

Importancia de la geometalurgia en los yacimientos de oro del futuro en el Perú

Importance of geometalurgy in the gold deposits of the future in Peru

Jhonny Handry Castillo Mamani^{1,a}, Mario Inca Cano^{1,b}, Jordan Liceta Avendaño^{1,c}, Daniel Alberto Ortiz Saavedra^{1,d}, Manuel Shishido Sánchez^{1,e}, Julio César Anastasio Domínguez^{1,f}, Yessica Vela Soria^{1,g}

Recibido: 29/09/2022 - Aprobado: 09/11/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

En la actualidad, nos encontramos cada vez con mayor demanda de minerales entre ellos el Oro. Los beneficios de la minería del Oro en el país se reflejan en su contribución a las exportaciones y a la recaudación tributaria. La geometalurgia busca reducir significativamente el impacto de incertidumbre espacial en el planeamiento de la mina, debido a la documenta variabilidad en un depósito de Oro, esto minimiza el riesgo del proyecto en una futura explotación. Por ello el presente estudio, se plantea la necesidad de que la actividad minera peruana implemente la geometalurgia en sus operaciones y procesos a fin de disminuir los efectos negativos al medio ambiente y alcanzar el aprovechamiento máximo de los recursos naturales. La importancia de la geometalurgia radica en la calificación de los yacimientos oro, basado en sus propiedades físico-mecánicas, texturales, mineralogía de proceso y análisis químico-metalúrgico. Estos estudios proporcionan información para la realización de pruebas metalúrgicas de lixiviación y determinar los factores que podría afectar el procesamiento.

Palabras claves: ambiental, geología, geometalurgia, metalurgia, minas, oro, Perú.

ABSTRACT

Currently, we are facing an increasing demand for minerals, including gold. The benefits of gold mining in the country are reflected in its contribution to exports and tax revenues. Geometallurgy seeks to significantly reduce the impact of spatial uncertainty in mine planning because it documents the variability in a gold deposit, this minimizes the risk of the project in future exploitation. Therefore, this study raises the need for the Peruvian mining activity to implement geometallurgy in its operations and processes; to reduce the negative effects on the environment and achieve the maximum use of natural resources. The importance of geometallurgy lies in the qualification of gold deposits, based on their physical-mechanical and textural properties, process mineralogy, and chemical-metallurgical analysis. These studies provide information for conducting metallurgical leaching tests and determining factors that could affect processing.

Keywords: environmental, geology, geometalurgy, metallurgy, mines gold, Peru.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E. P. Ingeniería Geológica. Lima, Perú.

a Autor para correspondencia: jhonny.castillo@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3349-306X>

b E-mail: mario.inca@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0195-6683>

c E-mail: jordan.liceta@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-7212>

d E-mail: daniel.ortiz1@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2123-3017>

e E-mail: manuel.shishido@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3552-1370>

f E-mail: julio.anastasio@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4138-8972>

g E-mail: yessica.vela@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9271-194X>

I. INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los productores por excelencia de oro, reflejándose en un 14.0% del total de metales exportados durante el 2022 (Figura 1). Nuestro país ocupa el segundo puesto en Latinoamérica y onceavo puesto a nivel mundial (U.S. Survey Geological, 2022). Durante el diciembre del 2021, la producción nacional aurífera fue de 96.6 TMF (MINEM, 2021).

En Perú, el 84% del oro producido ha provenído de 3 franjas metalogenéticas, de edades de Mioceno, Cretácico superior y Carbonífero-Pérmico; siendo la franja epitermal del Mioceno quien tiene la mayor producción de oro, alrededor del 63% de la producción total. Esta franja alcanza una extensión de más de 2,000 km, y se ubican las minas Yanacocha, Alto Chicama, Pierina, Santa Rosa entre otros (Acosta Ale et al., 2014). La siguiente en importancia, es la franja de oro orogénico del Carbonífero-Pérmico; con una extensión aproximada de 200 km y aloja a minas como Parcoy, Retamas y Poderosa. Finalmente, la franja de oro relacionado con intrusivos del Cretácico superior posee una extensión de 500 km, hospedando las minas San Juan de Chorunga, Caravelí, Orión, entre otras (Acosta Ale et al., 2014).

Por todo lo mencionado, Perú cuenta con gran potencial de reservas de oro aun no explotados asociados principalmente a estas 3 franjas metalogénicas, y en menor medida a otras franjas que alojan el oro en forma de mineral accesorio. Debido a la mayor complejidad para el descubrimiento de nuevos yacimientos, además del aumento geométrico de los costos asociados a su explotación, se hace necesario elevar el nivel científico y técnico de los programas de exploración y/o explotación.

La geometalurgia, se presenta como una alternativa para la evaluación de yacimientos de oro; esto debido a que, al manejar una gran cantidad de datos, permite la integración de la incertidumbre, la variabilidad y los factores externos (Torres Guerra et al., 2021) en la cual serán determinante para predecir el comportamiento del yacimiento, evaluando la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto minero.

II. MÉTODOS

El presente estudio posee un enfoque geometalúrgico, por lo que busca dar información sobre una completa caracterización del yacimiento a fin de determinar la ocurrencia del oro.

La metodología empleada en la presente investigación es no experimental del tipo descriptiva, no introduce ninguna variable experimental. Describe la importancia de la geometalurgia, para predecir el comportamiento de un yacimiento de oro frente a los procesos extractivos y seleccionar los procesos ambientalmente aplicables en el beneficio, extracción y recuperación del oro (Espinoza et al., 2021). El fin es plasmar las ventajas de la geometalurgia en los futuros proyectos mineros de oro; siendo una de ellas la obtención de mayores rentabilidades, al mejorar los procesos de explotación y beneficio del oro, y a la vez generar menor impacto ambiental.

En base a lo mencionado, se describe a continuación un programa geometalúrgico, con lo cual permita realizar un análisis completo de un yacimiento de oro integrando datos geológicos, mineros y metalúrgicos (Figura 2).

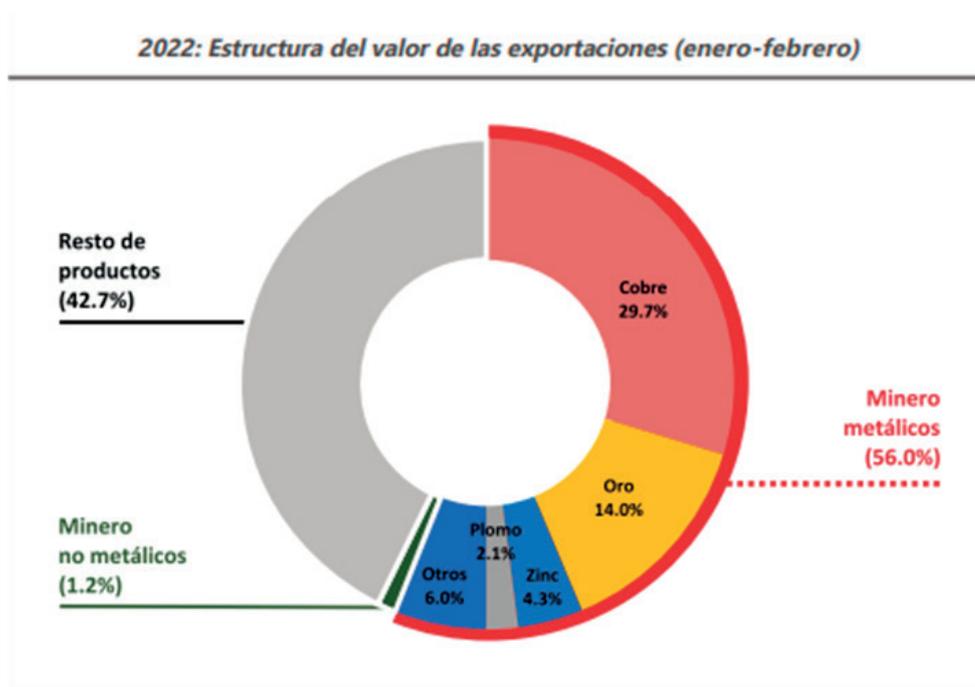


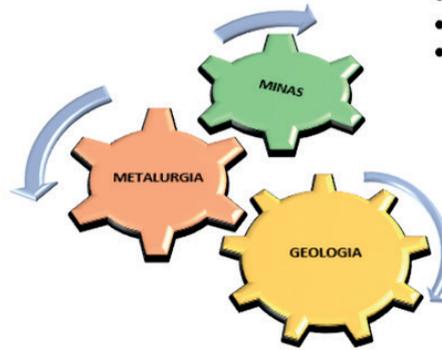
Figura 1. Porcentaje de exportación oro durante enero a febrero del 2022 (MINEM, 2022)

Data metalúrgica:

- Prueba de conminución
 - Equotip (en core de sondaje)
 - Prueba de caída de peso (DWT)
 - Pruebas de trituración en Molino SAG (SMC)
 - Bond Work Index
- Prueba de separación (para la recuperación y la calidad de producto)
 - Flotación
 - Gravedad
 - Prueba de filtración

Pruebas ambientales:

- Prueba de drenaje ácido y metalífero

**Data geomecánica:**

- *Rock mass rating* (RMR)
- Prueba de carga puntual
- Pruebas triaxiales

Data geológica:

- Logeo de cores
- Densidad
- Ensayos ICP
- Escaneo de core
 - *Hiperespectral*
 - Difracción de rayos X (XRD)
- Estudios de mineralogía

Figura 2. Información recopilada en programa geometalúrgico

III. RESULTADOS

Los alcances de la planificación geometalúrgica son amplios y de alto valor como instrumento de gestión minera durante las etapas de exploración previa a la formulación del proyecto, durante la explotación del yacimiento o como base del diseño de planta del proceso metalúrgico seleccionado según el tipo yacimiento (Marchese García, 2012).

El programa geometalúrgico expuesto aborda diferentes disciplinas (geología, metalurgia y mina); a continuación, se explica la información recopilada para cada una de ellas:

3.1. Data geológica

Existen muchos tipos de depósitos de oro, incluidos los yacimientos hidrotermales (epitermal), skarn, IOCG, placeres, VMS y pórfidos. En estos yacimientos es posible encontrar el oro incluido y/o asociado a diferentes minerales. La principal ocurrencia mineralógica del oro es como oro nativo y fino en forma de inclusiones dentro de otros minerales: pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_7S_8), arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS), estibina (Sb_2S_3), cuarzo y en material carbonosa. Excepcionalmente se puede encontrar el oro conformando especies minerales en forma de telururos de oro.

Otro factor por tener en consideración es la granulometría del oro presente. Se debe tener en cuenta que los yacimientos con oro grueso son escasos, pero cuando existen generalmente el oro grueso se vincula al cuarzo o a vetas de cuarzo; en contraposición el oro diseminado se vincula a los sulfuros (mencionados previamente).

Como parte del programa geometalúrgico, se debe buscar la recopilación de data geológica en aspectos importantes como la identificación del patrón textural especies minerales, alteraciones y rocas, identificar el comportamiento geoquímico, el estudio mineralógico y el

comportamiento físico-mecánico. El análisis de cada uno de estos aspectos y una minuciosa observación de los mapeos litológicos-mineralógicos y descripción e interpretación de los sondajes permiten elaborar un constructo general de la geología para yacimientos de oro.

3.1.1. Cartografiado geológico

Nos permite identificar características fundamentales de la zona, por ejemplo: los tipos de unidades litoestratigráficas e intrusiones, el control estructural, la alteración y la mineralización. Es importante identificar las unidades estratigráficas ligadas al yacimiento, así como mediciones corresponden a los rumbos/buzamientos de estratos.

Además, debido a que estas muchas veces las alteraciones se presentan zonadas (varían según temperatura), se puede realizar la identificación adecuada de los minerales presentes y el ensamble mineralógico asociado con cada tipo de alteración (argílica, potásica, prolítica, sericítica, etc.). En cuanto al control estructural, es de importancia el reconocimiento de las fallas, así como diaclasamiento; ejecutando una correcta ubicación y correlación a un entorno regional. Esto debido a que en distintos yacimientos los planos de debilidad sirven de conductos alimentadores por donde se desplazó la mineralización

3.1.2. Logeo de cores

El logeo geológico y geomecánico de testigos de perforación (Figura 3), es uno de los aspectos más importantes dentro del proceso geológico; en ellos, se describe la muestra e identifican el tipo de roca, identifica zonas mineralizadas, zonas de alteración, estructuras, texturas, fallas y/o diaclasamiento, con el propósito de obtener y registrar los parámetros geológicos presentes en el yacimiento.

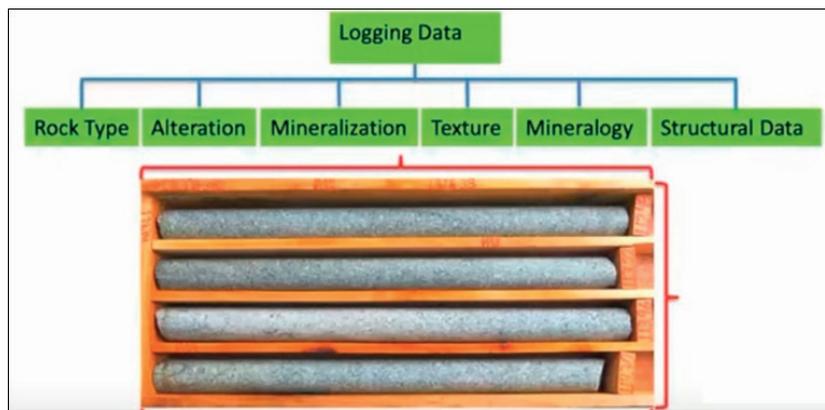


Figura 3. Información obtenida durante el logeo geológico y geotécnico.

De acuerdo con el logeo, se identifica las características de la muestra de testigo y determinar zona con potencial mineral; posteriormente se marca la pauta para el corte y muestreo de testigos. Para obtener mayor información durante el logeo se puede implementar escaneo y espectroscopia de reflectancia de testigos, con ello se obtiene un mapeo mineralógico con un perfil 3D. Se identifica en el testigo la mineralogía (mena y la ganga), geoquímica, morfología textural y propiedades mecánicas claves de las rocas.

3.1.3. Muestreo

La toma de muestras es una parte clave del programa geometalúrgico, debido a que el resultado de ellas sustenta la cadena de valor de la mina. Los protocolos de muestreo deben estar diseñados para adaptarse al estilo de mineralización del tipo de yacimiento, siendo la prioridad que las muestras obtenidas sean representativas.

Pudiendo realizarse diferentes disposiciones en muestreo como canales, trincheras y malla; además de diferentes tipos de muestras a obtener como suelos, sedimentos, testigos, rock chips, etc. Con los resultados obtenidos se podrá realizar estudios geoquímicos donde se determine la correlación entre elementos, y de esta forma determinar los elementos principales y *pathfinder* del yacimiento (de importancia durante la fase de exploración).

3.1.4. Análisis Químicos

3.1.4.1. Ensayo al fuego

El método para analizar oro se denomina ensayo de fuego, donde se requieren de 30 a 50 gramos de muestra. El análisis se realiza a través de un recipiente cerámico llamado crisol, en el cual se funde la muestra. Debido a que los minerales que contienen oro presentan puntos de fusión muy elevados, es necesario utilizar fundentes para que las temperaturas de los hornos logren fundir todo el material. Uno de los fundentes más usado es el carbonato de sodio. Además, para concentrar el oro se utiliza óxido de plomo que, al alcanzar altas temperaturas, se reduce y desprende el oxígeno del plomo metálico en estado líquido

y que, producto de su peso, baja al fondo del crisol junto con metales como el oro o la plata que son absorbidos. Al finalizar el proceso de fusión se obtiene una capa de plomo fundido con oro y una capa de escoria compuesta por cuarzo, feldespato, plagioclasa, carbonato de sodio, entre otros. Posteriormente las fases fundidas se vierten en una lingotera donde se enfría.

Una vez enfriadas las fases fundidas, se realiza un proceso de copelación, el cual consiste en fundir nuevamente la muestra en un horno de copelación dentro de un crisol llamado copela, el cual absorbe el plomo y otros metales básicos, quedando dos fases de oro y plata. Luego, para separar estos elementos se utiliza ácido nítrico, el cual disuelve la plata. Una vez separadas las fases, se extrae el oro y se analiza a través de gravimetría, adsorción atómica o ICP.

3.1.4.2. Análisis por ICP

El microanálisis láser ICP-MS tiene un enorme potencial principalmente para la determinación de elementos trazas en minerales. Desde el punto de vista de la exploración o explotación minera, esta técnica puede aplicarse fácilmente en tres grandes campos: a) análisis a micro escala de elementos preciosos presentes como trazas en la estructura del mineral (oro invisible en la estructura de pirita o arsenopirita; EGP en arseniuros, etc.); b) análisis a micro escala de elementos significativos en minerales indicadores (por ejemplo, análisis de Ni en granate de procedencia kimberlítica, para conocer la temperatura del manto subyacente, etc.), c) análisis de la distribución a micro escala de elementos traza que pueden ser penalizables desde el punto de vista metalúrgico o medioambiental.

3.1.4.3. Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de rayos X consiste en el bombardeo de rayos X a una muestra, cuya preparación involucra la conminución de la misma para que los granos queden orientados en distintas direcciones. Los rayos X se difractan según la ley de 2 θ Bragg y se registran los peaks de difracción. Cada fase cristalina tiene un espectro de difracción característica, por lo que quedan caracterizadas siempre y cuando no se

produzcan problemas como el solapamiento de peaks o el efecto matriz, donde una fase altamente cristalina oscurece a una pobremente cristalina (Mukherjee, 2011).

3.1.5. Densidad

La densidad de masa en testigos de perforación es basada en ensayos en pesos secos; con estos ensayos se efectúa una conexión no parcializada entre los volúmenes de muestra de testigos del modelo de recursos en bloque, el peso de la roca asociado con los volúmenes del modelo en bloque (el factor del tonelaje o densidad en masa) y los ensayos (efectuados en pesos secos).

Con respecto a la prueba de densidad, se debe tener las siguientes consideraciones: las muestras que deberán ser completamente secadas y luego selladas (parafina) antes de ser pesadas en agua. Caso contrario, las mediciones de densidad en rocas porosas serán muy altas (por humedad en poros).

Además de ello se debe considerar que, en algunos yacimientos de oro, tienen la presencia de arcillas en zonas de óxidos (mayor cantidad contenía por alteración argílica avanzada). Lo cual puede conllevar a errores si no se tiene un correcto secado y sellado; esto debido a que, estos filosilicatos, se hinchan al retienen líquidos en su estructura cristalina.

3.1.6. Estudios Mineralógicos

La geometalurgia basa su principio en la comprensión de que las menas son asociaciones de minerales, por lo que son las características fisicoquímicas de éstos las que determinan las condiciones de un proceso de recuperación industrial. A continuación, se detalla los estudios mineralógicos empleados:

3.1.6.1. Microscopia por luz transmitida

Usado generalmente para análisis petrográficos. El análisis de cortes transparentes se basa en el paso de luz polarizada por los granos minerales, una vez que la luz pasa por ellos vuelve a vibrar en varias direcciones (López García, 2019). Posterior a esto se puede volver a colocar un polarizador antes que la luz llegue a los ojos (nícoles cruzados) o dejar pasar la luz directamente (nícoles paralelos). Es gracias a este fenómeno que se pueden identificar los minerales por las características ópticas distintivas de cada uno (Mukherjee, 2011). A continuación, se listan las propiedades ópticas que son posibles de observar ya sea a nícoles paralelos o cruzados.

Nícoles Paralelos: color, pleocroísmo, forma y tamaño, clivaje, índice de refracción (Mukherjee, 2011).

Nícoles Cruzados: birrefringencia, extinción, color de interferencia, maclas (Mukherjee, 2011).

3.1.6.2. Microscopia por luz reflejada

Usado generalmente para estudiar los minerales metálicos. Los minerales de mena deben ser analizados en un microscopio de luz reflejada. Su funcionamiento se basa en la iluminación de la muestra desde arriba para permitir la examinación de la luz reflejada por las superficies pulidas (Gribble & Hall, 1985) (Figura 4). Las propiedades que se miden son tanto a nícoles paralelos como cruzados se listan a continuación:

- Nícoles Cruzados: anisotropía, reflejos internos (Gribble & Hall, 1985).
- Nícoles Paralelos: color, reflectividad, pleocroísmo, birreflectancia, dureza (Gribble & Hall, 1985).

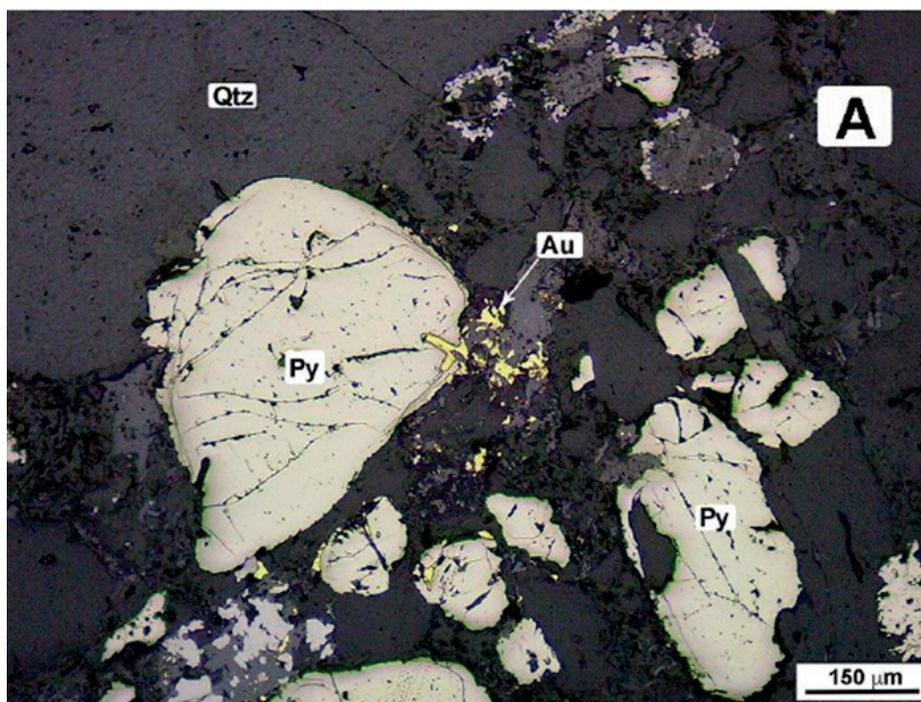


Figura 4. Partícula mixta de oro y pirita (Py), microscopia por luz reflejada.

3.1.7. QAQC

El programa de QAQC constituye una garantía de prevención de los errores aleatorios y sistemáticos, verificando que las actividades sean planificadas y sistemáticas, lo que da confianza sobre la calidad del producto a obtenerse. Los trabajos realizados se deben regir entonces por *Protocolos y Procedimientos de Trabajo*; los cuales, son implementación para las fases de exploración, mina y planta.

Para el caso del muestreo (superficial, mina, perforación diamantina y pulpas de planta), se considera el uso de muestras de control para verificar que cada etapa de la obtención y análisis de una muestra se rija bajo parámetros de calidad. Las muestras de control representan en promedio un 20 % del total de muestras (Tabla 1) enviadas a laboratorio (Simón, 2007). Debido a la erratividad del oro, las muestras duplicadas de campo (gemelas) son aquellas con las que se debe tener especial cuidado, estas comprueban que el muestreo en campo se realice de una forma correcta evitando que la presencia de finos (muestra pulverizada) varíen excesivamente los valores obtenidos entre ambas muestras.

Además, como parte del programa de calidad se toman pruebas de desviación del pozo, obteniendo coordenadas e inclinación inicial y final del pozo (Torres Guerra et al., 2021).

3.1.8. Modelo geológico

Un modelo geológico (Figura 5) es la representación bidimensional o tridimensional del yacimiento, haciendo una construcción de las variables estructurales, litológicas, mineralización, alteración u otro tipo de característica geológica propia de este tipo de depósito mineral; buscando reflejar lo más fielmente la realidad del yacimiento. Dicho modelo se base en los datos recopilados del yacimiento, compuestos principalmente por la cartografía geológica de superficie, información de muestras de sondajes, muestreo de mallas, etc.

Adicionalmente dentro del modelo geológico se definirán unidades de densidad y dominios para la interpolación de los grados o leyes. La complejidad y variabilidad de este tipo de yacimiento mineral dificulta determinar dominios geológicos homogéneos, por lo cual se integra modelos geoestadísticos permitiendo la interpolación de datos para analizar y predecir los valores a encontrarse en el modelo.

3.2. Data metalúrgica

Las pruebas metalúrgicas se basan en datos de caracterización que presenta el mineral a tratar, para ello se realizan pruebas que determinen su densidad, tamaño, consumo energético para la reducción de tamaño (Work

Tabla 1. Proporciones actuales de muestras control (Simón, 2007)

Proporción acostumbrada de muestras de control		
Tipo de control	Frecuencia	% Adecuado
Muestras gemelas (Duplicado de campo)	1 de 30 a 50	2%
Duplicados Gruesos	1 de 30 a 50	2%
Duplicados de Pulpa	1 de 30 a 50	2%
Estándar Bajo		2%
Estándar Medio	1 de 20 alternadamente	2%
Estándar Alto		2%
Blanco Gruesos	1 de 30 a 50	2%
Blanco Finos	1 de 30 a 50	2%
Duplicados Externos	1 de 20	2%

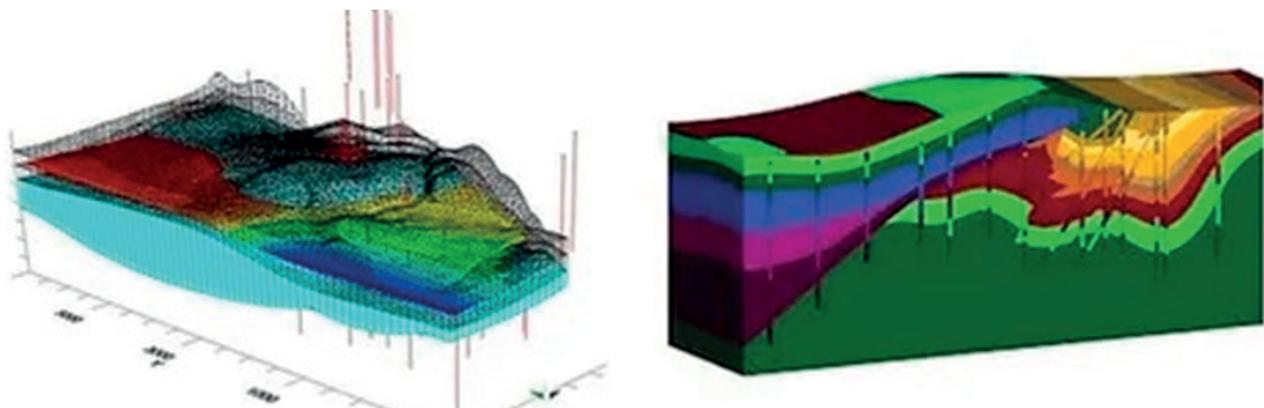


Figura 5. Modelo geológico incorporando datos de litología, mineralogía, alteración, aspectos estructurales, etc.

Index). A continuación, se detalla las pruebas utilizadas en el programa geometalúrgico:

3.2.1. Pruebas de caracterización

3.2.1.1. Determinación de humedad y gravedad específica de un mineral (pulpas)

Los minerales tienen un cierto grado de humedad; sin embargo, en algunos casos los cálculos metalúrgicos requieren estar expresados tomando como base productos secos para realizar comparaciones entre sí. Por ello, es de fundamental importancia realizar medidas exactas del porcentaje de humedad de cada mineral. Con el manejo apropiado, los errores debidos a la humedad o al secado subsecuente se reducen o deben de reducirse a los más bajos niveles posibles. El peso específico aparente es el peso del volumen aparente de un mineral, relativamente seco, el cual varía en forma inversa con la granulometría del mineral. Este dato es de mucha importancia en el cálculo de tolvas, camiones y silos.

La mayoría de las operaciones en planta se realiza con minerales, de los que hay que conocer su gravedad específica. La gravedad específica es numéricamente igual a la densidad del material en el sistema métrico. Y es la relación entre la densidad de un material con respecto a otro elemento, por lo tanto, es adimensional, si las partículas están inmersas en un medio acuoso se deberá determinar la densidad de pulpa (Quiroz Nuñez, 1990).

3.2.1.2. Análisis granulométrico de minerales

Análisis de tamaño de los diversos productos de una planta de beneficio de minerales constituye una parte fundamental del procedimiento de pruebas de laboratorio. Este análisis es muy importante para la determinación de la calidad de la molienda y para establecer el grado de liberación de la ganga en varios tamaños de partículas. En la etapa de separación, el análisis de tamaño de los productos se usa para determinar el tamaño óptimo de la alimentación al proceso, esto se realiza para obtener una máxima eficiencia y determinar el tamaño en que ocurre cualquier pérdida en la planta de manera que se pueda corregir.

Por lo tanto, es indispensable que los métodos de análisis de tamaño sean exactos y seguros, ya que se pueden hacer cambios importantes en la operación de la planta basados en los resultados de las pruebas de laboratorio. Debido a que se utilizan solamente cantidades relativamente pequeñas de material en las pruebas de clasificación de tamaño, es necesario que la muestra sea representativa de la masa de material y se debe tener el mismo cuidado para el muestreo del análisis de tamaños que para un ensaye de análisis químico.

Para futuros yacimientos auríferos es muy importante, determinar la inclusión y el tamaño el cual se presenta los minerales de oro para determinar un P80 óptimo para la mejor recuperación (Ballester et al., 2000b).

3.2.1.3. Pruebas de radio de reducción

La razón de reducción de un equipo de trituración constituye una medida de la eficiencia del mismo, en cuanto a su capacidad para reducir de tamaño un producto determinado. En términos generales, la razón de reducción de una chancadora se define como el cociente entre el tamaño del producto alimentado y el tamaño del producto triturado.

$$RRed = \frac{\text{tamaño del producto alimentado}}{\text{tamaño del producto chancado}}$$

De la relación se desprende que: para un mismo mineral y equipo podrán obtenerse diferentes valores de R, dependiendo como se defina los tamaños característicos de la alimentación y de la descarga de la chancadora. Ello ha dado origen a diferentes tipos de razón de reducción, siendo las más comunes la Razón de Reducción del 50% (R50) y la Razón de reducción de 80% (R80).

3.2.1.4. Pruebas de WI

Las pruebas de caracterización son la primera etapa de cálculos de costos para determinar si una mena es económicamente tratable por procesos de conminución. Diferentes yacimientos (ejemplo: yac. epitermales) contienen oro asociado a polimetálicos como cobre y hierro, estos contenidos también influyen en el costo de extracción.

En el caso de yacimientos futuros de oro se debe tener en cuenta estos valores que conforme se avanza en la exploración geológica en busca de nuevos yacimientos, estos son de naturaleza de alta competencia, es por ello esta herramienta de caracterización será muy importante en nuevos minerales a tratar.

3.2.1.5. Pruebas de flotación

La flotación es la técnica de reprocesamiento de mineral más importante y variada; su uso es extenso y actualmente se aplica más en el tratamiento de tonelajes cada vez mayores de minerales y con leyes bajas. La flotación permitió el procesamiento de yacimiento complejos y de bajo grado o ensaye, considerados en esos momentos como no económicos. Una aplicación práctica inicial se les dio a las colas de muchas plantas de concentración por gravedad, los cuales eran de un grado o ensaye muy alto.

La flotación es un proceso muy selectivo que se usa para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos tales como plomo-zinc, cobre-zinc, plomo-cobre-zinc, etc. En sus inicios se utilizó para tratar sulfuros de cobre, plomo, zinc, molibdeno; actualmente el campo de la flotación se ha extendido para incluir los minerales oxidados y los no metálicos además del carbón fino.

Para el caso de minerales auríferos, se deberá aplicar a minerales asociados al oro o a minerales al cual el oro está presente en inclusiones, caso de la pirita aurífera, cobre con inclusiones de oro, etc. El proceso de flotación para minerales refractarios en la arsenopirita aurífera no es diferente a otros sulfuros en su tratamiento metalúrgico,

pero implica dificultades en su proceso extractivo (hidrometalurgia, pirometalurgia) (Figura 6).



Figura 6. Flotación de sulfuros (calcopirita)

3.2.2. Pruebas de extracción

3.2.2.1. Lixiviación ácida

La lixiviación es un proceso en el cual se extrae uno o varios elementos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido (Figura 7). Ambas fases entran en contacto íntimo y él o los componentes de interés pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.



Figura 7. Pruebas en columnas de lixiviación ácida.

Para el caso de la disolución de los minerales de cobre, es básicamente una simple descomposición en minerales oxidados; y reacciones de reducción-oxidación en los minerales sulfuros de cobre. Los productos resultantes son solubles en el agua. Las reacciones de los minerales de cobre comunes con el ácido sulfúrico y el sulfato férrico ayudan a la oxidación de los sulfuros.

Las fuentes principales de cobre para la extracción hidrometalúrgica son los llamados minerales de óxido, los más importantes son: azurita, malaquita, crisocola, cuprita, atacamita y antlerita. Estos minerales oxidados son los productos de la degradación geológica de los depósitos de sulfuro originales y en ellos siempre se encuentran pequeñas cantidades de sulfuro de hierro y sulfuro de cobre.

Los procesos de lixiviación de cobre se deben tener en cuenta la mineralogía, se tiene problemas cuando el mineral esté asociado con oro libre y óxidos de cobre, ya que la extracción se realiza a condiciones diferentes es complicado la recuperación del oro en estos minerales, las pruebas se deben orientar a los reportes mineralógicos y las

asociaciones con los minerales ganga y minerales a extraer (Ballester et al., 2000a).

3.2.2.2. Lixiviación básica (cianuración)

La cianuración es el proceso electroquímico de disolución del oro, plata y algunos otros componentes que se pueden encontrar en un mineral aurífero, mediante el uso de una solución alcalina de cianuro, que forma aniones complejos de oro, estables en condiciones acuosas. Este proceso implica una serie de reacciones que ocurren en la superficie del sólido. Elsner (1846) propuso la reacción global de disolución del oro mediante una solución acuosa de cianuración, en presencia de oxígeno.

Los minerales con contenido de oro son cada vez de menor cuantía, actualmente por falta de tecnología se está dejando de lado algunos minerales de alta ley, pero de baja recuperación, tal es el caso del oro refractario asociado a arsenopirita, existen propuestas para la recuperación de estos minerales, pero por su implementación aun no es atractiva por la falta de necesidad y el procesamiento del arsénico.

3.2.2.3. Extracción por solventes

La extracción por solventes es usada para separar especies del metal deseado de especies no deseadas antes de la reducción de las especies deseadas a metal libre. El método basado en el uso de un solvente inmisible que preferentemente extrae el o los componentes seleccionados de la fase acuosa.

El solvente orgánico es íntimamente mezclado con la solución acuosa y posteriormente se deja que ambos se separen. Durante el mezclado, la fase orgánica se “carga” con el o los metales deseados, pues los iones metálicos inicialmente presentes en la fase acuosa se distribuyen entre la fase orgánica y la fase acuosa de acuerdo con la solubilidad relativa entre las dos fases. Posteriormente el metal puede ser transferido otra vez a una fase acuosa en una forma concentrada y purificada ajustando las condiciones de la solución para reducir la solubilidad del metal en la fase orgánica, “descargando” por lo tanto, el orgánico de los valores metálicos.

En el caso del oro, aun no se tiene definido un extractante eficiente para la obtención del metal en las soluciones lixiviadas (cianuración).

3.2.2.4. Pruebas de electrodeposición

La electrodeposición es un proceso de extracción electrolítica donde la reducción catódica es usada para recuperar el metal con valor del electrolito que proviene de un proceso de lixiviación. Los ánodos usados en las celdas electrolíticas son usualmente inertes y generalmente soportan una reacción gaseosa, además que sean completamente insolubles. Cualquier disolución que signifique la producción de un ion metálico que luego puede ser reducido catódicamente o puede formar precipitados, puede contaminar el metal depositado.

En el caso del oro se utiliza lana de Hierro en el cátodo para obtener un área superficial muy grande para poder reducir el oro en soluciones cianuradas, en futuros tratamientos de yacimientos de oro es posible mejorar los materiales y los diseños de celdas electrolíticas para manejar leyes muy bajas de oro producto del tratamiento de nuevos minerales auríferos en el futuro.

3.2.2.5. Pruebas de tostación de sulfuros

Los procesos pirometalúrgicos son aplicados a minerales sulfurados para oxidarlos y eliminar parte del azufre, estos procesos son aplicados a minerales con altos contenidos de arsénico y oro, en el caso de reducción directa se utiliza para obtener cobre blíster y zinc. En los yacimientos futuros de oro se deberá controlar más los parámetros de emisión de gases y controlar procesos pirometalúrgicos exotérmicos.

3.3. Data geomecánica

Los trabajos en minería conllevan a costes altos en la extracción del mineral y el desmonte producido; por lo que es importante la recopilación del estado del macizo rocoso para las etapas de diseño, construcción, y el sostenimiento adecuado.

Los estudios geomecánicos nos permiten una adecuada caracterización del macizo rocoso con el fin de tomar las decisiones correctas en términos de diseño y sostenimiento teniendo resultados positivos minimizando los gastos adicionales y accidentes (Figura 8).

3.3.1. Ensayos uniaxiales

El ensayo se realiza sobre especímenes de roca que puede ser testigo, bloques cortados o trozos irregulares; a estos se le da forma de cilíndrica.

Se aplica a la muestra gradualmente fuerza axial hasta que se produce la rotura. Durante el ensayo se van registrados las curvas esfuerzo-deformación axial de la probeta, pudiendo además medirse las deformaciones radiales o trasversales. Es por lo tanto un ensayo para realizar la clasificación de la roca según su resistencia y para la determinación de su deformabilidad (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

3.3.2. Ensayo de compresión triaxial

ESTE ensayo representa las condiciones de las rocas in situ sometidas a esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta. Lo que permite determinar la envolvente o línea de resistencia del material rocoso ensayado, obteniendo los valores de los parámetros de resistencia: cohesión y fricción; además de las características de la roca de la presión confinante aplicada (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

3.3.3. Clasificación de los macizos rocosos

Existen diversos sistemas de clasificación, siendo uno de los más utilizados el método de Bieniawski (Rock Mass

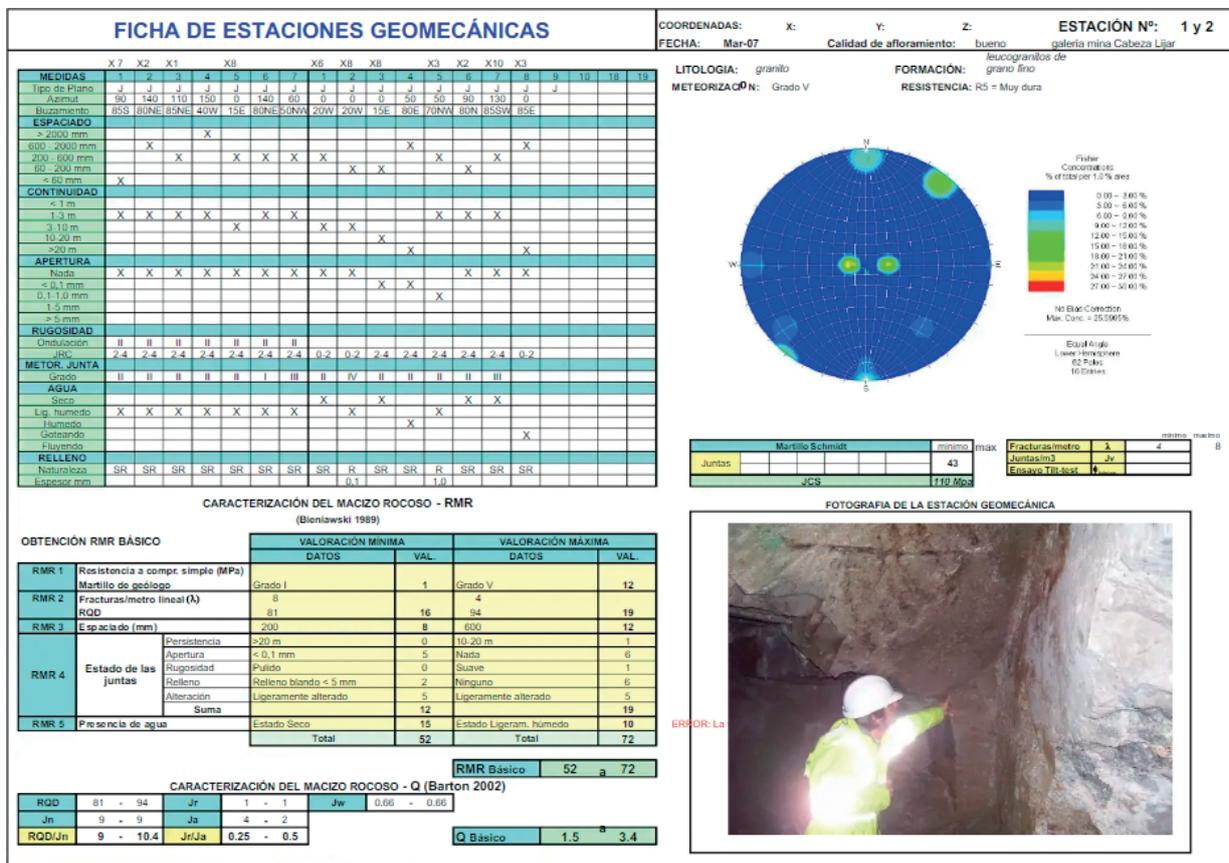


Figura 8. Ficha de estación geomecánica, para evaluación del macizo rocoso según método Bieniawski.

Rating, RMR). Este sistema se ha desarrollado en base a otras clasificaciones existentes, indica la calidad del macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de los siguientes parámetros: resistencia a la compresión simple de la roca intacta, índice de calidad de roca (RQD), espaciado y estado de las diaclasas o discontinuidades, presencia de agua y orientación de las discontinuidades.

A cada de los parámetros previamente mencionados se les asigna una puntuación, que al ser sumado asigna una valoración RMR al macizo rocoso. Los valores varían de <20 a 100, asignándose con ello la calidad del macizo rocoso, pudiendo ser: muy mala (<20), mala (40-21), media (60-41), media (60-41), buena (80-61) y muy buena (100-81). Sujeto a la clasificación se puede saber la cohesión y ángulo de rozamiento de la muestra (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

3.4. Pruebas ambientales

Durante la explotación del yacimiento quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurados en los componentes de relavera y desmontera; el material dispuesto en ellos puede llegar a formar drenajes ácidos. Para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias (Figura 9).

El modelo geometalúrgico contempla la caracterización del material extraído a través de pruebas ambientales como ensayos ABA, NAG, SFE, SPLP y celdas húmedas. Con ello se busca un diseño efectivo de los componentes de mina, utilizando a materiales no generadores de drenaje ácido, para ser cobertura e impermeabilizar materiales que si tienen características ácidas (Figura 9); con ello se busca minimizar costos de remediación con el material propio de mina (Aduvire, 2006). Además, pueden reducir el impacto ambiental negativo de la minería, debido a que permite identificar las áreas dentro del proyecto, aquellas que no son económicamente factibles de procesar o contienen algún valor económico. Al identificarlas y evitar el minado, se elude el desperdicio de recursos naturales y la contaminación.

IV. DISCUSIÓN

A partir del presente estudio, se puede observar los múltiples factores que integran a un programa geometalúrgico; de esta información se confecciona un modelo geometalúrgico. El cual, a diferencia del modelo geológico, es más avanzado y complejo pues ayuda a predecir lo que se tendrá en yacimiento durante su explotación (producción en mina).

A la luz de los positivos resultados obtenidos por diferentes minas que emplean la geometalurgia en la predicción de sus resultados de producción; se hace necesario que otros proyectos a futuro adopten la misma estrategia. Es pues la geometalurgia una metodología con mayor componente fenomenológico en la construcción de los modelos de tratamiento y recuperación de minerales, con el fin de simular complejos escenarios productivos, lo cual será de importancia en la prospección de futuros yacimientos.

A continuación, se detalla los aspectos más importantes en los cuales la geometalurgia contribuiría en el desarrollo futuros proyectos mineros de yacimientos de oro:

4.1. Elección de proceso de planta óptimo

Dentro del programa geometalúrgicos una vez identificado la mineralogía se puede predecir qué tipo de proceso se puede aplicar (Figura 10). Además de poder predecir y resolver problemas de procesamiento (Barriga Vilca, 2019), teniendo en cuenta que los yacimientos de oro a prospectarse tendrán una mayor carga de minerales de sulfuros al ser yacimientos preservados a profundidad (poca presencia de óxidos). A continuación, se detalla los ítems principales identificables con el análisis geometalúrgico:

Nos permite predecir:

- La respuesta del oro a diferentes procesos
- Oro libre o refractario

Nos permite resolver problemas de procesamiento:

- Comportamiento de oro perdido

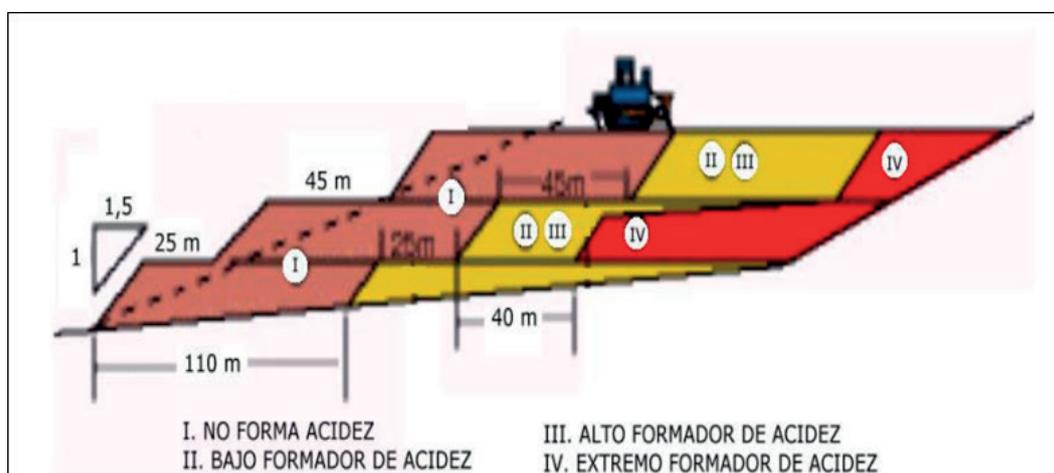


Figura 9. Diseño de una escombrera de una mina teniendo en cuenta la relación ácido/base de los materiales a depositar (Aduvire, 2006)

- Causas de pérdida de oro y otras pérdidas valorables
- Como mejorar recuperación

Como parte de la predicción, por ejemplo, la mineralogía nos permitirá conocer si el material es liberado o refractario como extremos casos. En la Figura 10 se expone los procesos a emplearse dependiendo de la forma en la que se presenta el oro en el yacimiento; pudiendo ser, en caso de oro liberado, gravimetría, flotación y/o cianuración. Para el caso de oro submicroscópico, se plantea métodos no convencionales de extracción como peroxidación previa al paso de cianuración.

4.2. Identificar y solucionar posibles problemas a presentarse

A diferencia de los minerales de metales básicos, que generalmente se procesan mediante flotación por espuma, los minerales de oro a menudo se tratan utilizando varios procesos en combinación, incluidos los procesos unitarios como la separación por gravedad, la flotación y la cianuración para minerales refractarios de oro, en los que el oro se presenta principalmente como oro submicroscópico

en minerales de sulfuro y está asociado con carbono materia en algunos depósitos, se requiere un pretratamiento antes de la lixiviación, lo que hace que el procesamiento del mineral de oro sea más complicado.

Los cuatro factores principales (en todos los minerales de oro) a tener en consideración para caracterizarse en un programa de geometalurgia son: los minerales nocivos y/o tóxicos, la liberación, el tamaño de grano y la asociación. Ejemplo del problema más frecuentes ligados a los yacimientos de oro es la presencia de minerales secundario de cobre y/o pirrotita, los cuales son consumidores de oxígeno y cianicidas; lo cual afecta directamente al costo unitario de proceso por encima del Kpi.

Además, está también en algunos casos la presencia de minerales refractarios de oro como telururos de oro, los que conllevan a menudo recuperaciones de oro bajas debido a una cinética de lixiviación lenta. Según los problemas identificados se realiza un ajuste en el enfoque metalúrgico realizando cambios como: aumentar concentrador gravimétrico, cambio de tuberías, implementar nuevos puntos de dosificación, realizar blending, aumento de caudal de oxígeno, adición de peróxido, etc. (Tabla 2).

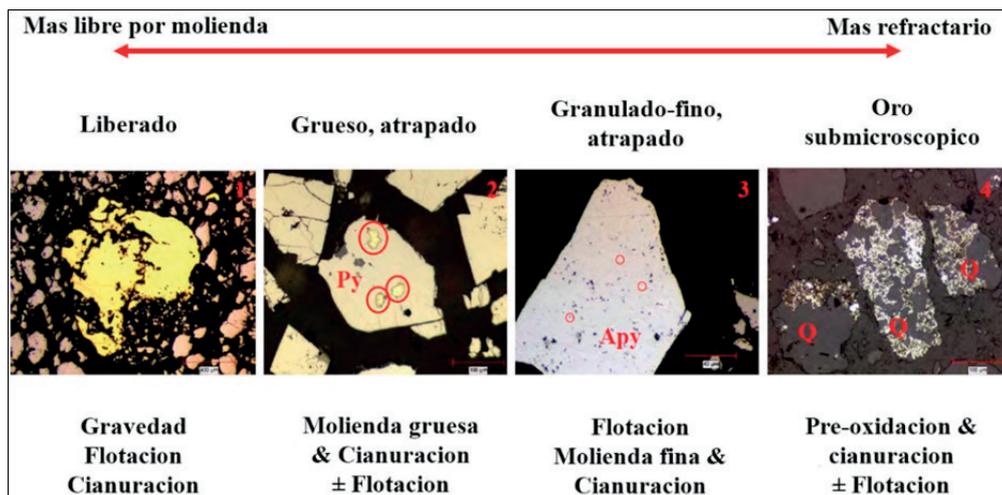


Figura 10. Oro atrapado en pirita y su morfología: grueso, poroso y fino (Barriga Vilca, 2019)

Tabla 2. Principales problemas en planta que afectan recuperación de oro

Causa de problemas	Procesos afectados
Liberación	Gravimetría, flotación y lixiviación
Tamaño de grano	Gravimetría, flotación y lixiviación
Asociación	Gravimetría, flotación y lixiviación
Química de superficie	Gravimetría, flotación y lixiviación
Recubrimiento y bordeado	Gravimetría, flotación y lixiviación
Cinética de disolución	Lixiviación
Cianicidas y consumidores de oxígeno (minerales secundarios de cobre, pirrotita)	Lixiviación
Refractariedad (oro submicroscópico)	Gravimetría, lixiviación
Preg-robbing (material C, óxido de hierro, etc.)	Lixiviación
Minerales nocivos/elementos tóxicos (As, Hg, Se, Sb, Te, etc.)	Flotación, lixiviación, purificación de soluciones y disposición de relaves.
Mineralogía de ganga (arcillas, formadoras de ácido y consumidoras de ácido).	Flotación, lixiviación y disposición de relaves

4.3. Proyectos con menor impacto ambiental

La minería desde un punto ambientalmente responsable debe evaluar a fondo los impactos ambientales generados por esta y plantear la posible reestructuración de los sistemas de tratamiento. Así, la geometalurgia genera modelos predictivos del yacimiento, los cuales podrán ser usados en la disposición de relaves y tratamientos de efluentes procedentes del proceso los minerales; como la presencia de elementos Cd, As, Sb, etc.; y sulfuros de Fe formadoras de ácido (desmonte y relavera). El tratamiento programado conforma un papel importante para tener efluentes por debajo de los límites máximos permisibles y ECA; de ese modo, tener un impacto positivo en las comunidades aledañas.

4.4. Sinergia entre las diversas áreas de mina

No cabe duda de que las empresas están teniendo una mirada integral en la gestión de sus procesos, lo que permite anticiparse a los cambios y minimizar la variabilidad. En este contexto, se hace fundamental que los equipos técnicos de las áreas de geología, minería y metalurgia trabajen de manera coordinada en la etapa previa al diseño y durante el periodo de operación. En este trabajo coordinado, fundamental en la actualidad y a futuro, la geometalurgia provee mayores herramientas de integración. Pues, pese a que el trabajo integrado y la generación de sinergias no es algo nuevo, sí requiere de un esfuerzo constante para mantenerlo en el tiempo y con especial énfasis en los futuros prospectos de oro que serán ciertamente de mayor complejidad probablemente al no encontrarse cercanos a superficie.

V. CONCLUSIONES

Los programas geometalúrgicos contemplan la integración de datos geológicos, datos metalúrgicos, datos geomecánicos y datos medioambientales, los cuales plasman modelos con mayor componente fenomenológico.

La aplicación de modelos geometalúrgica a los trabajos de exploración de nuevos yacimientos de oro deben implementarse desde el inicio; con el fin de definir el proceso metalúrgico a emplearse. Las consecuencias económicas que derivan de una adecuada selección del proceso son altamente favorables para el proyecto minero.

El modelo de planificación geometalúrgica para los yacimientos de oro, se apoyará en que las pruebas metalúrgicas ejecutadas; con el fin de predecir con suficiente anticipación que mineral ingresará a la planta de tratamiento y el comportamiento del material; de modo que se pueda realizar ajustes en el enfoque metalúrgico (planta) de ser necesario. Debiendo enfocarse en técnicas mejoradas para la liberación de oro relacionados a sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita etc.); esto debido a que los yacimientos prospectados a futuro probablemente sean a una mayor profundidad, por lo que estarán bien preservados (sin zonas de óxidos).

Finalmente, la mayor complejidad presentada en la prospección y explotación de nuevos yacimientos de oro, desde enfoques geológicos, metalúrgicos, mineros y socioambientales; nos lleva a seguir en la búsqueda

de metodologías que nos ayuden a conseguir mayores beneficios y con el menor impacto al medioambiente.

VI. REFERENCIAS

- Acosta Ale, J. G., Santisteban Angeldonis, A., Huanacuni Mamani, D., Valencia Muñoz, M. M., & Villarreal Jaramillo, E. (2014). Pasado, presente y futuro de la producción de oro en el Perú. *Repositorio Institucional INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3328>
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje acidodeminageneración y tratamiento*. https://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- Torres Guerra, J. A., Mejía Cáceres, D., Moreyra Ramos, P., Oré Grados, J., & Oscco Barrientos, S. (2021). Geometalurgia y el futuro de la minería digital en el Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47), 163–179. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20661>
- Ballester, A., Verdeja Gonzalez, Luis Felipe, & Sancho, J. (2000a). *Metalurgia extractiva - Fundamentos (Vol. II)*. <https://latam.casadellibro.com/libro-metalurgia-extractiva-procesos-de-obtencion-vol-ii/9788477388036/734457>
- Ballester, A., Verdeja Gonzalez, Luis Felipe, & Sancho, J. (2000b, November 1). *Metalurgia extractiva - Fundamentos (Vol. I)*. <https://www.cervantes.com/libro/9788477388029/metalurgia-extractiva-vol1-fundamentos/>
- Barriga Vilca, A. (2019). *Estudio de la Extracción de Oro de Concentrados Refractarios mediante el Proceso Albion* [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín.]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9069>
- Elsner, L. (1846). Observations on the behavior of pure metals in an aqueous solution of cyanide (in German). *Journal Für Praktische Chemie*, 37(1), 441–446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/prac.18460370167>
- Espinoza, L., Iriarte, G., Espinoza, L., Gutarra, R., Herrera, M., Zamalloa, J., Aramburú, V., & Torres, J. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 85–100. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid. https://www.academia.edu/50773034/INGENIERIA_GEOLOGICA_GONZALES_DE_VALLEJO
- Gribble, C. D., & Hall, A. J. (1985). *A Practical Introduction To Optical Mineralogy (Microscopy-Minerals)*. George Allen & Urwin. <https://es.scribd.com/document/270985496/A-Practical-Introduction-to-Optical-Mineralogy-C-D-Gribble-A-J-Hall>
- López García, J. A. (2019). *Microscopía práctica de minerales opacos* (Universidad Computense, Ed.). GEMM. https://eprints.ucm.es/id/eprint/55692/1/Libro_Microscopia_Opacos.pdf
- Marchese García, A. (2012). Conceptos y aplicaciones de planificación geometalúrgica. *TECSUP*, 28–35. http://app.tecsup.edu.pe/file/sga/documentos/revistali/li_1/4.pdf

- MINEM. (2021). *Boletín Estadístico Minero*. Ministerio de Energía y Minas. Dirección de Promoción Minera. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2802527/BEM%20%2012-2021.pdf.pdf?v=1644589735>
- MINEM. (2022). *Boletín Estadístico Minero*. Ministerio de Energía y Minas. Dirección de Promoción Minera. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3824089/BEM%2009-2022.pdf.pdf?v=1668017389>
- Mukherjee, S. (2011). *Applied Mineralogy: Vol. XV* (SpringerLink, Ed.; 1st ed.). Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-1162-4>
- Quiroz Nuñez, I. (1990). *Ingeniería Metalúrgica*. <https://es.scribd.com/document/411300595/Ingenieria-Metalurgica-Quiroz-Nunez-pdf>
- Simón, A. (2007). Control Sample Insertion Rate-Is There An Industry Standard. *AMEC*, 1–9. <https://es.scribd.com/document/75630300/Simon-Armando-Text-Control-sample-insertion-rate-is-there-an-industry-standard>
- U.S. Survey Geological. (2022). Mineral commodity summaries 2022. In *Mineral Commodity Summaries*. <https://doi.org/10.3133/MCS2022>

Contribución de autoría:

Conceptualización y Redacción: Mario Inca Cano, Daniel Ortiz Saavedra, Manuel Shishido Sánchez, Julio Anastasio Domínguez, Yessica Vela Soria.

Discusión: Jordan Liceta Avendaño, Jhonny Castillo Mamani