



**PRUEBAS DE CONCENTRABILIDAD A ESCALA PILOTO PARA LA PERIDOTITA
SAPROLITIZADA RT50 Y PERIDOTITA RT60 PROVENIENTES DE LOS DEPÓSITOS
DE QUERESAS Y PORVENIR BAJO EL NUEVO SISTEMA DE CONCENTRACIÓN
OSMOC (ORE SORTING + MECHANICAL ORE CONCENTRATION)**

Eunice León Rodiño

Trabajo final semestre de industria para Ingeniera de Materiales

Asesores:

Maryory Astrid Gómez Botero - Ingeniera metalúrgica Universidad de Antioquia -CIDEMAT-
Illich Álvarez Mercado - Ingeniero metalúrgico UPTC – Especialista comisionamiento OSMOC-
Cerro Matoso S.A

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Pregrado

Medellín

2022

Cita	Leon Rodiño [1]
Referencia	[1] E. Leon Rodiño, “Pruebas de concentrabilidad a escala piloto para la peridotita Saprolitizada RT50 y peridotita RT60 provenientes de los depósitos de queresas y porvenir bajo el nuevo sistema de concentración OSMOC (Ore Sorting + Mechanical Ore Concentration)”, Pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.



Créditos a Cerro Matoso S.A. por prestar los medios para la realización del proyecto propuesto para el semestre de industria, excelente acompañamiento por parte del asesor externo quien guió cada uno de los procedimientos descritos a lo largo de este documento y al asesor interno por el apoyo en todo lo relacionado con la documentación para la Universidad.



CENDOI: Centro de Documentación de Ingeniería

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Francisco Javier Herrera Builes.

Dedicatoria

Este proyecto es dedicado a mi familia quien como pilar estuvo apoyándome en la realización de mi carrera especialmente a mi madre quien ha estado como mi principal apoyo durante todo el proceso de mi formación tanto personal como profesional y a mis hermanos quienes han velado por mi bienestar.

Agradecimientos

Primeramente le doy gracias a Dios quien abrió todas puertas necesarias para realizar mi etapa práctica, a la Universidad de Antioquia como formadora de todos los conocimientos durante mi etapa de formación profesional, a mi familia quien siempre ha creído en todo lo que puedo alcanzar, a Cerro Matoso como escenario final de mi etapa de formación por el conocimiento práctico e intelectual aprendido durante los seis meses que duró la experiencia y a todos aquellos que de una u otra manera han aportado para alcanzar cada una de mis metas

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
III. OBJETIVOS	14
A. Objetivo general	14
B. Objetivos específicos	14
IV. MARCO TEÓRICO	15
A. Ubicación mineral Queresas y Porvenir [7].	15
B. Procesos de concentración [6].	15
C. Proceso actual de preparación de mineral CMSA	16
D. Proceso a implementar en CMSA en preparación de mineral	17
E. Definición: Ensayos a escala piloto [1]	17
1). Objetivos logísticos	19
2). Objetivos de viabilidad	19
3). Planeación del estudio piloto	20
4). Tamaño de muestra	20
5). Recolección y análisis de la información	21
F. Muestreo y preparación de muestras minerales [2].	22
G. Muestreo	23
1). Etapas de un muestreo	25
2). Tipos de muestreo	25
H. Reducción de la Muestra	26
I. Granulometrías.	27

J. Meteorización	28
1). Definición:	28
2). Descripción del grado de meteorización de la roca	28
K. Definición de variables	29
V. METODOLOGÍA	31
A. BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	31
1). Diseño experimental DoE	31
2). Masa de pilas	31
3). Diseño experimental tipo de roca	32
B. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	32
1). Materiales Procesados	32
2). Procedimiento	33
C. Análisis de muestras	35
D. Componentes simulación OSMOC	36
1). Procesamiento en el Rubbler (corridas)	38
E. Ensayos	39
VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS	42
A. Análisis químico y porcentaje de humedad inicial de los diferentes tipos de rocas	42
B. Litología inicial	44
C. Clasificación por tamaños: Simulación RollerScreen	46
D. Rubbler piloto: concentración mecánica	47
E. Resultados de los índices de concentrabilidad (%UG) bajo todo el sistema OSMOC	49
1). Peridotita RT60	49
2). Peridotita Sapolitizada bajamente meteorizada RT50B	50
3). Peridotita Sapolitizada altamente meteorizada RT50A	51

5). Resultados químicos de los rechazos del Rubbler piloto	53
VIII. CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	58

LISTA DE TABLAS

TABLA I. EQUIPOS DE SIMULACIÓN SISTEMA OSMOC.....	37
TABLA II VARIABLES PARA EL PROCESO.....	39
TABLA III. CANTIDAD DE MUESTRAS PARA GRANULOMETRÍA.	40
TABLA IV. CANTIDAD DE MUESTRAS RUBBLER.	41
TABLA V. ANÁLISIS QUÍMICO INICIAL DE LOS TIPOS DE ROCAS ENSAYADAS FRENTE A LA CONFIGURACIÓN OSMOC.	42
TABLA VI. ANÁLISIS LITOLÓGICO INICIAL DE LOS TIPOS DE ROCAS ENSAYADAS FRENTE A LA CONFIGURACIÓN OSMOC.	45
TABLA VII. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE LA PERIDOTITA RT60 QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.....	50
TABLA VIII. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE PERIDOTITA SAPROLITIZADA BAJAMENTE METEORIZADA RT50B QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.....	50
TABLA IX. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE PERIDOTITA SAPROLITIZADA ALTAMENTE METEORIZADA RT50A QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.....	51
TABLA XI. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA SAPROLITIZADA ALTAMENTE METEORIZADA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.	53
TABLA XII. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA SAPROLITIZADA BAJAMENTE METEORIZADA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.	53
TABLA XIII. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.	54

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Enriquecimiento mineral - Meteorización de la roca [6].....	16
Fig. 2. Proceso actual de preparación de mineral [7].....	16
Fig. 3. Configuración OSMOC [7].....	17
Fig. 4. Tipo de muestreos [3].	25
Fig. 5. Cuarteo [3].	27
Fig. 6. Riffle [3].....	27
Fig. 7. Granulometría [3].....	28
Fig. 8. Esquema general de las pruebas desarrolladas.	35
Fig. 9. Simulación del Sistema OSMOC a escala piloto.....	38
Fig. 10. Análisis por tipo de corriente en el proceso.....	40
Fig. 11 Peridotita saprolitizada durante el zarandeo	43
Fig. 12 Peridotita saprolitizada bajamente meteorizada RT50B.....	44
Fig. 13 Peridotita RT60.....	44
Fig. 14 Fracciones granulométricas en campo con set de zarandas	46
Fig. 15 Porcentaje de masa retenido en cada malla.....	47
Fig. 16. Productos del equipo Rubbler.....	48
Fig. 17. Clasificado y rechazo final del Rubbler.....	49

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CMSA	Cerro Matoso S.A.
RT	Tipo de roca

OSMOC	Ore Sorting + Mechanical Ore Concentration.
UG	Upgrading (Concentrabilidad).
RPM	Revoluciones por minuto.
50A	Peridotita saprolitizada altamente meteorizada.
50B	Peridotita saprolitizada bajamente meteorizada.
60	Peridotita.
Q&P	Queresas y Porvenir
t	Tonelada

$$\% \text{ elemento (NiS, MgO...)} = \% \frac{\text{Peso}}{\text{Peso}} = \frac{\text{Peso del elemento}}{\text{Peso total de mineral}} * 100$$

RESUMEN

Queresas y Porvenir es un depósito alterno que actualmente tiene CMSA, ubicado cerca de Planeta Rica, el mineral extraído de allí es transportado hasta la planta principal ubicada cerca de Montelíbano, a partir de esto, al ser un depósito nuevo, se desea conocer el comportamiento que va a tener este mineral al ser sometido a un nuevo proceso de concentración. A partir de ensayos a escala piloto, se determinaron los factores de concentrabilidad que tienen algunos tipos de roca provenientes de este depósito, sometiéndolo a una configuración que simularía el nuevo sistema de concentración mecánica OSMOC, arrojando resultados positivos frente a este nuevo modelo, ya que con la nueva tecnología se podrá obtener un mejor comportamiento en temas de concentrabilidad en el Rubbler a bajas revoluciones, debido a la fragilidad de la roca, esto por el grado de meteorización de la misma lo que conlleva a que se fracture más rápido dentro del equipo, disminuyendo tanto el tiempo de residencia como la velocidad a la que se opere.

Mediante análisis de FRX se determinó la composición química de las diferentes corrientes arrojadas durante todo el proceso, mostrando el mejor comportamiento para la RT50A, ya que debido a su grado de alteración se caracteriza por ser una roca frágil con composición química homogénea que permite ser descascarada dentro del equipo. A lo largo de este trabajo se describe cada uno de los tipos de rocas con potencial de concentración provenientes de Queresas y Porvenir frente al nuevo sistema de concentración OSMOC.

***Palabras claves:* OSMOC, %Concentrabilidad de níquel, peridotita, peridotita saprolitizada altamente meteorizada, peridotita bajamente meteorizada.**

ABSTRACT

Queresas y Porvenir is an alternate deposit that CMSA currently has, located near Planeta Rica, the ore extracted from there is transported to the main plant located near Montelíbano. we want to know the behavior that this mineral will have when subjected to a new concentration process. From pilot scale tests, the concentrability factors that some types of rock from this deposit have were determined, subjecting it to a configuration that would simulate the new OSMOC mechanical concentration system, yielding positive results compared to this new model, since With the new technology, it will be possible to obtain better behavior in terms of concentrability in the Rubbler at low revolutions, due to the fragility of the rock, this due to the degree of weathering of the same, which leads to faster fracture within the equipment, decreasing both the residence time and the speed at which it operates.

Through XRF analysis, the chemical composition of the different streams released throughout the process was determined, showing the best behavior for the RT50A, since due to its degree of alteration it is characterized as a brittle rock with a homogeneous chemical composition that allows it to be shelled. within the team. Throughout this work, each of the types of rocks with concentration potential from Queresas and Porvenir is described in front of the new OSMOC concentration system.

Keywords — OSMOC, Concentrability of the nickel, Peridotite, highly weathered peridotite, low weathered peridotite.

I. INTRODUCCIÓN

Determinar las características fisicoquímicas de los diferentes minerales que se extraen de un depósito es primordial para conocer su comportamiento durante el procesamiento en la planta de recuperación. Basado en esto, para lograr caracterizar las fuentes de mineral de ferroníquel con las que cuenta Cerro Matoso S.A. se desarrollan pruebas que indiquen los factores que impacten su operación y la influencia de las nuevas tecnologías que implemente la compañía, con el fin de predecir el comportamiento de los diferentes minerales que entran al proceso pirometalúrgico, entregando al sistema factores de concentrabilidad y comportamiento en su etapa de trituración y concentración mecánica. En esta búsqueda CMSA, desea conocer el comportamiento de algunos tipos de rocas que tiene el mineral extraído del depósito más reciente llamado Queresas y Porvenir, bajo el nuevo sistema de concentración OSMOC (Ore Sorting + Mechanical Ore Concentration), este nuevo sistema pretende la concentración de minerales por vías mecánicas con el objetivo de enviar al proceso metalúrgico un material más concentrado, retirando la parte estéril por medios mecánicos.

Cerro Matoso S.A. a lo largo de los años ha buscado siempre el aprovechamiento óptimo de sus recursos. Basándose en esto desde el año 2001 ha venido desarrollando estudios e implementando tecnologías de concentrabilidad del grado de níquel que desde la mina se envía al proceso metalúrgico. Entre los años 2006 y 2014 se desarrollaron ensayos a escala piloto con los diferentes tipos de rocas que tiene el depósito, con el fin de determinar los factores con los cuales se obtendría la mayor cantidad de níquel en el clasificado, los ensayos realizados se mencionan a continuación:

- Pruebas de concentrabilidad para tipos de roca puras.
- Diseño conceptual de planta de concentración de níquel.
- Pruebas de concentrabilidad para tipos de rocas puras y mezclas de rocas presentes en el proceso, 2006.
- Pruebas de concentrabilidad para tipos de rocas puras y mezclas de rocas presentes en el proceso, 2014.

De los anteriores estudios se concluyó que es posible incrementar el grado de níquel que se envía al proceso metalúrgico con la ayuda de tecnologías que permitan separar la parte rica en níquel de

la parte estéril de algunos tipos de rocas presentes en el depósito, evitando que gran parte del material con tenor bajo de níquel logre ingresar a los secadores y posteriormente al proceso pirometalúrgico, contribuyendo a una mejor recuperación de ferroníquel.

Los resultados obtenidos hicieron referencias a los materiales que en esa época estaban disponibles y la proyección que se tenía de ellos, las pruebas consistieron en la construcción de un modelo de concentración mecánico llamado concentración II, para esto se instaló una planta piloto en las instalaciones de la Compañía para hacer este tipo de estudios a futuro. Consecuente a estos estudios la Compañía se encuentra en la implementación de un modelo de concentración en su etapa de preparación de mineral llamado OSMOC (Ore Sorting + Mechanical Ore Concentration) (Clasificación de minerales + Concentración mecánica de minerales), un proyecto que busca el aprovechamiento de los minerales de la Compañía incluidas todas sus fuentes de explotación para la optimización de su proceso.

Bajo este lineamiento en los años que se ha venido desarrollando este proyecto y que se encuentra en su fase de incorporación a la Compañía, no se contaba aún con la explotación del depósito de Queresas y Porvenir, un mineral que al ser una fuente externa a la mina de Cerro Matoso puede tener un comportamiento diferente frente a este modelo. Con el objetivo de conocer dicho comportamiento se realizaron unas pruebas a escala piloto bajo una configuración similar al sistema de concentración OSMOC, en donde se evaluaron tres tipos de rocas con potencial de concentrabilidad como es la peridotita saprolitizada baja y altamente meteorizada (RT50B, RT50A) y la peridotita (RT60), obteniendo composición química por medio de FRX; además se profundizó en el porcentaje de humedad, la litología y grado de concentrabilidad de cada una de ellas.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en el proceso de producción, para la optimización y aprovechamiento de sus recursos Cerro Matoso, se encuentra en la implementación de un nuevo modelo de concentración de mineral llamado OSMOC (Ore Sorting + Mechanical Ore Concentration) (Clasificación de minerales + Concentración mecánica de minerales), diseñado para la concentración mecánica que actúa directamente en el mineral laterítico. Bajo este criterio, se desea determinar los índices de concentrabilidad de algunos tipos de rocas presentes durante el proceso, como lo son la peridotita Saprolitizada RT50 y Peridotita RT60 provenientes del depósito de Queresas y Porvenir, ya que sus características tanto litológicas como de humedad y composición química podrían variar con respecto a los minerales extraídos de la mina principal de CMSA, para hacer la evaluación se hace necesario la ejecución de unas pruebas a escala piloto con una configuración similar al sistema que está implementando la compañía para el mineral proveniente de esta zona. La ejecución de estas pruebas pretende dar respuesta al comportamiento del mineral en cuanto a factores de concentrabilidad, composición química, granulometría, generación de finos y litología.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar factores de concentrabilidad para la Peridotita Saproilitizada RT50 y Peridotita RT60 provenientes de Queresas y Porvenir usando una configuración similar al sistema OSMOC por medio de unas pruebas a escala piloto.

B. Objetivos específicos

- Evaluar composición química, mediante FRX; la granulometría, la generación de finos y litología para las rocas a ensayar.
- Conocer el porcentaje de Níquel del mineral de rechazo producto de la clasificación mecánica (OSMOC) por medio de FRX.
- Determinar los porcentajes de rechazo para los tipos de roca de Q&P en la configuración OSMOC.

IV. MARCO TEÓRICO

A. *Ubicación mineral Queresas y Porvenir [7].*

El proyecto de aprovechamiento de recursos minerales en los cerros Queresas y Porvenir está ubicado en el municipio de Planeta Rica, Córdoba; el cual le permitirá a Cerro Matoso mantener los niveles de producción, contribuyendo a su sostenibilidad. El proyecto cuenta con licencia ambiental otorgada por la ANLA.

B. *Procesos de concentración [6].*

El proceso de incrementar la ley de níquel en el material procedente de mina y que es entregado al proceso se basa en los siguientes aspectos:

- ✓ Propiedades de los diferentes tipos de rocas del depósito geológico, entre las que se destacan su dureza, meteorización y enriquecimiento en níquel. Es decir que el níquel en las rocas concentrables se encuentra principalmente en las fracciones blandas y mayormente meteorizadas, como se ilustra en la Figura 1. Existen rocas que no concentran (ejemplo: taquilita, saprolito negro, lateritas) básicamente debido a que la presencia de níquel en ellas es relativamente homogénea.
- ✓ Contaminación intrínseca del mineral que es enviado al proceso, debida al proceso de minería (tamaño de equipos de cargue y acarreo, voladuras, soporte en pisos de cargue, etc.) y heterogeneidad del yacimiento geológico (contacto del mineral con estéril, alteración de la roca que produce una concentración diferencial de níquel en la misma roca).



Fig. 1. Enriquecimiento mineral - Meteorización de la roca [6].

Los tipos de rocas tienen características físicas diferentes entre ellos (dureza, nivel de intemperismo, potencial de concentrabilidad del níquel, etc.). Las rocas susceptibles de mejoramiento (peridotita saprolitizada, saprolita verde y sus combinaciones con otros tipos de rocas) contienen la mayor parte del material que contiene níquel en la fracción más blanda y altamente degradada.

C. Proceso actual de preparación de mineral CMSA

En la Figura 2 se muestra el proceso actual que tiene la Compañía para concentrar mineral, que consiste en una zaranda vibratoria que rechaza partículas de tamaño mayor (consideradas con bajo contenido de níquel según los resultados de las pruebas realizadas), además de bandas transportadoras para transportar por separado los dos flujos de material (rechazos y clasificados).

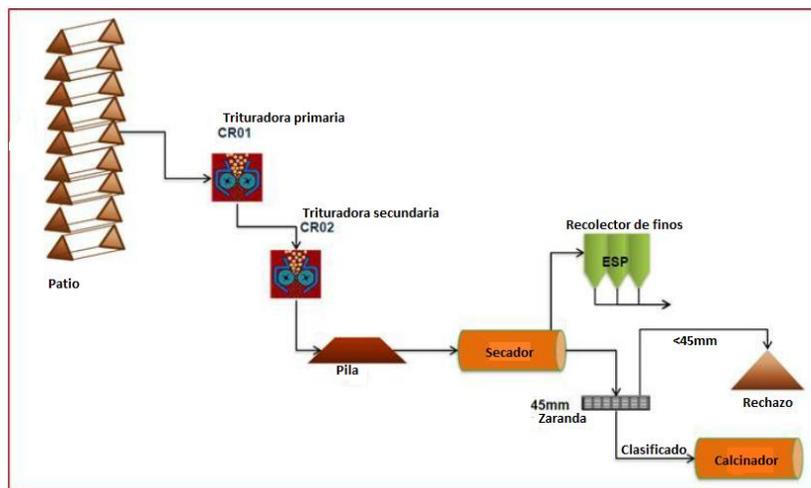


Fig. 2. Proceso actual de preparación de mineral [7].

D. Proceso a implementar en CMSA en preparación de mineral

El nuevo sistema de concentración se ilustra en la Figura 3, como se puede observar hay tres equipos nuevos que ingresan al sistema como son el CrusherSizer que es una trituradora, Rollerscreen que es un clasificador y el Rubbler que es un equipo de concentración mecánica que por medio de un proceso de conminución logra separar la parte rica en níquel del mineral que se ingresa al equipo [7].

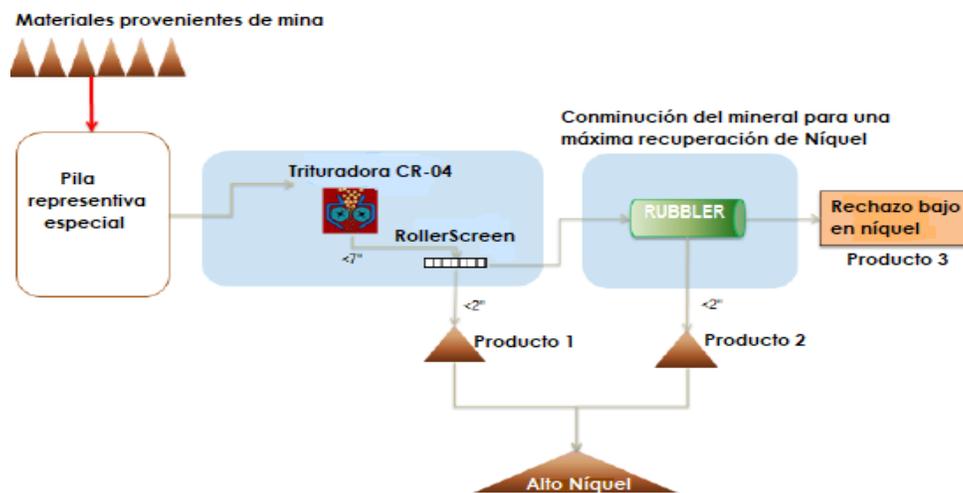


Fig. 3. Configuración OSMOC [7].

En el nuevo sistema OSMOC, el mineral es triturado con una trituradora CR-04 con una apertura de 190 mm, es transportado hacia el RollerScreen quien separará las partículas mayores a 50 mm que serán enviadas al Rubbler donde se produce la separación de la parte enriquecida de la roca y se enviará al rechazo.

E. Definición: Ensayos a escala piloto [1]

La definición de estudio piloto no es unánime y se podría decir que varía conforme las necesidades de cada campo de investigación y del diseño de estudio, sin embargo, la mayoría de las definiciones coinciden en que permiten planear un estudio de mayor escala o magnitud.

Un estudio piloto es un estudio pequeño o corto de factibilidad o viabilidad, conducido para probar aspectos metodológicos de un estudio de mayor escala, envergadura o complejidad. La naturaleza de estos estudios es evitar la aparición de un defecto que sería nefasto en un estudio posterior que es costoso en recursos. La definición permite inferir que no deberían diseñarse para responder preguntas o hipótesis de investigación, sino para responder preguntas de métodos específicos, es decir, evaluar la adecuación de los métodos y procesos, lo que evitará iniciar investigaciones de mayor escala sin un conocimiento o certeza del funcionamiento de los métodos que se proponen. Por lo anterior, se espera que un estudio piloto se desarrolle por razones de proceso (pasos que deben llevarse a cabo como parte del estudio principal), de recursos (tiempo y presupuesto necesarios para el estudio principal), de gestión (de recursos y datos) y científicas (mediciones y seguridad del participante).

Al mismo tiempo, se pueden encontrar dos tipos de estudios piloto: 1.) el de viabilidad o factibilidad, que se enfoca en precisar si es realizable o posible el estudio principal; 2.) los piloto aleatorizados y no aleatorizados, que se asemejan al grupo anterior, pero serán el sustento para estudios de intervención más complejos. Sin embargo, también es imperativo diferenciarlos de los estudios exploratorios, éste último se conduce para comprobar en una menor escala una hipótesis de investigación, usualmente relacionada al conocimiento de los mecanismos o eficacia de alguna intervención.

Considerando la definición de un estudio piloto, se pueden definir 7 objetivos principales de un estudio piloto:

1. Probar la integridad del protocolo de estudio para el futuro estudio
2. Obtener estimaciones iniciales para el cálculo del tamaño de la muestra
3. Probar formularios o cuestionarios de recolección de datos
4. Probar los procedimientos de asignación al azar
5. Estimar las tasas de reclutamiento y consentimiento
6. Determinar la aceptabilidad de la intervención
7. Seleccionar las medidas más apropiadas del desenlace primario

Es factible que el estudio abarque uno o más objetivos, los cuales se pueden agrupar en dos tipos: objetivos logísticos y objetivos de viabilidad. Esta propuesta de clasificación permitirá orientar el alcance y planeación del estudio piloto, como se detalla más adelante.

1). Objetivos logísticos

Los objetivos logísticos de un estudio piloto se refieren a aspectos operativos y organizacionales de la investigación, abarcando los asuntos de evaluación de tiempos, necesidad de recursos y manejo de información. La evaluación de tiempo se centra en contabilizar la duración de los procesos de la investigación: procedimiento de consentimiento informado, desplazamientos, tiempo en la búsqueda de participantes, sistematización de la información, entre otros. La identificación de necesidades de recursos se refiere a: cantidad de personal, definir perfiles o funciones de cada ayudante de investigación, métodos de transporte (investigadores, muestras y/o participantes), permisos de acceso, entre otros. Respecto al manejo de información, se debe contemplar la pertinencia de los equipos de recolección, disponibilidad de la información (registros, entrevistas, bases de datos, etc.), interpretación de preguntas/cuestionarios, aplicabilidad de los criterios de selección y cantidad de información completa.

2). Objetivos de viabilidad

Son los enfocados hacia responder preguntas relacionadas a la posibilidad de hacerse o no el estudio principal, como sería: porcentajes (reclutamiento, respuesta, retención y/o seguimiento), seguridad del paciente (en las mediciones y/o intervenciones), viabilidad de realizar una medición, posibilidad de acceder a la información u obtener un parámetro.

Además, el estudio piloto ayuda a asegurar al financiador que el estudio se puede hacer y que es un estudio en que vale la pena invertir; la ejecución y finalización de un piloto permite observar la capacidad de trabajo del equipo de investigación, es decir, muestra que el equipo de investigación puede y ha trabajado en conjunto para completar con éxito el estudio piloto, lo cual es un buen indicio para el proyecto principal.

Por otra parte, el estudio piloto también permite evaluar el lugar o sitio de ejecución del estudio, lo cual incluye: la infraestructura, acceso a los participantes, disponibilidad de información y colaboración de los trabajadores del lugar.

3). Planeación del estudio piloto

La planeación del estudio piloto deberá ser tan rigurosa como en otros estudios, debido a que aportará información valiosa para mejorar la metodología de investigaciones posteriores de mayor envergadura, es decir, no valdría la pena desarrollar un proyecto de investigación costoso a partir de información inválida o poco confiable. Además, la publicación de un estudio piloto es viable, por lo que su planeación y detalle deberán estar al nivel de una publicación científica; de ahí que se consideren aspectos similares a los de un protocolo: problema, pregunta(s) de investigación, justificación, objetivos, materiales y métodos y resultados esperados.

También es relevante considerar su vínculo o nexo con el estudio posterior y de mayor envergadura, en otras palabras, es necesario mantener en mente el siguiente estudio o estudio principal. Por tanto, y considerando los objetivos del piloto, el protocolo del estudio piloto podría estar inmerso en el protocolo de investigación del estudio principal (usualmente en la sección de métodos o con un apartado en el anexo) o podría demandar un protocolo aparte y previo al estudio principal, que deberá ser revisado y aprobado por un comité de ética (según las normas de cada institución/país y el riesgo al que estén expuestos los participantes).

A sí mismo, si uno de los objetivos del estudio piloto es evaluar asuntos relacionados a las mediciones de la investigación principal, se deberán realizar mediciones de manera idéntica a las del estudio principal. Cabe destacar que, si una investigación involucra la aleatorización y/o ocultamiento, su ejecución en el estudio piloto deberá ser meditada, debido a que el mismo procedimiento podría o no ocultar en el piloto aspectos relevantes para la ejecución del estudio principal, como eventos adversos, pérdida de pacientes, adherencia a la intervención, etc.

4). Tamaño de muestra

Un aspecto fundamental en el estudio piloto es la cantidad mínima de sujetos a incluir, que sean suficientes para responder los objetivos del piloto y que representen un segmento pequeño de la investigación principal. Por lo tanto, en el cálculo del tamaño de muestra de los estudios piloto se deben considerar uno o ambos de los siguientes escenarios: a.) si los objetivos del piloto se relacionan a objetivos de viabilidad o logísticos, de manera subjetiva se debe estimar a priori la probabilidad de los eventos indeseables en el estudio; b.) si en el estudio piloto se desea obtener información para el cálculo de la muestra del estudio principal, para la estimación del número de sujetos se podrían modificar los valores relacionados al error estadístico (disminuir la confianza y el poder); estos dos escenarios se detallan en los siguientes párrafos.

El cálculo de tamaño de muestra empleado para identificar un problema o evento indeseable en el estudio piloto, se basa en una probabilidad a priori que el investigador dé a los eventos indeseados esperados.

Para el caso particular de obtener un parámetro a partir de un piloto que permita calcular el tamaño de muestra del estudio principal, se ha sugerido emplear las mismas fórmulas que se utilizarían en el proyecto de investigación de mayor envergadura, pero aumentando los valores de error a un nivel admisible, es decir, aumentar el valor de la significancia estadística (fijar valores por encima de 0.05) y disminuir el valor del poder (contemplar valores inferiores a 0.8). Por lo anterior, los resultados del estudio piloto deberán ser interpretados a la luz de dichas modificaciones y deberán asumirse que poseen cierto nivel error.

Para el caso de los ensayos pilotos ejecutados se tomó como referencia un estudio realizado por la Compañía para los minerales de la mina principal y lo que se buscó fue replicar esos ensayos con un tamaño de muestra aproximado entre 4.5 – 5 toneladas para asegurar que sea representativo para cada uno de los tipos de roca que se ensayaron.

5). Recolección y análisis de la información

En la recolección de información se debe reunir de manera paralela la información del estudio principal y datos sobre la ejecución del estudio, estos últimos serán relacionados al objetivo del estudio piloto y al cálculo del tamaño de muestra del piloto.

Además, el análisis de información usualmente no trasciende de un análisis descriptivo de la información (frecuencias, porcentajes, promedios, medianas y/o rangos). Es de recordar que la comparación de valores, prueba o contraste de hipótesis no es aconsejable en los estudios piloto, debido a que el tamaño de muestra y la rigurosidad del piloto (por ejemplo selección de participantes a conveniencia o la ausencia de enmascaramiento, ocultamiento y/o aleatorización) podrían afectar la validez de los resultados. En el mismo sentido, se debe resaltar que la discusión de los resultados de un estudio piloto deberá relacionarse a la identificación de problemas en la ejecución del estudio y formular sus respectivas soluciones.

Otro aspecto a considerar en el análisis es la inclusión de los participantes del estudio piloto en la investigación principal. Cada caso es diferente, debido a que se debe considerar la posibilidad que los participantes del piloto contaminen o alteren el principal; si hay modificación del protocolo del estudio posterior al piloto, la inclusión de los participantes sería inadecuado. También se debe contemplar que los participantes del piloto pueden representar parcialmente a los del estudio principal, debido a que ya sufrieron la exposición y/o aleatorización, lo que podría sesgar los resultados del estudio principal

F. Muestreo y preparación de muestras minerales [2].

Para asegurar la correcta representatividad de las muestras es muy importante aplicar un diseño de toma de muestras apropiado que asegure que los resultados finales son reproducibles.

A partir de muestra tomadas se realizan todas las operaciones necesarias destinadas a la preparación de muestras para la realización de análisis de minerales y ensayos geoquímicos o metalúrgicos, con la máxima trazabilidad del proceso, y con precauciones exigentes para evitar contaminaciones.

Entre las operaciones que se llevan a cabo:

- Secado
- Trituración
- Molienda
- Refinado

En cada una de ellas, además, se aplican técnicas de homogeneización, cuarteo y división de muestras, para la obtención de sub-muestras y alícuotas.

G. Muestreo

En la evaluación de un depósito o mina es necesario conocer la cantidad y calidad del mineral valioso [3].

- El precio de compra o derechos de la propiedad
- La exploración, preparación y desarrollo del yacimiento
- Los determinados en el proceso de exploración. Para que el negocio minero sea atractivo, el mineral medido deberá pagar gastos de organización
- Las instalaciones y equipos
- Los costos de explotación y tratamiento
- Los gastos generales de administración
- Los gastos de comercialización
- La devolución del capital
- La ganancia de la empresa

Por lo tanto, con base en los datos obtenidos en el proceso exploratorio se debe determinar la cantidad y calidad del mineral para establecer la factibilidad del proyecto. Los datos de la exploración se necesitan para decidir inversiones, para definir un proyecto de desarrollo futuro, para establecer un valor de compra-venta, o para decidir un préstamo bancario. Para estos casos se puede evaluar:

- Un prospecto para decidir su puesta en operaciones
- Yacimientos con laboreos incipientes o minas apenas trabajadas
- Minas preparadas pero que no han entrado en producción
- Minas en operaciones que deseen aumentar el ritmo de producción

Principios básicos del muestreo

La tarea más compleja del proceso de exploración es definir los dos parámetros antes citados: Cantidad y calidad del mineral estimado en una anomalía, para que la empresa pueda arribar a una decisión fundamentada. Para disponer de los datos suficientes para llegar a una estimación de reservas, el paso fundamental es definir las características químicas (leyes, características mineralógicas y comportamiento mineralúrgico) y físicas (dureza, fragilidad, cohesión, tamaños) del mineral en cuestión.

Muestra: Es una porción de un conjunto, extraída por métodos que permiten considerarla como representativa del mismo.

Muestreo: Es la acción de recoger muestras representativas de un todo, para inferir el valor de una o varias características del conjunto.

Población o lote: Es el conjunto completo de observaciones que deseamos estudiar. En un primer paso se debe establecer que entidades se van a estudiar: leyes/contenidos, espesores/ potencia, densidad/peso específico, etc. La condición básica es que la muestra sea representativa, es decir, que en ella se encuentren representadas todas las características propias de la población, en este caso, de la masa mineralizada.

Como se puede observar en la Figura 4. el muestreo estadístico es diferente del muestreo de minerales:

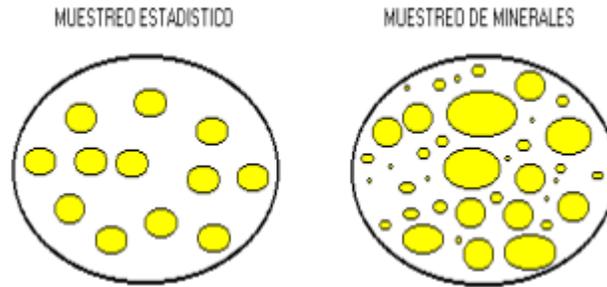


Fig. 4. Tipo de muestreos [3].

En el muestreo estadístico, el lote o población está compuesto por objetos de igual peso. En el muestreo de minerales, el lote está compuesto de objetos de diferentes pesos.

En las etapas de un proyecto minero, desde la exploración hasta el cierre de la mina, casi todas las decisiones que se toman están basadas en valores obtenidos de material muestreado. Estas decisiones representan millones de dólares.

1). Etapas de un muestreo

En todo muestreo, debe estar bien establecido lo siguiente:

- Objetivo del muestreo
- Población a muestrear
- Datos a recolectar
- Manera de recolectar los datos
- Grado de precisión deseado
- Método de medida

Para cumplir bien con la definición inicial de muestreo, se debe cumplir el hecho siguiente, de vital importancia: El muestreo debe ser equiprobable.

2). Tipos de muestreo

La toma de muestras puede hacerse de modos diferentes:

Muestreo aleatorio simple: Son muestras extraídas al azar en el yacimiento, cumpliendo el requisito probabilístico de que cada muestra tiene la misma probabilidad de ser elegida.

Muestreo aleatorio sistemático: En este caso las extracciones de las muestras son determinadas según una regla fija. Consiste en elegir muestras tomándolas a intervalos sistemáticos, o mediante una malla o grilla. Este método permite cubrir todo el yacimiento dando a toda la población la misma oportunidad para quedar incluida en el muestreo. Debe analizarse cuidadosamente el intervalo de muestreo porque existe el peligro de que la mineralización tenga ciclos, de modo que si las muestras caen siempre en un alto o siempre en un bajo se conducirá a conclusiones erróneas.

Muestreo orientativo no probabilístico: Estas muestras pueden ser de gran ayuda en las etapas preliminares para obtener información en sectores específicos del yacimiento, donde se observen aspectos característicos como asociaciones mineralógicas, alteraciones, tipos de ganga, características de las cajas, elementos nocivos, características geotécnicas. Aunque estas muestras no tienen base teórica suficiente para ser utilizadas en una estimación seria de calidad y volumen, pueden ser de gran ayuda en los inicios de la exploración.

Exactitud y Precisión: En teoría del muestreo de minerales se utilizan las nociones de exactitud y precisión. En términos estadísticos estos conceptos corresponden respectivamente a la media, la cual debe ser insesgada (exactitud) y a la varianza del error, la cual debe ser pequeña (precisión).

Para hacer la toma de muestras de todas las rocas ensayadas se usó el **muestreo orientativo no probabilístico**, el cual garantizó la masa mínima del tipo de roca que se ensayó y que el porcentaje presente de cada una de ellas en cada muestra fuera en mayor proporción con respecto a otros minerales que podrían estar presente.

H. Reducción de la Muestra

La reducción o división de una muestra es necesaria en la práctica. Principalmente se utiliza el Cuarteo y el Riffle. El cuarteo manual el cual se tuvo en cuenta para tomar las muestras en campo

para posteriormente ser enviadas al laboratorio de CMSA, debe realizarse en forma cuidadosa como se observa en la Figura 5:

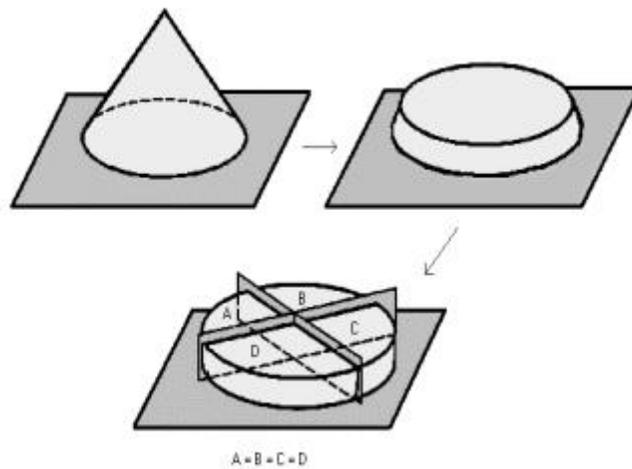


Fig. 5. Cuarteo [3].

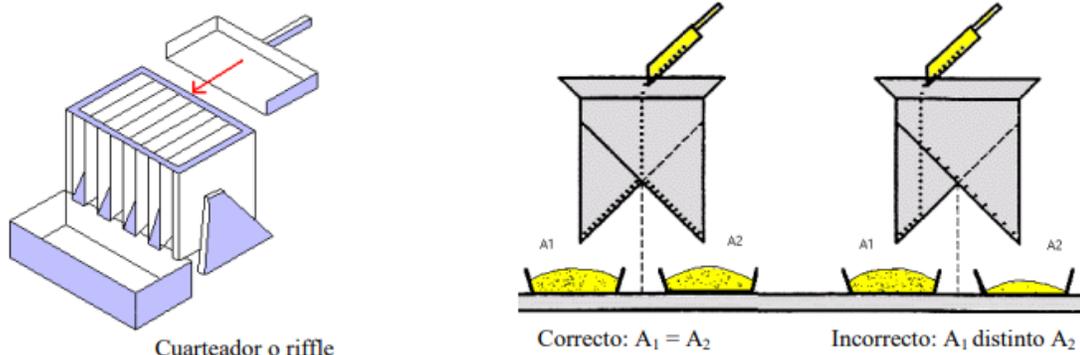


Fig. 6. Riffle [3].

La Figura 6 muestra un Riffle y la manera adecuada de cargarlo. Debe realizarse en el centro, lentamente, con una pala adecuada. Esto asegura que las 2 submuestras son aproximadamente iguales (para garantizar la equiprobabilidad).

I. Granulometrías.

El estudio de las granulometrías es muy importante dado que a menudo la ley de los finos es significativamente diferente de la ley de los gruesos. Se utilizan tamices como en la Figura 7a. Si se compara la granulometría de la figura 7b con la de la figura 7c se observa su diferencia.

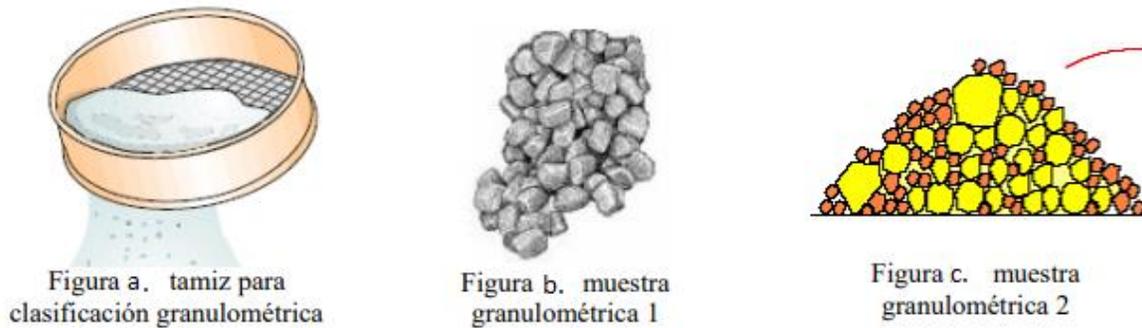


Fig. 7. Granulometría [3].

J. Meteorización

1). *Definición:* La meteorización está definida como el proceso de separación de la roca y materiales del suelo sobre y cerca de la superficie de la Tierra por destrucción química o desintegración física. La susceptibilidad de la roca a procesos de meteorización química es función de la mineralogía, textura y presencia de fracturas, aumentando cuando el tamaño del grano es más fino. Sin embargo, se considera que el control dominante en el modo de meteorización es la lluvia y la temperatura, al igual que el rápido cambio de dichas variables durante el día. Es por esto que masas rocosas en ambientes tropicales húmedos se caracterizan por la generación de profundos perfiles de meteorización, en algunos casos con horizontes superficiales enriquecidos en óxidos de hierro y aluminio conocidos como lateríticos [4].

2). Descripción del grado de meteorización de la roca

Fresca (Sana): No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa, tal vez ligera decoloración sobre las superficies de las discontinuidades principales.

Ligeramente Meteorizada: Se observan cambios en el color original de la roca matriz. Es conveniente indicar el grado de cambio. Todo material rocoso puede estar decolorado por meteorización y puede ser algo más débil externamente que en su condición fresca.

Moderadamente meteorizada: menos del material rocoso está descompuesto y/o desintegrado en suelo. Roca fresca y decolorada está presente aún, formando un esqueleto discontinuo o como núcleos de roca.

Altamente meteorizada: más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada en suelo. La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original formando un esqueleto discontinuo o como núcleos de roca. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.

Completamente meteorizada o descompuesta: la roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos. La estructura original del macizo es aun en gran parte reconocible.

Suelo residual: todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

K. Definición de variables

A continuación, se detallan cada una de las variables presentes en el proceso:

Factor: Variable de interés para evaluar su efecto sobre las variables respuesta. En este caso los factores son el tipo de roca, las revoluciones por minuto a las que se realizaron los ensayos y tiempo de residencia en el Rubbler.

Variables Controladas: Variables cuyo impacto en las variables respuesta desea ser minimizado y/o controlado.

- ✓ **Granulometría:** se refiere al tamaño de las partículas de las diferentes corrientes.
- ✓ **Volumen de llenado:** Se refiere al volumen de material que debe mantener el Rubbler en su interior durante el proceso, para lograr el mejor efecto de concentración (UG). Equivale al 15% del volumen total del Rubbler.
- ✓ **Masa de ensayo:** Se refiere a la masa de material total de un ensayo.

Variables No Controladas: Variable cuyo impacto en las variables respuestas no es controlado.

- ✓ **Humedad:** Se refiere a la humedad de entrada del material de los ensayos.

Variable de Respuesta: Variable en que se pretende observar cambios ocasionados por cambios en los factores.

- ✓ **Concentrabilidad (UG) (%):** Se refiere al incremento en la concentración de Ni, Fe, MgO, Al₂O₃ y SiO₂, producto del procesamiento de los materiales.
- ✓ **Química del material clasificado, por granulometría:** Se refiere a la composición química de los materiales enriquecidos en níquel producto del proceso de concentración, distribuido por tamaños de mallas.
- ✓ **Química del material rechazado, por granulometría:** se refiere a la composición química de los materiales empobrecidos en níquel producto del proceso de concentración.
- ✓ **Masa rechazo:** se refiere a la masa del material empobrecido en níquel producto del proceso de la concentración y es retirado como rechazo.
- ✓ **Masa recuperada:** Se refiere a la masa del material enriquecido en níquel producto del proceso de recuperación y que sería alimentado al proceso productivo.

V. METODOLOGÍA

A. BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para determinar el procedimiento para realizar las pruebas se hizo una búsqueda de pruebas similares realizadas en la compañía para el mineral que se extrae de allí obteniendo la base para la realización de la misma.

1). Diseño experimental DoE

Se entiende el Diseño de Experimentos como una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Mas técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida. El DoE es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción [5].

2). Masa de pilas

Uno de las primeras preguntas a resolver consiste en cuál es la masa de las pilas que se van construir para ser procesadas por la planta piloto de UG fase II, construir las pilas para cada ensayo por tipo de roca tanto para tipos de rocas puros, como para mezclas es importante; puesto que si los ensayos son realizados con unas pilas construidas con tamaño insuficiente, los errores por los muestreos realizados para construir las pilas pueden ser muy altos e imposibilitar tomar conclusiones con suficiente certeza sobre los resultados.

Para obtener los tamaños de pila adecuados se requiere conocer el tamaño de partícula de percentil 95 de granulometría del material que va a ser procesado por la planta piloto de UG II, de los ensayos de optimización de voladura se encontró que el percentil 95 de los minerales de voladura que van

ingresar a UG fase II, es de 300 mm, con este tamaño de partícula y con la constante de muestreo $K= 2.30$ obtenida por un estudio en la mina, se tendría un error de muestreo de 5% con un tamaño de muestra de 4.5 toneladas [6].

3). Diseño experimental tipo de roca

Para los ensayos por tipo de roca se busca conocer los porcentajes de concentrabilidad de Ni principalmente, la proporción de material rechazado (%Rechazo) por tipo de roca, esto se considera un Diseño de Experimentos (DoE) a un factor teniendo en cuenta los tipos de roca, en este diseño experimental se consideran dos factores principales el tipo de roca y tiempo de residencia del mineral en los diferentes procesos, para tipos de roca puros se considera un diseño experimental a dos factores [6].

B. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1). Materiales Procesados

Peridotita saprolitizada altamente meteorizada (RT50A), Peridotita saprolitizada bajamente meteorizada (RT50B) y Peridotita (RT60)

Peridotita Saprolitizada (RT 50): Es el primer estado de alteración de la peridotita por ende presenta altos contenidos de óxido de Magnesio (MgO). La alteración típica incrementa del núcleo de la roca hacia la parte externa, lo que permite la separación de la zona mineralizada (parte externa) mediante procesos mecánicos. Roca muy dura, compacta, y de estructura masiva. Textura granular de apariencia moteada, muy serpentizada con magnetita asociada y bastita a partir de piroxeno. Presenta esporádicas venillas irregulares de carbonatos.

Según el contenido de óxidos de magnesio (MgO) se clasifican en:

Peridotita saprolitizada altamente meteorizada (RT50A): es una peridotita saprolitizada con niveles más altos de óxidos de magnesio lo que la hace una roca más frágil y por ende la distribución de níquel es más homogénea.

Peridotita saprolitizada bajamente meteorizada (RT50B): Es una peridotita saprolitizada con niveles un poco más bajos de óxidos de magnesio lo que la hace una roca un poco más dura que la anterior, con menos contenido de níquel.

Peridotita (RT60): Es la roca madre por la que está compuesto el yacimiento, es una roca dura con porcentajes bajos de níquel, por esta razón entra al proceso como parte de la dilución ya que es considerada una roca estéril, su porcentaje de níquel varía entre 0,2-0,3 %.

Para los 6 ensayos se necesitaron 10 toneladas de cada uno de estos tipos de roca para un total de 30 t, donde predominara al menos el 60% de cada una de ellas en la muestra a tratar. Para cada tipo de roca se tomaron muestras de mínimo 4.5 t (por ensayo) para un total de 2 muestras por tipo de roca [6].

2). Procedimiento

Lo primero que se definió fue el tipo de roca que está presentando mayor porcentaje de rechazo en el depósito que actualmente se está explotando en Q&P, las cuales son las rocas peridotita altamente meteorizadas (RT50A), peridotita bajamente meteorizada (RT50B) y peridotita (RT60). Para empezar, se habilitó una zona amplia en mina para hacer el tamizado y clasificado de las muestras, donde se separaron en 2 pilas de mínimo 5 toneladas por cada tipo de roca, para un total de 30 toneladas para los 6 ensayos.

Todo el mineral se pasó por la trituradora LOKOTRACK para reducir su tamaño a 144 mm y así facilitar la clasificación. Con cada muestra de cada tipo de roca ya separada e identificada en pilas de aproximadamente 5 toneladas, se llevó a cabo una granulometría en campo y otra en laboratorio, para determinar la cantidad de finos que se generan en el proceso.

En campo se pasaron 3 pilas, de las 6 destinadas para los análisis, por un set de mallas de 50 mm, 40 mm, 30 mm, 15 mm y fondo, y con el retenido de cada una de estas mallas se procedió a tomar muestras para litología y laboratorio por medio de cuarteo.

Para la granulometría en laboratorio, se tomaron las 3 pilas restantes, se hicieron pasar por una malla de 50 mm, y por medio de cuarteo se tomaron muestras del retenido y del pasante, al pasante se le hizo granulometría con un set de mallas de 50 mm, 40 mm, 31.5 mm, 12.5 mm y fondo; disponibles en el laboratorio de CMSA con las normas estandarizadas para ensayos dentro de la empresa.

Adicional a las muestras anteriormente descritas, se tomaron dos muestras del retenido en malla 50 de aproximadamente 450 Kg por pila, para un total de 12 muestras que se procesaron en la planta piloto UGII.

Una vez se tuvieron las muestras para cada tipo de roca almacenadas en Big Bags, éstas se llevaron a la planta piloto de concentración II, ubicada en el área 100 al lado de “Casa Verde”. Aquí, el mineral se volvió a pesar, para corroborar el peso exacto que se procesaría en el Rubbler. Una vez se tuvo la masa inicial, se introdujo al Rubbler y las variables con las que se operó el equipo son el tiempo de residencia, que fue de 10, 20 y 30 min respectivamente; y la velocidad (rpm) que fue alta (11.6 rpm) y baja (7 rpm). Después de este proceso, se obtuvo un clasificado y un rechazo.

Una vez se completó el procedimiento, se tuvo una corriente de rechazo total (Muestra laboratorio) y de clasificado (Muestra laboratorio) de las 5 toneladas iniciales, donde se podrá calcular el %UG para el mineral procesado. En la Figura 8 se esquematiza el procedimiento.

Para medir la composición química de las muestras y poder obtener el %UG del mineral, se tomaron varias muestras en varios puntos durante el proceso que veremos más adelante.

En la Figura 8, se esquematiza todos los pasos descritos anteriormente desde mina hasta la planta de concentración II donde se encuentra el equipo Rubbler que es el último procesamiento que se le dan a las muestras.

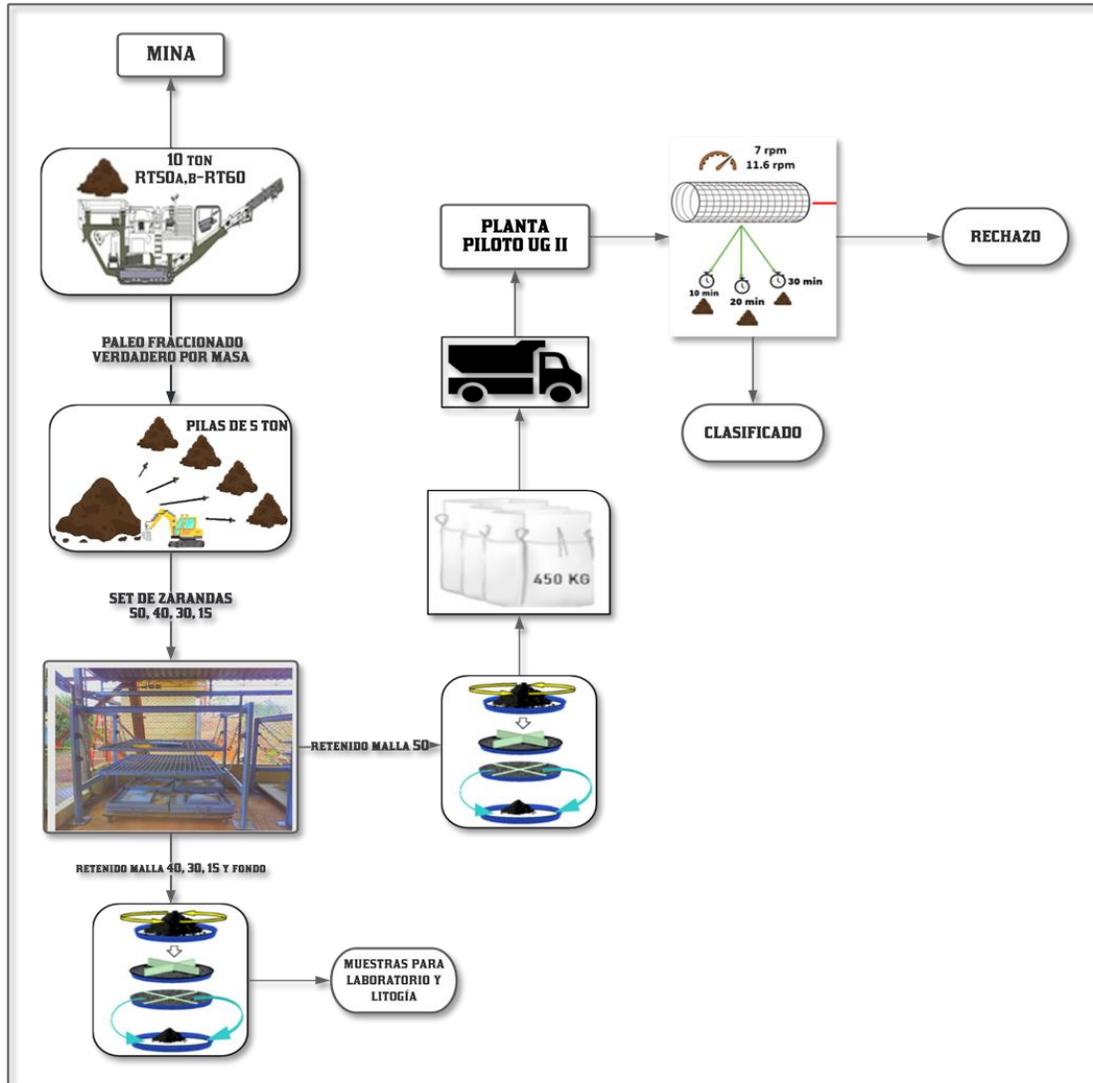


Fig. 8. Esquema general de las pruebas desarrolladas.

C. Análisis de muestras

Para calcular el porcentaje de concentrabilidad (%UG), que se tiene después de ingresar los diferentes tipos de rocas por la simulación del sistema OSMOC, se tomaron varias muestras, en los puntos que se describirán más adelante, que fueron procesadas por el equipo de laboratorio de Cerro Matoso S.A. bajo las normas establecidas por la empresa para el reporte de pruebas especiales, los requerimientos para laboratorio fueron:

- ✓ Análisis químico por FRX (%Ni, %Fe, y demás analitos presentes en la muestra) de cada una de las muestras tomadas durante el proceso.
- ✓ Análisis químico por tamices (FRX), tamices disponibles en el laboratorio de la Empresa, donde se analizaron la cantidad de material fino que generan estos tipos de rocas.
- ✓ Análisis litológico de los rechazos: se refiere a los tipos de roca que quedan al final de todo el proceso, el cual consiste en la clasificación del tipo de rocas según la mineralogía descrita por un geólogo de la Empresa con experiencia en el depósito.

Una vez obtenido el reporte de laboratorio se procedió a realizar los cálculos para hallar el grado de concentrabilidad que se obtiene al final del proceso de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2, que mide la cantidad de níquel que se recupera al ser retirada la parte estéril del mineral, entre mayor sea este número quiere decir que al proceso metalúrgico se enviará más contenido de níquel en el mineral bajando los porcentajes de material estéril.

Porcentaje de concentrabilidad (%UG)

$$\%UG = \frac{\%Niquel\ Clasificado - \%Niquel\ Inicial}{\%Niquel\ Inicial} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Porcentaje de rechazo

$$\%Rechazo = \frac{Masa\ final - Masa\ inicial}{Masa\ inicial} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Níquel en el rechazo

Se refiere al porcentaje de níquel en los rechazos (mineral que será enviado a los botaderos), que se espera sea mucho menor que el que ingresa al sistema inicialmente.

D. Componentes simulación OSMOC

Para la simulación del nuevo sistema de concentración OSMOC a escala piloto se tuvieron configurados los equipos que se relacionan en la Tabla I:

TABLA I. EQUIPOS DE SIMULACIÓN SISTEMA OSMOC

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
Trituradora Lokotrack (CrusherSizer)	GAP: 144 mm
Serie de mallas (RollerScreen)	50, 40, 30, 15 (mm) y fondo
Rubblor	Capacidad: 300 – 450 Kg
	Tiempo de residencia: 10, 20 y 30 min
	Rpm: 7 y 11.6
Ángulo de inclinación	0°
Tamices Tyler	Disponibilidad de laboratorio

Se hizo una trituración primaria una vez se tuvo la masa disponible para cada ensayo en la trituradora LOKOTRACK. Luego se pasó el mineral por una serie de zarandas con apertura de 50 mm, 40 mm, 30 mm, 15 mm y fondo que estaría simulando el RollerScreen, el retenido (>50 mm) se llevó al Rubblor donde se manejaron dos variables, en este caso fue el tiempo de residencia de 10, 20 y 30 min y la velocidad del equipo 7 y 11.6 rpm, con esto se pretendía evaluar el comportamiento y el grado de concentración de cada tipo de roca a diferentes velocidades y tomando muestras cada 10 min, para determinar las variables con las que mejor se obtiene recuperación de níquel en el clasificado. En la Figura 9 se ve un esquema de la simulación para el sistema OSMOC, a escala piloto.

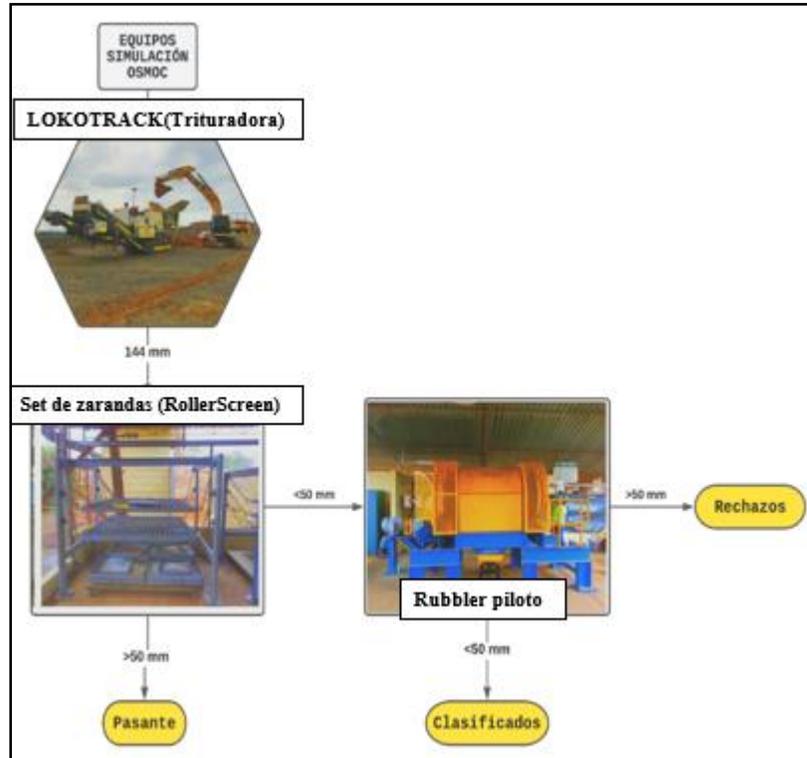


Fig. 9. Simulación del Sistema OSMOC a escala piloto.

1). *Procesamiento en el Rubbler (corridas)*

La Tabla II muestra las principales variables usadas en el procesamiento en el equipo Rubbler piloto, se tomaron 12 muestras de 450-480 Kg, 4 por tipo de roca y se operó el sistema a dos velocidades (7 y 11,6 rpm) con el mismo tiempo de residencia dentro del equipo (10, 20, 30 min) con el fin de obtener el tiempo y la velocidad optima donde se obtiene mejor resultado en el clasificado (material que va al proceso metalúrgico) con respecto a la concentrabilidad.

TABLA II VARIABLES PARA EL PROCESO

CONFIGURACIÓN RUBBLER				
Mineral	Número de ensayos	Velocidad (rpm)	Tiempo de residencia	Número de corridas
RT50A	RT50-A1	7	10 ,20, 30 minutos	6
	RT50-A3			
	RT50-A2	11.6	10 ,20, 30 minutos	6
	RT50-A4			
RT50B	RT60-B1	7	10 ,20, 30 minutos	6
	RT60-B3			
	RT60-B2	11.6	10 ,20, 30 minutos	6
	RT60-B4			
RT60	RT60-1	7	10 ,20, 30 minutos	6
	RT60-3			
	RT60-2	11.6	10 ,20, 30 minutos	6
	RT60-4			

E. Ensayos

Para evaluar la química de los componentes importantes dentro del proceso de extracción de Ferroníquel se tomaron muestras en los siguientes puntos del proceso de simulación:

- Retenido malla 50 mm, 40 mm, 30 mm, 15 mm y fondo (simulación Rollerscreen)
- Clasificado 10, 20, 30 min a 7 rpm (Rubbler piloto)
- Clasificado 10, 20, 30 min a 11.6 rpm (Rubbler piloto)
- Rechazo 30 min a 7 rpm (Rubbler piloto)
- Rechazo 30 min a 11.6 rpm (Rubbler piloto)

En la Figura 10 se muestra un esquema de las muestras que se tomaron para cada ensayo, en total se hicieron 6 ensayos para un total de 96 muestras para laboratorio, provenientes de cada una de las corrientes que arroja el proceso, además de esto se esquematiza los requerimientos de análisis que se le pidieron al laboratorio. En la tabla III y IV se muestran la cantidad de muestras que se tomaron.

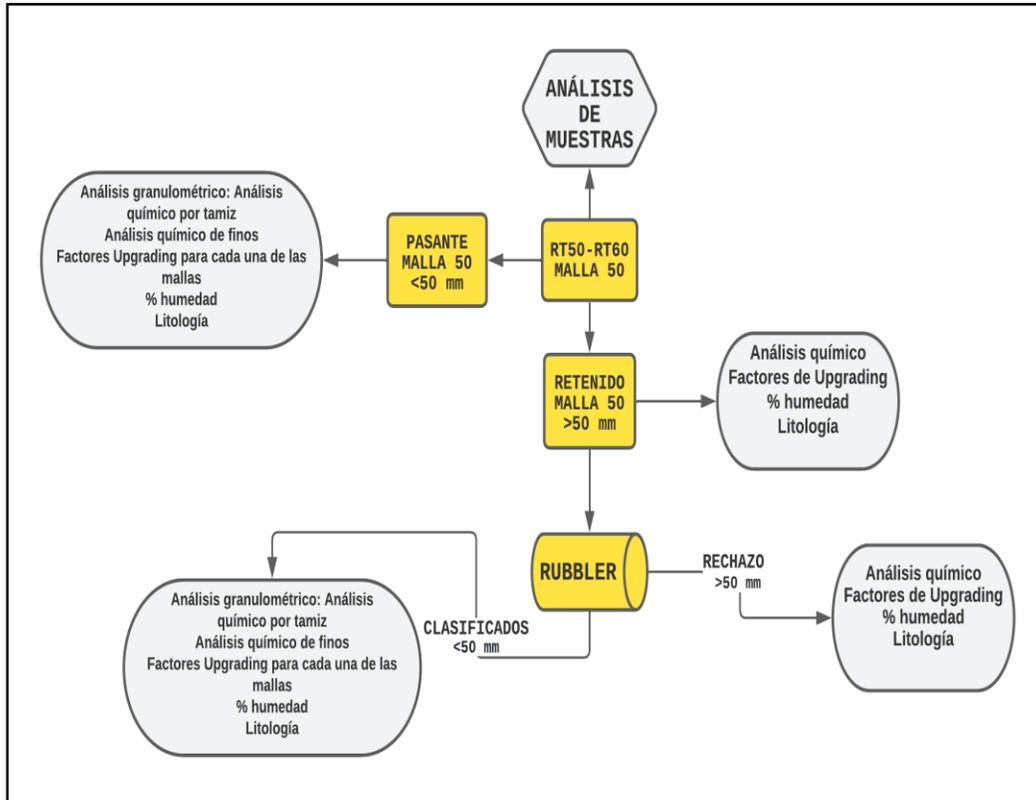


Fig. 10. Análisis por tipo de corriente en el proceso.

TABLA III. CANTIDAD DE MUESTRAS PARA GRANULOMETRÍA.

1 FRX 1 PARA LITOLOGÍA							TOTAL MUESTRAS EN MINA
RT	MALLA 50	MALLA 40	MALLA 30	MALLA 15	FONDO	RUBBLER	
RT50A (1,2)	2	2	2	2	1	2	
RT50B (1,2)	2	2	2	2	1	2	
RT60 (1,2)	2	2	2	2	1	2	
RT50A (3,4)	2				1	2	
RT50B (3,4)	2				1	2	
RT60 (3,4)	2				1	2	
	12	6	6	6	6	12	48

TABLA IV. CANTIDAD DE MUESTRAS RUBBLER.

		LABORATORIO			1 LITOLOGIA
		MINUTOS			1 FRX
CORRIDAS	RT	CLAS.10	CLAS.20	CLAS.30	RECHAZO
C1-7RPM	RT50A1	1	1	1	2
C2-11.6PM	RT50A2	1	1	1	2
C1-7RPM	RT50A3	1	1	1	2
C2-11.6RPM	RT50A4	1	1	1	2
C1-7RPM	RT50B1	1	1	1	2
C2-11.6PM	RT50B2	1	1	1	2
C1-7RPM	RT50B3	1	1	1	2
C2-11.6RPM	RT50B4	1	1	1	2
C1-7RPM	RT601	1	1	1	2
C2-11.6RPM	RT602	1	1	1	2
C1-7RPM	RT603	1	1	1	2
C2-11.6RPM	RT604	1	1	1	2
		12	12	12	24
					TOTAL MUESTRAS EN RUBBLER
					60

VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Análisis químico y porcentaje de humedad inicial de los diferentes tipos de rocas

Para calcular el contenido de níquel (NiS), hierro (FeS), magnesio (MgOS), silicio (SiO₂S) y alúmina (Al₂O₃S), que contenía cada tipo de roca, se analizó una muestra de cada una de ellas. Estos analitos son importantes ya que de ellos dependen las reacciones posteriores al proceso de trituración simulado, además de esto se solicitó el porcentaje de humedad de cada una de ellas para predecir el comportamiento en cada uno de los equipos nuevos que se simularon en estas pruebas. Los resultados fueron obtenidos por medio de análisis químico por FRX y el resultado es presentado en porcentaje peso/peso (peso del elemento sobre el total de la muestra) y el porcentaje de humedad fue calculado con la relación de peso en húmedo menos el peso en seco, después que el mineral se secó a 100°C. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla V:

TABLA V. ANÁLISIS QUÍMICO INICIAL DE LOS TIPOS DE ROCAS ENSAYADAS FRENTE A LA CONFIGURACIÓN OSMOC.

RT	%Humedad	%NiS	%FeS	%MgOS	% SiO ₂ S	%Al ₂ O ₃ S	SiO ₂ /MgOS
50A	19,4	0,70	10,12	30,22	39,07	1,19	1,30
50B	17,1	0,47	8,05	32,34	39,29	1,27	1,22
60	7.32	0,27	6,13	34,43	40,66	1,42	1,18

En la tabla V se muestra la composición química inicial para cada tipo de roca donde se obtuvo que el valor más alto de níquel se encontró en la peridotita Sapolitizada altamente meteorizada (RT50A), con un porcentaje de níquel de 0,70 lo que significa que por cada 100 g de mineral hay 0,7 g de níquel, pero que también era la que más contenido de humedad tenía, por ende su procesamiento en la configuración hecha para el RollerScreen se vio afectada por el atascamiento de las mallas con apertura más pequeña (30 mm y 15 mm) como se observa en la Figura 11, ocasionando que el material se aglomerara en la parte superior de la zaranda, es la roca más frágil de las tres debido a su grado de alteración lo que facilita que se fracture más fácilmente. Su contenido de humedad representa un reto en los nuevos sistemas instalados en el área de preparación de mineral ya que aumenta las posibilidades de que se produzcan atascamientos

cuando se encuentre en volúmenes grandes de mineral disminuyendo de esta manera la eficiencia del área; por su parte la peridotita saprolitizada bajamente meteorizada tiene un contenido más bajo de níquel y también de humedad como vemos en la Figura 12. Durante la simulación no se presentaron atascamiento como en la anterior, aunque esta roca (RT50B) tenía una característica higroscópica, es decir, tiene la capacidad de absorber agua cuando se presentan lluvias. Este hallazgo es muy importante ya que, el sistema de trituración está conformado por bandas que transportan el mineral y se encuentran dispuestas a cielo abierto, lo que representa un riesgo de atascamiento si se tritura este tipo de mineral mientras se presenten lluvias ya que aumenta las posibilidades de atascamiento en los distintos equipos; y por último la peridotita RT60, como se observa en la Figura 13, es una roca con bajos contenidos de humedad y de níquel, se considera una roca estéril que al ingresar al sistema tiene un efecto de dilución del níquel con respecto a otros minerales o tipos de roca que contienen un alto porcentaje de níquel, al ser dura y seca no presentó problemas para su procesamiento en el sistema simulado.



Fig. 11 Peridotita saprolitizada durante el zarandeo

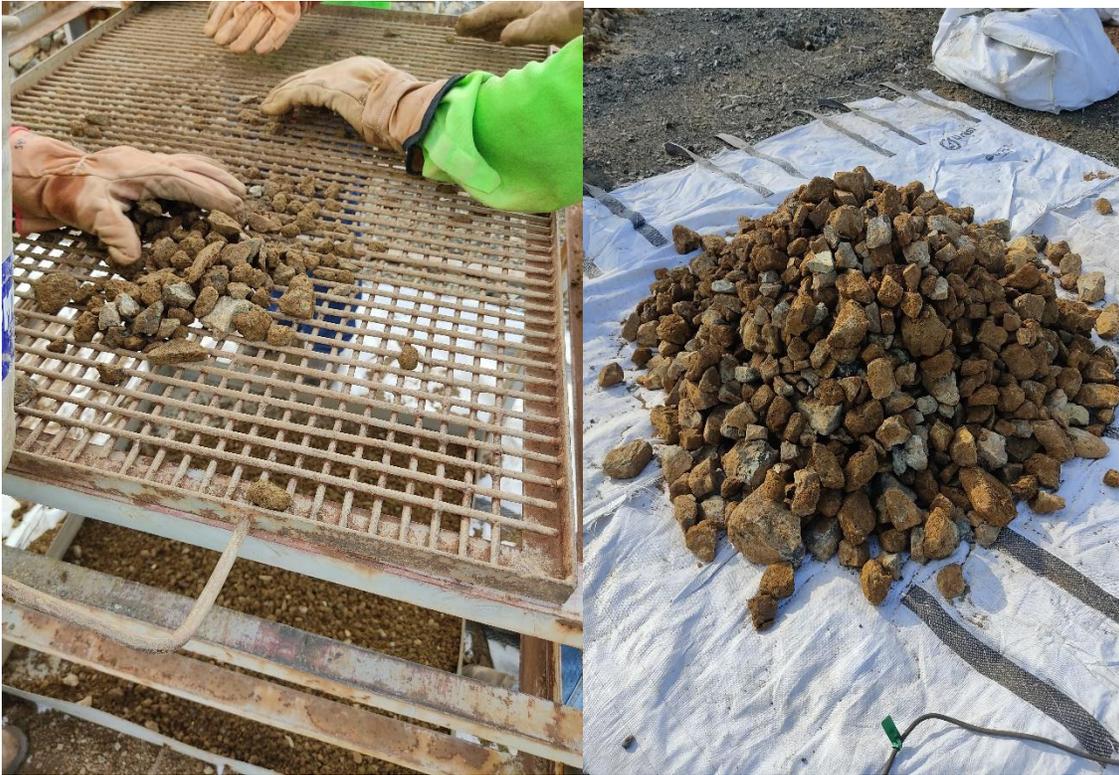


Fig. 12 Peridotita saprolitizada bajamente meteorizada RT50B



Fig. 13 Peridotita RT60

B. Litología inicial

Para garantizar el porcentaje mínimo del tipo de roca presente en cada uno de los ensayos se hizo un análisis litológico con la ayuda de un geólogo experto en el yacimiento ya que el requisito inicial era que mínimo el 60 % de la pila a analizar tenía que ser de la roca en cuestión obteniendo los siguientes resultados presentados en la tabla VI:

TABLA VI. ANÁLISIS LITOLÓGICO INICIAL DE LOS TIPOS DE ROCAS ENSAYADAS FRENTE A LA CONFIGURACIÓN OSMOC.

TIPO DE ROCA		% de presencia en la muestras	% de otros tipos de roca	Total
Peridotita saprolitizada altamente meteorizada 50A		88,78	10,82	100
Peridotita saprolitizada altamente meteorizada 50B		91,07	8,93	100
Peridotita 60		88,52	11,48	100

En cuanto a la litología como se observa en la Tabla VI; el porcentaje de cada tipo de roca se encuentra por encima del 80% predominando así la roca que se ensayó por muestra, cabe resaltar que esta labor realizada por el geólogo experto proporcionado por la Compañía, lo hacía con una muestra representativa de la muestra original de las 4,5 – 5 t, esto garantizó la representatividad del muestreo cumpliendo con lo planteado inicialmente, las características litológicas arrojaron que estos tipos de rocas provenientes de ese depósito presentaban una dureza inferior al mineral de la mina principal de CMSA, por ende al momento de ser procesado se fractura con mayor facilidad

esto debido al nivel de intemperismo del depósito y no se ha profundizado en su yacimiento ya que a medida que se vaya perforando se va encontrando con las rocas más duras por el nivel de meteorización de la corteza.

C. Clasificación por tamaños: Simulación RollerScreen

En la primera etapa del muestreo se hizo pasar la totalidad de la masa de cada uno de los ensayos por una serie de zarandas con apertura de 50 mm, 40 mm, 30 mm, 15 mm y fondo, esto con el fin de hacer una simulación planteada en la Figura 9, para observar el comportamiento después de la trituración en la trituradora Lokotrack obteniendo las distribuciones relacionadas en la Figura 14:

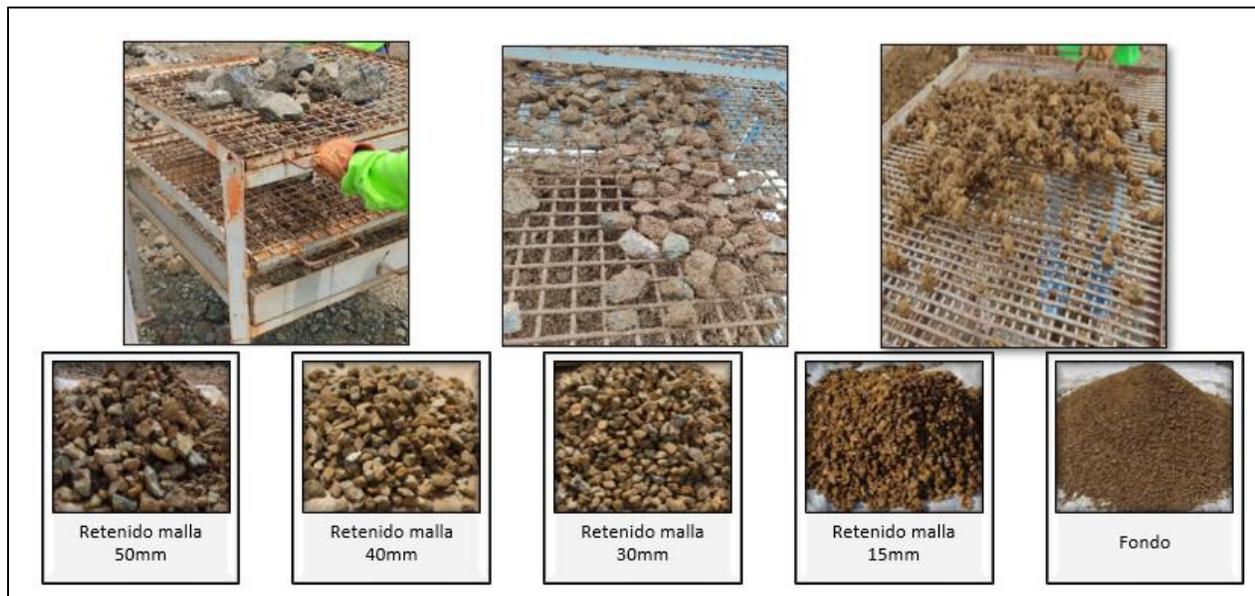


Fig. 14 Fracciones granulométricas en campo con set de zarandas

En la primera etapa de concentración que sería cuando este tipo de rocas llegan al RollerScreen clasificarían a pila entre el 63,16% - 71,65% del total de la masa de mineral ingresada al sistema para ser enviada al proceso metalúrgico y el restante iría a la última parte de concentración en el equipo Rubbler, como se puede ver en la Figura 14, la mayor cantidad de material clasifica por las mallas y el retenido en la malla de 50 mm sería el rechazo que pasaría al Rubbler.

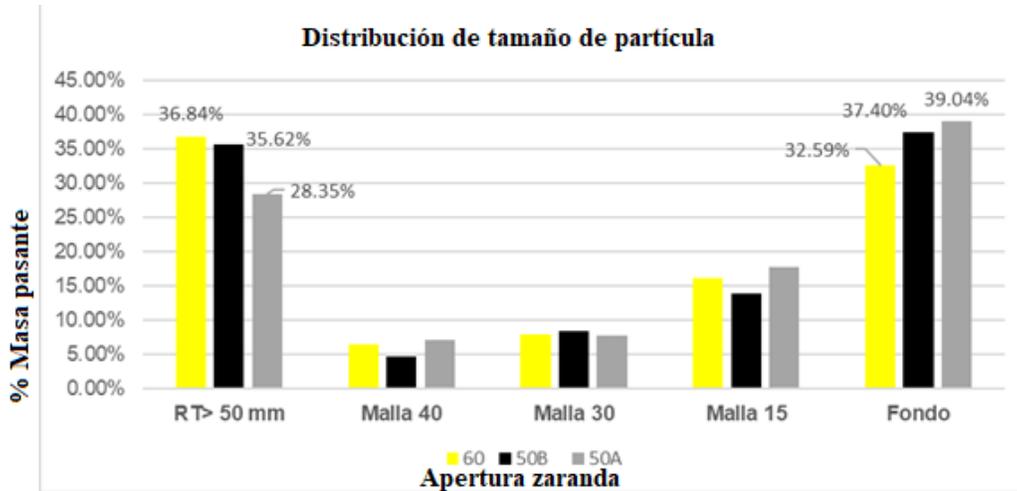


Fig. 15 Porcentaje de masa retenido en cada malla

De las 4,5-5 toneladas procesadas se obtuvo un clasificado (mallas 40 mm, 30 mm, 15 mm y fondo) entre el 63-71 % total de la masa ingresada, que varía según la dureza de la roca, en este caso la peridotita saprolitizada altamente meteorizada 50A, según su especificación altamente meteorizada, es una roca frágil y que al momento de su trituración tiende a fracturarse más fácilmente, obteniendo una proporción más grande de material fino con granulometría menor a 50 mm. En la Figura 15, se observa la distribución por tamaño de malla obtenida en campo, se observa que la roca donde más se generan finos (material con granulometría <15 mm) es la peridotita Saprolitizada altamente meteorizada y es donde mayor cantidad de material se envía al clasificado, su comportamiento como se mencionó anteriormente se debe a su nivel de dureza y le continúa la peridotita Saprolitizada bajamente meteorizada, que es un poco más dura que la anterior pero que tiende a tener el mismo comportamiento y la roca más dura y la que genera menos finos, sería la peridotita, el análisis del comportamiento de los finos es importante para el manejo de material particulado que se envía al ambiente, el cual tiene unos controles medioambientales para evitar contaminación excesiva.

D. Rubbler piloto: concentración mecánica

En la Figura 8 se muestra el equipo de simulación, en donde se procesaron entre 450- 480 Kg dentro del equipo con las variables planteadas en la Tabla III obteniendo los resultados mostrados en las figuras 16 y 17:



Fig. 16. Productos del equipo Rubbler.

En la Figura 17, se observa las condiciones con las que se operó el equipo con el resultado gráfico de las corrientes arrojadas. Esta gráfica representa en porcentaje la masa clasificada con respecto al total de la masa ingresada al sistema con cada uno de los tiempos y revoluciones con las que se operó el equipo.

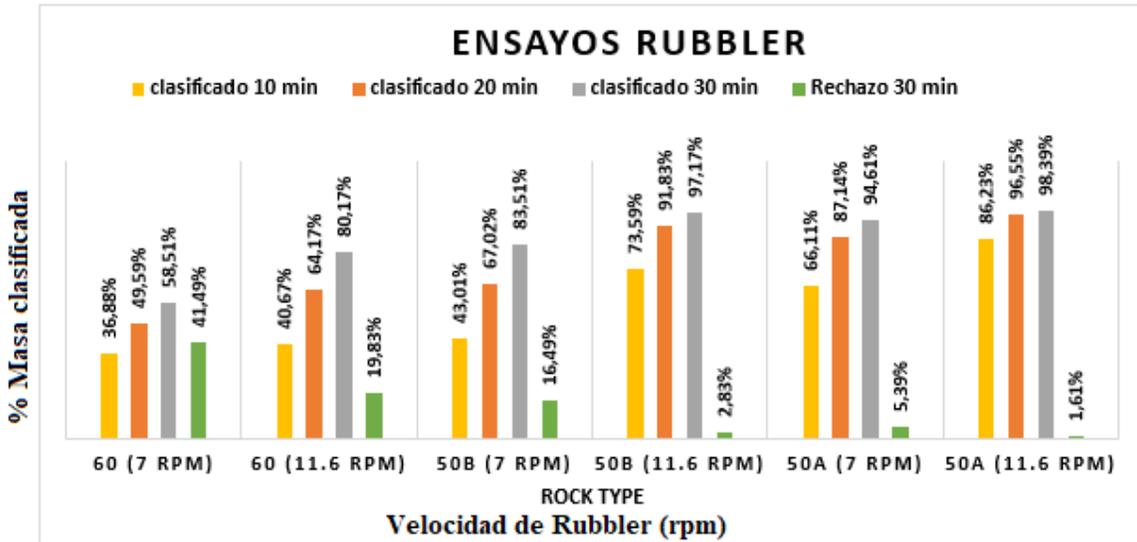


Fig. 17. Clasificado y rechazo final del Rubbler.

El Rubbler se operó con las variables planteadas inicialmente y se tomaron muestras de cada uno de los tiempos mostrados en la Figura 16, para analizar la composición química y observar el comportamiento del clasificado y del material rechazado al final del proceso.

De forma general el comportamiento en el equipo Rubbler de los diferentes tipos de roca se puede ver en la Figura 17. En donde el porcentaje de rechazo de la masa inicial es muy bajo, lo que indica que bajo todo el sistema OSMOC, estos tipos de rocas clasificarían en su totalidad a la pila, aprovechando al máximo el mineral proveniente de Queresas y Porvenir, aunque también entraría al proceso material estéril como es la peridotita que tiene un porcentaje bajo de níquel y que al llegar a este equipo sufriría fracturas en partículas con menor tamaño de la malla de 50 mm dispuesta a lo largo del equipo y por ende entraría al clasificado.

E. Resultados de los índices de concentrabilidad (%UG) bajo todo el sistema OSMOC

1). Peridotita RT60

En la Tabla VII se muestran los resultados del porcentaje de níquel después de ser procesado bajo la simulación de las pruebas y el cálculo de los porcentajes de concentrabilidad realizados con la Ecuación 1, para la peridotita bajo el sistema OSMOC:

TABLA VII. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE LA PERIDOTITA RT60 QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.

60	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	7	10 min	4,0%	0,271	0,233	28,5
20 min		3,1%	0,269	0,232	23,1	
30 min		2,6%	0,268	0,230	19,5	
60	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	11.6	10 min	3,5%	0,270	0,235	20,6
20 min		1,8%	0,265	0,236	11,9	
30 min		0,8%	0,263	0,238	6,8	

2). *Peridotita Saprolitizada bajamente meteorizada RT50B*

En la Tabla VIII se muestran los resultados del porcentaje de níquel y el cálculo de los porcentajes de concentrabilidad con la Ecuación 1, bajo el sistema OSMOC:

TABLA VIII. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE PERIDOTITA SAPROLITIZADA BAJAMENTE METEORIZADA RT50B QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC

50B	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	7	10 min	3,1%	0,506	0,42	10,07
20 min		1,1%	0,495	0,42	3,44	
30 min		0,5%	0,493	0,41	1,31	
50B	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	11.6	10 min	2,3%	0,484	0,235	4,23
20 min		0,7%	0,477	0,236	1,01	
30 min		0,3%	0,475	0,238	0,44	

3). *Peridotita Saprolitizada altamente meteorizada RT50A*

En la Tabla IX se muestran los resultados del porcentaje de níquel y el cálculo de los porcentajes de concentrabilidad bajo la simulación del sistema OSMOC:

TABLA IX. ANÁLISIS DE CONCENTRABILIDAD DE PERIDOTITA SAPROLITIZADA ALTAMENTE METEORIZADA RT50A QUERESAS Y PORVENIR ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.

50A	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	7	10 min	7,8%	0,708	0,491	17,46
20 min		5,6%	0,694	0,426	10,15	
30 min		4,2%	0,685	0,284	5,35	
50A	RPM	Tiempo Rubbler	%UG	%Ni Clasificado	%Ni Rechazo	% Rechazo
	11.6	10 min	3,3%	0,694	0,502	6,49
20 min		1,3%	0,681	0,429	2,34	
30 min		0,7%	0,677	0,281	0,87	

En las tablas VII, VIII y IX, se ven los resultados arrojados para el cálculo con la Ecuación 1, de la concentrabilidad que presentó cada uno de los tipos de rocas ensayados obteniendo unos resultados químicos iniciales y finales después de ser procesados en la simulación a escala piloto, que permitieron el cálculo mediante esa fórmula, los hallazgos encontrados son los siguientes:

La peridotita RT60, fue la roca que más presentó rechazo de las tres evaluadas, es una roca dura y su comportamiento en el equipo Rubbler fue más homogéneo, pero a medida que se iba aumentando el tiempo de permanencia en él, se fracturaba aún más, su mejor comportamiento se observa en la Tabla VII que fue a los 10 min a una velocidad de 7 rpm obteniendo un aumento en la concentrabilidad del 4% y disminuyendo a medida que se aumentaba el tiempo de residencia o las revoluciones por minuto debido a que se empezaba a diluir el contenido de níquel al clasificar más masa estéril.

La peridotita Saproilitizada bajamente meteorizada tuvo el porcentaje más bajo de rechazo en el Rubbler como se ve en la Tabla VII, en los primeros 10 minutos el 90% de la masa ingresada ya estaba en el clasificado, es una roca con composición química más homogénea, es decir, en el rechazo obtenido más del 60% era peridotita saproilitizada, es una roca frágil, por lo que clasifica casi que en su totalidad al ser ingresada al equipo, bajo las mismas condiciones como vemos en la Tabla VII, el mejor comportamiento con respecto al porcentaje de concentrabilidad se consigue a bajas revoluciones (7rpm) y un tiempo de 10 min obteniendo un porcentaje de concentrabilidad del 3.1%, en comparación con las otras dos rocas es el porcentaje es más bajo debido a que no presenta tanta concentrabilidad porque la distribución de níquel es mucho más homogénea a lo largo de la roca.

La peridotita Saproilitizada altamente meteorizada obtuvo el mejor comportamiento de los tres tipos de rocas ensayados como vemos en la Tabla VIII, bajo simulación de todo el sistema OSMOC, es una roca con centro de peridotita, que al ser ingresada al equipo con una velocidad baja se obtiene un porcentaje alto de concentrabilidad (7.8%) y por ende de níquel en el clasificado pero debido a su fragilidad, al aumentar las rpm del equipo, el porcentaje de níquel en el rechazo aumenta, lo que baja significativamente la concentrabilidad, favoreciendo a la dilución ya que la roca se fractura aún más y parte del centro que es peridotita pasa a ser clasificado.

En general para cada tipo de roca corrida bajo el sistema OSMOC, se obtuvo que el tiempo de residencia que mejor respuesta tiene para el porcentaje de concentrabilidad es de 10 minutos con una velocidad de 7 rpm, esto básicamente se presenta debido a la influencia que tiene la dureza de la roca o la misma meteorización, ya que entre mayor velocidad tenga el equipo y se deje mayor tiempo, lo que hace es fracturar aún más la roca generando dilución en el clasificado ya que parte de la roca estéril pasa a ser clasificado.

Los tres tipos de rocas clasificarían en su total a la pila entre el 82.5 - 95.8% en los primeros 10 minutos en el Rubbler.

5). Resultados químicos de los rechazos del Rubbler piloto

Se analizaron muestras de los diferentes rechazos del Rubbler para determinar si el equipo es capaz de retirar la parte rica en níquel de la roca y enviar al rechazo aquella pobre obteniendo los resultados presentados en las tablas XI, XII, y XIII:

TABLA X. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA SAPROLITIZADA ALTAMENTE METEORIZADA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.

		NI_S	FE_S	MGO_S	SIO2_S	AL2O3_S
Total rechazo 50A_7rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,49	8,96	32,40	38,90	0,79
	Rechazo 20 min Rubbler	0,43	9,94	31,31	38,54	0,84
	Rechazo 30 min Rubbler	0,28	9,77	31,88	38,70	0,81
Total rechazo 50A_11.6rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,50	6,74	34,31	40,08	0,88
	Rechazo 20 min Rubbler	0,43	6,41	34,62	40,02	0,87
	Rechazo 30 min Rubbler	0,28	6,02	35,26	40,44	0,88

TABLA XI. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA SAPROLITIZADA BAJAMENTE METEORIZADA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.

		NI_S	FE_S	MGO_S	SIO2_S	AL2O3_S
Rechazo 50B_7rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,42	6,99	34,19	39,89	1,22
	Rechazo 20 min Rubbler	0,42	7,18	34,01	39,75	1,37
	Rechazo 30 min Rubbler	0,41	7,94	33,32	39,19	1,63
Rechazo 50B_11.6rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,34	6,44	35,02	40,32	1,12
	Rechazo 20 min Rubbler	0,30	6,24	35,11	40,24	1,12
	Rechazo 30 min Rubbler	0,30	6,21	35,08	40,08	1,12

TABLA XII. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS RECHAZOS DE LA PERIDOTITA DESPUÉS DE SER PROCESADA ANTE LA SIMULACIÓN OSMOC.

		NI_S	FE_S	MGO_S	SIO2_S	AL2O3_S
Total rechazo 60_7rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,23	6,38	34,87	40,67	1,17
	Rechazo 20 min Rubbler	0,23	6,47	34,86	40,73	1,17
	Rechazo 30 min Rubbler	0,23	6,43	34,89	40,69	1,16
Total rechazo 60_11.6rpm	Rechazo 10 min Rubbler	0,23	5,75	35,97	40,80	1,14
	Rechazo 20 min Rubbler	0,24	5,71	36,13	40,75	1,14
	Rechazo 30 min Rubbler	0,24	5,72	36,61	40,85	1,12

El rechazo es el material con granulometría mayor de 50 mm, que se espera sea material estéril donde se tenga un índice bajo de níquel y que será enviado a los botaderos, se tomaron muestras para análisis químico de cada uno de los rechazos del Rubbler, cabe resaltar que en algunos casos la masa era muy pequeña entre 20-40 Kg, ya que casi que todo el mineral clasificaba, en las Tablas XI, XII y XIII se observa la química obtenida en el rechazo de cada una de las rocas.

La peridotita saprolitizada altamente meteorizada (50A) es la roca que más se ve afectada por la velocidad del equipo Rubbler, al tener una velocidad alta, más del 80% de la masa ingresada clasifica en los primeros 10 minutos, generando un porcentaje bajo en los rechazos, pero como se observa en la tabla XI sigue teniendo alto níquel en comparación de la química inicial de la roca.

Para el segundo tipo de roca la peridotita saprolitizada bajamente meteorizada (50B), el níquel en el rechazo es mayor a bajas revoluciones y disminuye al aumentar las revoluciones, pero el porcentaje de concentrabilidad también disminuye significativamente, esto debido a que esta roca es más homogénea que la altamente meteorizada.

La peridotita RT60, es la roca que mayor porcentaje de rechazos presentó, su comportamiento no varía significativamente en la química, ya que como se observa en la tabla XIII, los rechazos tienen prácticamente la misma química.

En cada uno de los rechazos obtenidos en los tiempos de residencia en Rubbler se observa que entre mayor tiempo se deja en el equipo el porcentaje de níquel disminuye, es decir, pasa más al clasificado pero como se observó anteriormente, se genera también dilución ya que en los primeros 10 minutos en el equipo se clasifica la gran mayoría de la peridotita saprolitizada tanto alta como baja, aunque estos resultados van ligados a la granulometría que se tenga en la primera clasificación, ya que entre más grande sean las rocas que ingresan al Rubbler el porcentaje de rechazo aumenta debido a que necesitaría más tiempo para que se fracture y llegue al clasificado.

VIII. CONCLUSIONES

Después de analizar el comportamiento bajo todo el sistema OSMOC se obtuvieron las siguientes conclusiones que soportan todo el trabajo realizado para este proyecto y que servirán como base en el modelamiento de este depósito:

- ✓ La concentrabilidad de los diferentes tipos de rocas de Querasas y Porvenir, está ligado al tiempo de residencia y la velocidad que se programe dentro del equipo Rubbler, ya que al aumentar las rpm el porcentaje de concentrabilidad baja significativamente, debido a la fragilidad de este tipo de roca debido a que al aumentar las rpm el mineral pasa casi que en su totalidad a ser clasificado, ingresando a la pila material relativamente estéril.
- ✓ Las condiciones que mejor presentaron porcentajes de concentrabilidad en el sistema simulado para OSMOC, para los tres tipos de rocas ensayadas fueron 10 minutos a 7 rpm, teniendo porcentajes de concentrabilidad, para la 50A (7,8%), 50B (3,1%) y 60 (4,0%) respectivamente.
- ✓ En la simulación hecha para el sistema OSMOC, se observó que en la primera trituración y clasificación por mallas, se clasifica directamente entre el 63-71 % de los diferentes tipos de rocas, entrando al sistema de concentración Rubbler, entre el 27-30% de las rocas y que dependiendo de la velocidad de este equipo las rocas clasificarían a pila entre el 10-28% del total ingresado al equipo.
- ✓ Aunque los patios que ingresan actualmente a trituración tienen porcentajes altos de humedad, las rocas ensayadas (50A, 50B y 60), tienen humedades relativamente bajas y que contribuyen a un mejor procesamiento dentro del equipo Rubbler, ya que la humedad varía entre el 7-19%, evitando que dentro del equipo se produzca atascamiento.
- ✓ El comportamiento de este tipo de material sigue siendo variable a medida que sea mezclado como normalmente ingresa a planta ya que estos tipos de rocas representan un porcentaje del total del material limonítico que se trae de Q&P y que dependiendo del porcentaje que se tenga de cada uno de ellas en el total del mineral ingresado a trituración

se tendrá un comportamiento dentro de los nuevos equipos que tendrá el nuevo sistema de trituración.

- ✓ Aunque el comportamiento que mejor presenta concentrabilidad a bajas revoluciones a escala industrial no es recomendable debido al flujo de material que normalmente ingresa a planta y a la velocidad con que viajaría sobre las bandas transportadoras ya que se podrían tener atascamientos en el área por el bajo flujo de material.

REFERENCIAS

- [1] G. Díaz Muñoz. (2020). Metodología del estudio piloto. Revista chilena de radiología, 26(3), 100-104. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-93082020000300100>
- [2] AG laboratorios, Muestreo y preparación de muestras, (<https://agqlabs.co/muestreo-y-preparacion-de-muestras-minerales/>)
- [3] Repositorio institucional Universidad de San Juan, Introducción al muestreo y estimación de reservas, (<http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/exploracionminas/wp-content/uploads/2020/04/APUNTES-Introducci%C3%B3n-Muestreo-Datos.pdf>)
- [4] E. Aristizábal, Y. Valencia, A. Guerra, M. Vélez et O. Echeverr. (2011). CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE PERFILES DE METEORIZACIÓN DESARROLLADOS SOBRE ROCAS ÍGNEAS EN AMBIENTES TROPICALES. Boletín de Ciencias de la Tierra, (30), 93-106. Retrieved August 08, 2022, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302011000200009&lng=en&tlng=es.
- [5] M. Tanco, E. Viles Diez, y L. Pozueta, Diferentes enfoques del diseño de experimentos (DOE), ingeniería, n.º 7, pp. 29-37, oct. 2009.
- [6] R. Guzmán, REPORTE FINAL: Proyecto Upgrading Fase II 2013, Cerro Matoso S.A
- [7] S. Luna, Reporte pruebas piloto realizadas para el mineral de Queresas y Porvenir, Julio 2021-Diciembre 2021, Cerro Matoso S.A.
- [8] R. Silva, Valores Minerales, Observatorio minero- Petorca 2018 (<https://www.observatoriominerocil.cl/web/wp-content/uploads/material/seminario2/Muestreo%20y%20an%C3%A1lisis%20valores%20minerales.pdf>)
- [9] A. Castrillón, T. Pi-Puig, J. Guerrero, F. Nuñez-Useche, A. Rodriguez, C. Canet, Clay mineralogy and texture of deep-sea hydrothermal mudstone associated with the Cerro Matoso peridotite in accreted oceanic crust from Colombia, Journal of South American Earth Sciences, Volume 117, 2022, 103886, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103886>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981122001754>

- [10] S. Çetintaş Ufuk, Y. Deniz Bingöl, A novel reagent-assisted mechanochemical method for nickel recovery from lateritic ore Journal of Cleaner Productio, Volume 199, 20 October 2018, Pages 616-632 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981122001754>)
- [11] A. Salah Al-Khribash, Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses – scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy, Ore Geology Reviews, Volume 120, 2020, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136819301386>)
- [12] J. Naomi Saunders, J. Barling, J. Harvey, Alex N. Halliday, Heterogeneous nickel isotopic compositions in the terrestrial mantle – Part 1: Ultramafic lithologies, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 285, 2020, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703720304063>)
- [13] M. Warlo, G. Bark, C.Wanhainen, I. McElroy, A. Björling et U. Johansson, Extreme-resolution synchrotron X-Ray fluorescence mapping of ore samples, Ore Geology Reviews, Volume 140, 2022, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136821006466>)
- [14] NORMA TÉCNICA NTC-ISOCOLOMBIANA 2859-10, PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO PARA INSPECCIÓN POR ATRIBUTOS PARTE 10: INTRODUCCIÓN A LA SERIE DE NORMAS NTC-ISO 2859 SOBRE EL MUESTREO PARA INSPECCIÓN POR ATRIBUTOS
- [15] Kheireddine Rifai, Lütfü Özcan, François Doucet, François Vidal, Quantification of copper, nickel and other elements in copper-nickel ore samples using laser-induced breakdown spectroscopy, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 165, 2020, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0584854719304483>)
- [16] J. Sun, H. Qin, S. Yang, K. Sanematsu, Y. Takahashi, New insights into the distribution and speciation of nickel in a Myanmar laterite, Chemical Geology, Volume 604, 2022, 120943, ISSN 0009-2541, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120943>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254122002376>)
- [17] E. H. López, Caracterización física y química de escorias de ferroníquel a partir de minerales lateríticos de bajo tenor para posibles usos industriales. (Trabajo de pregrado). Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3033>, 2018

[18] A. M. Polanco Criterios de implementación ISO 14001:2015 Caso Estudio Sector minería a cielo a abierto en la extracción y comercialización de ferroniquel. [online]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/41115>.

[19] S. Díaz Bello, Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica, [online]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57494> 2016.

[20] N.S. Martirosyan, A. Shatskiy, K.D. Litasov, I.S. Sharygin, T. Yoshino, Interaction of carbonates with peridotite containing iron metal: Implications for carbon speciation in the upper mantle, *Lithos*, Volumes 428–429, 2022, 106817, ISSN 0024-4937, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106817>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493722002262>)

[21] Y.V. Bataleva, Y.N. Palyanov, A. Sokol, Y.M. Borzdov, O. Bayukov, The role of rocks saturated with metallic iron in the formation of ferric carbonate-silicate melts: experimental modeling under PT-conditions of lithospheric mantle *Russ. Geol. Geophys.*, 56 (2015), pp. 143-154

[22] J. Jayamini, S. Lee, S. Park, H. Sohn, Production of ferronickel from limonitic laterite ore using hydrogen reduction and cementation, *Hydrometallurgy*, Volume 203, 2021, 105622, ISSN 0304-386X, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X210007>

[23] B. Beverskog, I. Puigdomenech, Revised pourbaix diagrams for nickel at 25-300 °C, *J. Corrosion Sci.*, 39 (1997), pp. 969-980

[24] N.W. Brand, C.R.M. Butt, M. Elias, Nickel laterites: classification and features, *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.*, 17 (1998), pp. 81-88

[25] D. Quintero, W. Guillin, J. Echeverri, H. Maury, L. Corredor, J. Ruiz, B. Rueda, A. Gonzalez, Large- and Particle-Scale energy assessment of reduction roasting of nickel laterite ore for Ferronickel production via the rotary Kiln-Electric furnace process, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 32, 2022, 101331, ISSN 2451-9049, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101331>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245190492200138X>