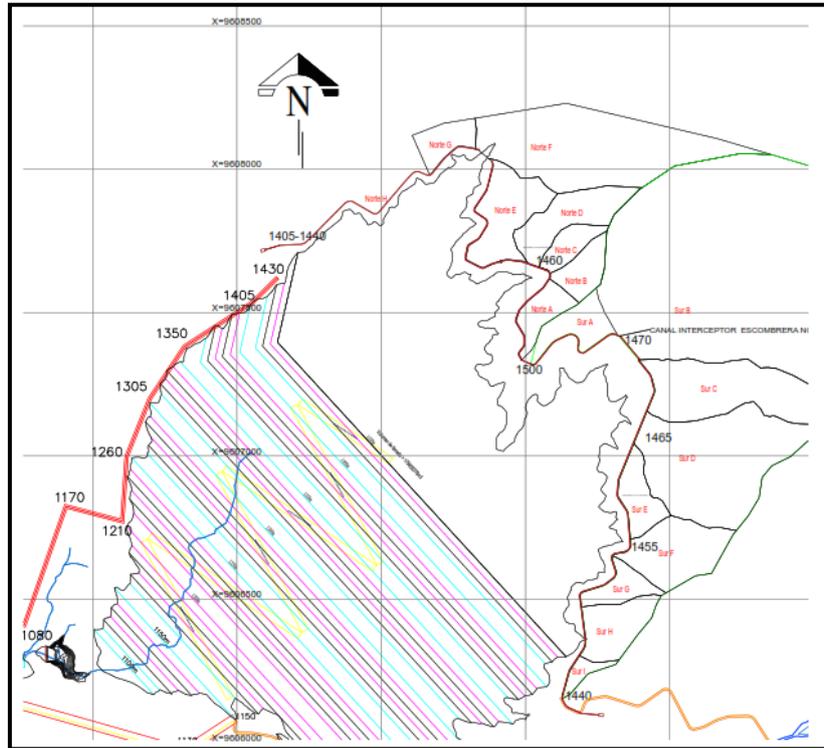


Figura 28. Escombrera Norte
Fuente: Elaborado por el autor

6.5.5. Ubicación de la relavera

La Mina Mirador posee dos depósitos de relaves, Quimi y Tundayme; el 18 de agosto de 2022 inició la campaña de investigaciones geotécnicas e instrumentación complementaria para los Depósitos de Relaves Quimi y Tundayme de la mina Mirador, la cual comprende la perforación de pozos e instalación de instrumentos para el monitoreo geotécnico en los Depósitos de Relaves Quimi y Tundayme.

Se aclara que la relavera Quimi está por culminar su vida útil de llenado y prácticamente la relavera que servirá para el depósito de los relaves del proyecto Mirador Norte será la relavera Tundayme.

En la Figura 24, se observa la relavera Tundayme



Figura 29. Relavera Tundayme

Fuente: Elaborado por el autor

7. Discusión

El desarrollo del proyecto de la empresa minera Ecuacorriente S.A. dentro de la concesión minera Mirador 1 Acumulada código 500807; contempla los dos depósitos con escala de producción total de 140000 t/d, siendo: “Mirador” de 80000 t/d y “Mirador Norte” de 60000 t/d; esta producción ha sido planificada en dos fases: La fase I que inició el año 2019 con la producción del depósito “Mirador” a 60000 t/d y la fase II que completa la producción de “Mirador Norte” hasta las 80000 t/d. que se espera comience a producir en el año 2025.

La ampliación del proyecto Mirador, considera la producción de 60000 t/d (20 millones de t/a) de la fase I Mirador; aumentando 80000 t/d (26.2 millones de t/a) con la ampliación y puesta en producción de la fase II Mirador Norte. Después de la ampliación, la producción total de la mina de cobre Mirador será de 140000 t/d (46.2 millones de t/a). Tanto la fase I como la fase II utilizarán la misma planta de beneficio y las mismas instalaciones para la gestión de relaves, porque las características técnicas de explotación y beneficio de minerales son similares.

El principal mineral que contiene cobre de la mina Mirador es la calcopirita; otros minerales metálicos incluyen la pirita y una pequeña cantidad de molibdenita. Los tipos de mineral de la mina “Mirador” y la mina “Mirador Norte” son mineral de pórfido de cobre con una pequeña cantidad de oro y plata. Es por ello que la optimización de la trituración y molienda es un requisito para mejorar los índices técnicos y económicos de flotación, lo que determina en gran medida la estabilidad y el costo de producción.

Moya, (2014) en su estudio “Diseño de una planta de concentración por flotación de calcopirita con depresores biodegradables de pirita” describe la mena del proyecto Mirador como un mineral del tipo pórfido, con contenido de Cu de 0.58% y Au de 0.17 g/t, acompañado de una gana mayoritariamente conformada por cuarzo 35%, plagioclasas 24%, ortoclasa 18% anhidrita 8% y pirita en 1% m y en contenido de material arcilloso (muscovita, anhidrita y caolinita) del 11%, esto dificultara el proceso de molienda como de flotación debido a que causan un aumento de la viscosidad de la pulpa, lo que influye en el diseño del circuito de molienda.

En contexto con lo anteriormente mencionado, en el presente estudio se tiene contenidos de mineral de calcopirita del 1.44%, pirita 1.63%, magnetita 0,14%, feldespato de potasio (ortoclasas) del 39.62 % existiendo un aumento considerable con respecto a lo anterior, en

plagioclasas el 25.81%, cuarzo 17.28% etc. Evidentemente existe problemas en la conminución por la presencia de arcillas, es por ello que en el presenta trabajo se optó por una trituración en seco, para evitar que el material viscoso se adhiriera a los equipos y dificulte el proceso.

En los últimos años, dado que las plantas de beneficio continúan mejorando la eficiencia de la producción y el rendimiento de los equipos, y considerando los requisitos sobre la protección del medio ambiente y la conservación del territorio, cada vez más plantas de beneficio utilizan el proceso de molienda semi-autógena y molienda de bolas.

La operación de trituración y molienda requiere una gran inversión en la construcción de infraestructura, su consumo de energía representa el 50-70% del consumo total de toda la planta, es por ello que, Tejada (2010), en su estudio “Análisis dinámico de molino SAG” menciona que existen ciertas zonas puntualmente críticas, las cuales probablemente, son causas de las frecuentes fallas que estos equipos han presentado desde la adopción de grandes dimensiones, producto de las exigentes tasas de producción operando en la industria minera actual, es por ello que la molienda SABC, al considerar la implementación de un molino de bolas, se convierte en un tipo de proceso más óptimo y factible en términos técnico y económicos de proceso.

Delgado, (2013) en su estudio “Evaluación de un cambio tecnológico para el procesamiento de minerales de alta dureza” señala que la opción de circuito de Molienda SABC tiene el potencial de reducir el costo operacional en más de un 7 % impactando de manera importante los consumos de energía y acero, dos de los ítems de costo más significativos en una planta concentradora, es por ello que el desarrollo de este trabajo al comparar la molienda convencional con la SABC la última resulto con menor consumo energético.

Ecuacorriente S.A. llevó a cabo en la república de China y Canadá, un estudio de prueba de trituración y molienda en el tajo Mirador Norte y obtuvo una gran cantidad de datos, que incluyen los siguientes: índice de trabajo de Bond para molino de varilla (BRWI o RWI), índice de trabajo de Bond para molino de bolas (BBWI o BWI); índice de abrasión A_i , índice de trabajo Bond con Trituración (CWI), índice de trabajo de Bond para molino SAG (SPI), Prueba de caída de peso JK y prueba SMC; estos datos muestran que el mineral de mena tiene una dureza media y una molturabilidad media.

En base a los resultados de los laboratorios de muestras del yacimiento Mirador Norte se puede indicar que existen tres tipos de rocas mineralizadas: pórfido temprano, granodiorita

y brecha intrusiva; las propiedades físicas promedios poseen un peso específico de 2.5 a 3.3 gr/cm³, porosidad de 0.44 a 1.9 % , y resistencia a la compresión simple de 37.33 Mpa y 23. 50 Mpa

Para finalizar, el presente trabajo se cumplió con los objetivos propuestos, sin embargo se concluye que el proceso de conminución actual es el más adecuado para el proceso, ya que al compararlo con el tipo de molienda convencional o SAG, resulta tener mayor eficiencia, la molienda SABC misma que la empresa ha venido desarrollando, por lo que otro tipo de molienda puede derivar en mayor consumo energético y no puede lograr el grado de liberación adecuado por ende habrá menor recuperación de mineral valioso.

8. Conclusiones

- Se recolectaron tres muestras equivalentes a granodioritas (M01 Y M02), y brechas intrusivas (M03), en las que se evidenció minerales como calcopirita, pirita, cuarzo, feldespato y micas con una ley de cobre es de 0.42%, por otra parte, las muestras tienen un peso específico que va desde los 2.5 a la 3.3 gr/cm³, de igual manera la porosidad va desde 0.04 a 1.9 %, con resistencias de 23.50 y 37.33 Mpa.

- Se analizaron tres tipos de molienda la molienda convencional, la molienda SAG y la molienda SABC, en el que la molienda convencional requiere de un molino de barras y de un molino de bolas, posterior la molienda SAG en el que se necesita una sola trituración y va a un molino de grandes dimensiones que reduce el tamaño por acción de las mismas rocas y un porcentaje de bolas de acero, finalmente la molienda que requiere de una sola trituración y esta compuesta por un molino SAG y un molino de bolas.

- Se estableció el circuito de trituración de la siguiente manera, se ubica una trituradora giratoria debido a que es capaz de procesar grandes volúmenes, considerando la producción diaria futura de 140 000 tn/día, esta máquina será ubicada en el tajo, el mineral triturado (d80=300mm) es transportado a través de una cinta, las que no cumplen con el diámetro van a una segunda trituración de guijarros.

- Al comparar los métodos de reducción se tiene que la molienda mas eficiente es la SABC ya que requiere de una sola trituración, un molino SAG y un molino a bolas, lo que ayuda a tener una recuperación adecuada, en este contexto, se determinó los consumos energéticos, dando como resultado que la molienda SABC tiene menor consumo energético, y menor consumo de bolas de acero. Adicionalmente, según las pruebas de finura que se efectuaron, en las que se determinó que cuando la finura de molienda es -0.074 mm y el contenido es 73.8%, el concentrado grueso contiene un 6.82% de cobre, la tasa de recuperación de cobre es 93.86%.

- Para la ampliación de la futura planta de tratamiento se considera la capacidad de producción que será 140 000 ton/día, en este contexto se debe implementar una trituradora giratoria misma que estará ubicada en el tajo Mirador Norte y será transportada por medio de fajas hasta la pila de stock; y luego se acondicionará una nueva trituradora de guijarros, para finalmente añadir dos molinos SAG y dos molinos de bolas adicionales.

- Para la planificación del proyecto Mirador Fase II, se lo realizó en función a la vida útil de la mina que es de aproximadamente 21 años, se determinó que las mismas

instalaciones de Mirador Fase I, serán utilizadas para la implementación de esta nueva fase, para esta ampliación se consideró: la geología en la que se concluye que no existe fallas en el área minera; las juntas y fisuras del yacimiento mineral no están desarrolladas y la estabilidad de la roca mineral es relativamente buena; también se consideró la hidrogeología en la que no existen cuerpos hídricos afectando al área y la principal fuente de agua es la precipitación y una fuente secundaria es una capa acuífera, y finalmente se analizó el factor ambiente, en el se determinó que la roca tiene tendencia a producir acidez por lo que se debe tomar las medidas adecuadas para prevenir este punto.

- La planificación para el área total de la escombrera norte y con sus obras auxiliares, de aproximadamente 394 ha, incluyendo la escombrera, el muro de escollera, el canal interceptor, la banda transportadora, la piscina de sedimentación, el dique de agua ácida, etc., de los cuales la escombrera ocupará aproximadamente 274 ha con una capacidad total aproximada de 215 millones de m³.

9. Recomendaciones

- Se recomienda implementar la detección y el control automático del proceso de conminución de la planta de trituración, pila de mena, molienda, flotación, concentración y espesadores, transporte de concentrado, sistema de tratamiento de agua como un accionar técnico ambiental y socialmente responsable.

- Se debe realizar la planificación de construcción de informatización e inteligencia de la mina Mirador para lograr la integración de los procesos; la informatización de la operación, la gestión de la mina, la automatización de la producción sobre la base de la informática, el Internet y las tecnologías de big data, aplicando la teoría de: recopilación de datos, la comunicación de datos, el control automático y el análisis inteligente que se resume en automatización y control de procesos.

- Se recomienda en el proceso de trituración, transferencia de pilas de mena por la generación de material particulado se adopte un método de combinación de eliminación hidráulica de polvo y eliminación mecánica de polvo.

- El estudio realizado permite recomendar el aumento de la producción de la planta de beneficio del Proyecto Mina Mirador Norte.

- Se recomienda que la planta industrial de Mirador Norte deberá contar con edificaciones propias, regulares y cómodas que asegure una operación continua y segura.

- El incremento de la gestión productiva del proyecto Mirador Norte deberá estar enmarcado en el contexto de la normativa ambiental y de Seguridad Industrial vigente que rige en el Ecuador.

- Es recomendable realizar un análisis con mayor profundidad desarrollando un plan minero optimizado con la variable asociada al rendimiento de procesamiento SABC, el que supone un impacto en el costo de oportunidad y en el volumen de Reservas

10. Bibliografía

- Blacio Aguirre , Robert Paúl. (2021, Noviembre 1). El Tributo en el Ecaudor. *Ambito Jurídico*(214). Retrieved Noviembre 19, 2021, from <https://ambitojuridico.com.br/revista-ambito-juridico/revista-ambito-juridico-no-214-ano-xxiv-novembro-2021/amp/>
- Carlos, D. R. (2013). *Evaluación de un cambio tecnológico para el procesamiento de minerales de alta dureza*. Santiago: Universidad de Chile.
- Castillo, D. (2016). *Operaciones Unitarias de Reduccion de Tamaño* . Mexico: UNAM.
- Centro Técnico Tongling NonferrousMetals Group Holdings Co., L. (2017). *Informe del Estudio Experimental del Beneficio del Mineral de Cobre del Depósito Norte Mirador*. Tongling- China: ECSA.
- Consultants, T. M. (2017). *Modelamiento y Simulación de Circuitos de Conminución* . Lima: Las Bambas.
- Cortázar Velarde, J. C. (2020, Junio). Estrategias educativas para el desarrollo de una cultura tributaria en América Latina. Experiencias y líneas de acción. *CLAD Reforma y Democracia*(17), 130-131. Retrieved from <https://www.yumpu.com/es/document/read/31434867/estrategias-educativas-para-el-desarrollo-de-una-siare-clad>
- CRCC-Tongguan Investment Co., L. (2010). *Informe del Estudio de Factibilidad del Proyecto de la Mina de Cobre. Mirador de Ecuador. ECSA*. Vancouver: ECSA.
- (CRCC-Tongguan Investment Co., 2010) (Centro Técnico Tongling NonferrousMetals Group Holdings Co., 2017 (Marcelo, 2014)
- Ecuador, B. C. (2019). *Boletín Informativo. Empresa Nacional Minera ENAMI*. Quito: Banco Central.
- Leon, L. E. (1984). *Teoría y Prácticas de Trituraciön y Molienda* . México: UNAM.
- Marcelo, J. (2014). *Diseño de una planta de 5000 ton/día de capacidad para la obtención del concentrado de cobre comercial por flotación de sulfuros a partir del mineral del Proyecto Mirador* . Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Olmos, B. (2018). *Ensayos de conminución para evaluar el efecto de la aplicación de microondas a muestras minerales*. Valparaiso: Universidad Tecnica Federico Santa María .
- Pinto, K. &. (2017). *Estimación de competencia del mineral para la predicción de tonelaje* . Lima: Las Bambas .
- Piquera, V. Y. (2022). *Ley de Bond (1951)*. Valencia: Politécnica de Valencia.
- Quintana, C. G. (2014). *Control Predictivo con Restricciones para una Planta de Molienda SAG*. Concepción: Universidad de Concepción .
- Quiroz et al, V. L. (2016). Implementación de Estrategia para fomentar la Cultura Tributaria en Comerciantes Minoristas de la Bahía del Cantón Guayaquil y garantizar el Cumplimiento Normativo para evitar sanciones de ley. 12. Guayaquil, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/686>
- Quispe et al, G. (2020, Agosto 06). La cultura tributaria y su efecto en la evasión fiscal en Ecuador. *Revista Espacios*, 41(29), 153. Retrieved from <https://www.revistaespacios.com/a20v41n29/a20v41n29p12.pdf>
- S.A., E. (2015). *Diseño y Estudio de Factibilidad del Proyecto Mirador de Fase I* . Quito: ECSA.
- Servicio de Rentas Internas. (2021, Mayo). *Servicio de Rentas Internas*. Retrieved from <https://srienlinea.sri.gob.ec/sri-en-linea/inicio/NAT>

11. Anexos

Anexo 1. Análisis químico de Mena Mirador Norte

Composición química del mineral

El análisis de los elementos múltiples del mineral crudo de la mina Mirador se muestra en la Tabla 4.2-2. A partir del análisis de los elementos múltiples y el análisis de la composición mineral, se sabe que los elementos actualmente reciclables en el mineral son cobre, oro y plata.

Tabla 4.2-2 Resultados del análisis de los elementos múltiples del mineral crudo

Elemento	Cu	S	Fe	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Au (g/t)	Ag (g/t)
Contenido (%)	0.548	3.33	4.06	1.42	1.34	13.31	67.58	0.38	3.1

Los resultados del análisis de la composición química de los minerales de la mina Mirador Norte se muestran en la Tabla 4.2-3. Los elementos valiosos del mineral son principalmente cobre y el elemento oro cumple con los requisitos de los indicadores de recuperación integral.

Tabla 4.2-3 Resultados de todo el análisis químico de la mina Mirador Norte

Elemento	Cu	Au (g/t)	Ag (g/t)	TFe	Zn	Pb	S	SiO ₂
Contenido (%)	0.53	0.11	2.46	2.72	0.01	<0.005	1.43	63.90
Elemento	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	C	Ti	
Contenido (%)	15.50	1.62	1.75	2.36	5.24	0.12	0.17	

Anexo 2. Análisis física mecánica de rocas

Propiedades físicas y mecánicas de las rocas principales

División de masa rocosa		Valor medio de los parámetros de resistencia del macizo rocoso				
Código	Nombre	Peso Volumétrico (kV/m ³)	Resistencia del macizo rocoso intacto (MPa)	RMR	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
Brecha central	CBx	25.6	30.4 (21.4)	55.6 (43.6)	0.561 (0.371)	39 (30)
Granodiorita noreste	NEC	25.8	25.1 (18.7)	42.5 (32.4)	0.422 (0.292)	33 (25)
Pórfido sureste	SEP	25.8	30.8 (20.7)	59.7 (44.6)	0.635 (0.385)	42 (31)
Granodiorita noroeste	NwG	25.8	23.2 (14.3)	49.5 (36.5)	0.482 (0.297)	36 (25)
Granodiorita suroeste	swG	25.8	28.8 (19.1)	56.9 (45.1)	0.618 (0.411)	42 (32)
Granodiorita sureste	SEG	25.8	24.0 (16.3)	46 (35.2)	0.465 (0.311)	35 (26)
Cuarcita Hollin	HOL ⁷	25.9	100 (68)	69 (52.8)	1.477 (0.700)	55 (45)

Anexo 3. Indicadores de concentrado de cobre

Índices de diseño de la planta de beneficio de la fase II Mirador Norte

Año	Ítem	Productividad (%)	Ley (%)			Tasa de recuperación (%)		
			Cu	Au(g/t)	Ag(g/t)	Cu	Au	Ag
1-5	100.00	0.594498	0.068096	0.146	100.00	100.00	100.00	100.00
	2.571.78	1824.00	0.7941.618	2.461	7886.00	30.00	30.00	2.571.78
	97.4398.22	0.134071	0.049068	0.104	2214.00	70.00	70.00	97.4398.22
26-	Crudo	100.00	0.516438	0.079094	0.209	100.00	100.00	100.00
	Concentrado	2.061.47	20.0026.30	1.15918	4.265	8088.00	30.00	30.00
	Relaves	97.9498.53	0.106053	0.057067	0.148	2012.00	70.00	70.00

Anexo 4. Pruebas de Trituración y molienda

Resultados de prueba de trituración y molienda

No.	Ítem	A×b	DWI (kwhkWh/t)	BWI (kwhkWh/t)	Observación
1	Valor promedio	43.9	6.16	14.4	
2	Valor medio	41.5	6.48	14.9	
3	Valor máximo	63.1	7.58	16.3	
4	Valor mínimo	35.2	4.05	10.9	

Resultados de la prueba

Tabla - Hoja de datos de los resultados de la prueba SMC

□□□□□□□□	DWi (kWh/m ³)	DWi (%)	Mia (kWh/t)	Mih (kWh/t)	Mic (kWh/t)	SCSE (kWh/t)
EG-1#	6.93	54	20.3	15.1	7.8	10.03
EG-2#	5.47	34	16.6	11.8	6.1	8.99
EG-3#	8.1	69	22.9	17.6	9.1	10.69

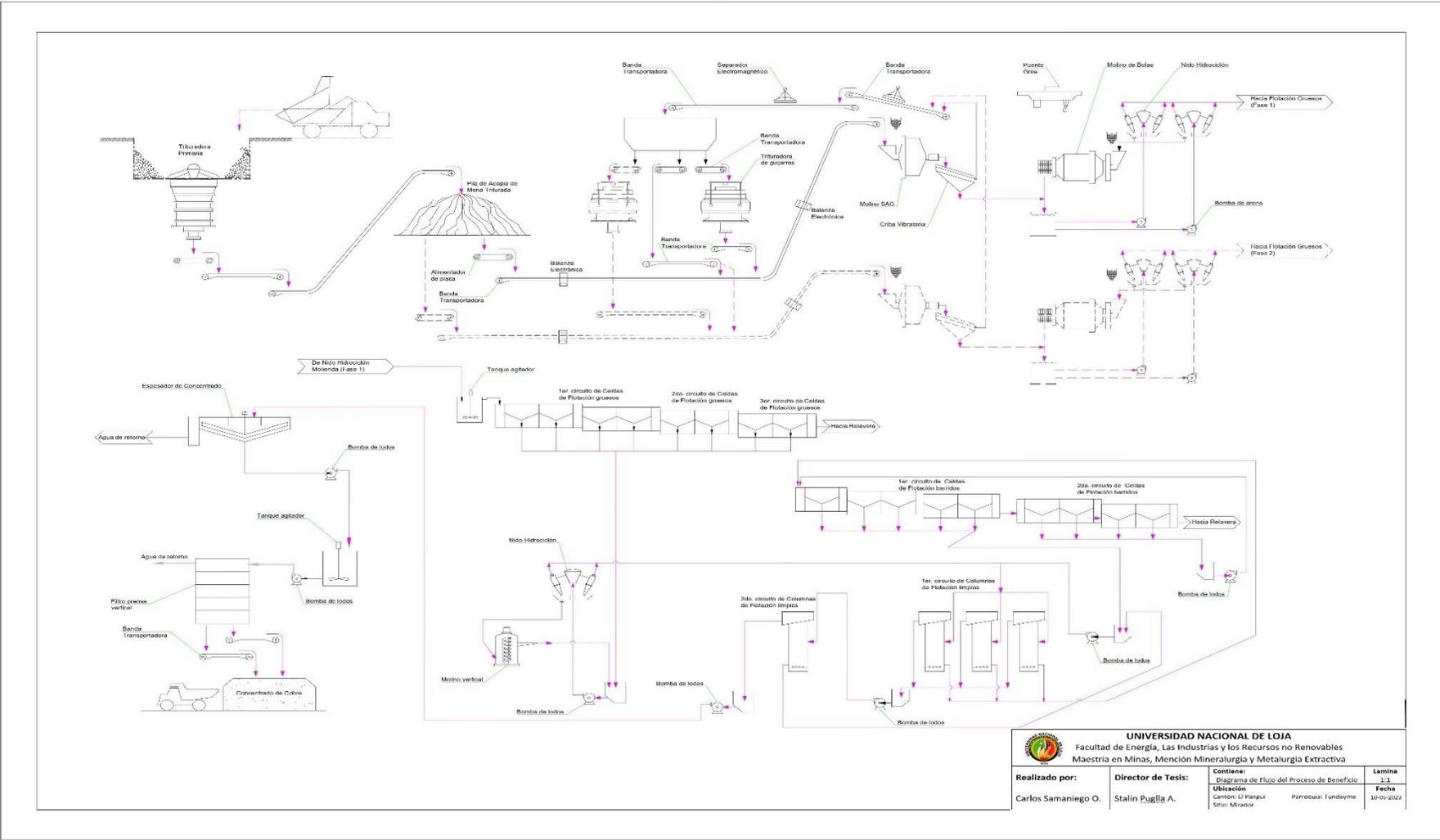
Tabla - Parámetros de cálculo de prueba SMC

□□□□□□□□	A	b	Axb	ta	(g/cm ³)
EG-1#	80.9	0.47	38.02	0.37	2.66
EG-2#	71.1	0.69	49.06	0.47	2.69
EG-3#	90.1	0.37	33.34	0.32	2.67

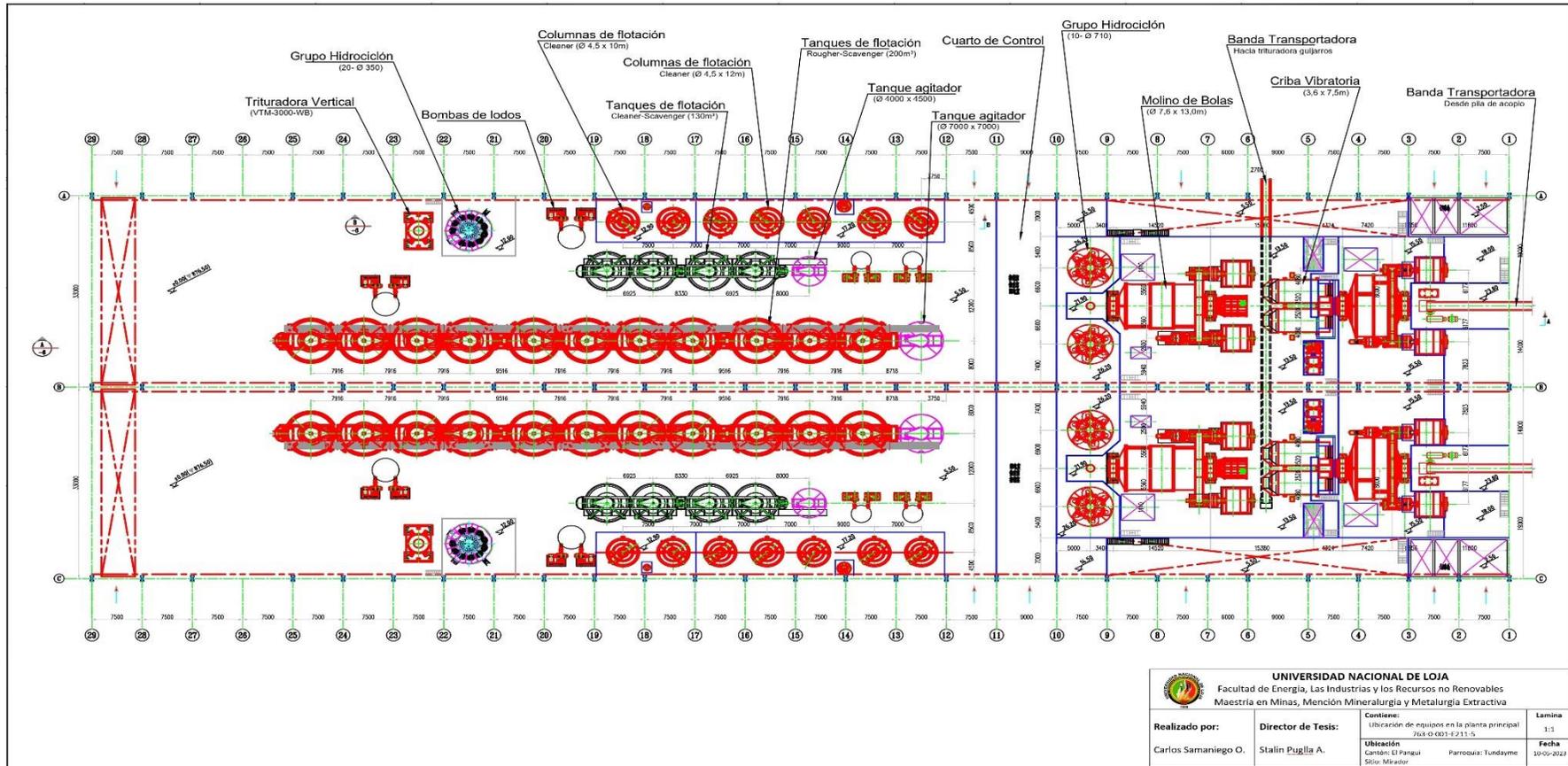
Tabla - Hoja de datos de los resultados de la prueba del índice de trabajo de Bond

□□□	Parámetro	Unidad	Identificación de la muestra		
			EG-1#	EG-2#	EG-3#
1	Tamiz de control P1	μm	125	125	125
2	P1	Malla	120	120	120
3	F80	μm	2139	2076	2039
4	P80	μm	95	97	96
5	Gramos netos generados por revolución Gbp	g/r	1.264	1.191	1.056
6	Índice de trabajo BWI	kWh/t	16.46	17.59	19.33

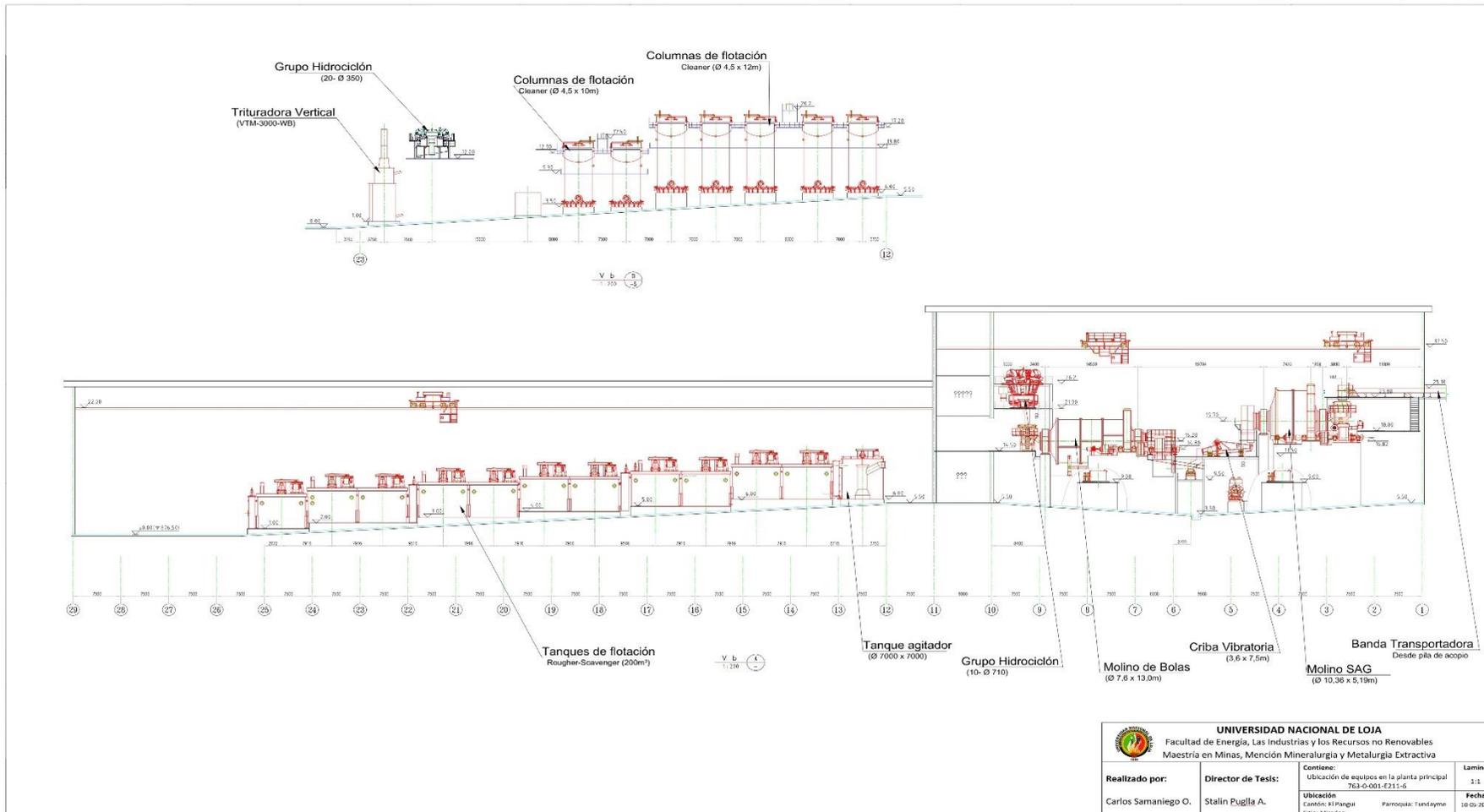
Anexo 5. Diagrama de flujo del proceso de beneficio



Anexo 6. Ubicación de equipos en la planta de beneficio



Anexo 7. Ubicación de equipos en la planta de beneficio



Anexo 8. Autorización de empresa ECSA



Zamora, 09 de enero de 2023.

La empresa Ecuacorriente SA. Operadora de la Mina Mirador, autoriza utilizar información para fines netamente académicos y con el carácter de reserva al Sr Ing. Carlos Israel Samaniego Ordoñez, para que desarrolle su tesis de maestría en el siguiente tema: **"CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE MINERALIZACIÓN PARA EL PROCESO DE CONMINUCIÓN EN EL AUMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO DEL PROYECTO MINA MIRADOR NORTE"**.

El interesado podrá hacer uso de la información según lo mencionado.

Muy Atentamente.



Vilma Pazmiño Q.
**GERENTE DE GESTION AMBIENTAL
ECUACORRIENTE S.A**

Oficina Principal: Campamento Mirador, Vía al Valle del Quimi Parroquia Tundayme, El Pangú - Zamora Chinchipe

Oficina Quito: Av. Naciones Unidas E1044 y Av. República del Salvador, Edif. CitiPlaza, Séptimo Piso, Oficina 703

PBX: (593-2)397-2000 EXT. 4000

www.ecsa.com.ec

Ecuacorriente S.A.

Anexo 9: Certificado de traducción del resumen

**MGS. MARIA MAGDALENA SARAGURO T.
PROFESORA DE INGLES**

CERTIFICA:

Que ha realizado la traducción del resumen de su tesis de maestría al Ing. Carlos Israel Samaniego Ordoñez; en calidad de profesora de Educación Media en la especialidad de Inglés; cuyo registro del Senescyt corresponde a número 1008-2017-1913044.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Loja, 28 de abril 2023.


Mgs. María Magdalena Saraguro T.
1102452800