

DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS METALÚRGICOS DE BENEFICIO DE  
MINERALES COMPLEJOS DE ORO Y PLATA, REALIZADOS EN EL PROGRAMA  
MINERO DE LA EMPRESA SOCIEDAD MINERA DEL SUR S.A.S. EN EL  
MUNICIPIO DE BUENOS AIRES, EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA,  
REPÚBLICA DE COLOMBIA.



JOSÉ CHAVES TOBAR

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2015

DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS METALÚRGICOS DE BENEFICIO DE  
MINERALES COMPLEJOS DE ORO Y PLATA, REALIZADOS EN EL PROGRAMA  
MINERO DE LA EMPRESA SOCIEDAD MINERA DEL SUR S.A.S. EN EL  
MUNICIPIO DE BUENOS AIRES, EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA,  
REPÚBLICA DE COLOMBIA.

JOSÉ CHAVES TOBAR

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Físico

Director  
Dr. WILLFRAND PÉREZ URBANO

Codirector  
Ing. FREDY LADINO MANJARES

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2015

Nota de aceptación:

El Director y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autora y lo encuentran satisfactorio.

Director \_\_\_\_\_  
Dr. Willfrand Pérez Urbano

Jurado \_\_\_\_\_  
Dr. Sonia Gaona Jurado

Jurado \_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Rincon

Fecha de sustentación: Popayán, 25 de Junio 2015

*Las grandes batallas no las gana el mejor, las gana el más convencido...*

***DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS METALÚRGICOS DE BENEFICIO DE MINERALES COMPLEJOS DE ORO Y PLATA, REALIZADOS EN EL PROGRAMA MINERO DE LA EMPRESA SOCIEDAD MINERA DEL SUR S.A.S. EN EL MUNICIPIO DE BUENOS AIRES, EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA, REPÚBLICA DE COLOMBIA.***



Jose Chávez Tobar

Popayán, Junio 2015

# Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
2. Caracterización de un yacimiento mineral .....	3
2.1 Programa minero .....	3
2.2 Exploración geofísica aplicando técnicas eléctricas, y electromagnéticas de prospección.....	5
2.2.1 Prospección geofísica basada en las propiedades resistivas del sub-suelo.....	5
2.2.1.1 Tomografía geoelectrica de resistividades .....	5
2.2.1.2 Tomografía geoelectrica de polarización inducida (IP) .....	6
2.2.2 Prospección geofísica aplicando el principio de inducción electromagnética .....	7
2.2.2.1 Magnetometría .....	7
2.2.2.2 Perfil electromagnético .....	8
2.3 Exploración geológica.....	9
2.4 Recursos minerales.....	10
2.4.1 Geología regional .....	10
2.4.2 Geología estructural local .....	10
2.4.3 Geología local .....	11
2.5 Caracterización del complejos minerales .....	11
2.5.1 Microscopia.....	11
2.5.1.1 Microscopia óptica, MO.....	12
2.5.1.2 Microscopia electrónica .....	13
2.5.2 Difracción de rayos X, DRX.....	15
3. Beneficio de complejos minerales.....	16
3.1 Procesos de conminución y reducción de tamaño .....	16
3.1.1 Trituración de minerales .....	16
3.1.1.1 Trituración primaria .....	16
3.1.1.2 Trituración secundaria.....	18
3.1.2 Molienda de minerales .....	20
3.2 Estratificación de tamaño de partícula .....	22
3.2.1 Tamizaje industrial.....	22
3.2.2 Concentración en hidrociclones .....	24
3.2.3 Concentración gravimétrica .....	26
3.3 Proceso hidrometalurgico de flotación.....	29
3.3.1 Fenómenos hidrodinámicos .....	31

3.4 Lixiviación por cianuración.....	32
3.4.1 Efecto del pH.....	35
3.4.2 Alcalinidad protectora.....	35
3.4.3 Efecto de la superficie específica.....	36
3.4.4 Efecto del porcentaje de finos.....	36
3.4.5 Efecto de la temperatura.....	36
3.4.6 Efecto de la velocidad de agitación.....	36
3.4.7 Efecto de la concentración de oxígeno.....	37
3.4.8 Efecto del consumo de oxígeno.....	37
3.4.9 Efecto de la concentración de cianuro.....	37
3.4.10 Influencia de minerales y compuestos químicos en el proceso de cianuración.....	38
3.4.11 Efecto catalizador.....	38
3.4.12 Requerimientos técnicos y operacionales del proceso de cianuración.....	39
3.4.12.1 Requerimientos técnicos.....	39
3.4.12.2 Estático de cianuración.....	39
3.4.12.3 Sistemas de inyección de oxígeno.....	39
3.4.12.4 Limitaciones de operación.....	40
3.5 Precipitación con polvo de zinc (sistema Merrill Crowe).....	40
3.5.1 Cementación de cationes metálicos.....	41
3.5.2 Etapas del proceso Merrill Crowe.....	41
3.5.3 Limitaciones del proceso de precipitación de metales preciosos.....	44
4. Proceso productivo sociedad minera del sur S.A.S.....	46
4.1 Beneficio de complejos minerales.....	46
4.1.1 Trituración de complejos minerales.....	47
4.1.1.1 Almacenamiento de mineral.....	47
4.1.1.2 Lavado de mineral.....	48
4.1.1.3 Trituradora de mandíbulas.....	50
4.1.1.4 Impactor.....	50
4.1.1.5 Harnero.....	51
4.1.2 Molienda y concentración de complejos minerales.....	52
4.1.2.1 Molino primario.....	53
4.1.2.2 Jig.....	54
4.1.2.3 Hidrociclón H10.....	54
4.1.2.4 Flotación.....	55
4.1.2.5 Molino re-moedor e hidrociclón H4.....	57
4.2 Beneficio de lodo mineralizado.....	57
4.2.1 Molienda de lodo mineralizado.....	58

4.2.1.1 Almacenamiento de lodos .....	58
4.2.1.2 Molienda y estratificación de lodo mineralizado .....	58
4.3 Procesos de metalurgia extractiva .....	59
4.3.1 Lixiviación por cianuración .....	59
4.3.2 Precipitación de metales preciosos en el sistema Merrill Crowe .....	61
5. Diagnóstico de los procesos metalúrgicos .....	62
5.1 Procesos de beneficio .....	63
5.1.1 Almacenamiento y transporte de mineral.....	63
5.1.2 Trituración primaria .....	63
5.1.3 Trituración secundaria.....	64
5.1.4 Tamizaje industrial.....	64
5.1.5 Separación sólido-líquido.....	64
5.1.6 Molienda de minerales .....	65
5.1.7 Concentración gravimétrica .....	65
5.1.8 Estratificación en hidrociclones .....	65
5.1.9 Transporte de mineral .....	66
5.1.10 Flotación.....	66
5.1.11 Proceso hidrometalurgico de cianuración .....	66
5.1.12 Sistema Merrill Crowe .....	67
5.2 Factores externos.....	67
5.2.1 Factores ambientales .....	68
5.2.2 Capacitación de personal.....	68
5.2.3 Apoyo económico gubernamental.....	68
6. Recomendaciones.....	69
6.1 Caracterización mineralógica .....	69
6.2 Cuantificación de reservas.....	70
6.3 Transporte de mineral.....	70
6.4 Separación sólido-líquido.....	70
6.5 Trituración primaria .....	71
6.6 Trituración secundaria.....	71
6.7 Concentración gravimétrica .....	71
6.8 Molienda de minerales .....	71
6.9 Flotación.....	71
6.10 Flotación de cobre .....	72
6.11 Metalurgia .....	72
6.12 Reactivos químicos .....	72
6.13 Lixiviación por cianuración.....	72

6.14 Sistema de aireación.....	73
6.15 Sistema Merrill Crowe .....	73
6.16 Agua industrial .....	73
6.17 Seguridad industrial.....	74
6.18 Mantenimiento .....	74
6.19 Repuestos .....	74
6.20 Capacitación de personal.....	74
7. Conclusiones. ....	75

# 1. Introducción

La minería de metales preciosos históricamente ha sido de gran importancia para el país. En Colombia este tipo de minería se desarrolla en distintas escalas y formas de operación, existe minería formal e informal, minería de gran escala, y también minería en mediana y pequeña escala, denominada minería de subsistencia y artesanal, que tiene una profunda raíz en la tradición productiva de Colombia y se le define como aquella que utiliza principalmente instrumentos manuales, se asienta en el trabajo familiar y extrae bajos volúmenes de mineral.

Sin embargo, pese a la importancia de la minería en Colombia, la mayoría de los yacimientos auríferos son beneficiados y extraídos sin tener conocimientos técnico y científico apropiados, en particular sobre el tipo de mena en que se presentan los metales preciosos y las características de los diferentes recursos, las que deberían definir los procesos metalúrgicos de beneficio. El conocimiento de los recursos minerales contenidos en los depósitos auroargentíferos (caracterización y cuantificación de reservas) es un aspecto fundamental de partida que se debe considerar para optimizar los procesos de beneficio y aumentar la recuperación de metales preciosos; ya que un mal aprovechamiento de estos genera agotamiento de reservas, altos impactos ambientales, baja recuperación, gastos económicos excesivos y problemas operacionales.

Por otra parte, en Colombia la mayor parte de los metales preciosos y los minerales ligados a los diferentes tipos de mena son transformados y recuperados por la pequeña y mediana minería, mediante el procesamiento y beneficio de complejos minerales.

El procesamiento de minerales es un conjunto de técnicas y procedimientos, efectuados sobre complejos minerales. Se realiza mediante la aplicación de procesos metalúrgicos, los cuales comprenden entre otros: la conminución o reducción de tamaño y la concentración de los complejos minerales. El objetivo que persiguen los procesos de beneficio es la obtención de concentrados polimetálicos con alto contenido porcentual de metales preciosos, descartando los diferentes subproductos que se obtienen del mismo y que se disponen como material estéril (conocidos como cola de relave).

Considerando el contexto sociopolítico, histórico y cultural de la región norte del departamento del Cauca, el procesamiento de minerales obedece principalmente al conocimiento empírico que poseen sus habitantes, lo que conlleva a sistemas poco eficientes con bajos porcentajes de recuperación. Se ignora que los procesos mencionados anteriormente son descritos por fenómenos físicos y químicos. El conocimiento preciso de la interpretación teórica de los fenómenos que describen el procesamiento de minerales y los conceptos de ingeniería desarrollados en esta área, pueden ayudar significativamente a la optimización de la operación en planta de producción de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. Los procesos operativos se iniciaron artesanalmente, considerando

la tradición minera y productiva de la región. Posteriormente la empresa, fundamentándose en las condiciones de la región, decidió adecuar las instalaciones donde desarrollaba sus procesos operativos. Inicialmente, se amplió significativamente la planta de beneficio, pasando del procesamiento de entre 40 y 80 toneladas/día a 300 toneladas/día. Este cambio genera problemas en la gestión productiva y financiera, debido entre otras causas, a la falta de protocolos que describieran y parametrizaran los procesos metalúrgicos de beneficio además de la falta de un modelo de transferencia tecnológica.

Por las razones mencionadas anteriormente, se elaboró un trabajo de recopilación, documentación, revisión, análisis y diagnóstico de los procesos de minería y metalurgia realizados en la planta de beneficio de minerales de oro y plata de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. (S.M.S. S.A.S) como una herramienta de gestión del conocimiento.

El diagnóstico de los procesos metalúrgicos se realizó haciendo una comparación entre el programa minero que se presenta en la literatura especializada (capítulos 2 y 3) y los procesos operativos desarrollado por la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. presentado en el capítulo 4; además de considerar aspectos de transferencia tecnológica, las condiciones de la región del norte del departamento del Cauca, y la historia de la empresa. La comparación se realiza en cada fase del proceso, haciendo énfasis en el procesamiento y beneficio de complejos minerales.

El estudio de la descripción de los procesos de producción utilizados en la industria metalúrgica y minera, establece una información que aporta insumos que se requieren para el desarrollo socio-económico de la región, además de generar conocimiento que sirve como referencia para posteriores investigaciones sobre procesos de minería y metalurgia en el departamento del Cauca. En este sentido, este trabajo se puede constituir en una herramienta de apoyo e insumo conceptual para definir la metodología de trabajo en los procesos metalúrgicos, coadyuvar en la toma de decisiones, constituir una base para la realización de estudios más elaborados que permitan controlar variables operacionales, reducir costos de operación y contribuir a mejorar el rendimiento de los procesos metalúrgicos (mayor recuperación de metales preciosos) lo que a su vez posiblemente ayudará a mejorar la productividad en la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.

## **2. Caracterización de un yacimiento mineral**

La caracterización de un yacimiento mineral es el primer aspecto que se debe considerar para estudiar la viabilidad técnico-económica y factibilidad para hacer explotación de los recursos minerales que se encuentran en concentración considerable en un depósito, así mismo conocer los tipos de mena y la forma de asociación de las especies valiosas permite definir el procesamiento y beneficio de los minerales complejos, en este capítulo se hace la descripción desde la planeación estratégica para un programa minero, además de la presentación de diferentes técnicas de exploración geofísica, y técnicas de caracterización de minerales, que se emplean para caracterizar el depósito. Adicionalmente se presenta la metodología de las jornadas de exploración geológica y evaluación de recursos minerales. Los resultados obtenidos con algunas de las técnicas de prospección geofísica y caracterización de minerales para el programa de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. son presentados en este capítulo, aunque se debe mencionar que existen otras técnicas y metodologías para hacer exploración geofísica y caracterización mineralógica.

### **2.1 Programa minero**

La planeación estratégica de un programa minero inicia con la detección de un prospecto, mediante evidencia geológica, visitas de compañías mineras a una región, o revisión de minas abandonadas. Con el objetivo de definir blancos de exploración y reducir las áreas donde se presentan anomalías de mineralización, se emplean técnicas de prospección geofísica, y en algunos casos estudios geoquímicos o litogeoquímicos muestreando mineral o suelos, para determinar analíticamente las características de un yacimiento aurífero o depósito mineral. El propósito es evaluar prospectos para convertirlos en blancos de explotación. Otra alternativa complementaria es un estudio de sedimentos activos en la hidrografía de la región, ya que muchas veces los minerales y metales pesados asociados al oro se precipitan en los sistemas acuíferos. Tomando como referencia esta información preliminar se procede a realizar perforaciones que permitan conocer mejor las características del yacimiento minero, nuevamente mediante muestreo geológico. Lo anterior necesita de grandes recursos, sin embargo la perforación es la forma más precisa de identificar las características de los minerales presentes en un yacimiento.

Los procesos geológicos obedecen a protocolos de muestreo sistemático de complejos minerales en pilas, volquetas, sedimentos, núcleos, suelos, y túneles de exploración y producción. Se desarrollan con el fin de caracterizar macroscópicamente el depósito mineral (vetas y diseminado). Los protocolos se realizan basados en parámetros de calidad, generando mayor confiabilidad y repetitividad en el proceso, y deben ser únicos para cada yacimiento. Con este estudio se pretende caracterizar periódicamente en el espacio el yacimiento, sin embargo cuando se intenta tomar muestras representativas del depósito se presentan errores acumulativos, tanto sistemáticos (que obedecen a la distribución anisotrópica del yacimiento) como aleatorios, algunos depósitos

presentan “efecto pepita” que consiste en la presencia irregular de oro libre, lo que genera variaciones significativas en tenor de mineral aurífero. Estos errores pueden afectar el cálculo de recursos y reservas, la estimación del espesor de la veta, el volumen de mina (toneladas de mineral) y el tenor dado en gr/ton. Para intentar la disminución de estos errores se debe delimitar el área de muestreo y definir distancias para la toma de cada muestra (característica única de cada mina).

Para caracterizar un yacimiento se debe tener en cuenta la historia geológica y litológica del depósito mineral, teniendo en detalle la historia de cada muestra con la recopilación de testigos<sup>1</sup> en cada etapa de preparación y análisis de las mismas, consignando toda la información en una base de datos. Un análisis complementario para la caracterización mineralógica se realiza mediante secciones pulidas, para determinar composición, moliendabilidad y porcentaje de oro libre.

El tratamiento de los valores entregados por cada muestra puede realizarse técnicamente mediante geoestadística para obtener un modelo tridimensional de la mina, además de obtener, mediante interpretación matemática, el cálculo de recursos y reservas minerales, aunque en muchas ocasiones y específicamente en la empresa sociedad minera del sur S.A.S.se realiza de forma clásica, definiendo secciones para determinar el tenor de mineral aurífero. En cualquier caso, el tratamiento de datos debe proporcionar confianza y debe estar encaminado hacia la productividad del programa minero. En este punto, el laboratorio de metalurgia es el auditor de los datos proporcionados por el geólogo.

Posteriormente con la información obtenida se estudia la factibilidad del programa minero basados además en la infraestructura de la región, el contexto social, los factores medioambiental, y la viabilidad de comercialización de los complejos minerales. Posteriormente mediante la realización de pruebas metalúrgicas, se determinan los procesos de beneficio y tratamiento de minerales, teniendo en cuenta la rentabilidad del programa minero, la licencia ambiental y la responsabilidad social, reduciendo todo a un modelo económico, administrativo y financiero.

El departamento de geología administra los recursos minerales indicando la perforación y explotación, además de determinar la evaluación (basada en el tenor crítico del depósito) y preparación de la mina para suministrar material a la planta de beneficio.

En el caso particular de la planta de beneficio de minerales de la sociedad minera del sur, el diseño fue sobreestimado, teniendo una planta de procesamiento de 300 toneladas (mineral y lodo) por día. Por lo que la solución operacional adoptada fue la creación de un composito conformado por los distintos minerales presentes en los diferentes títulos mineros de la región.

---

<sup>1</sup> Se denomina testigo a una muestra mineral, que es almacenada con el propósito de conocer la historia geológica de un depósito

## 2.2 Exploración geofísica aplicando técnicas eléctricas, electromagnéticas y gravimétricas de prospección

Los métodos de prospección geofísica son un conjunto de técnicas y metodologías en desarrollo desde inicios del siglo XX, las cuales tienen como objetivo obtener modelos detallados de la distribución espacial mineralógica y las características físicoquímicas del subsuelo. El objetivo es determinar, con base en los resultados de la exploración geofísica, las zonas con mayor probabilidad de tener una alta concentración de minerales metálicos. Las técnicas que más se utilizan en exploración geofísica son: Tomografía geoelectrica de resistividades, tomografía geoelectrica de polarización inducida, y magnetometría, que se describen en las siguientes secciones.

### 2.2.1 Prospección geofísica basada en las propiedades resistivas del subsuelo

#### 2.2.1.1 Tomografía geoelectrica de resistividades

La resistividad es una propiedad eléctrica fundamental de los materiales estrechamente ligada con su composición, estructura cristalina y litología. Por lo tanto, la determinación de la distribución de la resistividad en el subsuelo, a través de mediciones realizadas en la superficie terrestre, puede entregar información útil acerca de la geología estructural o la composición de las formaciones geológicas que constituyen el subsuelo. Un método común consiste en la transmisión de corriente directa en el subsuelo. Generalmente empleando una configuración de cuatro electrodos (varillas metálicas de  $\pm 20$  cm de largo). El propósito de esta configuración es introducir la corriente en el subsuelo y medir el potencial asociado, como se presenta en la Figura 1.

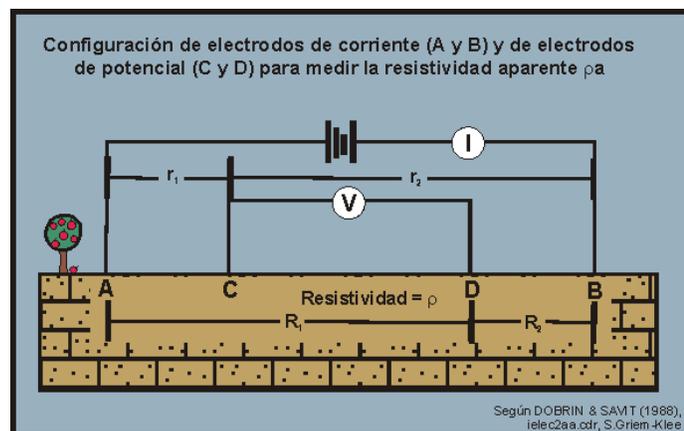
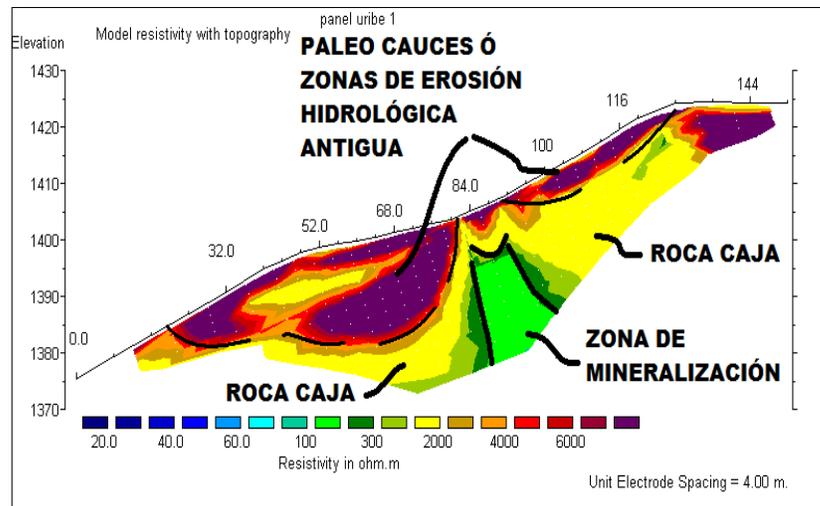


Figura 1. Circuito de tomografía eléctrica de resistividades.

En el caso particular, el programa minero de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. realizó un estudio de tomografía eléctrica de resistividades para definir las características de una región parcial del

suelo del título minero Mina La Puchis. Los resultados se obtuvieron trabajando hasta una profundidad de 30 m aproximadamente, entregando perfiles geoelectricos georreferenciados con imágenes de las resistividades. En estos se evidencian una anomalía de mineralización, probablemente asociada a un depósito de mineral. En la Figura 2 se muestra el detalle espacial 2D de las diferentes litologías y los valores de resistividad de este estudio.



**Figura 2.** Tomografía de resistividad eléctrica que describe la distribución mineralógica del panel Uribe de mina “La Puchis”

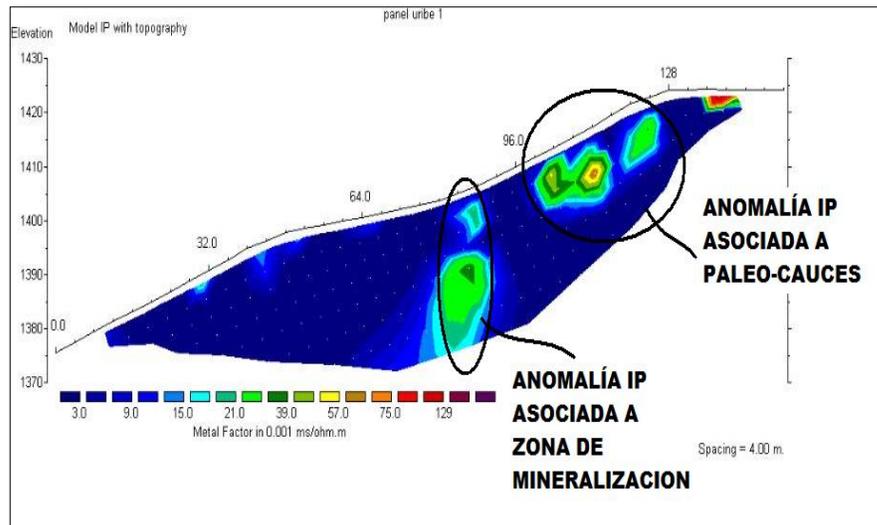
### 2.2.1.2 Tomografía geoelectrica de polarización inducida (IP)

Para la aplicación de esta técnica se energiza la superficie del terreno con un pulso de corriente de onda cuadrada a través de un par de electrodos. Generalmente las mediciones de resistividad IP son efectuadas simultáneamente a lo largo de cuadrículas regularmente distribuidas en el área a explorar.

Se aplica un impulso eléctrico al terreno, y el efecto de la técnica IP se obtiene construyendo una curva de decaimiento de voltaje en los electrodos de recepción. El efecto IP es una medida de la cantidad de materiales polarizables eléctricamente en el volumen de roca evaluada <sup>[1]</sup>. En circunstancias ideales, la cargabilidad IP da una medida de la cantidad de metales diseminados en la roca del subsuelo. Desafortunadamente, existen otros materiales tales como rocas grafiticas, arcillas y rocas metamórficas que inciden el efecto IP. Así pues, desde el punto de vista geológico las respuestas IP de un terreno no pueden ser interpretadas de manera unívoca y se hace necesario incorporar otros parámetros geológico-geofísicos (perforaciones, resistividad, muestreo físicoquímico, etc) para complementar la interpretación.

El programa minero de la Sociedad Minera del Sur, realizó un estudio de tomografía geoelectrica de polarización inducida para determinar la presencia de mineral diseminado y las cargabilidades

reales del subsuelo, en una región parcial del predio del título minero Mina La Puchis. Las mediciones se realizaron hasta una profundidad de 30 m aproximadamente. Como se puede observar en la Figura 3, los resultados evidencian una anomalía asociada a una zona de mineralización, probablemente asociada a un depósito de mineral.



**Figura 3.** Tomografía de polarización inducida (IP) donde se observa una anomalía de mineralización en el panel Uribe de mina “La puchis”.

## 2.2.2 Prospección geofísica aplicando el principio de inducción electromagnética

Los resultados de prospección electromagnética dependen de las variaciones de las propiedades físicas (susceptibilidad magnética) que influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas<sup>[2]</sup>

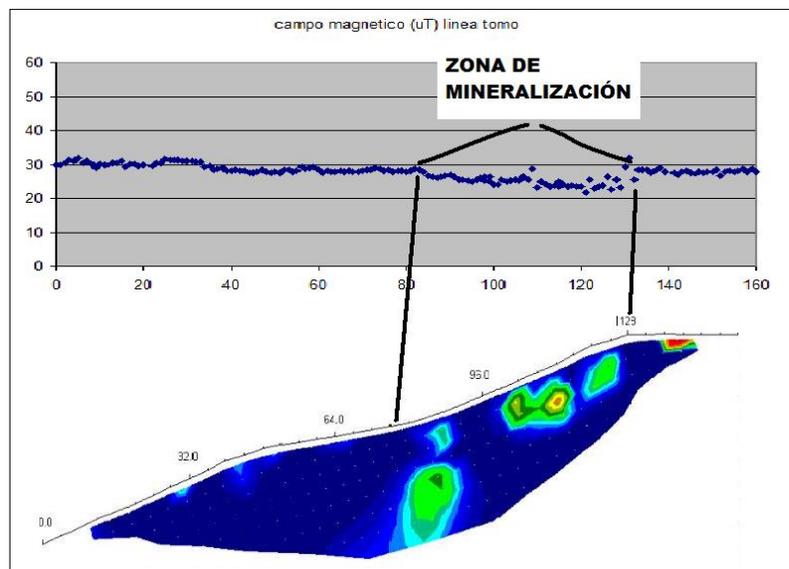
Los métodos electromagnéticos utilizan la generación de un campo electromagnético primario con frecuencia e intensidad constantes cuyos parámetros eléctricos (amplitud y fase) son medidos en diferentes ubicaciones. Sus variaciones son graficadas y correlacionadas con cambios en las propiedades físicas de los materiales influidos por dicho campo<sup>[3]</sup>.

### 2.2.2.1 Magnetometría

El principio físico de la técnica se basa en la medición del campo geomagnético local y la comparación de los resultados medidos con los resultados esperados de acuerdo con el modelo matemático del campo geomagnético terrestre.

Las diferencias entre ambos permiten concluir acerca de la ubicación de zonas de anomalía magnética causadas por alteraciones locales del campo medido. Dichas anomalías son resultado de magnetizaciones secundarias sufridas por los cuerpos ferrosos presentes en el área de estudio.

En el caso particular, el programa minero de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. realizó un estudio de magnetometría en una región parcial del suelo del título minero Mina La Puchis para ubicar las zonas más probables donde se encuentren cuerpos ferrosos a los cuales se asocia la mena de oro. En los resultados se evidencian una anomalía magnética asociada a mineralización, probablemente debida a un depósito de mineral. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos en este estudio.

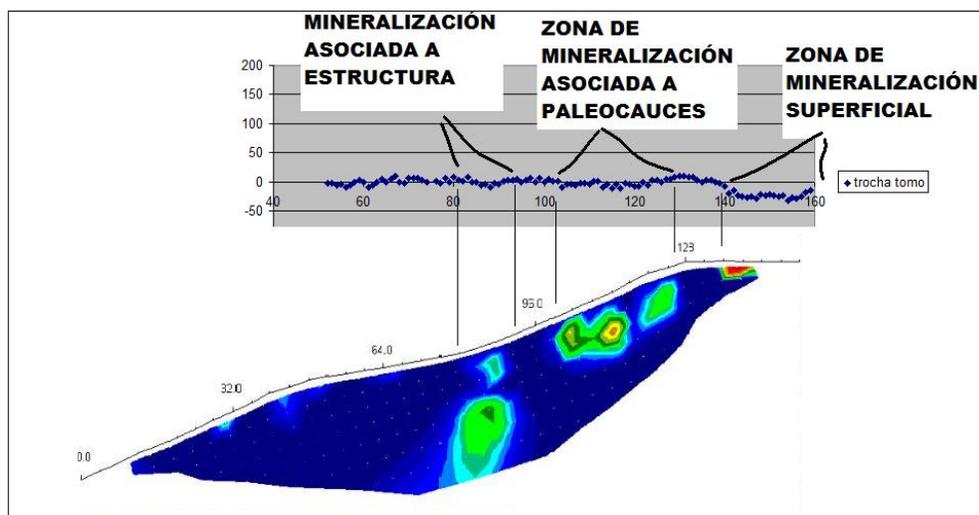


*Figura 4.* Magnetometría donde se observa una anomalía magnética asociada a mineralización en el panel Uribe de mina “La puchis”.

### 2.2.2.2 Perfil electromagnético

En el método del perfilaje electromagnético, un campo electromagnético primario es generado por una corriente alterante en un bobinado transmisor, el cual se ubica sobre el terreno a estudiar. Este campo en su interacción con el suelo genera una alteración de la señal de campo electromagnético medida a lo largo de una distribución regular de detectores o perfiles magnetométricos.

En el caso particular, el programa minero de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. se realizó un estudio de perfilaje electromagnético en una región parcial del suelo del título minero Mina La Puchis. Los resultados se obtuvieron comparando las anomalías magnéticas que se presentan alrededor del valor de referencia de (0  $\mu$ T). En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos en este estudio.



**Figura 5.** Perfil magneto métrico donde se observan zonas de mineralización en el panel Uribe de mina “La puchis”.

## 2.3 Exploración geológica

La presencia de minerales económicamente explotables en determinadas geografías de una región, se debe principalmente al ciclo de las rocas. Por ejemplo, la geología del oro muestra la formación de un paisaje rocoso con anomalía de mineralización<sup>2</sup>, como resultado del choque entre placas tectónicas, lo que ocasiona fractura en las estructuras de las rocas, donde queda diseminado el mineral aurífero. Las fallas y los eventos tectónicos posteriores (presiones y tensiones) determinan la dirección preferencial del cuerpo mineral o rumbo de la veta. Comúnmente y en particular en los títulos mineros de la sociedad minera del sur, las fallas se asocian a mena de oro, el buzamiento (inclinación) de las fallas es semi-vertical con una inclinación de 80 grados respecto a la superficie, además en estos títulos las vetas presentan morfología pinch and swelt (camándula), lo que ocasiona que las minas presenten anisotropías, siendo depósitos irregulares morfológicamente y en tenor, (grado de mineralización variable espacialmente), todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta, en la evaluación de un programa minero.

Respecto del ciclo minero, inicialmente se cuenta con una etapa de exploración y caracterización macroscópica por parte de un geólogo, la cual tiene como propósito estudiar la composición mineralogía, definir y/o revisar los frentes de explotación. La caracterización cuenta con la toma de muestras representativas del mineral que permiten establecer la composición y la asociación de una mena a otro mineral. En el caso particular de los títulos mineros de la Sociedad Minera del Sur, el mineral aurífero está asociado a la presencia de sulfuros en el tren estructural<sup>3</sup>, el grado de

<sup>2</sup> Anomalía de Mineralización: Concentración de minerales, sulfuros o metales preciosos.

<sup>3</sup> Tren Estructural: Terminología geológica que hace referencia a un sistema de fallas que siguen una tendencia en el terreno a partir de una falla regional o falla mayor.

liberación y el tenor dado en g/ton. Las actividades de muestreo deben entregar resultados que presenten correlación entre los datos de geología y los datos del laboratorio de metalurgia. Sin embargo, algunas veces el geólogo debe asumir conclusiones sobre el mineral, decidiendo si es un mineral económicamente explotable o material estéril.

En los frentes de explotación, se emplean herramientas como el martillo geológico, que tiene una punta de tungsteno (8 en la escala de Mohs) y una brújula que permite hacer mediciones del buzamiento de una falla geológica asociada a una veta, el rumbo de la anomalía de mineralización y las propiedades magnéticas de los minerales presentes en la estructura. El muestreo también se realiza en las volquetas que transportan el mineral mena y en sitios donde se almacena el mineral (patios).

Por otra parte, una herramienta complemento para el análisis que realiza el departamento de Geología de un programa minero es la topografía. Esta ciencia estudia el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie terrestre con sus formas y detalles. El estudio topográfico debe tener el menor desfase posible en las mediciones y permite entre otras cosas identificar agua subterránea y la ubicación más probable de un cuerpo mineral (veta).

## **2.4 Recursos minerales**

### **2.4.1 Geología regional**

El municipio de Buenos Aires (Cauca) se localiza en la denominada depresión Cauca-Patía. El Cerro Santa Catalina o Cerro la Teta es el principal rasgo morfológico de la zona y tiene una altura máxima de 1.800 msnm, está circundado por colinas bajas, onduladas fuertemente disectadas por las corrientes de agua y con contrastes de relieve. Este fuerte contraste está ligado a las diferencias de dureza entre los variados tipos de rocas del área y posiblemente a un relieve de cuerpo subvolcánico que se encuentra mineralizado con oro.

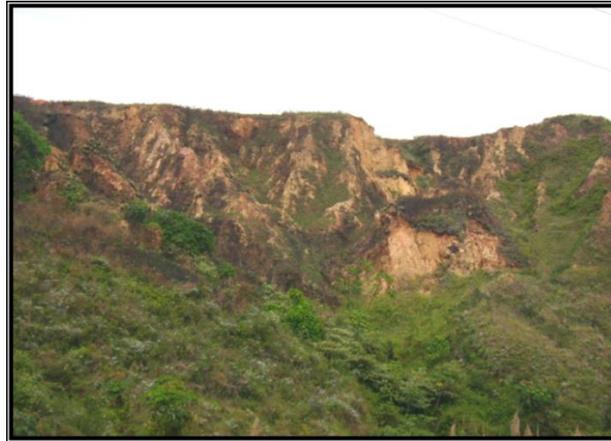
Se observan sedimentos, compuestos por flujos de lodos, conos de deyección de ladera y sedimentos en las terrazas de los principales ríos y quebradas que drenan el área, en especial el río la Teta.

### **2.4.2 Geología estructural local**

El stock<sup>4</sup> del cerro la Teta o Santa Catalina, se localiza regionalmente en el pie oriental de la Cordillera Occidental, ocupando una zona de intenso fracturamiento con fallas menores que interceptan la principal falla de la región, denominada falla Cauca, la cual sigue el cauce de dicho río. Generalmente estas fallas menores están ocultas debajo de una gruesa capa de suelos y rocas meteorizadas.

---

<sup>4</sup> Stock: termino geológico que hace referencia a una intrusión discordante ígnea



*Figura 6.* Rocas meteorizadas del Stock de Santa Catalina.

### **2.4.3 Geología local**

Geológicamente el stock del cerro la Teta o Santa Catalina, se caracteriza por presentar mineralizaciones de sulfuros de hierro y cobre, producto de un evento hidrotermal sobre zonas de fracturas. Su composición mineralógica básica es cuarzo, feldespatos, biotita, sulfuros (pirita, calcopirita, arsenopirita, galena) y trazas de clorita.

## **2.5 Caracterización de complejos minerales**

La industria minera tiene como objetivo definido procesar diferentes tipos de menas para la obtención de concentrados minerales de alta ley y valor comercial. Los métodos utilizados para el beneficio dependen de sus propiedades físicas, composición química y características fisicoquímicas.

El esquema de operación, además de la planta de tratamiento y beneficio de minerales auríferos, se debe realizar considerando diferentes estudios geológicos y mineralógicos, tomando como referencia la caracterización de depósitos y mineralogía de procesos.

A continuación se presentan las técnicas de caracterización más comunes empleadas en la industria minera.

### **2.5.1 Microscopia**

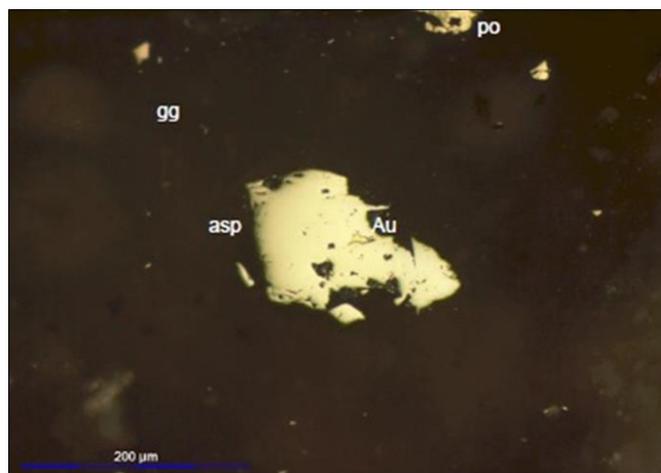
La microscopía es el conjunto de técnicas y métodos destinados a hacer visible objetos de estudio que por su reducido tamaño están fuera del rango de resolución del ojo humano. Un microscopio es un instrumento que amplifica una imagen y permite la observación de mayores detalles de los posibles a simple vista. La resolución de una imagen obtenida por microscopía depende de la longitud de onda de la fuente, el espesor de la muestra, la calidad de la fijación, entre otros factores.

### 2.5.1.1 Microscopia óptica, MO

La microscopia óptica de luz reflejada es una técnica de análisis y estudio fundamentado en las propiedades ópticas de diversos minerales opacos, siendo posible identificarlos por su color, textura, dureza, y brillo. En mineralogía permite la determinación de ciertos minerales, específicamente sulfuros metálicos, además de abstraer de la anisotropía y reflexiones internas características tales como tamaño, asociación a mineral aurífero y grado de liberación. Para esto se emplea el microscopio óptico común, el cual está conformado por sistema mecánico, sistema de iluminación y sistema óptico (lentes, filtros, compensadores, laminas).

La técnica permite conocer información de la composición mineralógica y la proporción de cada uno de los minerales. Estos son datos fundamentales ya que pueden interferir en los procesos de beneficio. Algunos minerales pueden llegar a ser generadores de ácidos o consumidores de cianuro y oxígeno (arsenopirita, pirrotina, teluros de oro y plata). Además, la relación intergranular, la textura y la secuencia de deposición de los minerales que conforman la mena, proporcionan información sobre la petrología y formación del depósito. Estos parámetros permiten definir la incidencia de la refractariedad de un mineral, es el caso del encapsulamiento (pirita, óxidos de hierro, silicatos), la distribución granulométrica, la presencia de oro expuesto con recubrimientos (óxidos de hierro o arcillas ferruginosas), el grado de liberación y la forma en la que se presenta el oro en los diferentes yacimientos. El conocimiento de estas características es una herramienta que permite definir el proceso y las condiciones de beneficio.

En el caso particular, el programa minero de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. realizó una caracterización óptica de una muestra representativa del depósito, para determinar la asociación de la mena de oro a otros minerales y los tamaños representativos del metal precioso de interés. Los resultados muestran asociación de partículas de oro a sulfuros (Pirita (*py*), Arsenopirita (*asp*)) en tamaños reducidos del orden de unos cuantos micrones, además de la presencia de minerales como la pirrotina (*po*) y galena (*gg*). En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos en este estudio.



**Figura 7.** Microscopia óptica de una muestra mineral.

### 2.5.1.2 Microscopia Electrónica

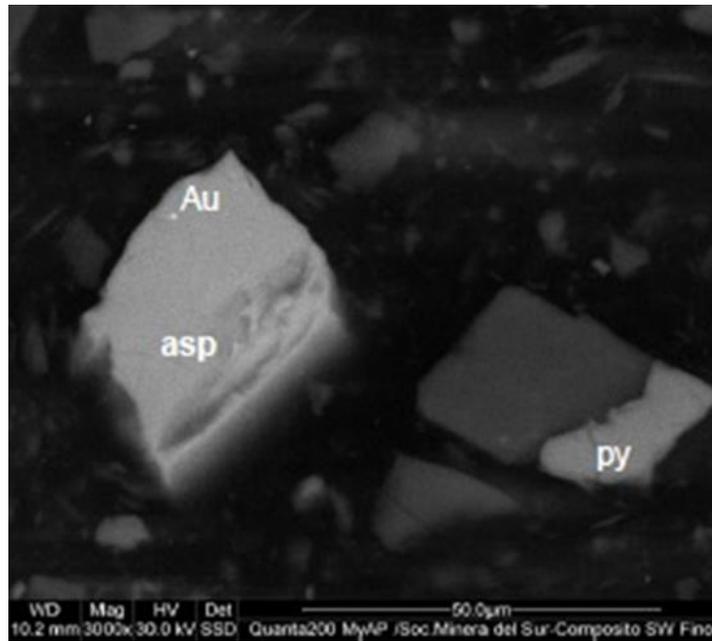
Técnica de análisis que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. La técnica presenta gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución. La técnica se basa en la observación de fenómenos producidos tras el bombardeo de un haz de electrones de alta energía sobre una superficie. Existen dos variantes de la técnica que son la microscopia electrónica de transmisión TEM y la microscopia electrónica de barrido SEM.

En la microscopia TEM se utiliza un haz de electrones para visualizar el objeto, debido a que la amplificación de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. Cuando las muestras a analizar son muy pequeñas, se debe obtener imágenes con patrones de difracción (Característica de la microscopia electrónica de transmisión), que se logran cuando la fuente emite en longitudes de onda del orden de las características de la muestra, la imagen obtenida se logra gracias a los electrones que atraviesan la muestra, lo que proporciona un zoom de hasta  $10^6$ . Las principales partes que componen un microscopio electrónico de transmisión son: el cañón de electrones (Transistor de efecto de campo FET), lentes magnéticas, sistema de vacío y el fotodetector (fotomultiplicador).

La microscopia electrónica es una herramienta que permite la caracterización de menas auríferas, mediante la determinación cuantitativa de minerales, grado de liberación, determinación de minerales de difícil diferenciación óptica, la determinación de la composición elemental, la detección de regiones con localización de oro submicroscópico en los sulfuros y otros minerales asociados, determinación de metales pesados (interés comercial, tratamiento de efluentes) e identificación de telurios o arseniuros de oro<sup>[4]</sup>.

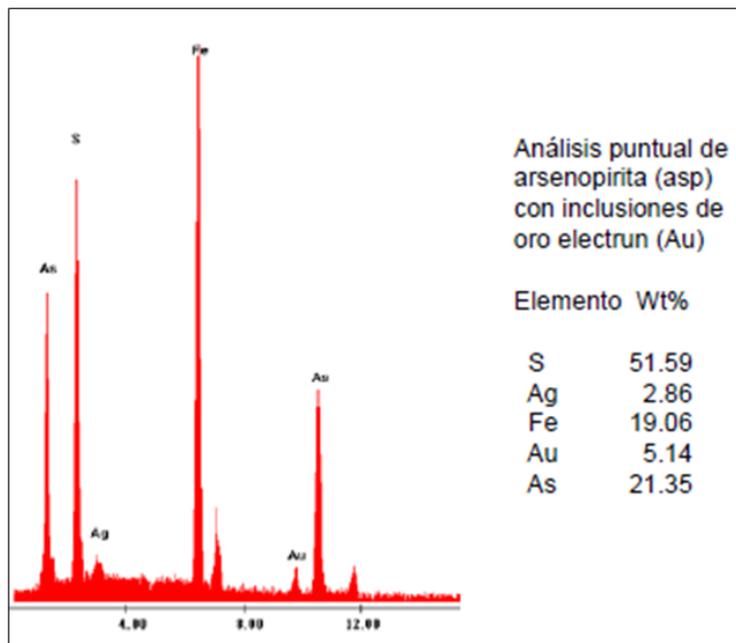
Una herramienta adicional con la que se cuenta en el análisis de minerales con esta técnica, es la microsonda electrónica, con la que se elaboran mapas elementales y espectros de composición elemental utilizando rayos X (EDX, espectroscopia de dispersión de rayos X), los cuales permiten caracterizar químicamente los minerales de un yacimiento.

En el caso particular, el programa minero de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. realizó una caracterización con la técnica de análisis microscopia electrónica de barrido SEM de una muestra representativa del depósito, para determinar la presencia de oro submicroscópico asociado a sulfuros y la presencia de telurios de oro y plata. En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos en este estudio. Donde además se observa la asociación de la mena de oro a diferentes sulfuros pirita (*py*) y Arsenopirita (*asp*),



**Figura 8.** Imagen tomada con microscopia electrónica de barrido.

Complementariamente se caracteriza químicamente la muestra con ayuda de la técnica de análisis espectroscopia de dispersión de rayos X, que permite conocer la composición elemental, los resultados obtenidos se presentan en la figura 9 donde se observan los picos característicos de los elementos que componen los sulfuros a los cuales se asocia la mena de oro, y la intrusión de oro-electrum dentro de la matriz de mineral refractario.



**Figura 9.** Espectro de composición tomado con la técnica de análisis EDX.

## 2.5.2 Difracción de rayos X, DRX

Técnica de caracterización que se utiliza para determinar parámetros cristalográficos en la identificación y análisis de sólidos. En minería, esta técnica permite identificar los minerales de mena asociados y minerales finogranulares de alteración hidrotermal en depósitos auríferos <sup>[5]</sup>. Por otra parte, la técnica de DRX permite un análisis en donde es posible obtener una composición mineralógica cualitativa de las especies más abundantes. Una de las desventajas de la técnica es que no puede analizar composición mineralógica menor al 5%.

Los análisis por difracción de rayos X contribuyen a la identificación de minerales y compuestos químicos neoformados; por cambios en temperatura, acidez y composición de soluciones, en depósitos hidrotermales.

## Referencias

- [1] Bhattacharya B.B., Gupta Dinesh, Buddhadeb Banarjee, **Mise-a-la-masse survey for an auriferous sulfide deposit**, *Geophysics*, vol 66, No 1 (January-february 2001).
- [2] Best M. E., Shamma B.R., **some modelling results for turam type em systems**, *SEG*, july 1976.
- [3] Frischknecht Frank C., **Scandinavian electromagnetic prospecting**, *Minning engineering*, September 1959.
- [4] M. C. Ojeda Escamilla, J. L. Reyes Bahena, A. Aragón Piña, **Caracterización mineralógica en la industria minera**, *Instituto de metalurgia, Universidad Autónoma de san Luis Potosí*, México.
- [5] TÉCNICAS MINERALÓGICAS, QUÍMICAS Y METALÚRGICAS, PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MENAS AURÍFERAS, *Agencia de Cooperación Internacional del Japón, Ingeominas (instituto colombiano de geología y minería)*, Guía metodológica, colección de textos científicos, Bogotá, Colombia 2010.

## **3. Beneficio de complejos minerales**

### **3.1 Procesos de conminución y reducción de tamaño**

La conminución es el conjunto de procesos de reducción de tamaño de minerales, los cuales se realizan con el objetivo de liberar especies valiosas y preparar el mineral para procesos metalúrgicos de beneficio posteriores <sup>[1]</sup> (flotación y lixiviación por cianuración). Los factores que determinan la intensidad del proceso y la razón de reducción son:

- La ley del mineral (asociada al porcentaje de metal a recuperar)
- Características físicoquímicas de la ganga<sup>5</sup> presente
- Tonelaje de reservas
- Proceso posterior de concentración o recuperación
- Dimensiones geométricas de los equipos de conminución
- Valor comercial del mineral
- Costos de producción

La liberación de minerales económicamente explotables se logra en forma parcial y se debe realizar mediante el desarrollo de varias etapas de trituración (chancado) y molienda <sup>[2]</sup>. En las etapas de producción en labores de mina, la fragmentación controlada de la roca mediante el empleo de explosivos es el primer proceso de conminución, seguido de las etapas de trituración y molienda.

#### **3.1.1 Trituración de minerales**

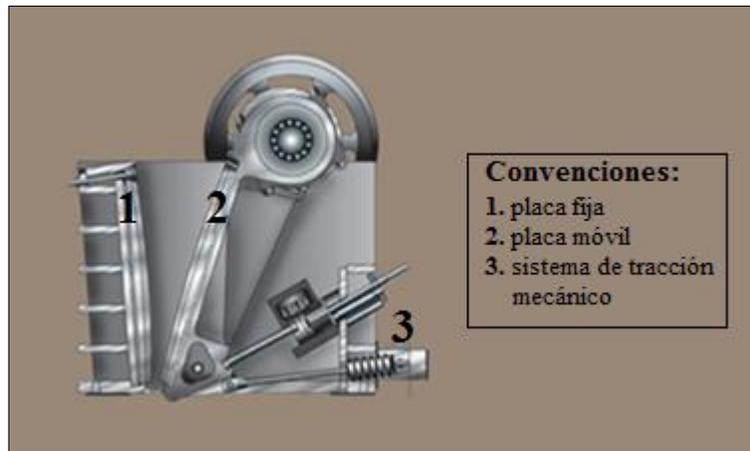
La trituración de minerales es un proceso de reducción para obtener minerales con tamaño de partícula relativamente grandes (del orden de pulgadas) que debe realizarse en seco <sup>[2]</sup>. El propósito de este proceso es obtener partículas con un tamaño requerido y uniforme. El proceso se realiza en una trituradora que es un equipo electro-mecánico en el que se reduce el tamaño de un mineral, mediante movimientos de desgaste y atrición. Las etapas de trituración pueden ser varias dependiendo de los requerimientos operacionales de cada planta de beneficio de minerales, en la planta de beneficio de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S se realizan dos etapas de trituración, que se describirán a continuación.

##### **3.1.1.1 Trituración Primaria**

La trituración primaria se realiza en una chancadora o trituradora de mandíbulas tipo Blake (empleada principalmente en la industria minera), como la que se muestra en la Figura 10. Dos placas (una móvil y otra fija) generan presión e impacto sobre los complejos minerales para fracturar por fisuras preferenciales la mena, desde un tamaño de partícula de 60 pulgadas a entre un tamaño de 8 y 6 pulgadas.

---

<sup>5</sup> Ganga: Mineral sin valor comercial, también denominado estéril.



**Figura 10.** Esquema de una Trituradora de Mandíbulas tipo Blake. En la figura se presenta la placa fija y la placa móvil que hacen compresión sobre los minerales complejos, además del sistema de tracción mecánico que genera el movimiento en la placa móvil.

Las placas son de superficie corrugada construidas con aleaciones de acero de alta resistencia mecánica, como las que se muestran en la Figura 11. Las superficies corrugadas tiene la intención de disminuir el efecto del problema característico en esta etapa de chancado, que se presenta cuando se tiene gran cantidad de material con tamaño de partícula inferior o igual al producto (finos), ya que en este punto, el mineral presenta un comportamiento elástico que disminuye la eficiencia de los equipos en la fractura de sólidos. Por otra parte, se debe evitar la sobre-molienda de un mineral, ya que se incrementan los consumos de energía y por lo tanto los costos de producción.



**Figura 11.** Superficies Corrugadas de la Trituradora Primaria.

La velocidad de las mandíbulas varía de modo inverso al tamaño de material requerido. El rango operacional se encuentra entre las 100 y 350 rpm<sup>[3]</sup>. La amplitud máxima de oscilación se determina con base al tipo de material, siendo mayor para materiales resistentes y de comportamiento plástico, y menor para materiales duros y quebradizos, estos parámetros operacionales son definidos empíricamente para cada planta de beneficio.

Un factor determinante en las etapas de conminución es la resistencia mecánica del mineral, la cual está relacionada con la composición mineralógica del material. Este parámetro afecta la reducción de tamaño y define el tipo de herramientas y maquinas que se emplearan en cada etapa. Un indicador de esta característica es el índice de trabajo (Work Index) que se define como la energía necesaria para reducir a un tamaño determinado una tonelada de mineral. En la práctica este índice se determina experimentalmente, siendo un parámetro característico de cada depósito<sup>3</sup>.

El tamaño de partícula del producto es inversamente proporcional al consumo de energía, por lo que si se requiere partículas finas se debe suministrar al sistema y equipos de conminución, la energía suficiente para lograr la reducción apropiada.

El parámetro que controla la reducción de tamaño y granulometría final del mineral producto en conminución es el consumo específico de energía, definido como la potencia del equipo (p) empleado para la reducción de tamaño de una tonelada de mineral (f) en una hora de operación, dado en (KWh/ton) . Como se indica en la Ecuación 1.

$$E = \frac{P}{f} \quad (1)$$

La trituración de minerales y el porcentaje de metal precioso contenido en la matriz de mineral definen el consumo de reactivos, ya que en esta etapa de la conminución se utilizan para promover reacciones químicas a través de la exposición e incremento del área superficial como consecuencia de la reducción de tamaño.

Los mecanismos con que se reduce el tamaño en las etapas de conminución son fractura, impacto (aplicación de esfuerzos compresivos de alta velocidad) y cizalla (no deseable en la práctica)<sup>4</sup>. Además se debe tener en cuenta que aunque el tamaño final de partícula depende de los requerimientos operacionales, asociado al grado de liberación, debe ajustarse a condiciones económicamente factibles.

### **3.1.1.2 Trituración Secundaria**

Las etapas de trituración secundaria y terciaria, se realizan para el tratamiento de minerales de mayor densidad aparente (minerales compactos con menor espacio libre). El mecanismo con que se realizan estas etapas es el impacto. En la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. se realiza en una chancadora giratoria o impactor (presentado en la Figura 12), el cual tiene la característica de procesar un importante flujo másico. Debido a que la velocidad de operación es considerable (velocidad angular de 6000 rpm), la trituradora debe soportar mayores esfuerzos de trabajo. Generalmente los eyectores del equipo poseen películas o recubrimientos cerámicos para reducir el desgaste (deformación de la superficie en los puntos de contacto) y minimizar el consumo de energía. En la Figura 13 se presentan los eyectores del impactor.

Tanto el diseño del proceso de trituración como el circuito y las etapas de chancado, son definidas por las características y composición mineralógica del depósito<sup>[4]</sup> (que es variable en el tiempo). La eficiencia en la reducción de tamaño en las etapas de conminución depende de la capacidad de

procesamiento, dureza, porcentaje de finos, humedad, características de mena y ganga, composición mineralógica y factor de forma del producto final. La condición de mayor eficiencia se logra cuando la razón de reducción es considerablemente alta, y la potencia consumida es baja, en condiciones ideales la energía específica del proceso tiende a cero.



*Figura 12.* Impactor (Trituradora giratoria).

La operación de los procesos de trituración primaria y trituración secundaria en la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. se realiza mediante dos etapas de trituración en serie chancadora de mandíbulas e impactor el objetivo es obtener una razón de reducción mayor<sup>6</sup>, en un circuito cerrado directo (circuito que consta de dos etapas de trituración y una etapa de clasificación en un tamiz industrial), la etapa de clasificación define el sobretamaño<sup>7</sup> que ingresa como carga circulante a la etapa de trituración secundaria, obteniendo un producto final enviado a las etapas de molienda. En el capítulo 4 se retomaran y ampliarán estos aspectos en la descripción del proceso productivo.

---

<sup>6</sup> Que se calcula como el producto de las razones de reducción de las etapas individuales.

<sup>7</sup> Sobretamaño: Partículas de mineral con un tamaño superior al tamaño de los orificios de la red de clasificación, y por lo tanto quedan en el tamiz.



*Figura 13.* Eyectores Cerámicos del Impactor.

### **3.1.2 Molienda de minerales**

La molienda de minerales hace referencia al proceso de conminución que se realiza utilizando medios de molienda, además de emplear fluidos elegidos generalmente por su viscosidad y viabilidad económica de operación. El objetivo es el mismo que en la trituración: reducir el tamaño y liberar especies minerales de valor comercial (mena) dispersos en una matriz de estéril (ganga). Los equipos empleados en el proceso pueden ser molinos de bolas, molinos de barras y molinos semiautógenos (SAG). En la industria minera y en particular en la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. se emplea el molino de bolas presentado en la Figura 14, logrando un tamaño de partícula más reducido, que el obtenido en las etapas de trituración.

Los molinos de bolas se utilizan en aplicaciones industriales en las que se requiere un producto con granulometría intermedia (tamaño representativo de partícula de 0.5mm hasta 75 $\mu$ m) o productos finos (tamaño representativo de partícula inferior a 75 $\mu$ m)<sup>[5]</sup>.

Los molinos son cilindros rotatorios que son sometidos a movimientos de rotación en torno a su eje horizontal, reduciendo en este proceso el tamaño de partícula de los minerales por medio de mecanismos de compresión e impacto para partículas gruesas y abrasión para partículas finas. La relación de dimensión (largo:diámetro) del molino puede ser igual o mayor a uno<sup>[5]</sup>, siendo los más empleados en la industria los de relación de 2, 1.5 y 1. Algunos molinos tienen en las paredes del cilindro películas o recubrimientos cerámicos para disminuir el desgaste y prolongar la vida útil de los equipos. El tamaño de alimentación a los molinos de bolas está constituido por partículas en un rango de 1 a 2 mm.



*Figura 14.* Molino de Bolas

El medio de molienda es constituido por un conjunto de esferas (bolas) de diversos diámetros, las cuales pueden ser de acero, hierro fundido o aleaciones de materiales<sup>[6]</sup>. En la Figura 15 se presenta una ilustración del medio de molienda. El propósito es aumentar la superficie específica para lograr mayor eficiencia, pero hasta un valor crítico en el que se evite la sobre-molienda. Las bolas ocupan de 35 a 45% del volumen útil del molino.

Debido al desgaste de las bolas se deben reponer cada cierto tiempo o hacer una recarga que debe introducirse al molino estando en operación. El desgaste se asocia con las siguientes características: la abrasividad del mineral, características físicas y químicas del fluido agregado en el proceso (frecuentemente se emplea agua), nivel de llenado del molino, material del medio de molienda y velocidad de giro en operación.



*Figura 15.* Medio de Molienda.

La potencia de trabajo del molino está definida por el nivel de llenado de las bolas, el cual puede variar debido a las características intrínsecas del mineral (dureza, viscosidad de la pulpa, porcentaje de sólidos).

La velocidad de operación del molino de bolas tiene un valor cercano al 75% de la velocidad crítica para molinos grandes y 80% para molinos pequeños. La velocidad de giro crítico es cuando se alcanza una magnitud a la cual la carga se centrifuga, esto es, la fuerza centrífuga supera o es igual en magnitud al peso de la partícula ejercido por la aceleración de la gravedad, generando que la carga se adhiera a la superficie del molino, gire a la misma velocidad del molino y no se obtenga molienda de mineral.

Los movimientos a los que son sometidas las partículas minerales en el proceso de molienda en el molino de bolas son: catarata, cascada (molienda por impacto), pie de carga y hombro de carga (molienda por abrasión)<sup>[5]</sup>. Estos definen la trayectoria de la partícula y dependen del ángulo de ataque del mineral en la superficie del cilindro del molino.

## **3.2 Estratificación de tamaño de partícula**

La estratificación de minerales se refiere a su separación en términos del tamaño de partícula. En la industria minera puede ser una etapa de separación de partículas grandes (gruesos) realizada en harneros en un proceso de tamizaje o para la clasificación de partículas finas realizada en equipos más complejos llamados hidrociclones.

Los objetivos del proceso de estratificación y clasificación de tamaños son: extraer minerales suficientemente finos (para procesos de beneficio posteriores), aumentar el grado de liberación de la mena, favorecer reacciones químicas, evitar sobre-molienda para reducir costos de operación, tener control sobre el tamaño de partícula y satisfacer restricciones granulométricas de beneficio<sup>[7]</sup>.

### **3.2.1 Tamizaje industrial**

El tamizaje industrial es un proceso probabilístico donde la variable de interés es el tamaño de partícula. Depende de factores como la forma de la partícula, abertura disponible de la red del harnero (área), posición con que la partícula enfrenta a la superficie y el tiempo de harneado.

La separación de partículas minerales gruesas se realiza en harneros y persigue objetivos más específicos como: la separación de fragmentos gruesos de los más finos que se encuentran contenidos en una mezcla de material y la extracción del material que cumple con las especificaciones de producto (set point). El harneado mecánico se basa en las oportunidades de paso de la partícula a través de la superficie clasificadora, que depende de la forma, el área del orificio, y el número sucesivo de orificios, además de la trayectoria, velocidad, dirección, empaquetamiento y deslizamiento de las partículas. A su vez, la capacidad de harneado es afectada por factores como el porcentaje de rechazos en el material, porcentaje de humedad (indicador de la aglomeración y adhesión de las partículas) y el porcentaje de partículas denominadas difíciles (tamaños de partícula inferiores o superiores, pero similares al set point)<sup>[7]</sup>.

La eficiencia del proceso de clasificación en harnero depende del tonelaje de alimentación y el espesor de la capa mineral, se obtiene como la razón entre la masa pasante y la masa pasante en

condiciones ideales. Los harneros empleados frecuentemente en la industria minera (80%) son harneros de estratificación (salto de partículas) e inclinación simple. El ángulo de inclinación debe estar alrededor de los 15 grados y su movimiento se debe a un sistema de movimiento circular y contrapeso.

Una variable que se considera crítica es el espesor de la capa mineral que se deposita sobre la superficie clasificadora. Su valor se debe determinar para cada yacimiento mineral y se le asocian los problemas que comúnmente se presentan, tales como el taponamiento de las aberturas de la red del harnero (cuando el espesor es delgado) y la obstrucción de las partículas finas hacia las aberturas (que tiene lugar si el espesor es grueso) <sup>[8]</sup>.

Las especificaciones del medio de harneado (mallas) son el área efectiva (abertura), tamaño, forma y tipo de material que depende directamente del flujo de alimentación. Los requerimientos operacionales de las mallas son: resistencia a la abrasión por deslizamiento y cizalla además de resistencia al impacto. La forma estándar y de mayor comercialización en el mercado de los orificios de las mallas es romboédrica, aunque la malla elíptica que se presenta en la Figura 16 tiene un periodo de vida útil mayor.



**Figura 16.** Medio de Estratificación.

Matemáticamente la distribución de tamaño de partícula es descrita por funciones de probabilidad. Un modelo que muestra la distribución de las partículas finas, en términos de tamaño ( $x$ ) y porcentaje  $F(x)$ , es la función de distribución de Gates, Gaudin y Schuhmann, en el cual la distribución depende de la relación del tamaño de partícula con el valor del set point  $x_0$  (abertura de la malla), y un coeficiente  $\alpha$  que depende de características intrínsecas del mineral.

$$F(x) = 100 \left( \frac{x}{x_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

A su vez la distribución de las partículas gruesas, en términos de tamaño ( $x$ ) y porcentaje  $F(x)$ , es descrita por la función de distribución de Rosin-Rammler. Esta distribución varía en forma

exponencial en relación a la razón entre el tamaño de partícula y el valor del set point  $x_0$  y depende de un coeficiente  $\alpha$  característico para cada tipo de mineral.

$$F(x) = 100 \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^\alpha} \right\} \quad (3)$$

Existe una relación entre la distribución de partículas finas y partículas gruesas. Así, la función de distribución de Gates, Gaudin y Schuhmann se obtiene como caso límite de la función de distribución de Rosin-Rammler, haciendo un desarrollo en series de Taylor de esta última, alrededor del valor del set point y aplicando el siguiente criterio:

$$x \ll x_0$$

$$F(x) = 100 \left\{ 1 - \left( 1 - \left( \frac{x}{x_0} \right)^\alpha + \frac{1}{2!} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{2\alpha} \dots \right) \right\}$$

$$\therefore F(x) = 100 \left( \frac{x}{x_0} \right)^\alpha$$

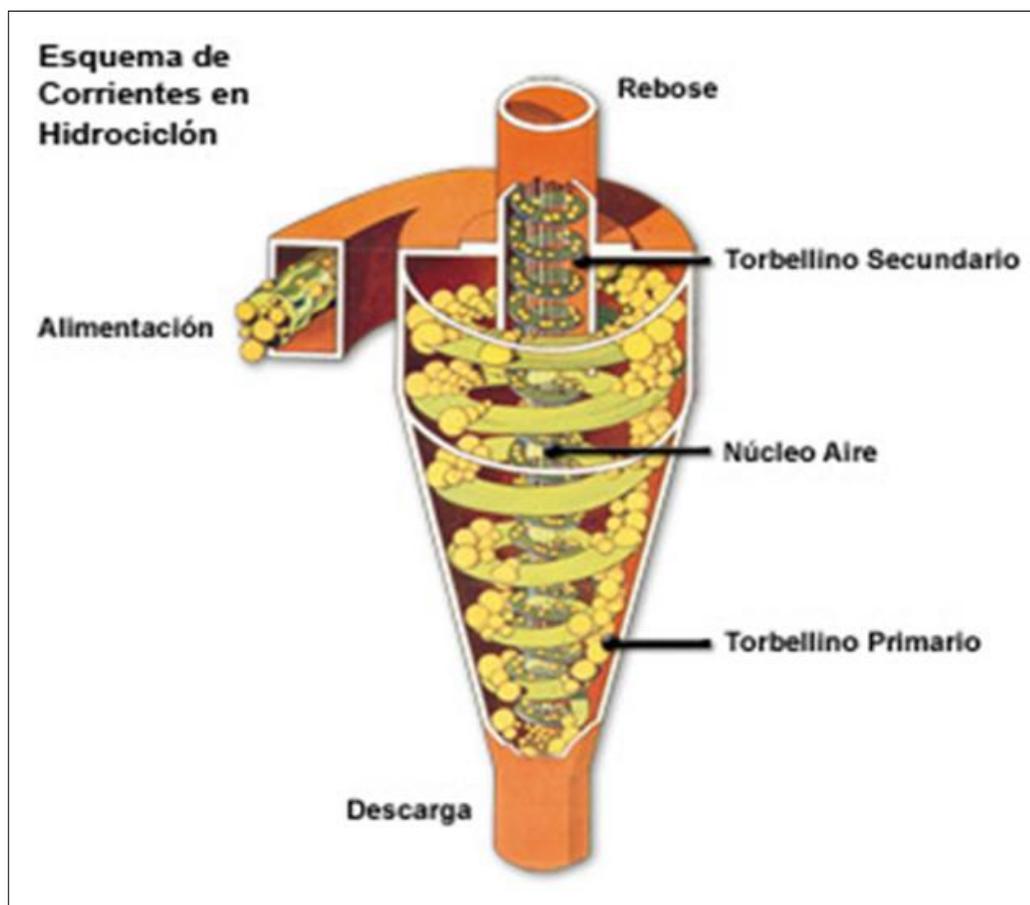
### 3.2.2 Estratificación en hidrociclones

Los hidrociclones son dispositivos que se utilizan con el propósito de hacer estratificación y/o separación de partículas sólidas contenidas en una mezcla bifásica<sup>[9]</sup>.

Los hidrociclones son empleados en la actualidad en diversas aplicaciones tecnológicas con propósitos variables, como el lavado de sólidos, clasificación y estratificación de partículas minerales por tamaño y ordenamiento de complejos minerales por densidad y forma.

En el hidrociclón, la pulpa mineral y el flujo másico de agua ingresan en forma tangencial al dispositivo, formando un espiral, por lo que en el interior siguen una trayectoria helicoidal, tal como se muestra en la Figura 17 donde se indica el esquema de corrientes en la operación del dispositivo hidrociclón. La fuerza centrífuga ejercida sobre las paredes del hidrociclón forma un vórtice de baja presión generando vacío, por efecto del cual el mineral con menor tamaño de partícula (finos) es llevado a la parte superior del hidrociclón (over flow) y el mineral con mayor tamaño de partícula (gruesos) es empujado por el flujo de alimentación hacia la parte inferior (under flow), por lo general enviado como carga circulante a etapas de molienda.

En la práctica el producto grueso de la descarga (under flow), está formado por partículas gruesas y partículas finas que son arrastradas por el agua. Los finos presentes en este flujo reducen la eficiencia de estratificación del hidrociclón. A este fenómeno se le denomina bypass.



*Figura 17. Esquema de Operación de un Hidrociclón.*

Las variables físicas presentes en el proceso son: presión de entrada, aceleración del vórtice y parámetros geométricos del hidrociclón <sup>[9]</sup>. A continuación se realiza una descripción de los parámetros geométricos más relevantes y sus efectos. El área de entrada define el flujo de entrada (alimentación), y la velocidad con la que ingresa el flujo másico de **pulpa mineral** y agua, además del gradiente de velocidad tangencial para los diferentes radios del hidrociclón. La forma en el conducto de entrada debe ser rectangular, ya que es la forma que se considera más eficiente para el suministro de la pulpa. La acción del cono es comprimir los sólidos de mayor tamaño de partícula (los gruesos) hacia el interior del dispositivo clasificador. En el momento de la descarga, esta disposición se obtiene con un ángulo que es parámetro de diseño y depende de características de la pulpa mineral: el coeficiente de fricción entre la pulpa y la superficie del hidrociclón y la viscosidad de la misma. El efecto de incrementar la longitud de la sección cilíndrica, es la obtención de un producto over flow con menor tamaño de partícula (en los finos). El over flow alcanza tamaños de partícula en un rango de 10-500  $\mu\text{m}$  <sup>[10]</sup>, con una fuerza centrífuga que es inversamente proporcional al diámetro del hidrociclón.

### 3.2.3 Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es esencialmente un método para separar partículas minerales de diferente peso específico, por las diferencias en movimiento en respuesta a las acciones que ejercen sobre ellas simultáneamente la gravedad y/u otras fuerzas (empuje y fricción)<sup>[3]</sup>.

La separación y concentración por gravedad se emplea actualmente para realizar tratamientos de beneficio a una gran variedad de minerales metálicos: galena, casiterita, cromita, blenda, pirita, oro, entre otros. El procedimiento se puede emplear en etapas previas al proceso de flotación. Se realiza para el beneficio de minerales con tamaños de partícula representativos, superiores a los manejables y requeridos en flotación. El proceso se aplica si existe cierta diferencia de densidades entre las fracciones de minerales o rocas que se pretenden separar. La separación se realiza en un fluido o medio de concentración que puede ser agua o un medio de mayor densidad. La razón entre densidades indica el grado de facilidad de separación de las fracciones minerales y el rango de tamaños a los que es aplicable la técnica<sup>[11]</sup>.

El movimiento de las partículas que se encuentran dentro de un fluido para la concentración gravimétrica se realiza bajo condiciones newtonianas y es afectado por su densidad relativa y su tamaño. Un modelo matemático que describe la aceleración de las partículas, en términos de la densidad relativa, e implícitamente muestra la probabilidad de estratificación gravimétrica en términos de la diferencia de densidades relativas, se elabora a partir de la segunda ley de Newton, presentada en la Ecuación 4. A continuación se presenta esta descripción teniendo en cuenta algunas consideraciones:

$$\sum \vec{F}_x = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4)$$

Considerando partículas esféricas de radio R, la sumatoria de fuerzas, incluye el peso de la partícula  $m\vec{g}$ , el empuje de la partícula de mineral sobre el fluido de trabajo  $\tilde{m}\vec{g}$ , y la fuerza de fricción que experimenta la partícula  $6\pi\mu R\vec{V}$ , por la viscosidad  $\mu$  propia del medio de clasificación, por lo que tenemos la Ecuación 5:

$$m\vec{g} - \tilde{m}\vec{g} - 6\pi\mu R\vec{V} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (5)$$

Dado el pequeño instante de tiempo en el que ocurre el proceso de concentración gravimétrica, la fuerza de fricción que experimenta la partícula de mineral es despreciable, por lo que la expresión presentada en la ecuación 5, nos queda reducida a la Ecuación 6 de la siguiente manera:

$$m\vec{g} - \tilde{m}\vec{g} = m\vec{a} \quad (6)$$

Empleando un artilugio matemático para obtener la aceleración de la partícula mineral en términos de la densidad relativa, entre la densidad de la partícula y la densidad del medio de clasificación, se llega a la expresión que se presenta en las Ecuaciones 7 y 8:

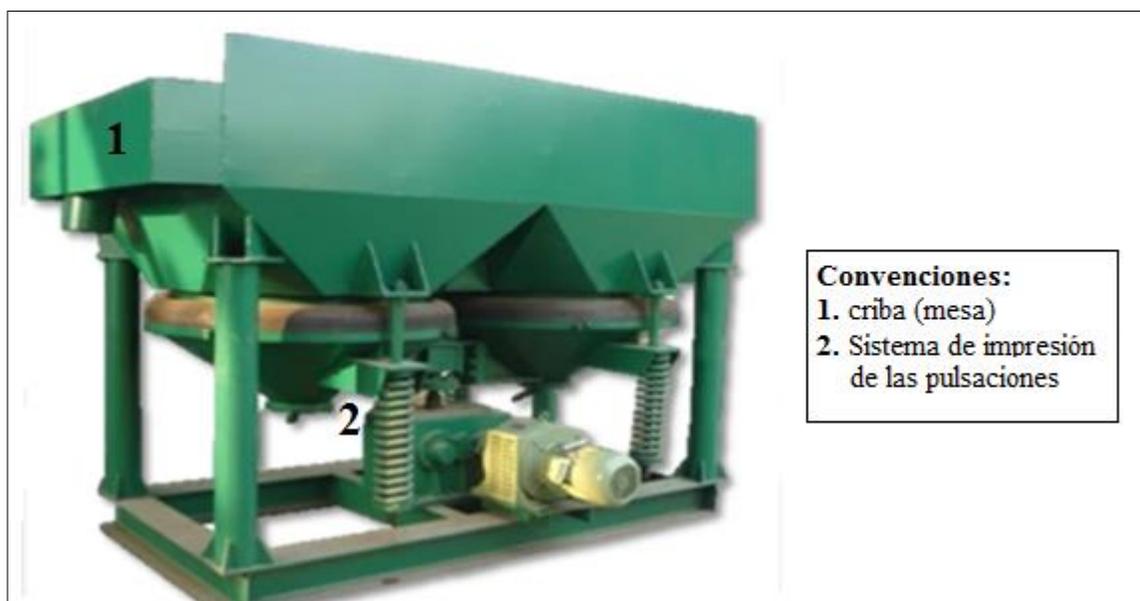
$$\left( m\vec{g} - \tilde{m}\vec{g} = m\vec{a} \right) * \frac{1}{v} \quad (7)$$

$$\therefore a = g \left\{ 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right\} \quad (8)$$

La expresión que se presenta en la Ecuación 8 con  $\rho_l$  siendo la densidad del medio de concentración y  $\rho_p$  siendo la densidad de la partícula mineral indica que la estratificación de mineral, se basa en la magnitud de la aceleración que experimenta cada partícula de mineral, que a su vez depende del valor de la aceleración gravitacional, y la diferencia de densidades relativas, por lo que en la capa mineral las partículas finas experimentan una aceleración menor, depositándose en el interior de la capa mineral, mientras que las partículas gruesas experimentan una mayor aceleración y se depositaran sobre la superficie de la capa mineral.

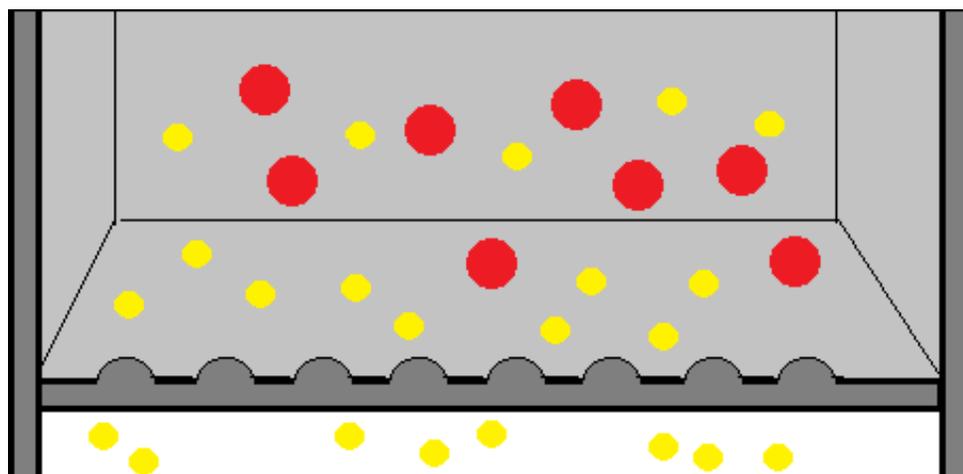
Con un análisis de la Ecuación 8, se tiene que un factor determinante en la eficiencia del proceso es el control granulométrico, que debe realizarse a través de intervalos reducidos de tamaños de partícula para que la separación dependa principalmente de la densidad relativa<sup>[11]</sup>. Además se debe tener control del flujo másico de agua, del cual depende la densidad de la pulpa mineral.

El procedimiento se realiza en diversos equipos de concentración, artesanalmente en mesas vibratorias (mesa alemana), mientras que en la industria se emplean concentradores gravimétricos, también conocidos como pulsadoras o jigs, como el que se ilustra en la Figura 18. En la operación de pulsado o jigging, una mezcla de partículas de mineral son depositadas sobre una criba (mesa), la cual es sometida a un flujo cíclico de elevación y caída en un fluido. El propósito de este movimiento es que las partículas más densas se ubiquen en el fondo de la capa mineral y las partículas menos densas sean recogidas en la parte alta de la capa mineral. El fluido de trabajo puede ser un líquido o un gas. En la industria minera, se emplea con frecuencia agua.



**Figura 18.** Concentrador Gravimétrico o Jig. Sistema de concentración de especies valiosas que consta de una criba (mesa) sobre la que se deposita la capa mineral y un sistema de impresión de un pulso vertical.

La impresión de las pulsaciones puede realizarse por diferentes métodos: diafragma, pistón, flujo de aire, entre otros). En la operación del jig ocurre un proceso de estratificación de partículas debido a la alternancia de expansión y compactación de la capa mineral, como efecto del flujo vertical pulsante. El proceso puede ser descrito por dos eventos: la carrera de presión o pulsación ascendente, donde las partículas menos densas son elevadas a mayor distancia respecto a las partículas más densas, y la carrera de succión, donde las partículas más pesadas sedimentan más rápido que las ligeras. En la Figura 19, las esferas color rojo representan las partículas menos densas, presumiblemente material estéril, y las esferas color amarillo representan las partículas más densas, sulfuros a los cuales se asocia la mena de oro.



**Figura 19.** Movimiento de las Partículas de Mineral en el Proceso de Concentración Gravimétrica.

Las ventajas operacionales de esta técnica son: la capacidad variable, el tratamiento y concentración de minerales con diversos tamaños de partícula y el hecho de no requerir fluidos de trabajo densos de alto costo. Las desventajas de la operación del jig son: los problemas de estratificación causados cuando las densidades de las partículas del material son muy próximas, las dificultades de separación selectiva de minerales que presentan bajas densidades relativas y la baja eficiencia cuando se tiene un amplio rango de tamaños en las partículas que conforman la pulpa de mineral.

### **3.3 Proceso hidrometalúrgico de flotación**

Después de las etapas de conminución y reducción de tamaño de partículas del material, se tiene un complejo compuesto por partículas de minerales económicamente explotables (mena) y partículas de material estéril (estéril), lo que hace necesario separar el material valioso, para lo cual se usa el hecho de que la superficie de las partículas de mena es diferente de la de las partículas de estéril. Para lograr este objetivo se emplea el proceso hidrometalúrgico de flotación, que consiste en un tratamiento químico a la pulpa mineral para crear las condiciones favorables para la adhesión de ciertas partículas de minerales a burbujas de aire <sup>[12]</sup>. Con frecuencia se emplean sustancias surfactantes (xantatos que producen una superficie hidrófoba en la mena) para causar repulsión entre las partículas de la mena y el agua, mientras que el estéril permanece con afinidad al agua.

En la industria minera se emplea el xantato amílico de potasio como agente colector en la flotación de minerales de sulfuro y elementos metálicos tales como cobre, plata y oro. Los xantatos son sustancialmente no espumantes y por lo tanto pueden emplearse en cualquier cantidad necesaria, sin peligro de producir una excesiva espumación. Esto hace posible un control altamente flexible y separado de la acción colectora y espumante. Los xantatos, debido a su elevado poder colector son empleados en la flotación de minerales complejos asociados a la presencia de pirita.

Los minerales hidrofílicos más comunes están constituidos por óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos, mientras que los minerales hidrofóbicos más representativos son los sulfuros de metales, generalmente asociados a metales preciosos <sup>[13]</sup>.

El proceso inicia mezclando la pulpa mineral con una solución de agua y sustancias hidrofobantes de sulfuros (pirita), llamadas colectores, mientras se mantiene en agitación constante la dispersión sólido-líquido <sup>[3]</sup>. Conjuntamente se hace pasar a través de la dispersión un flujo de burbujas de aire de tamaño del orden de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) Como se ilustra en la Figura 20. Las partículas coloidales hidrofobadas; presumiblemente sulfuros, se adhieren a las burbujas de aire, las cuales las arrastran en su movimiento ascendente, mientras que las partículas de estéril permanecen en la dispersión sólido-líquido. Las burbujas cargadas de partículas de mineral terminan por formar una espuma que se recoge como un concentrado rico en sulfuros (pirita).



**Figura 20.** Banco de Flotación. El banco está conformado por varias celdas que forman un circuito en serie realimentado. Las celdas cuentan con un sistema de agitación y un sistema de aireación para formar y diseminar burbujas de aire en la parte inferior de la celda, como se ilustra en la figura.

Por otra parte desde el punto de vista técnico-económico, los aspectos más importantes en el proceso son el consumo de reactivos, potencia, y desgaste de las celdas (mantenimiento). La eficiencia del proceso de flotación depende del tonelaje de trabajo, el flujo másico de las pulpas minerales (alimentación y producto), porcentaje de recuperación, potencia, y consumo de reactivos. El nivel de pulpa en el proceso hidrometalúrgico regula el nivel de espuma mineralizada donde se concentra el mineral de interés.

Las funciones de la celda de flotación son: mantener en suspensión las partículas de la pulpa que ingresan a la celda evitando la segregación de los sólidos por tamaño o densidad, formar y diseminar pequeñas burbujas de aire por toda la celda, promover los choques entre partículas de mineral y burbujas de aire, permitir una adecuada evacuación de relaves y concentrados, además de regular el nivel de pulpa, aireación y grado de agitación.<sup>[14]</sup> Las colisiones entre burbujas y partículas son necesarias para que el conjunto mineral-burbuja tenga una baja densidad y pueda elevarse desde la pulpa hasta la espuma, la cual concentra y contiene la mena. Las variables presentes en la generación y difusión de burbujas son: volumen de aire, presión de entrada y peso del material a flotar. Las celdas de flotación se dividen en: zona de mezcla, donde las partículas tienen contacto con las burbujas, zona de separación, donde las burbujas se condensan (rompen) y se eliminan partículas indeseables y zona de espumas, donde las espumas mineralizadas deben tener estabilidad. Las celdas de flotación pueden ser neumáticas o mecánicas. Estas se caracterizan por tener un agitador mecánico que mantiene la pulpa en suspensión y dispersa el aire dentro de la celda. La aireación en la celda se realiza por inyección de aire y la acción succionante del impulsor. En la industria minera se emplean principalmente celdas mecánicas ya que mantienen adecuadamente los sólidos en suspensión.

El tipo de celda clásico que se presenta en la figura 21, es aquel que comprende un estático cilíndrico, a menudo con deflectores en las paredes. Al centro se ubica un sistema de agitación por

turbina, que produce un movimiento centrífugo de la dispersión sólido-líquido y por lo tanto una baja presión en la vecindad del eje. Los dispositivos conocidos como lanzas, se ubican cerca del eje para permitir que el aire sea aspirado cerca del centro del recipiente. El aire aspirado pasa a la zona turbulenta y forma burbujas. A menudo el agitador posee un sistema de rotor-estator que funciona a la vez por impacto y por cizallamiento para dividir las burbujas de aire.



*Figura 21. Celda de Flotación Mecánica.*

Las variables presentes en el proceso de flotación son: tamaño de partícula, densidad de la pulpa, temperatura, pH, tiempo de residencia, dosis de reactivos, agitación, grado de aireación, nivel de pulpa y de espumas<sup>[12]</sup>. Por otro lado, la eficiencia del proceso depende del consumo de energía y variables relacionadas con características del mineral (composición mineralógica, presencia de sales solubles, y grado de oxidación), procesos de beneficio y concentración previos (tamaño de liberación, dureza, efecto de la oxidación de mineral en molienda, y efecto de la adición de reactivos), características del agua (presencia de sustancias disueltas y pH) y variables relacionadas con el acondicionamiento de la pulpa (densidad de pulpa, puntos de adición de reactivos químicos, tiempo de acondicionamiento, temperatura, agitación, y pH).

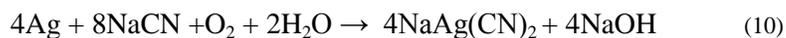
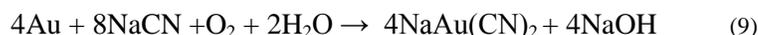
### **3.3.1 Fenómenos hidrodinámicos**

Los fenómenos hidrodinámicos conciernen principalmente a la probabilidad de captura de una partícula hidrófoba por una burbuja. La probabilidad de extracción exitosa de una partícula

involucra otras probabilidades: la probabilidad de contacto o colisión partícula-burbuja, la probabilidad de adhesión y la probabilidad de arrastre en la espuma<sup>[15]</sup>. En la práctica, las partículas de sólido y las burbujas está sometida a una intensa agitación, las colisiones se deben a procesos inerciales, de sedimentación o de difusión browniana, según que las partículas y burbujas sean grandes, micrométricas o submicrométricas<sup>[15]</sup>. El caso de la captura de partículas por una burbuja que sube, solo se da para las partículas presentes en las líneas de corriente muy vecinas a la burbuja, además se debe tener en cuenta el tiempo de residencia, la agitación y el tamaño de las burbujas. Por otra parte la probabilidad de colisión entre burbuja y partícula es mayor en un medio muy agitado. Además, cuando la distancia entre partícula y burbuja puede considerarse suficientemente pequeña para que se dé una colisión, existe todavía la etapa de adhesión, que está relacionada con la probabilidad de que la película líquida se rompa o no durante el "tiempo de colisión"<sup>[16]</sup>.

### 3.4 Lixiviación por cianuración

El proceso hidrometalúrgico de lixiviación es un conjunto de técnicas o procedimientos con los que se realiza un tratamiento metalúrgico de extracción de metales preciosos, a partir de complejos minerales polimetálicos de baja ley. En el caso particular de la lixiviación por cianuración, el proceso consiste en la disolución selectiva de metales preciosos (oro y plata) en soluciones de cianuro alcalino. Tal proceso se explica con diferentes reacciones químicas que han sido propuestas por distintos investigadores. La reacción de mayor aceptación es la Ecuación de Elsner:



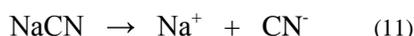
La Ecuación describe el mecanismo de la extracción de metales preciosos cuando las superficies del oro en la Ecuación 9 y la plata en la Ecuación 10, se exponen a la acción del cianuro en una solución acuosa que contenga oxígeno libre. Como producto de esta reacción se forma un complejo aniónico y un hidróxido alcalino. Esto se presenta porque las soluciones de cianuro alcalino atacan de preferencia a los metales preciosos, propiedad característica de las soluciones de cianuro denominada "acción selectiva". La ecuación indica que la reacción necesita suministro de oxígeno, además por ser un proceso controlado difusionalmente la agitación aumenta la concentración de oxígeno disuelto en la solución, esto se debe a la disminución de la capa límite de fluido que rodea la partícula de metal precioso. Por lo tanto, los iones cianuro y el oxígeno deben recorrer una menor distancia para alcanzar la superficie del metal.

La lixiviación por cianuración es un proceso controlado difusionalmente, la cinética de la disolución puede ser descrita fenomenológicamente mediante los siguientes pasos:

1. Adsorción de oxígeno en la solución.
2. Transporte del oxígeno diseminado y del cianuro disuelto a la interface sólido-líquido.
3. Adsorción de los reactantes disueltos sobre la superficie sólida.

4. Reacción electroquímica.
5. Desorción (desde la superficie solida) del complejo de cianuro y oro, además de otros productos de reacciones colaterales.

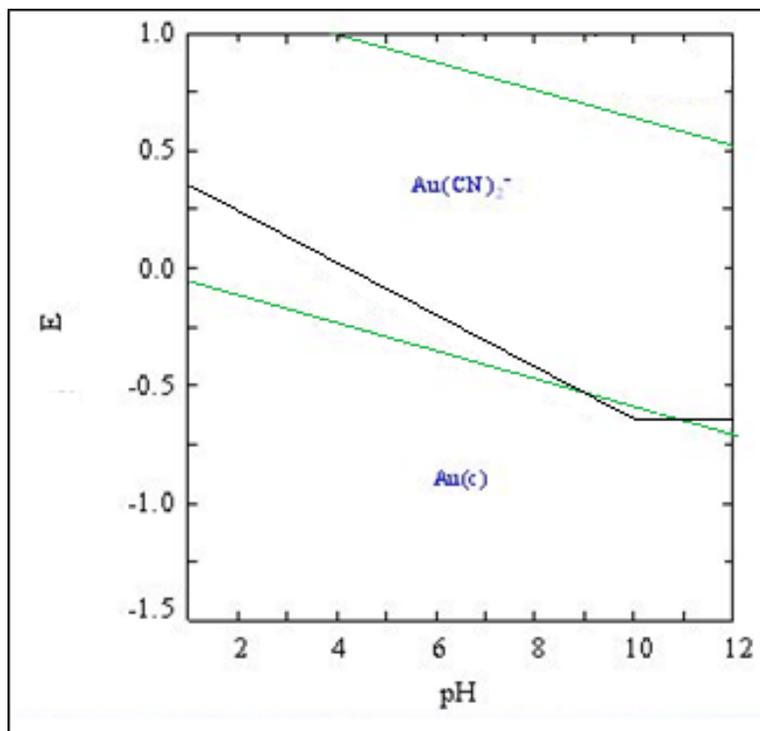
El agente lixivante que se emplea en el proceso es una sal de cianuro, que se disuelve y posteriormente se ioniza en el agua, como se indica en la Ecuación 11, generando su respectivo catión metálico y los iones de cianuro libre, los que a su vez se encargan de formar el complejo aurocianuro. Comercialmente en la industria minera, para la recuperación de metales preciosos se emplea cianuro de potasio KCN o cianuro de sodio NaCN. Este último es el de mayor aplicación industrial dada su alta solubilidad relativa a temperatura ambiente en un medio acuoso de pH neutro: 48 g/100 cc a 25 °C<sup>[17]</sup>.



La principal desventaja del proceso es la alta toxicidad y el impacto ambiental generado por los efluentes residuales que se disponen como colas de relave. La toxicidad de las soluciones cianuradas se genera por el desprendimiento de ácido cianhídrico HCN cuando se produce hidrólisis, como se presenta en la Ecuación 12. Además, esta situación es un problema ya que afecta la eficiencia de extracción y el beneficio de menas refractarias debido al alto consumo de cianuro o la baja solubilidad de metales preciosos durante la lixiviación. La hidrólisis en las soluciones de cianuro se produce en medios ácidos y neutros que van en un rango de valores de pH ácido hasta un valor crítico de 10, por lo que la operación en la extracción de metales preciosos requiere un medio alcalino.

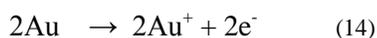


La estabilidad de los complejos aurocianuros se representa en un espacio potencial de pH en función del campo eléctrico asociado al potencial estándar de óxido-reducción y se describe por medio del diagrama de Pourbaix de soluciones cianuradas, presentado en la Figura 22. En este diagrama se resaltan los elevados potenciales de óxido-reducción de los complejos auríferos diseminados en una matriz de mineral refractario y la gran estabilidad de este metal precioso a pH ácidos (ambiente de los yacimientos de cuerpo mineralizado (veta)). Además, en el mismo diagrama, se muestra tanto que el proceso hidrometalúrgico de cianuración tiene lugar en la zona de estabilidad del agua, como los valores críticos de pH donde se presenta la hidrólisis del agente lixivante, con un valor de pH de transición cercano a 10.



**Figura 22.** Diagrama de Pourbaix del sistema Au-CN-H<sub>2</sub>O, En el diagrama se observa la estabilidad del mineral aurífero en ambientes ácidos Au(c), la zona donde el ion cianuro se enlaza con los cationes metálicos de oro formando el complejo aurocianuro Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup> delimitada en la zona de estabilidad del agua donde tiene lugar la reacción electroquímica en el proceso, definida por las líneas verdes, la línea color negro muestra la hidrólisis del ion cianuro con un pH de transmisión de 10.

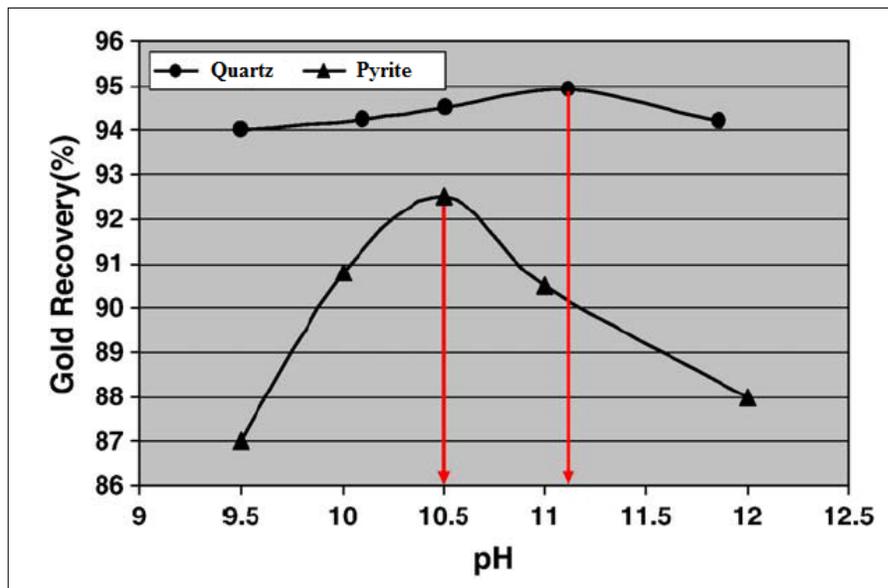
En el proceso hidrometalúrgico de cianuración se presenta una reducción de oxígeno, mostrada en la Ecuación 13, que conlleva a la lixiviación de oro, presentada en la Ecuación 14. Durante este proceso, el oro queda como catión metálico y puede enlazarse con los iones libres de cianuro para formar un complejo aurocianuro, como se indica en la Ecuación 15.



El proceso de lixiviación por cianuración es afectado por diversos factores y variables, de los cuales los más relevantes son: pH, superficie específica, porcentaje de finos, temperatura, velocidad de agitación, concentración de oxígeno, y aireación y concentración de agente lixiviante. A continuación se describen los aspectos más relevantes acerca de estos parámetros y sus efectos.

### 3.4.1 Efecto del pH

La solución de cianuro debe mantenerse alcalina durante la lixiviación del mineral auroargentífero principalmente para prevenir la hidrólisis del ion cianuro, evitar la descomposición del cianuro por el dióxido de carbono atmosférico, neutralizar compuestos ácidos de la menas y sedimentar partículas para obtener una solución clara durante la separación del metal precioso lixiviado. La alcalinidad debe ser controlada para alcanzar elevadas tazas de disolución de metal precioso y por lo tanto altos porcentajes de recuperación como se muestra en la Figura 23. El rango de operación en la alcalinidad del medio en el que se desarrolla la reacción de cianuración generalmente debe estar entre 10.5 - 11.5<sup>[18]</sup>.



**Figura 23.** Efecto del pH en el beneficio de mineral aurífero<sup>[18]</sup>. en la figura se presenta el comportamiento de los porcentajes de recuperación en función de la variación del pH del proceso para complejos minerales de matriz refractaria de cuarzo y pirita, se observa que la máxima tasa de extracción de oro para el mineral de cuarzo se obtiene a un valor cercano a 11, y para el mineral de pirita a un valor crítico de 10.5.

### 3.4.2 Alcalinidad protectora

La alcalinidad de las soluciones de cianuro es un parámetro determinante debido a que evita pérdidas de cianuro por hidrólisis, previene la descomposición de cianuro por acción del CO<sub>2</sub> atmosférico, neutraliza los componentes ácidos (generalmente presentes en los yacimientos de

cuerpo mineralizado (veta)) y facilita la sedimentación de las partículas sólidas coloidales de la mena cianurada necesaria para obtener una solución Pregnant<sup>8</sup> clara.

### **3.4.3 Efecto de la superficie específica**

La velocidad de disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuro alcalino depende de la exposición de área superficial o superficie específica del metal en contacto con la fase líquida, la que a su vez varía en forma inversamente proporcional al tamaño de partícula: si se aumenta la superficie específica, aumenta la velocidad de disolución de los metales preciosos.

### **3.4.4 Efecto del porcentaje de finos**

Cuando el porcentaje de finos es mayor al 20% en los complejos minerales a lixiviar, las partículas tienden a aglutinarse, dificultando el paso de la solución de cianuro alcalino a la interface entre el metal precioso y la solución de cianuro. Además, al disminuir la superficie específica expuesta de los complejos polimetálicos se disminuye la eficiencia del proceso y se incrementa el consumo de cianuro de sodio y de oxígeno<sup>[19]</sup>.

### **3.4.5 Efecto de la temperatura**

La lixiviación por cianuración es un proceso controlado difusionalmente, por lo tanto es afectado por la temperatura, por lo que hay una dependencia de la cinética de reacción, de las tasas de disolución de metales preciosos y de los porcentajes de recuperación con este parámetro. El valor apropiado de temperatura para obtener altas tasas de recuperación de mena auroargentífera es de aproximadamente 85 °C, sin embargo en procesos industriales se considera que no es viable económicamente<sup>[4]</sup>. Por lo que el proceso se realiza a temperatura ambiente.

### **3.4.6 Efecto de la velocidad de agitación**

La lixiviación por cianuración es un proceso controlado difusionalmente, por lo tanto es afectado por la agitación de la solución. En este sentido, la tasa de disolución de oro y plata aumenta con el incremento de la velocidad de agitación, esto se debe esencialmente a la disminución de la capa límite de líquido que rodea la partícula. Se sabe que a menor espesor de la capa límite del líquido, los iones cianuros y el oxígeno deben recorrer menos espacio para alcanzar la superficie del metal precioso. Sin embargo, para el caso del oro la velocidad de disolución se incrementa hasta un valor de 150 rpm<sup>19</sup> después del cual la disolución del metal precioso disminuye. Este parámetro puede cambiar dependiendo de las condiciones de cada matriz de mineral refractario, de las características del agua, de la cantidad de oxígeno disuelto, y de la concentración inicial de cianuro.

---

<sup>8</sup> Solución Pregnant: solución producto del proceso hidrometalurgico de Lixiviación por cianuración, que posee alto contenido de especies valiosas (metales preciosos).

### 3.4.7 Efecto de la concentración de oxígeno

Partiendo del fundamento establecido en la primera ley de difusión de Fick y considerando soluciones acuosas a altas y bajas concentraciones de cianuro, se obtiene la relación límite a la cual se alcanza la máxima disolución de metales preciosos, mediante la razón del coeficiente de difusión del oxígeno  $Do_2$ <sup>9</sup> y el coeficiente de difusión de cianuro  $Dc$ <sup>10</sup>.

$$\frac{[CN]}{[O_2]} = 4 \frac{Do_2}{Dc} \quad (16)$$

$$\therefore \frac{[CN]}{[O_2]} = 6 \quad (17)$$

### 3.4.8 Efecto del consumo de oxígeno

El oxígeno que se introduce en la solución de cianuro alcalino mediante la inyección directa de aire al reactor de cianuración es determinante y necesario para la disolución del oro. Cualquier reacción colateral, en la cual la solución de cianuro sea despojada de su contenido de oxígeno, ocasionará una disminución en la velocidad del proceso. Por ejemplo, si el complejo auroargentífero se disemina en una matriz de pirrotina, se disminuirá la concentración de oxígeno debido a que la pirrotina en un medio alcalino se descompone para formar hidróxido ferroso y azufre.

### 3.4.9 Efecto de la concentración de cianuro

La solubilidad del oro en una solución de CN aumenta al pasar de las soluciones diluidas a las concentradas. Como se indica en la Figura 24 donde se observa incremento en la tasa de disolución de oro en diferentes matrices de mineral refractario, cuando se incrementa la concentración dada en ppm del agente lixiviante.

---

<sup>9</sup>  $Do_2 = 2.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

<sup>10</sup>  $Dc^{10} = 1.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

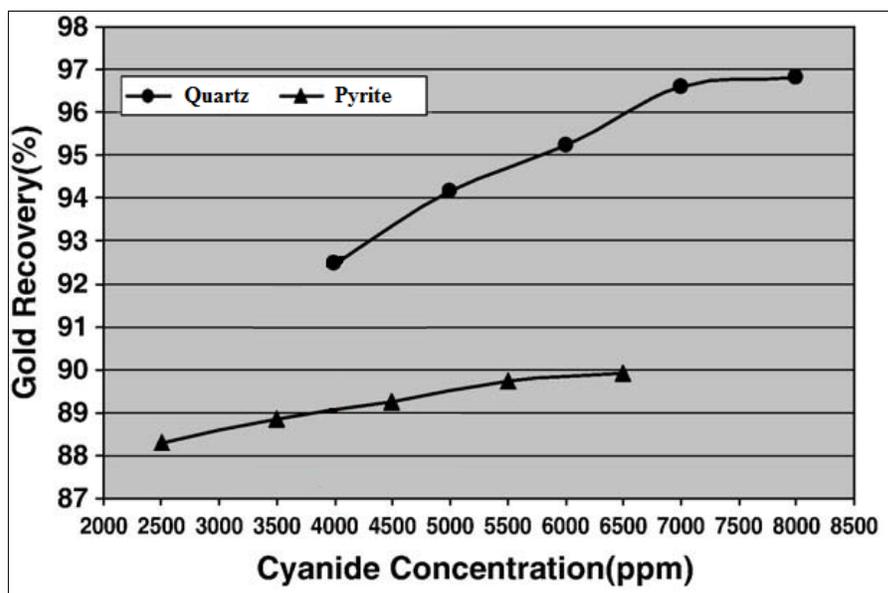


Figura 24. Efecto de la concentración de cianuro en el beneficio de complejos minerales auroargentíferos [18]

### 3.4.10 Influencia de minerales y compuestos químicos en el proceso de cianuración

Los diversos minerales con los que frecuentemente están asociados los metales preciosos, en su gran mayoría al disolverse en la solución cianurada perturban la eficiencia en el beneficio de la mena auroargentífera. Los compuestos minerales asociados a metales preciosos son: pirita, pirrotina, minerales de cobre, minerales de arsénico (arsenopirita, oropimente), estibina, galena, anglesita, cuarzo, calcita, minerales de telurio, entre otros. La mayoría de estos minerales presentan problemas en el beneficio de complejos minerales, en particular en el proceso hidrometalúrgico de cianuración, ya que son agentes consumidores de oxígeno o cianicidas<sup>11</sup>.

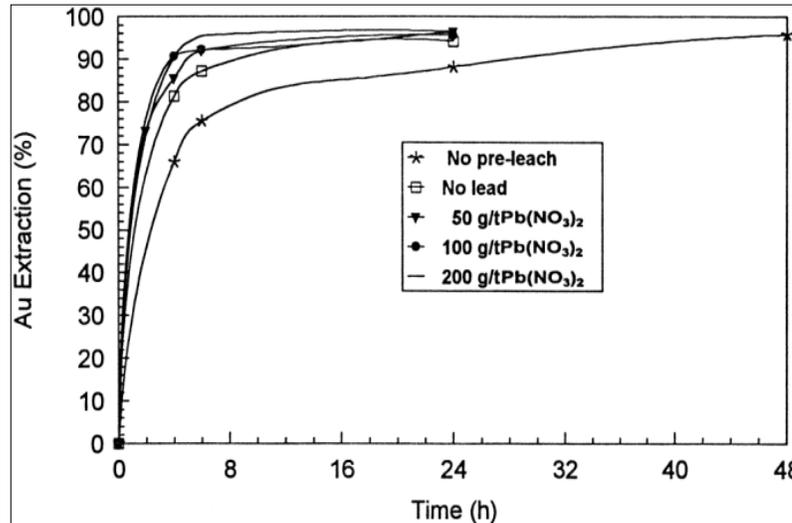
### 3.4.11 Efecto catalizador

La presencia de pequeñas cantidades de sales de Pb o Hg acelera la disolución de metales preciosos. La cinética del proceso es afectada por la modificación de la superficie de oro en la presencia de estos metales, formando aleaciones que presentan un comportamiento de micro celdas galvánicas.

Las menas que contienen minerales sulfurosos como pirrotina forman iones sulfuros que son agentes consumidores de oxígeno y cianuro en la solución alcalina de cianuro de sodio. Para disminuir o pasivar este efecto generalmente se agrega una sal de Pb (Nitrato de Plomo) para favorecer el beneficio de metales preciosos. El tipo de mineral asociado a estos metales forma

<sup>11</sup> Cianicidas: Agentes consumidores del agente lixivante NaCN, generalmente presentes en minerales de matriz refractaria.

sulfuro de plomo, que es insoluble en agua. Además la presencia de nitrato de plomo aumenta el porcentaje de extracción de material aurífero<sup>[20]</sup> tal como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Efecto de la adición de Nitrato de Plomo en el proceso hidrometalúrgico de Cianuración<sup>[20]</sup>. La figura muestra las tasas de extracción de oro en el tiempo, siendo modificada por la presencia de nitrato de plomo como catalizador de la reacción, incrementando los porcentajes de recuperación.

### 3.4.12 Requerimientos técnicos y operacionales del proceso de cianuración

#### 3.4.12.1 Requerimientos técnicos

- El oro y la plata deben encontrarse en forma de partículas discretas y limpias.
- Debe evitarse que las impurezas puedan inhibir la reacción, estando ausentes o en composición porcentual disminuida.
- Debe garantizarse una adecuada aireación y difusión de oxígeno en el proceso.

#### 3.4.12.2 Estático de cianuración

El reactor de cianuración es un tanque cilíndrico de agitación mecánica. La agitación de la pulpa se efectúa por el movimiento de una propela unida a un eje, (la velocidad de giro está en el rango de 300 a 350 RPM revoluciones por minuto), y/o por la introducción de aire a presión.

#### 3.4.12.3 Sistemas de inyección de oxígeno

Como se mencionó anteriormente, la concentración de oxígeno en el proceso hidrometalúrgico de cianuración es un parámetro crítico para el beneficio de minerales complejos. En este sentido, es

importante mencionar las diversas formas de inyección de aire a la solución a lixiviar, las cuales son:

- Inyección de aire comprimido
- Inyección de oxígeno puro
- Dosificación de peróxido de hidrógeno
- Mezcla forzada entre oxígeno y pulpa mineral en un reactor

#### 3.4.12.4 Limitaciones de operación

Las limitaciones que se presentan con frecuencia en la operación del proceso hidrometalúrgico de lixiviación por cianuración son las siguientes:

- Falta de difusión de CN a la capa límite
- Deficiente suministro y/o difusión de oxígeno a la solución
- Consumo excesivo de oxígeno de la solución
- Presencia de agentes cianicidas
- Formación de una película sobre la superficie del metal

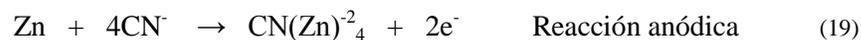
### 3.5 Precipitación con polvo de zinc (proceso Merrill Crowe)

Después del proceso de lixiviación es necesario recuperar los complejos de oro y plata. Para lograr este propósito se requiere de la precipitación mediante la adición de polvo de zinc. En el sistema Merrill Crowe. Las etapas desarrolladas en el proceso son: clarificación de la solución rica en oro y plata, desoxigenación de la solución, adición a la solución de polvo de zinc y sales de plomo y finalmente la recuperación de complejos precipitados por filtración. La solución pregnant con alto contenido de metales preciosos Au, Ag, y Cu (solución lixiviada en el proceso hidrometalúrgico de cianuración) debe ser filtrada y deaireada para aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de metales. En este sentido, la solución debe estar clara y sin oxígeno, ya que se requiere de un ambiente reductor como condición para propiciar la reacción.

En el proceso de precipitación con zinc se obtiene recuperaciones de hasta el 99% de los metales de interés (Au,Ag), en forma de precipitado de la solución pregnant. La cinética del proceso se describe por medio de la Ecuación 18, donde el complejo aurocianuro o argentocianuro producto del proceso hidrometalúrgico de lixiviación por cianuración  $\text{Na}(\text{Au,Ag})\text{CN}$  con la adición de polvo de zinc en un ambiente reductor favorece la precipitación de las especies valiosas, como sigue:



La cinética de la reacción de la precipitación de los metales preciosos con la adición de polvo de zinc en la solución es de naturaleza electroquímica. El zinc se disuelve en los sitios anódicos, como se presenta en la Ecuación 19 y los electrones cedidos sirven para reducir los cationes metálicos en los sitios catódicos, como se presenta en la Ecuación 20. La cinética de la reacción electroquímica global se describe por medio de la Ecuación 21:



En el proceso Merrill Crowe se obtienen complejos polimetálicos, característica que lo clasifica como un proceso de recuperación no selectivo. Además, este proceso depende de la solubilidad relativa de los cationes metálicos en una solución de cianuro alcalino, la cual se puede analizar fenomenológicamente mediante la cementación de metales.

### 3.5.1 Cementación de cationes metálicos

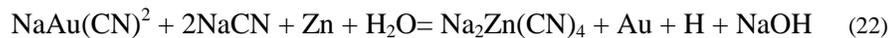
El orden electroquímico respecto a la electronegatividad de los metales en soluciones cianuradas determina su solubilidad relativa. En el solvente alcalino NaCN, la secuencia ascendente de solubilidad es Zn, Cu, Hg y Au. Cualquier metal de esta secuencia tenderá a disolverse en la solución de cianuro alcalino, los de más alta solubilidad relativa Zn y Cu se disolverán más rápido que los metales de menor solubilidad relativa Hg y Au, desplazándolos y favoreciendo su precipitación.

### 3.5.2 Etapas del proceso Merrill Crowe

La descripción de las etapas desarrolladas en el sistema Merrill Crowe para la sedimentación metálica de especies valiosas es la siguiente:

1. **Clarificación de la solución pregnant:** la solución lixiviada que es producto del proceso hidrometalúrgico de cianuración se somete a una etapa de clarificación con el propósito de eliminar las partículas coloidales e impurezas, mediante la sedimentación y filtración en tanques clarificadores. Así, en este proceso se pretende lograr una solución pregnant cristalina con un contenido de sólidos en suspensión menor a 2 ppm. Los filtros clarificadores son recubiertos con películas de tierra diatomea (selite), lo que permite la remoción de partículas en suspensión de la solución pregnant de tamaño representativo (del orden de unas cuantas micras).
2. **Deaireación – Desoxigenación:** Para obtener un ambiente reductor se debe eliminar el oxígeno disuelto en la solución Pregnant. Para esto se emplea una torre de vacío, que consta de una bomba de vacío y un circuito manométrico, que permite retirar el aire diseminado en la solución. Generalmente en el proceso hidrometalúrgico de cianuración la solución pregnant tiene diseminado oxígeno en una concentración entre 5 a 8 ppm. Esta concentración debe ser disminuida a un rango de valores de 1 y 0.5 ppm para lograr altos porcentajes de recuperación en la sedimentación metálica.
3. **Sedimentación Metálica:** La precipitación de los complejos polimetálicos se desarrolla dentro de la secuencia que se describe a continuación.

- A. **Adición de Zinc:** para realizar la sedimentación metálica, inicialmente se introduce polvo de zinc en la solución pregnant clarificada y deaierada. El tamaño de partícula del polvo de zinc es un factor importante y debe tener un valor pequeño. En la industria minera se emplea zinc con tamaño de partícula del orden de 300 a 350 micrones <sup>[21]</sup>. El propósito de este tamaño tan pequeño es incrementar la superficie específica para aumentar la cinética del proceso logrando altos porcentajes de recuperación del metal de interés. El ambiente de trabajo debe ser controlado; esto es, sin agitación o corrientes exteriores de aire en la superficie de la solución pregnant para no introducir y difundir oxígeno.
- B. **Precipitación:** El principio de la precipitación de metales preciosos contenidos en soluciones de CN empleando polvo de zinc, está basado en el hecho de que el oro y la plata son electronegativos respecto al zinc. Debido a esta característica, ocurre un reemplazo electroquímico del oro y la plata por el zinc. Posterior a esto, ocurre un desplazamiento del hidrógeno del agua por el sodio según la reacción de la Ecuación 22.



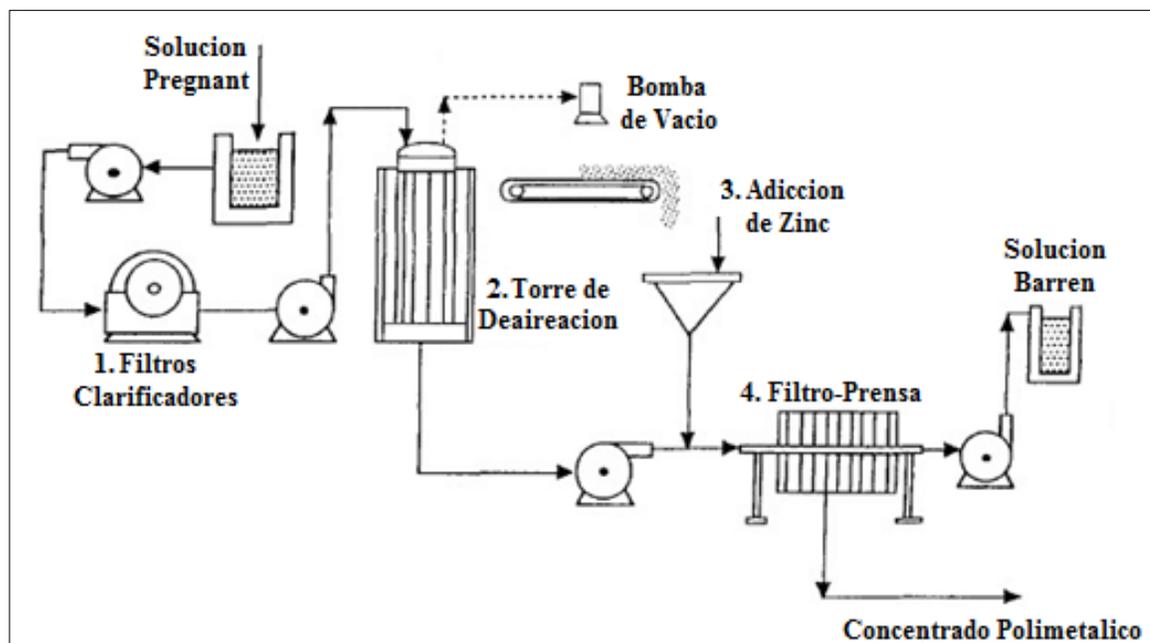
Una condición operacional del proceso es un valor de pH alto, con un valor de referencia de 10. El objetivo de esta condición es precipitar metales preciosos de interés con una disminuida precipitación de cobre presente en la solución pregnant.

- C. **Adición de nitrato de plomo:** la adición de esta sal tiene como función crear un acople galvánico con el zinc, lo que genera una transferencia de electrones entre estos metales. Como consecuencia, se incrementa la diferencia de electronegatividad entre el Zn y los metales preciosos de interés Au y Ag, se cataliza la reacción y se produce una precipitación controlada con una mayor cinética en la reacción y una disminución del consumo de zinc.
4. **Filtración:** Finalmente se requiere de un proceso de separación sólido-líquido para lo cual se emplea un medio filtrante o superficie permeable con una distribución regular de poros que garantiza la retención del sólido permitiendo el paso de la fase líquida. El proceso se desarrolla en un sistema de filtración por presión denominado filtro-prensa, como el que se ilustra en la Figura 26, el cual consiste en una serie de placas y marcos alternados con un medio filtrante a cada lado de las placas. Las placas tienen incisiones con forma de canales para drenar el filtrado en cada placa, las cuales generalmente son construidas de acero inoxidable de alta resistencia química.



*Figura 26.* Sistema de Separación solido-liquido **Filtro-Prensa**

Las etapas desarrolladas para la recuperación de metales preciosos por medio del proceso de Merrill Crowe se ilustran en el diagrama de flujo de la figura 27.



*Figura 27.* Diagrama de Flujo del sistema de recuperación de metales preciosos (Au,Ag) en el proceso merrill Crowe <sup>[22]</sup>

### 3.5.3 Limitaciones del proceso de precipitación de metales preciosos

El proceso Merrill Crowe generalmente se referencia como un proceso eficiente debido a que se obtienen altos porcentajes de recuperación. Sin embargo, un desajuste entre los parámetros y las variables que se consideran críticas puede llevar a una ineficiente sedimentación metálica. Las posibles causas para que se presente esta situación son las siguientes:

- Alta concentración de oxígeno disuelto en la solución Pregnant (debido a una presión insuficiente en el cono de adición de polvo de zinc)
- Insuficiencia de zinc
- Insuficiencia o exceso de sales de plomo (nitrato de plomo)
- Proceso sensible a iones interferentes (soluciones contaminadas)
- Baja selectividad de precipitación para complejos polimetálicos

### Referencias

- [1] D. M. Kjos, “**Grinding Circuits: Current Status and Projected future Development**” *AIME, Minnesota Meetin*, 1972
- [2] E. J. Pryor, “**Mineral Processing**” *Elseiver published Co Ltd*, New York, 1965
- [3] Lynch A. J. “**Circuitos de Trituración y Molienda de Minerales**” *Rocas y Minerales*, 1980
- [4] Iván Quiroz Núñez, **OPERACIONES UNITARIAS EN PROCESAMIENTO DE MINERALES**, *Lima-Perú*
- [5] Bond F. C. “**New Grinding Theory Aids Equipment Selection**” *Chemical Engineering*, Octubre 1952
- [6] Bond F. C. “**Grinding Ball Size Selection**” *Mining Engineering*, Mayo 1958
- [7] Colman K. G. “**Selection Guidelines for Size and Type of Vibrating Screens in Ore Crushing Plants**” *Mineral Processing Plant Design 2<sup>nd</sup> Edition*, A.L. Mular, R.B. Bhappu Editors, AIME, New York, 1980.
- [8] Kelly E. G, Spottiswood D. J. “**Introduction to Mineral Processing**” *John Wiley and Sons*, New York, 1982.
- [9] M. I. Bloor, D. B. Ingham, “**Theoretical Investigation of the Flow in a Conical Hydrocyclone**” *Trans. Inst Chem Engrs*, Vol 51, 1973.

- [10] A. J. Lynch, T. C. Rao, **“The Operating Characteristics of Hydrocyclone Classifiers”**
- [11] Matthews C. W. **“Trends in Size Reduction of Solids”** *Chemical Engineering*, Julio 1972.
- [12] IVES K. Ed.: **The Scientific Basic of Flotation**, *NATO Advanced Study Institute Series, Martinus Nijhoff Publisher, La Hague*, 1981. (Distribuido por Kluwer Pub. P.O. Box 322, 3300 AH Dordrech, Holanda)
- [13] LEJA J. **Surface Chemistry in Flotation**, *Plenum*, N.Y., 1982.
- [14] R. L. Sutherland, I. W. Wark, **“Principles of Flotation”** *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 1955.
- [15] LEMLICH R. Ed. **Adsorbitive Bubble Separation Techniques**, *Academic Press.*, N.Y., 1972.
- [16] Bull W. R. **“The rate of Flotation of Mineral Particles in Sulphide Ores”** *Annual Conference of Austr. Inst. Min. Met.* Mayo 1966.
- [17] P. Navarro Donoso, **Agentes Lixiviantes**, *Intercade Consultancy y training*, Cámara minera del Perú.
- [18] P. Karimi, H. Abdollahi, A. Amini, M. Noaparast, S.Z. Shafaei, F. Habashi. **Cyanidation of gold ores containing copper, silver, lead, arsenic and antimony.** *International Journal of Mineral Processing (2010) pag 68–77*
- [19] Fidel Misari Chuquipoma, **METALURGIA DEL ORO**, *Editorial san Marcos 2010*.
- [20] Guy Desche<sup>^</sup>nes, Marlaine Rousseau, Jean Tardif, P.J.H. Prud’homme. **Effect of the composition of some sulphide minerals on cyanidation and use of lead nitrate and oxygen to alleviate their impact.** *Hydrometallurgy 1998. Pag 205–221*
- [21] Gexla Chi, Maurice C. Fuerstenau, Peter A. Anderson, **Study of Merrill-Crowe processing. Part II: Regression analysis of plant operating data**, *International journal of mineral processing*, 1997. Pag 185-192.
- [22] Gexla Chi, Maurice C. Fuerstenau, John O. Marsden, **Study of Merrill-Crowe processing. Part I: Solubility of zinc in alkaline cyanide solution**, *International journal of mineral processing*, 1997. Pag 171-183.

## 4. Proceso productivo Sociedad Minera del Sur S.A.S.

En la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. se realizan procesos de beneficio y recuperación de minerales auroargentíferos mediante el desarrollo de procesos metalúrgicos e hidrometalúrgicos, tales como conminución, flotación, lixiviación por cianuración y precipitación con polvo de zinc. Con el propósito de beneficiar lodo y mineral rico en sulfuros a los que se asocian los metales preciosos, la configuración de la planta de beneficio (que se ilustra en la Figura 28), presenta diferentes disposiciones dependiendo del material a beneficiar: mina o lodo.



*Figura 28.* Planta de tratamiento y beneficio de complejos minerales de Sociedad Minera del Sur S.A.S.

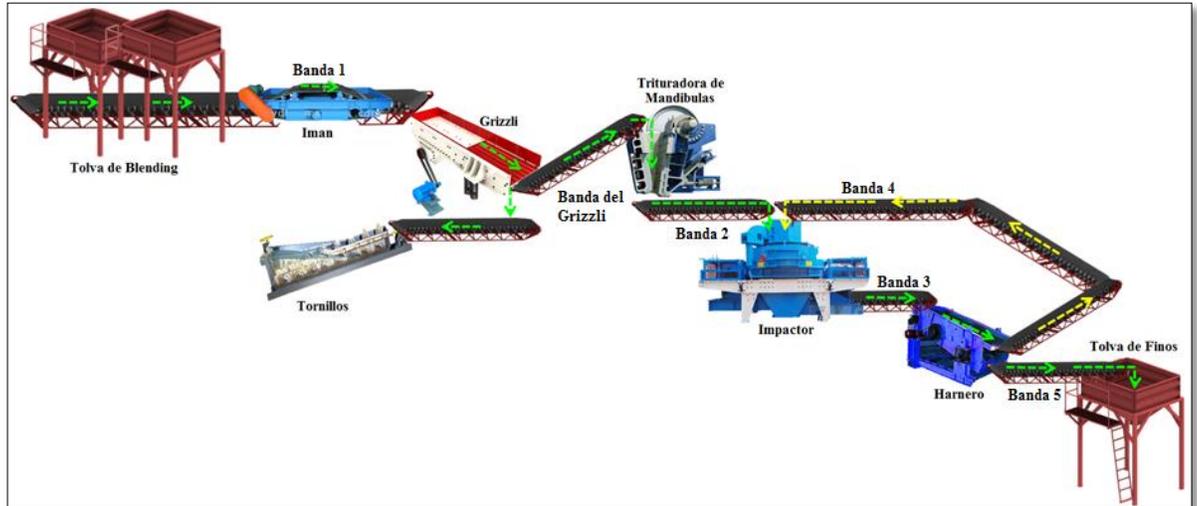
### 4.1 Beneficio de complejos minerales

El procesamiento y beneficio de complejos minerales obtenidos de la extracción en labores de mina se define con base en las características de los minerales de la región norte del departamento del Cauca (matriz refractaria con alto contenido porcentual de sulfuros, en particular pirita, a los que se asocia la mena de oro), entre las características que se consideran más relevantes, se tiene considerable tamaño de partícula, bajo grado de liberación, dilución coloidal de especies valiosas y alta dispersión de tamaños.

La operación para el procesamiento de complejos minerales puede dividirse en tres grandes procesos: trituración, molienda y concentración, además de los procesos de metalurgia extractiva, lixiviación por cianuración y la sedimentación metálica en el sistema Merrill Crowe. A continuación se hace la descripción de estos procesos de acuerdo a la operación en la planta de beneficio de Sociedad Minera del Sur S.A.S.

### 4.1.1 Trituración de complejos minerales

Dado el considerable tamaño de partícula y el bajo grado de liberación, se inicia la operación en planta de procesamiento y beneficio de complejos minerales con los procesos de trituración. El esquema de operación se presenta en la Figura 29. Los procesos en esta etapa del beneficio son: almacenamiento de mineral, lavado de mineral, separación solido-liquido, y la operación de la trituradora de mandíbulas, el Impactor, y el harnero.



*Figura 29.* Diagrama de flujo de las etapas de trituración

#### 4.1.1.1 Almacenamiento de mineral

La operación para el beneficio de complejos minerales (mina) se inicia en la tolva de blending, también denominada tolva de gruesos, la cual se ilustra en la Figura 30. Esta etapa se alimenta con reservas minerales (mineral de varias minas de la región) almacenadas en el patio de acopio o directamente de la mina “La Puchis”. Esta última operación se procesa mediante la extracción del material obtenido con explosiones de los frentes de explotación utilizando el malacate<sup>12</sup>. La función principal de la tolva de blending es almacenar el mineral, aunque como función complementaria suministra el material de forma organizada sobre la banda 1, la cual trasporta el mineral hacia el grizzli<sup>13</sup>. Sobre la banda 1 se encuentra suspendido un imán, para eliminar el material magnético de

<sup>12</sup> Malacate: sistema de tracción constituido por una polea, un motor y un skip (Carro).

<sup>13</sup> Grizzli: mesa vibratoria con recubrimiento de lona resistente a la abrasión. La vibración se debe a un sistema de motor y desnivel mecánico. La mesa tiene un sistema de amortiguadores (resortes), que posicionan el grizzli.

tamaño considerable (Clavos, balines, tornillos, alambre), la extracción del material magnético se hace para proteger los equipos empleados en conminución y molienda.



**Figura 30.** Almacenamiento de complejos minerales: 1. Tolva de Blending, 2. Rieles por donde se desplaza el skip, 3. Malacate, 4. Punto de descarga de mineral.

#### **4.1.1.2 Lavado de mineral**

El lavado de mineral es un procedimiento que se realiza para la eliminación de arcillas que podrían interferir con los equipos de trituración, ya que una elevada concentración de estas podría generar un comportamiento plástico que reduce la eficiencia de los procesos de conminución. Este proceso se realiza en el grizzly.

El grizzly cuenta con un sistema de riego de agua presentado en la Figura 31. La dispersión de agua se logra a través de unas duchas (boca de pato) que por diseño generan dispersión de agua, el riego realiza un lavado superficial para limpiar el mineral, este procedimiento genera dos productos mineral y agua-lodo.



**Figura 31.** Sistema de riego y esparcimiento de agua en el grizzli

El conjunto de agua y lodo es enviado a través de canales a los tornillos (presentados en la figura 32) para una etapa de separación solido-liquido (lodo-agua). El lodo es enviado a la etapa productiva de metales preciosos, mientras que el agua es recirculada a los puntos de inyección en la planta de beneficio.



**Figura 32.** Estructuras Helicoidales de separación solido-liquido.

#### 4.1.1.3 Trituradora de mandíbulas

El mineral obtenido del grizzli es enviado a través de la banda del grizzli a la primera etapa de conminución denominada *chancado primario*, que se efectúa en una trituradora o chancadora de mandíbulas. El proceso se realiza con el propósito de disminuir el tamaño de partícula y por lo tanto aumentar el grado de liberación de las especies económicamente explotables, el producto final tiene un tamaño de partícula promedio de 6 a 7 pulgadas, la trituradora tiene forma de cono para facilitar la movilidad y descarga del mineral, está constituida por dos placas corrugadas, una fija y otra pivotada en un extremo que se desplaza por la tracción de un motor para fracturar por compresión el material. Las placas forman un ángulo entre sí que puede ser modificado dependiendo de los requerimientos operacionales.

El material es descargado por la trituradora en el sistema de transporte de mineral, como se presenta en la Figura 33, en la denominada banda 2, donde un operario realiza la extracción manual de rocas con un tamaño apreciablemente grande. Desde este punto se cuenta con una cubierta de zinc que va sobre las bandas para proteger y aislar el mineral de las condiciones climáticas y medioambientales, especialmente humedad en épocas de alta precipitación. La banda 2 alimenta la etapa de conminución secundaria que se realiza en el impactor.



*Figura 33.* Transporte de mineral

#### 4.1.1.4 Impactor

El Impactor, presentado en la Figura 34, es una chancadora de alta velocidad que es alimentada por la chancadora de mandíbulas mediante la banda 2, y por una carga circulante enviada desde la etapa de clasificación, realizada por la zaranda o harnero. El impactor fragmenta el material debido al impacto de las partículas con los eyectores o piezas en forma de “muelas” con recubrimientos cerámicos, algunos eyectores son móviles, se localizan en el centro del impactor, mientras que hay

otros que se disponen sobre las paredes y se encuentran fijos. Las “muelas” se deben reemplazar periódicamente debido al desgaste y a la abrasión del mineral, algunas veces para reducir costos de operación los eyectores son rellenos con soldadura. La colisión de los complejos minerales entrega como producto un material pulverizado con tamaños de partícula del orden de 3 a 4 mm. Las variables con que se realiza la operación del impactor son: una corriente eléctrica de 160 mA, un número de revoluciones por minuto en el motor de 6000 rpm, y un nivel de vibración promedio de 2.5 mm/s. El control del procedimiento se realiza basado en el nivel de vibración siendo operativo a un valor inferior a 5 mm/s, la descarga del impactor se hace en la banda 3, la cual transporta el mineral a la etapa de clasificación realizado en el harnero.



*Figura 34.* Trituradora de alta velocidad (Impactor)

#### **4.1.1.5 Harnero**

El harnero o zaranda es una mesa vibratoria inclinada, que clasifica el mineral de acuerdo con la distribución probabilística que ocurre cuando el mineral es estratificado y clasificado para obtener un producto y un sobretamaño (tamizaje). La vibración es producida por un contrapeso y un motor eléctrico. El harnero cuenta con estructuras en forma de “V” para disminuir la velocidad y por lo tanto la energía cinética de las partículas a clasificar antes de acceder a las dos mallas. Las mallas se encuentran sobrepuestas y desfasadas espacialmente para obtener un producto de 3 a 4 mm, además se cuenta con un sistema amortiguador (resortes) para posicionar la zaranda. El producto alimenta la banda 5, mientras que el sobretamaño se transporta como carga circulante por la banda 4 hasta el Impactor (presentado en la Figura 35). Un problema de operación es que en ocasiones se

presenta atascamiento de las mallas producido por la presencia de partes de cordón detonante empleado en la explosión para la extracción de mineral. Por otra parte, si el mineral que llega a esta etapa tiene una humedad relativa alta (apariencia a plastilina) también tiene lugar el atascamiento y se reduce la eficiencia del proceso de clasificación (separación solido-solido, basada en la estratificación de mineral por tamaño de partícula).



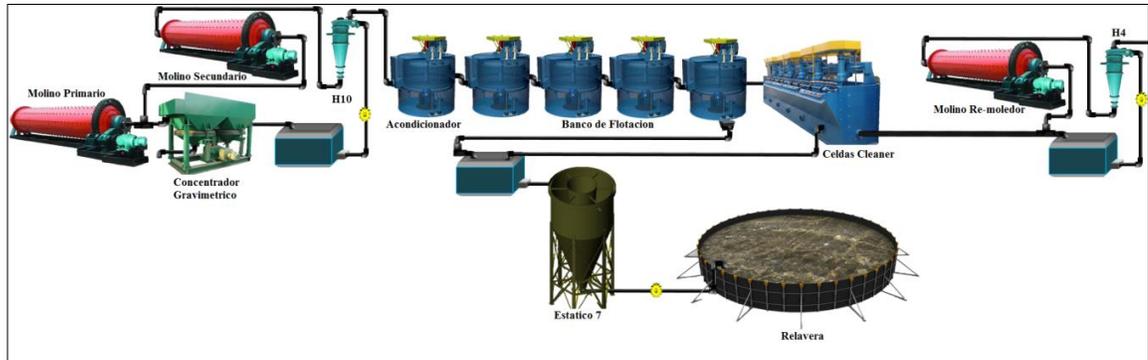
*Figura 35.* Tamiz industrial: 1. Banda de alimentación, 2. Medio de harneado (malla), 3. Contrapeso y desnivel mecánico, 4. Banda que transporta el producto del proceso, 4. Banda de transporte del sobretamaño.

En este punto terminan las operaciones de conminución en seco, y se inician las etapas de molienda, en las cuales se adiciona un caudal de agua. La banda 5 transporta el mineral hasta la tolva de finos, donde se almacena el mineral que va a ser enviado a las etapas de molienda. La tolva de finos alimenta la banda 6 (pie de banda 6), que transporta el mineral hasta la alimentación del molino primario; en este punto se agrega óxido de calcio (CaO) al mineral para controlar la alcalinidad y mantener el pH en un valor de 11.

#### **4.1.2 Molienda y concentración de complejos minerales**

Dada la dilución coloidal de especies valiosas y la alta dispersión de tamaños, se debe incorporar a las etapas de beneficio los procesos de molienda y concentración. El esquema de operación se

presenta en la Figura 36. El desarrollo de los procesos en esta etapa del beneficio de complejos minerales se realiza con la operación de los molinos primario, secundario y re molidor, el jig, los hidrociclones H10 y H4, y las celdas de flotación.



*Figura 36.* Diagrama de flujo de las etapas de Molienda y Concentración de Complejos Minerales

#### 4.1.2.1 Molino primario

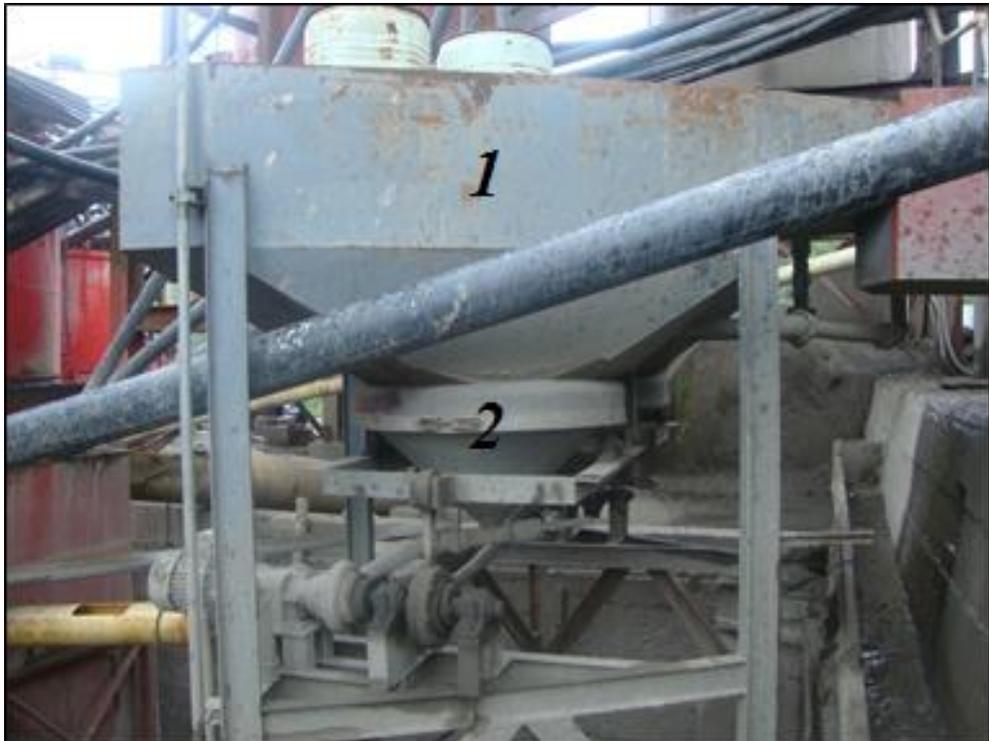
El molino primario presentado en la Figura 37, es un molino cilíndrico de bolas, de razón geométrica (largo-diámetro) de 1, teniendo como dimensión 3 m. El molino es accionado con un motor de velocidad angular de 60 Hz y una catalina (rueda dentada). El molino es alimentado con el mineral y agua, en proporción y caudal, que no se monitorean, ni registran; la adición de agua se hace hasta tener fluidez en la movilidad del mineral, el medio de molienda son esferas (bolas) de acero, aleación de hierro, aleación de molibdeno, o tungsteno; el diámetro de las diferentes esferas empleadas en el proceso es 3, 2.5 y 2 pulgadas. El tiempo de molienda, las toneladas de mineral procesadas por hora, y la energía requerida son parámetros determinantes, pero desconocidos. En la descarga del molino se mide la densidad de la pulpa mineral que debe encontrarse en un rango de 1600 a 1750 kg/m<sup>3</sup> aunque en muchas ocasiones se encuentra por debajo de este valor (1300-1400 kg/m<sup>3</sup>), el producto del molino (que tiene un tamaño de partícula del orden de las  $\mu\text{m}$ ), es enviado a una etapa de concentración gravimétrica.



*Figura 37.* Molino de Bolas

#### 4.1.2.2 Jig

La concentración gravimétrica se realiza en el jig o pulsadora, la cual se presenta en la Figura 38, la pulsadora es alimentada por el flujo de salida del molino primario y la carga circulante del molino secundario, los impulsos son generados por un mecanismo de diafragma y polea accionado por un motor eléctrico, que genera un vacío parcial que ocasiona la succión que levanta el medio de estratificación y el mineral. Los sulfuros (presumiblemente el material más denso) se precipitan y son enviados a la caja del molino remolador donde, luego de una etapa de remolienda y clasificación en un hidrociclón, son enviados al proceso hidrometalurgico de lixiviación por cianuración, mientras que el material menos denso (concentrado con bajo contenido porcentual de sulfuros) es enviado a la caja del molino primario; luego una bomba Denver impulsa el mineral a una etapa de clasificación en el hidrociclón H10.



*Figura 38. Concentrador Gravimétrico JIG. Sistema de concentración de especies valiosas que consta de: 1. Criba (mesa) sobre la que se deposita la capa mineral. 2. sistema de impresión de un pulso vertical.*

#### 4.1.2.3 Hidrociclón H10

En la etapa de clasificación en el hidrociclón, presentada en la Figura 39, el mineral ingresa por una abertura rectangular en forma tangencial al dispositivo clasificador para formar una espiral. La fuerza centrífuga genera una presión de vacío que arrastra el material más fino hacia la parte superior (over flow) el cual es enviado al proceso hidrometalurgico de flotación, y el material de mayor tamaño de partícula es expulsado por la parte inferior (under flow) y enviado a una etapa de molienda como carga circulante que alimenta la etapa de clasificación gravimétrica.



*Figura 39.* Dispositivo clasificador H10.

#### **4.1.2.4 Flotación**

El proceso de flotación inicia en el acondicionador, donde se prepara la pulpa mineral para obtener un concentrado con alto contenido de sulfuros (pirita) a los cuales se asocia la mena de oro y plata. En la etapa de acondicionamiento se airea la pulpa mientras se mantiene a agitación constante; el proceso requiere la adición de insumos químicos en tres puntos de adición: la banda cinco B5, donde se adiciona sulfato de cobre (activador de pirita), y el colector promotor AERO 404, la banda seis B6 donde se adiciona al mineral un agente modificador y depresor (óxido de calcio-cal), para controlar la alcalinidad y mantener el pH cercano a un valor de 11, el punto tres se ubica en la caja del molino primario, donde se adiciona al sistema AEROFLOAT 31, agente colector que propicia la generación de espuma. La pulpa mineral es enviada al banco de flotación compuesto por 4 celdas de

agitación mecánica, como la que se presenta en la Figura 40. Las celdas constan de un agitador mecánico y cuatro lanzas de inyección de aire, acopladas para difundir aire dentro de la celda y generar burbujas de aire, el primer banco o bulk 1 es donde se realiza la primera etapa, la etapa rougher en la que se logra la mayor concentración de sulfuros y metales preciosos, por lo que la espuma es enviada directamente a la caja del molino remolador, donde luego de una remolienda y clasificación inicia el proceso de lixiviación por cianuración.



*Figura 40.* Celda de Flotación

La cola del bulk 1 es enviado a la etapa scavenger que se realiza en los bulk 2, 3 y 4, la disposición de los mismos es en serie, donde las espumas que se obtienen como producto de la flotación son enviadas a la etapa cleaner y las colas siguen el circuito de flotación, finalmente la cola del bulk 4, suele iniciar las etapas rougher y scavenger, o es enviada al estático 7 donde se dispone como cola de relave, en el banco de flotación se adiciona el agente espumante y colector xantato amílico de potasio para iniciar el proceso de selectividad del mineral basado en las diferencias superficiales de los minerales valiosos y el estéril, la espuma enviada a la etapa cleaner es flotada nuevamente en el banco de flotación Cleaner presentado en la Figura 41 que consta de celdas mecánicas rectangulares de agitación mecánica sin la inyección de aire, las cuales tienen el propósito de obtener una espuma limpia con alto contenido de sulfuros (pirita), la cola es dispuesta como relave, mientras que la espuma es enviada a la caja del molino remolador.



*Figura 41.* Banco de Flotación Cleaner

#### **4.1.2.5 Molino re-molador e hidrociclón H4**

Todo el mineral presente en esta etapa (mineral obtenido de la concentración gravimétrica, espuma de la flotación rougher, y la espuma obtenida en las etapas scavenger y cleaner) es enviado a una etapa de clasificación en el hidrociclón D4, donde se obtiene un mineral con tamaño de partícula definido por el set point (over flow) y un mineral sobretamaño (under flow) que es enviado a remolienda hasta cumplir con las especificaciones técnicas del set point; el mineral que ha pasado estas etapas está listo para ser lixiviado mediante la disolución del mineral valioso en una solución de cianuro de sodio.

El proceso de lixiviación por cianuración y precipitación con polvo de zinc serán descritos posteriormente, ya que son comunes para el procesamiento de lodos y mineral particulado obtenido en la extracción minera. En esta parte se introduce al lector al proceso productivo del beneficio de lodos.

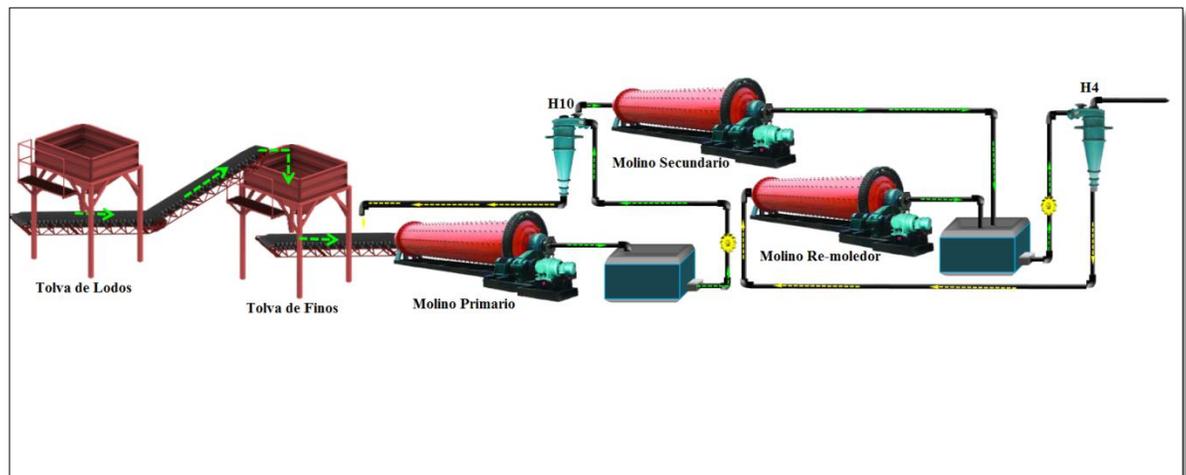
## **4.2 Beneficio de lodo mineralizado**

El procesamiento de lodos difiere del beneficio de complejos de minerales, ya que se omiten algunas etapas de producción; no se realiza la trituración o chancado, tampoco la clasificación en harneros para obtener una distribución granulométrica, ya que los lodos tienen un reducido tamaño de partícula y un grado de liberación mayor. Las etapas de flotación y concentración gravimétrica

no se realizan, dado que el lodo tiene alto contenido de sulfuros (pirita) a los que se asocian los metales preciosos, es decir el lodo es un material concentrado de especies valiosas, por lo que solamente se procesa en las etapas de molienda y clasificación en hidrociclones, para posteriormente iniciar los procesos de metalurgia extractiva (lixiviación por cianuración y precipitación con polvo de zinc).

#### 4.2.1 Molienda de lodo mineralizado

Se inicia la operación en planta de procesamiento y beneficio de lodo mineralizado con los procesos de molienda, cuyo esquema de operación se presenta en la Figura 42. Los procesos en esta etapa del beneficio de lodo mineralizado son: almacenamiento de lodos, molienda y estratificación de lodo mineralizado.



*Figura 42.* Diagrama de flujo de las etapas de molienda y estratificación de lodo mineralizado.

##### 4.2.1.1 Almacenamiento de lodos

La operación inicia en la tolva de lodos (tolvin) donde se alimenta la planta con diferentes lodos de la región suministrados por diferentes proveedores. La tolva de lodos tiene la función de almacenar el mineral y verterlo de manera organizada en la banda cinco B5, que alimenta la tolva de finos en la que, para el caso particular de los lodos, se inyecta aire para reducir el porcentaje de humedad y evitar la formación de conglomerados.

##### 4.2.1.2 Molienda y estratificación de lodo mineralizado

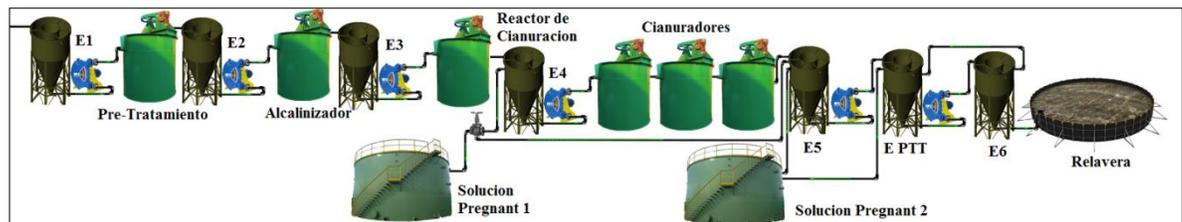
El lodo es vertido en la banda seis B6, en conjunto con la carga circulante y agua, esta banda alimenta el molino primario que tiene la función de reducir el tamaño de partícula y aumentar el grado de liberación de la mena de oro. En un medio de molienda conformado por esferas de diversos diámetros. La descarga alimenta la caja del molino primario, donde el mineral es almacenado y luego enviado (bombeado) por una bomba Denver a una etapa de clasificación en el

hidrociclón H10. El hidrociclón suministra tanto un flujo de lodo con mayor concentración de especies valiosas (over flow) a una etapa de molienda posterior en el molino secundario, como un material que no cumple con los requerimientos en la distribución granulométrica y con bajo contenido en sulfuros (under flow), que conforma la carga circulante que alimenta el molino primario. El molino secundario reduce a una proporción menor las partículas que conforman el lodo y lo envía a otra etapa de clasificación en el hidrociclón H4.

En esta etapa de clasificación se define el set point del tamaño de partícula para ser lixiviado en los estáticos de cianuración. El lodo con tamaño de partícula inferior a este valor, presumiblemente el mineral con mayor contenido de especies valiosas (over flow), es enviado a la etapa de cianuración, mientras que el sobre tamaño (under flow) es enviado a una etapa de molienda en el molino remolador, para posteriormente ser clasificado nuevamente en el hidrociclón H4 en un circuito de laso cerrado. Finalmente se realizan los procesos de metalurgia extractiva para recuperar el mineral procesado, que es un complejo con altos contenido de oro y plata.

### 4.3 Procesos de metalurgia extractiva

Los procesos de metalurgia extractiva se realizan con el propósito de recuperar metales preciosos contenidos en una matriz de mineral refractario. El esquema de operación en la planta de procesamiento y beneficio de complejos minerales de Sociedad Minera del Sur S.A.S. se presenta en la figura 43, esquema de operación que es común para el tratamiento de complejos minerales y lodo mineralizado. Los procesos que se realizan en esta etapa de operación son: lixiviación por cianuración y precipitación de metales preciosos en el sistema Merrill Crowe.



*Figura 43.* Diagrama de Flujo del Proceso Hidrometalurgico de Lixiviación por Cianuración

#### 4.3.1 Lixiviación por cianuración

Los procesos de metalurgia extractiva se inician en el estático número uno (E1), donde se realiza el primer enjuague a la pulpa mineral, adicionando agua. El estático tiene la función de decantar la pulpa mineral, eliminando en forma parcial las sales presentes en el complejo; posteriormente una bomba Denver envía la pulpa mineral decantada en el estático al reactor de Pretratamiento, un punto de adición de reactivos, donde se adicionan algunos compuestos químicos con el objetivo de oxidar el material sulfuroso presente en la pulpa mineral. En este punto se agrega EDTA, soda caustica, peróxido de hidrógeno (que genera una mayor difusión de oxígeno a la solución en la que está inmersa la pulpa mineral), nitrato de plomo (catalizador) y óxido de calcio (cal) para regular el pH,

a un valor de 11. La pulpa mineral es enviada al estático número dos (E2), donde se realiza un segundo enjuague, se adiciona agua para obtener una pulpa mineral libre de impurezas; la pulpa sedimentada es enviada al alcalinizador, tanque provisto con un sistema agitador traccionado por un motor eléctrico, donde se inyecta aire a la pulpa mineral con el propósito de oxidar los cuerpos sulfurosos para pasivar el efecto de los agentes consumidores de oxígeno y los agentes Cianicidas. En el proceso hidrometalúrgico de cianuración, la pulpa previamente tratada es enviada a un tercer enjuague en el estático número tres (E3), se adiciona agua con la que se pretende la eliminación de sales e impurezas suspendidas para obtener una pulpa mineral lista para ser lixiviada. La pulpa es enviada al reactor de cianuración número uno presentado en la Figura 44, el cual está provisto del sistema de agitación mecánico (eje acoplado a una propela) que produce agitación para facilitar la interacción de los compuestos químicos con el mineral económicamente explotable y con el material ganga.

Además el sistema de aireación (compuesto por cuatro lanzas ubicadas en una distribución regular para producir burbujas de aire), es alimentado por compresores de aire, este sistema de compresión de aire también alimenta el sistema de aireación de las minas, fundamental en el desarrollo de las labores mineras, por lo que se tienen constantes caídas de presión lo que reduce la eficiencia del proceso, además de generar burbujas grandes que dificultan la correcta difusión de oxígeno a la pulpa mineral. El tiempo de residencia es de 12 horas en operación continua. En este punto del circuito de operación de la planta de tratamiento y beneficio de complejos minerales se adiciona el agente lixivante (cianuro de sodio NaCN) en una concentración de 3000 ppm y una sal de plomo en concentración diluida como catalizador (Nitrato de plomo  $PbNO_3$ ).

La pulpa mineral es enviada al estático número cuatro (E4), donde se adiciona una solución con bajo contenido en ppm de metales preciosos (solución barren) para realizar una segregación de la solución lixiviada o solución pregnant y la pulpa mineral. La segregación se logra mediante la decantación de la pulpa mineral en un proceso de separación sólido-líquido; la solución sometida a la primera cianuración es analizada, determinando su concentración en ppm de oro, mediante la aplicación de la técnica de análisis de absorción atómica. Si el resultado muestra una alta concentración respecto a los puntos de equilibrio de la relación “costos de producción: productividad”, la solución se almacena en el tanque de solución pregnant número uno, de lo contrario es enviada al estático número cinco (E5) para su posterior tratamiento.

La pulpa mineral sedimentada en el estático número cuatro (E4), es enviada a un circuito en serie de cianuradores para la lixiviación intensiva de los metales preciosos. Los cianuradores dos, tres y cuatro, son análogos al cianurador uno, ya descrito. La diferencia de operación con la primera cianuración es que en esta etapa no se adiciona agente lixivante, solo se pretende ampliar los tiempos de retención del proceso; la etapa de cianuración en esta parte tiene un tiempo de residencia de 24 horas, tiempo después del cual la solución lixiviada obtenida se envía al estático número cinco (E5), para la sedimentación de la solución con bajo contenido porcentual de metales preciosos o solución barren, y la obtención de la solución pregnant que se almacena en el tanque de solución pregnant número dos. La solución barren es enviada al estático de pretratamiento que cumple las funciones de un estático sedimentador, en este punto se realiza un lavado a contra

corriente que puede hacerse con agua o con la solución barren que se obtiene como residuo de la operación de la planta de lixiviación por cianuración. La pulpa que es sedimentada se envía al estático número seis (E6) donde se realiza un enjuague con solución barren o agua para obtener una pulpa que se dispone como cola de relave, y la solución que se recircula al estático de Pretratamiento. Finalmente la solución pregnant obtenida en el estático de pre-tratamiento se almacena en el tanque de solución pregnant número dos. La cola de relave es enviada a la relavera para el tratamiento de efluentes y su disposición final; el primer tratamiento es la destoxificación de los complejos de cianuro con peróxido de hidrógeno y la eliminación de metales pesados. Por último se realiza la obtención del producto final, (un complejo polimetálico) mediante la precipitación con polvo de zinc en el sistema Merrill Crowe.



*Figura 44.* Reactor de Cianuración

#### **4.3.2 Precipitación de metales preciosos en el sistema Merrill Crowe**

El proceso en la planta de beneficio de complejos minerales de Sociedad Minera del Sur S.A.S. se inicia con la clarificación o eliminación de impurezas no deseadas de la solución pregnant en los clarificadores, 30 paneles que hacen una filtración de las impurezas o partículas coloidales. Los paneles son fabricados con tela índigo y un recubrimiento de selite (filtro), posteriormente la solución pregnant clarificada se envía a la torre de vacío, constituida por una bomba que extrae el aire en el interior de la torre, haciendo uso de una bomba turbo molecular DENVER. La selectividad de succión de solo aire (sin la solución pregnant clarificada) se logra con una disposición de tubería en forma de manómetro tuvo en u de agua, en el que la diferencia de presiones se equilibra en el valor de 10 m de altura en la tubería, lo que direcciona la corriente de aire e impide la evacuación de la solución pregnant. La solución pregnant clarificada y deareada se envía a una banda transportadora donde se adiciona polvo de zinc, nitrato de plomo y cianuro de sodio, que se adicionan para propiciar el intercambio iónico para galvanizar el oro y la plata, logrando la sedimentación de los metales preciosos. Finalmente se envía la solución a la filtro prensa para precipitar y recuperar los complejos de oro y zinc. La prensa debe estar en un rango de 70 a 80 Lb-f, donde se obtiene un concentrado pulverizado con alto contenido porcentual de metales preciosos, pero no selectivo, es decir contiene Au, Ag, Zn, Cu, y otros compuestos que pueden generarse de reacciones colaterales en las etapas de beneficio y metalurgia extractiva. El producto final obtenido es un complejo polimetálico con alto contenido porcentual de oro y plata.

## 5. Diagnóstico de los procesos metalúrgicos

La empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. inició sus labores operativas adecuando sus instalaciones de acuerdo con la tradición minera y productiva del norte del Cauca. Posteriormente, basados en los buenos resultados decidieron ampliar el volumen de material procesado en la planta de beneficio, pasando del procesamiento de entre 40 y 80 toneladas/día a 300 toneladas/día. El incremento productivo debido al crecimiento operacional generó problemas en la gestión productiva y financiera, debido a:

- Falta de protocolos que describieran y parametrizaran los procesos metalúrgicos de beneficio
- Improvisación en el desarrollo de la operación
- Falta de un modelo de transferencia tecnológica

Se ha identificado que otra situación que genera dificultades indirectas en la producción de la empresa, es que la organización interna de la misma carece de una estructura administrativa definida apropiadamente, tal que permita establecer las responsabilidades de cada área en el procesamiento de minerales.

En términos de transferencia tecnológica e innovación, se identifica que la empresa no tiene la capacidad, ni la tradición para generar tecnología, los paquetes tecnológicos se adquieren de forma improvisada, situación generalizada en el sector productivo de Colombia. En este sentido, se debe considerar que la empresa no cuenta con un equipo técnico de auditores y analistas de los procesos de minería, que determine los parámetros óptimos para la producción de concentrados polimetálicos.

El modelo de negocio en el que se basa la operación de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. está dividido en tres grandes actividades: la exploración o extracción, el tratamiento y beneficio de complejos minerales y finalmente el procesamiento de lodos. Se optó por comprar lodo mineralizado principalmente porque esta actividad requiere de una menor cantidad de procesos de beneficio. Las características de los lodos de un tamaño de partícula reducido, en menor dispersión y una alta concentración porcentual de metales preciosos, permiten que se supriman del procesamiento las etapas de conminución y la concentración.

Realizando una comparación entre la cadena de valor de un programa minero estándar y los inicios de operación de la empresa, se identifica que no se emplean las técnicas y metodologías de prospección geofísica, lo que imposibilita obtener un modelo de distribución espacial que indique las zonas de más alta probabilidad para encontrar metales preciosos. Se realizan exploraciones geológicas y una caracterización inicial, sin considerar la anisotropía de composición característica de los depósitos que se forman en eventos hidrotermales. Por otra parte, no existe una cuantificación aparente de las reservas (toneladas de mineral económicamente explotable).

Todo esto ha llevado a disminuir la capacidad de producción en toneladas/hora. Actualmente la planta de tratamiento y beneficio de minerales está sobredimensionada ya que su capacidad es de

300 toneladas/día pero se alimenta con una menor capacidad. Como consecuencia, los costos de operación se incrementan. Además se identifica un desajuste entre los parámetros y las variables que se consideran críticas en la operación, lo que ha llevado a bajos porcentajes de recuperación. A continuación se presenta una descripción de los problemas identificados en los procesos de beneficio para el tratamiento y procesamiento de complejos minerales y lodos mineralizados. Además se presenta la influencia de factores externos a la operación de la planta de beneficio de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.

## **5.1 Procesos de beneficio**

En el diseño de la planta no se consideraron los problemas que se presentan por las dimensiones y extensión de la planta, que conllevan a complicaciones en el transporte de mineral.

Los equipos y maquinas con los que se desarrolla la operación del procesamiento y beneficio de complejos minerales no cuentan con el registro e historia de las modificaciones a las que han sido sometidos. Lo que puede dar como resultado cambios en el diseño original y por tanto variaciones en los parámetros de operación que no quedan registrados. Debido a esta circunstancia, se puede presentar un desajuste desconocido en los rangos de operación. Además el diseño inicial tiende a desaparecer, por lo que los parámetros iniciales se alteran. Por otra parte, no se tiene la hoja de datos que define los rangos y las distintas configuraciones de operación. La mayoría de los equipos se han modificado sin obedecer a una planeación estratégica que busque lograr altos porcentajes de recuperación, pero si se ha hecho de acuerdo con las necesidades del momento.

A continuación se describen algunos de los problemas que se identifican en el desarrollo de los procesos metalúrgicos de beneficio de complejos auroargentíferos, en el programa minero, de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.

### **5.1.1 Almacenamiento y transporte de mineral**

Un primer problema se detecta en el proceso de descarga en la tolva de blending, debido al tamaño de partícula con el que se obtiene el mineral. Se desconoce la masa y la densidad aparente de las rocas que ingresan a la planta. Un segundo problema se detecta en el grizzly donde el lavado no se realiza de forma apropiada ya que la dispersión de agua no puede cubrir todo el volumen de mineral, además este sistema de lavado llena de humedad superficial al mineral, lo que posiblemente disminuya la eficiencia de la reducción de tamaño en los procesos de trituración.

Por su parte, las bandas que realizan el transporte de mineral tienen una inclinación de aproximadamente 25°, por lo que no se aprovecha la aceleración de la gravedad generando altos e innecesarios consumos energéticos.

### **5.1.2 Trituración primaria**

En la operación unitaria de trituración primaria, se observa una distribución irregular de partículas minerales, con una dispersión de tamaño que no se encuentra en el rango de valores operacionales. Normalmente, luego de este proceso un operario tiene que eliminar las piedras de un tamaño

excesivo. Esto es un indicador de que el proceso no se desarrolla apropiadamente, lo que presumiblemente se atribuye al tiempo de retención en la trituradora y a los parámetros geométricos como el ángulo de las placas y la abertura de descarga.

Por otra parte, en la operación de los procesos de conminución se pierde material debido a la abrasividad característica del mineral. Además, en este proceso se genera material particulado rico en sulfuros y especies valiosas que se dispersa por el aire y constituye un riesgo laboral para los operarios.

### **5.1.3 Trituración secundaria**

En este proceso realizado en el impactor, la dificultad principal se debe al alto desgaste de los eyectores. Este desgaste se debe a la abrasividad del material y a la presencia de objetos metálicos, que no son removidos por el imán. Como consecuencia se genera un incremento en los costos de operación debido a que se deben realizar paradas en el proceso, que se ocasiona por la necesidad de constante modificación de estas piezas en la trituradora giratoria.

Si el mineral presenta una considerable viscosidad o un alto contenido de finos, la operación en el impactor se ve afectada. Esto es, la reducción de tamaño no se realiza, se presenta atascamiento y obstrucción entre los eyectores fijos y móviles del impactor. El anterior problema se presenta con mayor intensidad en temporadas de alta precipitación.

### **5.1.4 Tamizaje industrial**

En esta etapa se identifica una limitación por la reducción del área efectiva del medio de clasificación (malla). La causa se debe a la obstrucción de la malla por el cordón detonante, el cual se emplea en las labores de extracción.

Por otra parte, se identifica la necesidad de realizar un ajuste en las etapas de conminución que relacionen el tamaño de liberación con los porcentajes de finos y gruesos. El exceso de finos genera deslizamiento y obstrucción sobre el área de la malla, mientras que el exceso de gruesos dificulta el proceso de estratificación en tamaños. En épocas de alta precipitación, el mineral incrementa su humedad relativa, lo que genera un aumento en la viscosidad y la deficiencia en la operación de tamizaje industrial.

### **5.1.5 Separación sólido-líquido**

Se identifica que el proceso de separación sólido-líquido no se desarrolla de forma apropiada ya que se obtiene como producto final agua turbia con contenido de partículas sólidas. Por esto, los parámetros a revisar y definir son: la altura tornillo-base, el caudal con que es alimentado el tornillo, el tiempo de residencia en los tanques de sedimentación, el número de revoluciones por minuto (rpm) del motor que genera el movimiento helicoidal de los tornillos y finalmente la inclinación del sistema. Este último parámetro se encuentra en 18° y el valor inicial de diseño es de 22°.

### **5.1.6 Molienda de minerales**

Se observa que es necesario realizar una alineación en los molinos ya que presentan un desbalance, generando un desgaste no uniforme en la superficie de los mismos. Además esta condición perturba la dinámica del mineral y medio de molienda, generando que la reducción de tamaño no se realice de forma apropiada, incrementando el consumo de energía y los costos operacionales.

Los molinos giratorios de bolas, son sistemas rotativos, por lo que requieren un sistema de amortiguadores, que reduzca la vibración de operación, que puede convertirse en una señal modificadora que perturba el desarrollo del proceso. También, se observa la ausencia de un mecanismo moto-reductor o variador de velocidad, que permita controlar la velocidad de operación y la potencia mecánica a transmitir en los molinos.

En las etapas de molienda se adiciona agua, la cual modifica las características de mineral. Cuando se trata de material proveniente de yacimientos de cuerpo mineral (veta), se debe controlar el pH del agua, ya que la presencia de sales en el complejo mineral podría desencadenar reacciones que alteren la composición y características fisicoquímicas en la pulpa mineral que se forma.

Un problema en términos de productividad, se presenta por el desconocimiento del coeficiente de fricción entre la pulpa mineral y la superficie de los molinos. Sin considerar esta variable, una posible situación es que el material se adhiera a las paredes del molino, ocasionando que el mineral no sea sometido a los mecanismos de impacto y abrasión. Esta condición reduce el volumen útil del molino, la razón de reducción y lo más crítico, conduce a una pérdida significativa de metales preciosos contenidos en los complejos minerales que quedan suspendidos en los molinos y no son recuperados. Además, se desconocen dos parámetros de operación: la velocidad crítica en el molino primario y la velocidad de giro de los molinos de banda.

En el desarrollo de esta operación unitaria, se presenta desgaste del medio de molienda debido a la operación continua, la abrasividad del mineral y a las características del agua.

### **5.1.7 Concentración gravimétrica**

En el proceso de concentración gravimétrica, se realiza una estratificación de la pulpa mineral, obteniendo un complejo rico en sulfuros (pirita) y un mineral que debe ser sometido a otras etapas de concentración. No obstante, no se realiza una etapa de selectividad que aparte el oro nativo que se presenta libremente en la naturaleza, lo cual genera un incremento en los costos de operación debido al aumento en el consumo del agente lixivante.

### **5.1.8 Estratificación en hidrociclones**

En la clasificación de complejos minerales realizada en los hidrociclones, debido al alto flujo de pulpa mineral, algunas veces se genera atascamiento de los ductos de los hidrociclones. Esta condición genera pérdidas de tiempo (paradas imprevistas) durante el desarrollo de la operación. Además, se identificó que si no se hace control sobre la presión con que ingresa la pulpa mineral se puede realizar una incorrecta clasificación. Una clasificación inapropiada puede incrementar el

consumo energético debido a la sobre molienda o generar un funcionamiento incorrecto en el sistema de flotación, ya que las partículas gruesas no pueden ser flotadas dada la alta densidad del par partícula mineral-burbuja.

### **5.1.9 Transporte de mineral**

En relación al sistema de transporte para la pulpa mineral, el coeficiente de fricción entre la superficie del circuito de operaciones (el polímero del que están construidas las mangueras) y la pulpa mineral es un parámetro importante de esta etapa. Si no se considera este parámetro, se generan pérdidas de material las cuales se evidencian en el porcentaje de recuperación.

### **5.1.10 Flotación**

El proceso de flotación es una de las etapas que se consideran más críticas en el beneficio de complejos auroargentíferos, debido a los problemas operacionales que afectan los porcentajes de recuperación. Se observó que la transmisión de energía mecánica que se utiliza para generar turbulencia en el sistema de flotación, presenta un desalineamiento en los ejes. Esta condición disminuye la capacidad másica de procesamiento en el desarrollo del proceso. Este deficiente alineamiento del eje se debe a problemas de diseño y al número de revoluciones inapropiado que no estabilizan el sistema. También se debe considerar que el eje y la propela están contruidos de materiales de alta densidad, por lo que son muy pesados para lograr agitación turbulenta.

Otro requerimiento operacional de esta etapa es mantener constante la presión de suministro de aire comprimido. Sin embargo, debido a la configuración en serie del circuito manométrico se tienen constantes caídas de presión ocasionadas por el suministro de aire para la realización de las labores mineras. Las caídas de presión generan un desbalance en los niveles de pulpa y espuma, condición que puede ocasionar reboses y pérdida de mineral. Los niveles de espuma y lodo son determinados por un sistema sencillo de hilo y arandela, el cual proporciona una aproximación de la selectividad de especies valiosas y material estéril.

Por otro lado, el sistema de aireación de las celdas de flotación presenta obstrucciones por el atascamiento de la pulpa mineral en las lanzas que diseminan las burbujas, debido a la longitud de las lanzas en el circuito de suministro de aire comprimido. Las lanzas que inyectan aire a las celdas de flotación no generan micro burbujas, por lo que la selectividad de la concentración es inapropiada.

Por otra parte, dada la abrasividad del mineral, los sistemas de inyección de aire son sometidos a constante desgaste disminuyendo la capacidad de diseminar burbujas en las celdas de flotación.

### **5.1.11 Proceso hidrometalúrgico de cianuración**

El otro proceso en el desarrollo de operaciones que se considera crítico, es el proceso hidrometalúrgico de cianuración. En esta etapa se presentan problemas en el sistema de aireación, debido a las constantes caídas de presión, lo que ocasiona que la concentración de oxígeno diseminado en la solución no esté cerca del parámetro óptimo de 8 ppm. Para obtener esta

concentración en la solución, se necesita una presión de trabajo muy elevada que actualmente no es suministrada por el compresor con el que se realiza la operación.

Además, la abrasividad del mineral desgasta el reactor de cianuración y a los eyectores de aire comprimido. También se observó que el sistema de aireación no es el adecuado para la correcta difusión de oxígeno en el reactor debido a que se utilizan 4 lanzas, en lugar de una malla con distribución regular que pueda incrementar la concentración de oxígeno en la solución.

Por ser un proceso controlado difusionalmente, se debe tener en cuenta el valor de la temperatura y los posibles gradientes que presenta este parámetro. En la operación del proceso de lixiviación, el valor de referencia es de 85°C, pero operacionalmente debido a la gran cantidad de mineral a procesar, se considera que es inviable económicamente.

Los reactores de cianuración son sistemas abiertos expuestos al dióxido de carbono presente en la atmósfera, lo que podría ocasionar pérdidas del agente lixivante por su descomposición. Además esta exposición abierta permite que los vapores tóxicos generados en el proceso se volatilizan y se envían al medio ambiente, generando contaminación, a la vez que exponen a los operarios a un riesgo laboral.

Se puede considerar que la composición mineralógica de la materia prima, es la variable más relevante de este proceso. A partir de esta característica se define la relación de insumos y agentes presentes en la reacción electroquímica, la cual juega un papel importante en el proceso de lixiviación por cianuración. La presencia de agentes consumidores de oxígeno como la pirrotina o la presencia de cianidas como la arsenopirita, incrementan los costos de operación. Por otra parte, la presencia de cobre ocasiona una precipitación del oro en la solución cianurada, debido a la diferencia de electronegatividad entre los metales y la solubilidad relativa de los mismos.

### **5.1.12 Sistema Merrill Crowe**

En la precipitación de metales preciosos utilizando el sistema Merrill Crowe se presentan varias limitaciones y problemas de operación. El lugar donde se adiciona al zinc es una fuente que suministra aire, lo que difunde oxígeno en la solución e inhibe la correcta cinética de reacción.

Por otra parte, la filtro-prensa es compactada de acuerdo a la experiencia de los operarios. No se tiene un sistema que controle la presión, lo que reduce la efectividad y genera riesgo a lesiones y accidentes laborales.

## **5.2 Factores externos**

En el diagnóstico realizado para los procesos metalúrgicos, también se deben considerar factores que no tienen relación directa con la operación de la planta de beneficio de complejos minerales, pero que generan limitaciones en el desarrollo de la operación y pueden tener una incidencia sobre el proceso.

### **5.2.1 Factores ambientales**

En épocas de alta precipitación, las celdas de flotación, los estáticos de espesamiento, los reactores de cianuración y los tanques de solución pregnant, se ven sometidos a reboses que ocasionan pérdida de pulpa mineral, deficiencias en el proceso y una alteración de las características fisicoquímicas de la pulpa. Además esta condición altera la densidad de la pulpa, variable física de control que se emplea para definir el proceso de concentración de las especies valiosas.

Las precipitaciones también suelen desplazar la solución que está contenida en las relaveras, siendo una fuente de contaminación del subsuelo y de las fuentes hídricas aledañas a la planta de procesamiento y beneficio de complejos minerales.

### **5.2.2 Capacitación de personal**

En la región norte del departamento del Cauca se evidencia un problema que afecta la producción de los procesos de tratamiento y beneficio de complejos minerales, por ejemplo la falta de preparación o de profesionales con conocimiento de los temas y los procesos operativos, ha contribuido a la realización de acciones no planeadas en el desarrollo de la empresa. En este sentido, en la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S no se realizan planes de capacitación del personal.

### **5.2.3 Apoyo económico gubernamental**

Otro aspecto que perjudica a la empresa es que no hay un apoyo económico gubernamental, pese al impacto regional de la organización, de gran componente social, ya que muchas familias dependen económicamente de la rentabilidad de la empresa.

## **6. Recomendaciones**

De acuerdo al diagnóstico realizado y contrastando con la revisión bibliográfica, que se toma como referencia, para elaborar el diagnóstico de los procesos metalúrgicos, información que se presentó anteriormente, se realizan algunas recomendaciones para la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.

Se ha identificado que en la empresa es necesario que se realicen acciones conducentes a establecer a la investigación y a la interacción con el sector académico (quizás universidades), como pilares fundamentales y cuyo propósito sea el fortalecimiento de las actividades de innovación y desarrollo que permitan que la productividad y sostenibilidad de la misma incrementen. En este sentido, también se identifica la necesidad de constituir un modelo de transferencia de tecnología y de establecer un equipo de investigación conformado por auditores y analistas de los procesos de minería, de tal manera que estas acciones garanticen que los objetivos ya mencionados se logren exitosamente. Se debe resaltar que simultáneamente a las acciones anteriores, es necesario que se generaran paquetes tecnológicos que se acoplen al contexto de la región, lo que en consecuencia requiere la adquisición y desarrollo de tecnología y maquinaria que lleven a fortalecer la competitividad de la empresa.

En complemento, se identifica que se requiere de la implementación de protocolos que describan y parametricen los procesos metalúrgicos de beneficio. En la misma idea, también es necesario definir una estructura administrativa de la empresa acorde a las acciones planteadas de tal forma que se establezcan las responsabilidades de cada área en el proceso.

Por otra parte, se recomienda la elaboración de una base de datos de operación donde se consigne la siguiente información: la hoja de operación de los equipos y de las herramientas empleados, los tiempos de operación, los rangos operacionales y finalmente las modificaciones que se han realizado. Esta última información se requiere para conocer el propósito de las modificaciones y los cambios respecto al diseño inicial.

A continuación se presenta una descripción de las recomendaciones planteadas en cada fase del programa minero, haciendo énfasis en los procesos de beneficio, para el tratamiento y procesamiento de complejos minerales y lodos mineralizados.

### **6.1 Caracterización mineralógica**

Considerando la anisotropía de los depósitos, se plantea la realización de investigaciones periódicas centradas en el objetivo de evaluar los depósitos sobre los que se encuentran los títulos de la Sociedad Minera del Sur S.A.S. Como consecuencia, se requiere generar inventarios de composición elemental de los elementos más abundantes en los depósitos hidrotermales (Au, Ag, Cu, Fe, S, As, Zn, Pb, Ca, Te), que permita determinar la correlación y la asociación de algunos elementos con el mineral aurífero. Las características del yacimiento se deben almacenar en una base de datos que administre información como: composición, morfología, tenores, etc., la cual además necesita de la construcción y/o adecuación de una sala para el almacenamiento de testigos. Los inventarios de composición elemental se deben realizar para tener un conocimiento preciso de la composición mineralógica del depósito además para ayudar a determinar la cuantificación de reservas.

Por otra parte, se recomienda hacer una caracterización del complejo mineral o compuesto, utilizando la técnica de análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM). El objetivo es definir las estrategias que permitan obtener altos porcentajes de recuperación con material con el que se alimenta la planta de procesamiento y beneficio. La razón para esta recomendación se fundamenta en el hecho de que la composición mineralógica define el beneficio y con esta técnica se determina: la forma en la que se presenta el oro, la asociación a minerales ganga y la presencia de agentes cianicidas y consumidores de oxígeno.

Adicionalmente se plantea realizar estudios sobre la preparación de muestras en secciones pulidas delgadas, para obtener la documentación requerida para la posterior realización de estudios litológicos, con la ayuda de la técnica de análisis microscopía óptica, consignando la información en protocolos que describan los procedimientos experimentales para el análisis de muestras.

## **6.2 Cuantificación de reservas**

Se propone la aplicación de los conceptos de geoestadística como una herramienta adicional para la estimación y cuantificación de las reservas. Esta información permite la construcción de modelos litológicos que muestran en un espacio tridimensional las zonas con más alta concentración de metales preciosos. Además, se constituye en un insumo para coadyuvar en la construcción de las labores de mina, determinando con relación a la topografía del depósito, las zonas donde se puedan realizar las perforaciones para desarrollo, exploración y extracción de mineral.

## **6.3 Transporte de mineral**

En la operación de la planta de beneficio de complejos minerales, se debe determinar el punto de equilibrio entre la fluidez de la pulpa mineral por el medio de transporte (asociada a la presión de trabajo) y la densidad requerida para la operación, ya que existe una correlación entre las variables que podría disminuir la efectividad de los procesos.

Se sugiere implementar un sistema de mangueras de transporte de pulpa mineral con un código de colores, los cuales indiquen la dirección del proceso y la dirección de carga circulante, además de mostrar con precisión las líneas de operación.

Para el transporte en banda se plantea dos características: realizar recorridos cortos reduciendo la longitud de las bandas y aumentar la inclinación para aprovechar la aceleración de la gravedad en el transporte de mineral.

## **6.4 Separación sólido-líquido**

Se recomienda que en la etapa de separación sólido-líquido se revisen y definan los parámetros de operación: la altura tornillo-base, el caudal con que es alimentado el tornillo, el tiempo de residencia en los tanques en que el agua es sedimentada, el número rpm del motor que genera el movimiento helicoidal de los tornillos y finalmente ajustar la inclinación hasta el valor inicial de diseño de 22°.

## **6.5 Trituración primaria**

Es necesario que anticipadamente a los procesos de reducción de tamaño se determine el tamaño de liberación y las propiedades mecánicas del mineral o compuesto en particular, la dureza o el índice de trabajo. Esta información permitirá determinar el tamaño representativo obtenido de esta operación unitaria y la energía requerida para entregar al sistema. Este último parámetro definirá implícitamente la velocidad de las mandíbulas en la trituración por abrasión y las dimensiones geométricas que eliminaran la dispersión de tamaño.

## **6.6 Trituración secundaria**

Para esta etapa se sugiere realizar un estudio detallado donde se establezca la posibilidad de emplear recubrimientos funcionales en los eyectores del impactor.

Una sugerencia complementaria es realizar una caracterización para definir la composición elemental de los eyectores, la que se tomaría como punto de partida para analizar la viabilidad de fabricación de los eyectores del impactor.

## **6.7 Concentración gravimétrica**

Se recomienda realizar una clasificación y una separación de las partículas de oro nativo, basados en las diferencias de densidad relativa, mediante la aplicación de un método de segregación, en un sistema rotativo, ya que la recuperación del oro libre presente en el mineral tendría altos porcentajes de recuperación y un menor consumo de agente lixivante.

## **6.8 Molienda de minerales**

Para un funcionamiento apropiado, se sugiere realizar la alineación y balanceo de los molinos de bolas. Además, se requiere una caracterización de los parámetros operacionales, en específico de la velocidad crítica. Adicionalmente, se debe implementar un sistema de amortiguamiento que reduzca el nivel de vibración en la operación y acoplar un variador de velocidad o motor-reductor para controlar la potencia mecánica y la velocidad de operación.

Por otra parte, se sugiere adicionar un molino de barras, luego del molino primario, para aumentar la razón de reducción y obtener un menor tamaño representativo de partícula. Este dispositivo permitiría la obtención de partículas de mineral más finas, para que posteriormente sean clasificadas en el proceso de flotación.

## **6.9 Flotación**

Se recomienda la implementación de sensores de nivel en el proceso hidrometalúrgico de flotación, para realizar control sobre la selectividad de especies valiosas y el nivel de espuma.

Además se propone la implementación de un sistema de aireación que genere micro-burbujas para mejorar el proceso hidrometalúrgico de clasificación por flotación.

Por otra parte, se deben modificar el eje y la propela en el sistema de aireación para lograr turbulencia en las celdas de flotación. Estas modificaciones se deben realizar tanto en el diseño como en los materiales de construcción de estos elementos del sistema.

### **6.10 Flotación de cobre**

Debido a la solubilidad relativa de los metales preciosos en soluciones de cianuro alcalino, se recomienda realizar flotación de cobre. Esto permitiría eliminar la presencia de mineral cuproso, el cual se presenta en alto contenido porcentual en los complejos minerales de los yacimientos sobre los cuales se realiza la explotación. Se conoce que este mineral es un agente cianicida, que inhibe la efectiva recuperación de especies valiosas.

Por otro lado, aprovechando la infraestructura de la planta y los recursos minerales presentes en los títulos mineros de la Sociedad Minera del Sur S.A.S., el proceso de flotación de cobre puede conducir a la obtención de un concentrado de valor comercial. Este proceso se puede utilizar como una estrategia para ampliar el mercado y posiblemente para mejorar la rentabilidad.

### **6.11 Metalurgia**

Se recomienda la realización periódica de pruebas en el laboratorio de metalurgia (moliendabilidad, distribución granulométrica, flotación, lixiviación por cianuración), que conduzcan a la determinación del proceso de beneficio de complejos minerales, ya que la composición y estructura del yacimiento son dinámicas y anisotrópicas. La realización de pruebas debe incluir estrategias de réplica en planta de procesamiento, definiendo los parámetros operacionales y un estimado del consumo de reactivos.

### **6.12 Reactivos químicos**

En la preparación de reactivos e insumos químicos necesarios para los procesos metalúrgicos, se recomienda hacer análisis físicos y químicos que determinen las características más importantes de las soluciones, principalmente su concentración (determinada en ppm). Para el caso particular del nitrato de plomo, se sugiere de una caracterización que indique la síntesis que garantice confiabilidad en la operación.

### **6.13 Lixiviación por cianuración**

Se recomienda la implementación de un sistema de aireación que garantice una distribución regular de los eyectores que suministran aire a la solución lixiviada. En complemento, se propone un diseño de lanzas con terminación en forma de tobera el cual permitiría: incrementar la presión de trabajo, incrementar el contenido de oxígeno y la difusión de este gas en la solución.

Además, se propone realizar un estudio que permita establecer una metodología para incrementar el porcentaje de oxígeno disuelto en solución, el cual podría ser la adición controlada de peróxido de hidrógeno o bien las modificaciones o implementación de un sistema de aireación, ya que la presencia de oxígeno en las soluciones de cianuro alcalino, incrementa la cinética de reacción, incrementando los tiempos de extracción de las especies valiosas y aumentando los porcentajes de recuperación.

Adicionalmente se sugiere la caracterización mineralógica del material con la técnica de análisis microscopia electrónica de transmisión (SEM), para determinar la presencia de agentes consumidores de oxígeno como la pirrotina, cianocidas como la arsenopirita, y la presencia de cobre, generalmente presentes en los depósitos hidrotermales de cuerpo mineralizado (veta), los cuales definen el consumo de reactivos, y la metodología de operación para lograr el incremento de los porcentajes de recuperación. Así por ejemplo la alta concentración de cobre puede inhibir la reacción, sin embargo se puede pasivar el efecto con una concentración inicial alta de cianuro en un proceso denominado cianuración intensiva.

Por otra parte, se debe modificar el diseño de los reactores cianuradores. Estas modificaciones se deben realizar tanto en el diseño como en los materiales de construcción. Los materiales se deben modificar teniendo en cuenta la Abrasividad del material y el medio corrosivo al que es expuesto en la operación del proceso, además se recomienda que sean sistemas cerrados, para evitar la descomposición de cianuro por el dióxido de carbono atmosférico, y aislar del posible desprendimiento de ácido cianhídrico por el mal manejo del agente lixivante en un medio acuoso a los operarios.

Otra recomendación adicional, se realiza teniendo en cuenta que el proceso de lixiviación por cianuración es un fenómeno controlado difusionalmente, por lo que se propone un estudio de viabilidad técnico-económico, para la implementación de un sistema de transferencia de calor, el cual podría ser un sistema de transferencia de calor por radiación, empleando una radiación en infrarrojo IR, o las clásicas calderas que funcionan con suministro de argón.

#### **6.14 Sistema de aireación**

Se sugiere modificar el sistema de suministro de aire, aislando las etapas de aireación de cada proceso metalúrgico (flotación y lixiviación por cianuración) y las labores de mina. Para tal fin, se propone la implementación de líneas cortas y bien definidas, acoplando válvulas anti-retorno check, sobre las líneas de suministro de aire para disminuir y/o evitar caídas de presión.

Además, se propone disponer con recubrimientos de polímeros la protección de las lanzas, que generalmente se desgastan por la abrasividad del mineral.

#### **6.15 Sistema Merrill Crowe**

Se recomienda automatizar el proceso de separación sólido-líquido en el sistema Merrill Crowe, tomando como variable de control la presión a la que se someten las placas yuxtapuestas. Esto permitiría aumentar el control y la selectividad en la obtención de complejos polimetálicos.

Además se sugiere modificar el sistema de adición de polvo de zinc, aislando el sistema, para evitar la difusión de oxígeno en la solución pregnant clarificada y deaireada. El objetivo es propiciar un ambiente reductor que favorezca la cinética de reacción en el proceso.

#### **6.16 Agua industrial**

En temporadas de sequía se presenta un desabastecimiento de agua lo cual es un inconveniente para la operación de la planta de beneficio que perjudica las etapas de molienda, lixiviación por cianuración y flotación. De acuerdo a esta situación, se recomienda hacer un tratamiento del agua

del proceso, refortificando y recirculando el agua industrial. En consecuencia, es posible que estas actividades incidan en la reducción de costos generados por el tratamiento de efluentes.

### **6.17 Seguridad industrial**

Se recomienda la elaboración de un plan de determinación de riesgos, cuyo resultado permita realizar la señalización e identificación de las zonas de más alta probabilidad de accidentes laborales.

### **6.18 Mantenimiento**

Se plantea la realización de jornadas de evaluación de los equipos que permitan prever posibles limitaciones de operación y/o deficiencias en el desarrollo del proceso. Esta actividad proporcionará información para la implementación de una política empresarial de mantenimiento preventivo y predictivo. Se espera que esto contribuya a la disminución de paradas imprevistas y problemas que puedan tener un efecto negativo en la recuperación de especies valiosas.

### **6.19 Repuestos**

De acuerdo a las observaciones, se sugiere mantener una dotación permanente de los repuestos más empleados de acuerdo a la experiencia de operación y de los más representativos para el procesamiento y beneficio de complejos auroargentíferos. Esta sugerencia tiene los siguientes propósitos: disminuir el tiempo de reparación de las máquinas y herramientas con las que se opera la planta, lograr mayor efectividad en el mantenimiento y reparación de equipos y finalmente una disminución en costos de transporte.

### **6.20 Capacitación de personal**

Se sugiere realizar un proceso constante de capacitación del personal de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S., el cual conduzca al fortalecimiento de los conocimientos técnicos, se convierta en una herramienta de reentrenamiento del personal y genere motivación en los empleados. Se espera que con esta actividad se incentive al personal al desarrollo de una buena labor y que este aspecto se refleje en el incremento de la producción de la empresa.

## 7. Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo de grado en modalidad de pasantía, fundamentándose en el análisis realizado, para el cual se utilizó la información bibliográfica para efectos de comparación con los procesos realizados en la planta de beneficio de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. y considerando los objetivos propuestos, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- Se elaboró el diagnóstico de los procesos metalúrgicos de beneficio de minerales refractarios con contenidos de sulfuros, oro y plata, que se realizan para el programa minero de la Empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.
- Realizando una exploración de campo se estableció la información preliminar de la operación de los procesos de beneficio de complejos minerales. Durante esta actividad, se identificaron los procesos metalúrgicos y las variables presentes en la operación. Con base en esta información se construyó el mapa de procesos, donde se presenta el proceso productivo desarrollado por la empresa
- Se realizó la revisión del estado del arte considerando las tecnologías y herramientas de trabajo que se utilizan en el proceso de beneficio de minerales de oro y plata. De acuerdo a la revisión de la literatura especializada, se hizo una comparación tomando como referencia la cadena de valor de un programa minero.
- Se realiza la sociabilización de los avances de los objetivos planteados en el trabajo, generando una estrategia de comunicación para la Universidad del Cauca. Mediante la presentación de cuatro conferencias en la modalidad seminario, las conferencias fueron de alto contenido científico-tecnológico, y trataron temas como las metodologías de prospección geofísica, las jornadas de exploración geológica, la caracterización macroscópica y mineralógica de los depósitos, procesos de conminución y reducción de tamaño (trituración y molienda), procesos de concentración y estratificación de partículas de especies valiosas, procesos de metalurgia extractiva (lixiviación por cianuración y precipitación con adición de polvo de zinc, en el sistema Merrill Crowe), además del proceso productivo de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S.
- Con base en la comparación y la operación de la planta de beneficio de la empresa se considera que los procesos críticos para el beneficio de complejos minerales son: lavado superficial de mineral, trituración secundaria, estratificación en harnero, molienda, flotación y lixiviación por cianuración. Mientras que para el procesamiento de lodo mineralizado son: molienda y lixiviación por cianuración.
- Los títulos mineros sobre los cuales realiza la extracción la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. se encuentran sobre depósitos hidrotermales dinámicos y anisotrópicos, variables en morfología y composición, lo cual presenta una limitación de partida para el beneficio de los complejos minerales, por lo que se deben plantear estrategias de beneficio

basados en la dinámica del yacimiento. En este sentido, se sugiere establecer una base de datos donde se consigne inventarios elementales y las principales características geológicas. Para lograr este propósito se identifica que la técnica de análisis más apropiada es la microscopía electrónica de transmisión (SEM) y su herramienta complementaria de micro sonda electrónica, con la que se elaboran mapas elementales, con ayuda de la espectroscopia de dispersión de rayos X, EDX, la cual proporciona información sobre la asociación de la mena de oro a otro mineral, permite localizar partículas de oro submicroscópico (característica que define la razón de reducción en los procesos de conminución) y ayuda a identificar agentes consumidores de oxígeno y cianicidas (pirrotina y arsenopirita). Esta información permitirá, entre otros aspectos, definir el consumo de reactivos.

- El estudio de los procesos de producción utilizados en la industria metalúrgica y minera, establece una información que aporta insumos que se requieren para el desarrollo socio-económico de la región, además de generar conocimiento que sirve como referencia para posteriores investigaciones sobre procesos de minería y metalurgia en el departamento del Cauca. La elaboración de este diagnóstico, a través de la investigación documental y la revisión detallada de los procesos productivos implicados en cada etapa proporciona un insumo documental que se espera sea utilizado para incrementar los porcentajes de recuperación de minerales de oro y plata. En este sentido, este trabajo puede constituir una herramienta de apoyo e insumo conceptual para definir la metodología de trabajo en los procesos metalúrgicos.
- En la realización del diagnóstico se identifica la ausencia en la cuantificación de las variables que se consideran críticas en cada fase del proceso, por lo que no se puede realizar una comparación entre el programa minero presentado en la literatura especializada y el proceso productivo de la empresa Sociedad Minera del Sur S.A.S. Estas se establecen teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y se presentan en detalle en el documento. Esta cuantificación de las variables operacionales se debe realizar teniendo en cuenta todos los yacimientos de mineral, de los cuales se extraen los complejos minerales que son enviados a procesamiento y beneficio en la planta de operación de la empresa, considerando la dinámica y anisotropía característica de cada yacimiento, esta cuantificación de las variables permitirá la definición de las distintas configuraciones de planta que permita alcanzar altos porcentajes de recuperación, para cada tipo de mineral.