



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



Trabajo Final de Grado (TFG)

CARACTERIZACIÓN DEL ORO OROGÉNICO DE BOLIVIA

Grado en Ingeniería Minera

Curso 2020-2021

Autor: Roger Gaona Boixader

Directora: Dra. María Pura Alfonso Abella

Codirectora: Dra. María Teresa Yubero De Mateo

Manresa, Julio 2021



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia todo lo que ha hecho por mí a lo largo de estos años, ya que si soy la persona que puedo ver delante de un espejo es gracias a ellos, a su educación y consejos. ¡Gracias de corazón!

Seguidamente, merece una especial mención mi tutora, profesora y amiga, Pura Alfonso, por todo el conocimiento aportado a este trabajo, pero sobre todo por todos esos buenos momentos compartidos durante la carrera.

En tercer lugar, debo dar gracias a la ONG “Minería Para el Desarrollo” (MPD) por la oportunidad que me brindó al poder realizar esta experiencia, así como al Centro de Cooperación para el Desarrollo (CCD) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) sin cuya contribución económica no hubiera sido posible la realización del proyecto de cooperación 2019-B005.

A Quim Sanz por sus consejos y apoyo en el día a día, así como a David Parcerisa por su amabilidad y buen trato hacia mí des del primer momento que pisé esta facultad. A Nor Sidki, por nuestras charlas que tanto me han ayudado a seguir adelante.

También quiero agradecer especialmente a la familia de Carla Villegas y Roberto Sandoval, por su hospitalidad, consejos, experiencias y recuerdos compartidos a lo largo de los días que pasé en Bolivia.

Así mismo, les doy las gracias a todos los miembros del MPD y a la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por su ayuda en la realización de este trabajo.

A veces, el sector minero, por desgracia no cuenta con el apoyo ni reconocimiento necesario de las labores que desarrolla por parte de la sociedad, es por eso que veo imprescindible agradecer en el presente trabajo a aquellos valientes e incansables mineros y mineras que día tras día contribuyen a nuestra sociedad brindándonos con los recursos minerales necesarios que son esenciales para nuestro desarrollo.



RESUMEN

En el presente trabajo se ha evaluado la actividad minera de una cooperativa que explota oro de forma artesanal, detectando sus puntos débiles en cuanto al rendimiento de la actividad minera para establecer criterios con tal de proponer mejoras que permitan tanto un aumento del desarrollo económico como un mayor conocimiento técnico de la actividad que se desarrolla.

El estudio se realizó en la Cooperativa Aurífera de Cotapata, se encuentra dentro de la faja de oro y antimonio de la Cordillera Oriental Andina, en el municipio de Coroico, provincia Nor Yungas, Departamento de La Paz, Bolivia, a 51 km de La Paz.

Esta cooperativa se centra en la extracción del oro que queda retenido en vetas de cuarzo que contienen pirita, arsenopirita, clorita y otros óxidos de hierro. El material arrancado es transportado mediante carros metaleros y procesado a través de sistemas de trituración, molienda y separación por gravedad. El producto con el que la cooperativa comercializa es el denominado “concentrado de pirita” dónde se aloja el mayor contenido de oro.

Se realizó un estudio de campo en el que se tomaron muestras de diferentes puntos de las galerías de la mina, así como diversas muestras de la planta de procesamiento. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis químicos para obtener la información mineralógica suficiente para continuar investigando sobre el yacimiento. La mineralogía se determinó mediante la difracción de polvo de rayos X, juntamente con la microscopía óptica y electrónica. Por lo que respecta a las muestras procedentes de la planta de procesamiento, se realizaron análisis granulométricos para determinar los tamaños de partícula.

El contenido de Au en el material que sale del molino es de 29,10 ppm, mientras que una vez concentrado, el residuo restante tiene una proporción de 18,85 ppm. Por lo que respecta al “concentrado de pirita”, su concentración fluctúa según su granulometría, encontrándose así los valores más altos en los tamaños de partícula más elevados, 263 ppm, y más pequeños, 305 ppm.

A nivel mineralógico, la forma más común de observar el oro es atrapado parcial o totalmente en pirita y arsenopirita, o de forma puntual, también se encuentra totalmente liberado.

Después de realizar los diferentes estudios, se ha podido identificar una mala praxis en cuanto a la forma de realizar el procesamiento y su correspondiente concentrado. El tamaño de partícula del material que sale del molino es demasiado elevado, causando así dificultades en las etapas posteriores del procesamiento necesarias para concentrar el oro. Así pues, es necesario reducir aún más el tamaño de partícula para poder extraer mayores cantidades de mena.

El trabajo parte con el objetivo de aportar a la cooperativa el conocimiento mineralógico y técnico necesario para implementar otras técnicas extractivas y de procesamiento necesarias para revertir la situación actual con la mayor eficacia y sostenibilidad posibles.



ABSTRACT

The present work assesses the mining activity of a cooperative that extracts gold in an artisanal way. An identification of its weaknesses was carried out to establish a criterion to propose improvements that allow an important increase of the economic development with deeper technical knowledge.

The study was accomplished in the Auric Cooperative of Cotapata, which is located inside the Au-Sb belt of the Eastern Andean Cordillera, in the village of Coroico, Nor Yungas province of the Department of La Paz, Bolivia, 57 km from La Paz.

This cooperative focuses on the gold extraction that is retained in quartz veins that contain pyrite, arsenopyrite, chlorite and other iron oxides. The torn material is moved by metallic wagons and processed by trituration systems, grinding and gravity separation. The product which the cooperative sells is called “pyrite concentrate” where the highest gold content is housed.

A field study was carried out, in which samples were taken from different points of the mine galleries, as well as various samples from the processing plant. Subsequently, chemical analyses were accomplished to obtain sufficient mineralogical information to continue investigating the mineral deposit. The mineralogy was determined by X-Ray diffraction, as well as with optical and electron microscopy. With regard to the samples from the processing plant, granulometric analyses were conducted to determine particle size.

The Au content in the material after the milling stage is 29,10 ppm, while once concentrated, the remaining residue has a proportion of 18,85 ppm. As it regards, the “pyrite concentrate” varies according to its granulometry. Thus, the highest values of Au content are located in the highest particle size, 263 ppm, and the smallest, 305 ppm.

In a mineralogical level, the most common way of observing gold is partially or totally captured in pyrite and arsenopyrite, or exceptionally totally released.

After performing the different studies, it has been possible to identify a malpractice of execution in different stages of processing and its corresponding concentrate. The particle size of the material leaving the mill is too high, thus, causing difficulties in the later stages of processing necessary to concentrate gold. It is necessary to reduce the particle size to be able to extract larger quantities of ore.

The present project started with the objective of providing to the cooperative a fundamental mineralogy and technical knowledge necessary to implement other extracting and processing techniques required to reverse the current situation with the greatest possible efficiency and sustainability.

ÍNDICE

	<u>Página:</u>
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Problemática mundial de la minería artesanal del oro	
2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	14
2.1. Objetivos	
2.2. Alcance	
3. ESTUDIOS PREVIOS O ANTECEDENTES.....	15
4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	16
4.1. Fisiografía	
4.2. Geomorfología	
5. MARCO GEOLÓGICO.....	18
5.1. La Cordillera oriental	
5.2. La Faja de oro-antimonio de la cordillera oriental	
5.3. Geología regional	
5.3.1. Estratigrafía	
5.3.2. Yacimiento y mineralogía	
5.3.3. Geología estructural	
5.3.4. Zona de estudio	
6. MINERÍA.....	23
6.1. Descripción de las labores mineras	
6.2. Perforación	
6.3. Voladura	
6.4. Ventilación	
6.5. Extracción y transporte del mineral	
7. PROCESAMIENTO MINERAL.....	26
8. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	30
8.1. Trabajo de campo	
8.1.1. Muestreo para estudio geológico	
8.1.2. Muestreo de la planta de procesamiento mineral	
8.2. Etapa de laboratorio	
8.2.1. Análisis granulométricos	
8.2.2. Análisis químicos	



8.2.3. Difracción de rayos X	
8.2.4. Microscopía óptica	
8.2.5. Microscopía electrónica	
8.2.6. Microanálisis mediante microsonda electrónica	
9. RESULTADOS	33
9.1. Análisis granulométricos	
9.2. Mineralogía	
9.3. Química mineral	
9.4. Composición química	
10. DISCUSIÓN	43
10.1. Mineralogía del depósito	
10.2. Liberación de partícula	
10.3. Alternativas al procesamiento actual	
11. CONCLUSIONES	46
REFERENCIAS	48



ÍNDICE DE FIGURAS

Página:

Figura 1. Situación geográfica de la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	16
Figura 2. Imagen donde se puede observar el relieve del terreno, así como la planta de procesamiento y las casas ubicadas en lo hondo del valle.....	17
Figura 3. Fajas metalogénicas y provincias fisiográficas de Bolivia (Arce-Burgoa, 2008).....	18
Figura 4. Localización del cinturón de Au-Sb situado en la Cordillera Andina Oriental (modificado de Haerberlin et al. 2002).....	19
Figura 5. Ubicación de la minería artesanal de oro en Bolivia.....	22
Figura 6. Entrada de la mina en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	23
Figura 7. A) Carros metaleros en la Cooperativa Aurífera de Cotapata. B) Líneas de Cauville en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	24
Figura 8. Buzón de recepción del material que proviene de mina en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	26
Figura 9. Entrada del material de mina hacia la planta de procesamiento mediante carros metaleros en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	26
Figura 10. Elementos de la planta de procesamiento de la Cooperativa Aurífera de Cotapata....	27
Figura 11. Diagrama de flujo en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	29
Figura 12. Distribución de tamaños de partículas de las muestras recogidas en planta.....	33
Figura 13. Diagramas de difracción de rayos X comparativos entre diferentes granulometrías del concentrado.....	34
Figura 14. Diagramas de difracción de rayos X comparativos entre diferentes etapas del procesado.....	35
Figura 15. Imagen de un grano de oro parcialmente liberado y parcialmente rodeado por pirita y cuarzo.....	36
Figura 16. Imágenes de SEM que muestran diferentes minerales del yacimiento de Cotapata....	37
Figura 17. A) Imagen de SEM de un grano de oro del concentrado de Cotapata. B) Espectro EDS del mismo grano de oro.....	39
Figura 18. Mapa composicional de un grano de pirita y arsenopirita.....	40
Figura 19. Mapa composicional de granos de pirita y arsenopirita.....	41
Figura 20. Mapa composicional de un grano de oro.....	42
Figura 21. Correlación entre el contenido de arsenopirita + pirita y el contenido en oro del concentrado de la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....	43



Figura 22. Distribución de tamaños de partículas de las diferentes cooperativas mineras parecidas a la Cooperativa Aurífera de Cotapata.....44



ÍNDICE DE TABLAS

Página:

Tabla 1. Contenido en oro de la alimentación y productos del procesamiento en la planta de Cotapata.....	33
Tabla 2. Variación de la composición mineralógica con la granulometría del concentrado, en % en peso.....	35
Tabla 3. Composición química de los minerales metálicos presentes en el yacimiento de Cotapata.....	38
Tabla 4. Composición química semicuantitativa del grano de oro de la Figura 16, en un grano presente en una muestra de concentrado. Resultados expresados en % en peso.....	39
Tabla 5. Composición química de los minerales metálicos presentes en los yacimientos de 24 de septiembre (SEP), señor de mayo (SM) y flor de mayo (R).....	40



1. INTRODUCCIÓN

Bolivia se caracteriza por ser un país con grandes y extensos recursos mineralógicos, siendo reconocida como una de las regiones metalíferas más ricas del mundo – igual que prácticamente la mayor parte de Sudamérica. Esta clase de recursos geológicos acompañados por la actividad minera, generan una de las principales fuentes de ingreso y beneficio para el país.

Entre sus recursos minerales, destacan; el estaño y el oro, aunque también cierta importancia elementos como el tántalo, cadmio, indio, bismuto, potasio, boro, hierro, gas natural y petróleo. En el presente trabajo, el oro y su minería serán el objeto de estudio.

La minería del oro en países en vías de desarrollo, como es el caso de Bolivia, a “grosso-modo” se puede llegar a desarrollar de dos maneras; de forma artesanal y/o a pequeña escala (Artisanal and Small-Scale Mining – ASM), o a través de grandes empresas, con un amplio poder económico y conocimientos tecnológicos. Cabe destacar que, en el caso de la ASM, se puede llevar a cabo dentro de la legalidad o por desgracia, de forma informal/ilegal.

La definición de minería artesanal o pequeña escala no se puede considerar uniforme en todas las jurisdicciones (Seccatore et al., 2014). En 1972, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), propuso una primera definición referente a la minería de pequeña escala: “Cualquier operación minera que tenga una producción anual de material sin procesar entorno o inferior a 50.000 toneladas métricas en la entrada de la mina” (Seccatore et al., 2014). Según Seccatore et al. (2014), la minería a pequeña escala (Small-Scale Mining, SSM) es una actividad minera que produce menos de 100.000 t/a. La minería artesanal, es un subconjunto de la anterior, dónde el conjunto de operaciones no sigue los principios convencionales ecológicos e ingenieriles de la minería, así como utiliza técnicas rudimentarias o básicas para extraer el mineral. En este caso, se tomará la definición anterior. La minería artesanal del oro (Artisanal Gold Mining – AGM) es un sector extractivo que no sólo se ha mantenido a lo largo de las décadas, sino que además ha crecido (Zolnikov et al., 2018). Hay aproximadamente 40 millones de personas involucradas en el sector en aproximadamente 70 países (IGF, 2017; de Haan et al., 2020).

A menudo este tipo de minería produce grandes impactos ambientales. Los estudios e informes, nos muestran que los países tercermundistas con cierta riqueza mineralógica, como es el caso de Bolivia, tienen un alto nivel de pobreza, corrupción, autoritarismo, guerras civiles, gobiernos inefectivos y pobres actuaciones sociales y económicas (Kumah, 2005). La combinación de los anteriores factores con la falta de conocimiento de la AGM en el sector minero a nivel geológico y tecnológico, conlleva a la generación de ciertos impactos ambientales. Uno de los principales problemas que ocasiona, es debido al uso del mercurio que utilizan los propios mineros para extraer el oro de los minerales con los que va asociado.

En 2011, alrededor de 16 millones de personas estaban involucradas en la minería artesanal dedicada a la extracción de oro, ya fuera en actividades mineras o de tratamiento, produciendo entre 380 y 450 toneladas de oro al año, confirmando que un mayor porcentaje de mercurio se encontraba en los países con una tecnología minera inferior (Seccatore et al., 2014). La “Global Mercury Assessment” estimó que el oro producido por la ASM, comportaba a una generación aproximada de 727 toneladas métricas de mercurio que se liberaban a la naturaleza. Es decir, el 37% del mercurio global liberado anualmente (1960 toneladas) por fuentes antropogénicas al ambiente (UNEP, 2010). Por desgracia, acostumbra a ser bastante difícil obtener estimaciones precisas del oro producido por la ASM, ya que los gobiernos de los países no disponen de datos



fiables o seguros de la producción de oro, y los mineros no revelan los datos fácilmente (Seccatore et al., 2014).

La principal problemática entorno al uso del mercurio reincide en dos factores; la generación de un daño al ecosistema de la zona que a veces puede llegar a ser irreparable, y la afección directa sobre la salud humana. La población humana que este expuesta al mercurio, puede sufrir daños agudos o incluso crónicos. Una baja exposición al mercurio, puede desencadenar a problemas respiratorios leves como dolores en el pecho, disnea, tos, hemoptisis, deterioro de la función pulmonar, neumonitis, entre otras cosas. Mientras que una exposición alta, puede conducir a la muerte o causar daños permanentes en el sistema nervioso (EPA, 2011; Poulin et al., 2008). Normalmente, los daños más comunes que sufre la población de la AGM, acostumbra a ser crónicos, debidos a exposiciones moderadas, las cuales se caracterizan por causar síntomas menos pronunciados como fatiga, irritabilidad, pérdida de la memoria y/o depresión (EPA, 2011).

Por otro lado, los mayores problemas ambientales y socioeconómicos causados por la minería del oro en los países en vías de desarrollo, incluyendo la deforestación, son; drenaje ácido de mina; ruido, polvo, contaminación del aire y las aguas a causa del arsénico, cianuro y mercurio, desorganización social; pérdida de los medios de vida y desplazamientos masivos (Kumah, 2005).

La falta de conocimiento sobre las características mineralógicas del mineral y de las tecnologías utilizadas en los centros de procesamiento, afectan directamente a la recuperación del oro, así como aumentan el uso del mercurio durante la amalgamación (Velásquez-López et al., 2010).

A lo largo de los años, se han invertido millones de dólares en políticas o regulaciones de este sector tan específico, con el principal objetivo de reducir las emisiones de mercurio (Hilson, 2008). Pese a los esfuerzos realizados, la minería de oro artesanal continúa siendo un penetrante problema de salud global, tanto humano como medioambiental.

Los resultados de los diferentes estudios realizados a lo largo de las últimas décadas, revelan resultados positivos y negativos asociados a cada intervención, confirmando así, que no existe una única solución para manejar o tratar de reducir los efectos del mercurio (Zolnikov et al., 2018). Por lo tanto, es necesario proseguir con los estudios e investigaciones, las cuales permitirán conocer las características mineralógicas, el origen de los yacimientos, organización y tecnología usada en las minas artesanales, que, a la vez, contribuirán al conocimiento de la zona de estudio y optimizarán su explotación y procesamiento, con el objetivo de reducir o eliminar las emisiones y uso del mercurio en la minería del oro.

1.1. PROBLEMÁTICA MUNDIAL DE LA MINERÍA ARTESANAL DEL ORO

En los últimos años, la aplicación del desarrollo sostenible en la industria minera, especialmente en la ASM, se ha convertido en un tema de considerables debates (Kumah, 2005). Este tipo de minería se caracteriza por ser muy rudimentaria, con mano de obra sin muchos recursos económicos, con equipos e infraestructuras pobres y con un bajo nivel tecnológico (Freixas, 2016). Sus principales características predominantes son (Costa, 2009):

- Informalidad, es decir, el hecho que la actividad no esté apoyada por el gobierno.

- Trámites de formalización costosos. En caso de buscar el amparo de la ley necesitarían obtener las concesiones correspondientes, lo cual implica unos costes elevados.
- Trabajos individuales o en pequeños grupos. Muchas actividades son realizadas por grupos familiares.
- Uso intensivo de mano de obra y bajas tecnologías. Los sistemas de explotación y beneficio son muy rudimentarios.
- Procesamiento artesanal con sustancias tóxicas como el mercurio.
- Altos riesgos de contaminación.
- Baja recuperación del mineral debido a los escasos conocimientos de las técnicas de recuperación y a la falta de control de este proceso.
- Hostilizados por grandes empresas.
- Desorganización.
- Sin conocimiento de las reglas de comercialización.
- Falta de acceso al crédito.
- Altas tasas de inmigración.
- Sin planificación a largo termino.

En muchos países, la ASM forma parte del sector informal o ilegal, por lo que genera efectos negativos tanto en los regímenes sociales como los ambientales o fiscales del propio país, este es el caso de Bolivia (Freixas, 2016). A pesar de los inconvenientes que puede llegar a generar, constituye la columna vertebral de varios países, pudiendo así generar beneficios significantes en cuanto al desarrollo económico estatal como local, siendo así la fuente de ingresos de muchas familias, permitiéndoles alcanzar una mejor calidad de vida (Kondo et al., 2002; Kumah, 2005; Pimentel et al., 2015).

Al mismo tiempo, la minería a pequeña escala puede ser ineficiente, con pobres condiciones de trabajo, problemas de salud y seguridad, así como producir una abundante degradación medioambiental. Asimismo, gran parte de este tipo de minería, se lleva a cabo de forma ilegal, resultando así muy difícil de monitorear y controlar (Hickie and Wade, 1998).

La Organización Panamericana de la Salud (PAHO) se mantiene firme con su punto de vista, en que la industria minera del oro es directamente responsable de los altos niveles de contaminación del aire y agua, causados por los desechos tóxicos, asociados con problemas de salud en América Latina y el Caribe (Campbell, 2007). Es por eso, que además de las consideraciones económicas, es esencial el hecho de reconciliar la actividad minera con la protección ambiental mediante proyectos y estudios sustentables y sostenibles, así como aliviar las preocupaciones de la población local (Calas, G. 2017).

En algunos casos, la falta de voluntad política para crear un marco adecuado para la legalización de la ASM, el cual podría aportar muchos beneficios al colectivo, puede ser debido a intereses relacionados con la corrupción, la política del momento, el lavado de dinero u otras actividades ilegales similares (RCS Global, 2016).

De todos modos, cualquier tipo de actividad minera únicamente se debería llevar a cabo, si se genera una contribución positiva a largo plazo que pueda satisfacer el bienestar humano presente y futuro, sin a la vez malmetter el ecosistema (Pimentel et al. 2015).

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1. OBJETIVOS

El presente trabajo aborda como objetivo principal conocer la mineralogía del procesamiento del material aurífero del yacimiento de Cotapata para contribuir al conocimiento de la zona y optimizar su aprovechamiento.

Mediante este proyecto se pretende dar soporte técnico a las actividades prospectivas y de explotación de la cooperativa minera aurífera Cotapata. De esta manera, se pretende contribuir a la implementación de una minería sostenible, a través del estudio mineralógico a detalle de los materiales explotados del yacimiento.

Para el desarrollo de este trabajo, los objetivos específicos que se pretenden alcanzar son:

- Determinar las características granulométricas del material en los diferentes estadios del procesamiento.
- Precisar la ley de oro de los materiales en cada uno de los anteriores estadios.
- Caracterizar la mineralogía de los materiales en cada uno de los diferentes estadios.
- Valorar las características de liberación del oro.
- Realizar una valoración de la eficiencia del sistema de procesamiento actual.
- Proponer mejoras del actual sistema.
- Extender los resultados de esta investigación a otras explotaciones mineras auríferas de Bolivia.

2.2. ALCANCE

La mayoría de los procesos que se describen en este trabajo, coinciden en una gran cantidad con otras explotaciones de la zona, así como a nivel general en la minería artesanal boliviana, la cual, en su mayoría se dedica a la explotación del oro.

Entre otras semejanzas, gran parte de la minería artesanal o a pequeña escala generada en países en vías de desarrollo, destaca principalmente por el desarrollo de la actividad minera sin conocimientos de la mineralogía y de todo el espectro de procesos para la separación del oro. A menudo se produce un uso indiscriminado de sustancias contaminantes en sus procesos de separación del mineral, así como tienen poco control sobre los residuos generados por dicha actividad.



3. ESTUDIOS PREVIOS O ANTECEDENTES

Muchos países que se encuentran en vías de desarrollo, están dotados con abundantes recursos naturales, y durante siglos, se han centrado inmensamente en sus sectores más primarios – concretamente en las industrias extractivas – para seguir un camino hacia el crecimiento económico (Kumah, 2005). La minería artesanal o de pequeña escala en América Latina se caracteriza por un nivel tecnológico más elevado, un mejor acceso al mineral, así como un mayor nivel de eficiencia en el procesamiento, que por ejemplo continentes como Asia y África, los cuales también llevan a cabo este tipo de minería (Seccatore et al., 2014).

La minería artesanal del oro o a pequeña escala en Bolivia se desarrolla de forma similar a la de otros países de Sud-América como en Perú o Colombia. En el caso de Perú, es el país de latinoamérica que más oro produce (Kumah, 2005). Las cooperativas mineras acostumbran a ser poblaciones pequeñas, y la mayoría de sus miembros son socios que no disponen de un amplio conocimiento del sector. Su capital financiero suele ser limitado, así como las infraestructuras donde viven son precarias y pueden presentar problemas sociales y culturales, por eso, las técnicas de extracción que utilizan son vulnerables a repercutir sobre el medioambiente, así como sobre la seguridad y la salud de los propios trabajadores o habitantes (Alfonso et al., 2019).

La minería y el desarrollo sostenible, están intrínseca y complejamente interconectadas (Pimentel et al., 2015). Por lo que afecta a la zona de estudio, se han realizado anteriormente estudios relacionados con la problemática que presenta la minería artesanal del oro y su difícil desarrollo sostenible (Pavilonis et al, 2017). Son muchos los autores que han demostrado la afección de la minería artesanal y sus métodos extractivos y de procesamiento sobre el medio ambiente (Seccatore et al., 2014; Zolnikov et al., 2018), así como modelos y retos para enfocar la actividad minera artesanal hacia un desarrollo sostenible (Pimentel et al., 2015; Ghose et al., 2005; Kumah, 2005).

Diversos trabajos han sido publicados sobre la geología del cinturón de Au-Sb de la Cordillera Oriental Andina como, por ejemplo (Arce-Burgoa, 2009) dónde se expone la metalogenia de Bolivia. Por otro lado, también se ha encontrado información notable sobre las ocurrencias de oro en la Cordillera Oriental del Paleozoico inferior en Bolivia y Perú (Forani et al. 1991).

En el cinturón boliviano se han llevado a cabo diversos trabajos académicos (Freixas, 2016; López, 2017). En el trabajo de Freixas, se centró en la realización de una valoración y propuesta de mejora sobre los niveles de contaminación por mercurio en tres cooperativas mineras ubicadas en el área de Sorata en el departamento de La Paz. Respecto al trabajo de López, se realizó un estudio mineralógico de la mina y planta de procesamiento de la Cooperativa 24 de Setiembre en la provincia Sud Yungas, también en el departamento de La Paz.

4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La actividad minera estudiada, correspondiente a la Cooperativa Minera Aurífera Cotapata R.L., se encuentra en el departamento de La Paz (Bolivia), concretamente en el municipio de Coroico, en la provincia Nor Yungas, sector Cotapata del Cantón Pacallo (Figura 1). El ingreso al área perteneciente a la cooperativa se encuentra a unos 3.205 metros sobre el nivel del mar, mientras que la entrada a la mina se encuentra entorno a los 3.000 metros. En las proximidades de la boca de la mina se halla la planta de procesamiento.

La mina está comunicada con La Paz mediante la carretera Ruta Nacional 3 hasta la zona denominada tranca Kala Jahuirá y de allí, hasta la población de Cotapata, sumando en total unos 48 km. En este tramo, la carretera está totalmente asfaltada y está formada por dos carriles. Una vez en Cotapata, el acceso a la cooperativa se halla al lado de la gasolinera y es mediante un camino de tierra poco transitado con un recorrido de dos kilómetros, seguido por una senda de un kilómetro. La distancia total que separa La Paz de la mina Cotapata es de 51 kilómetros.

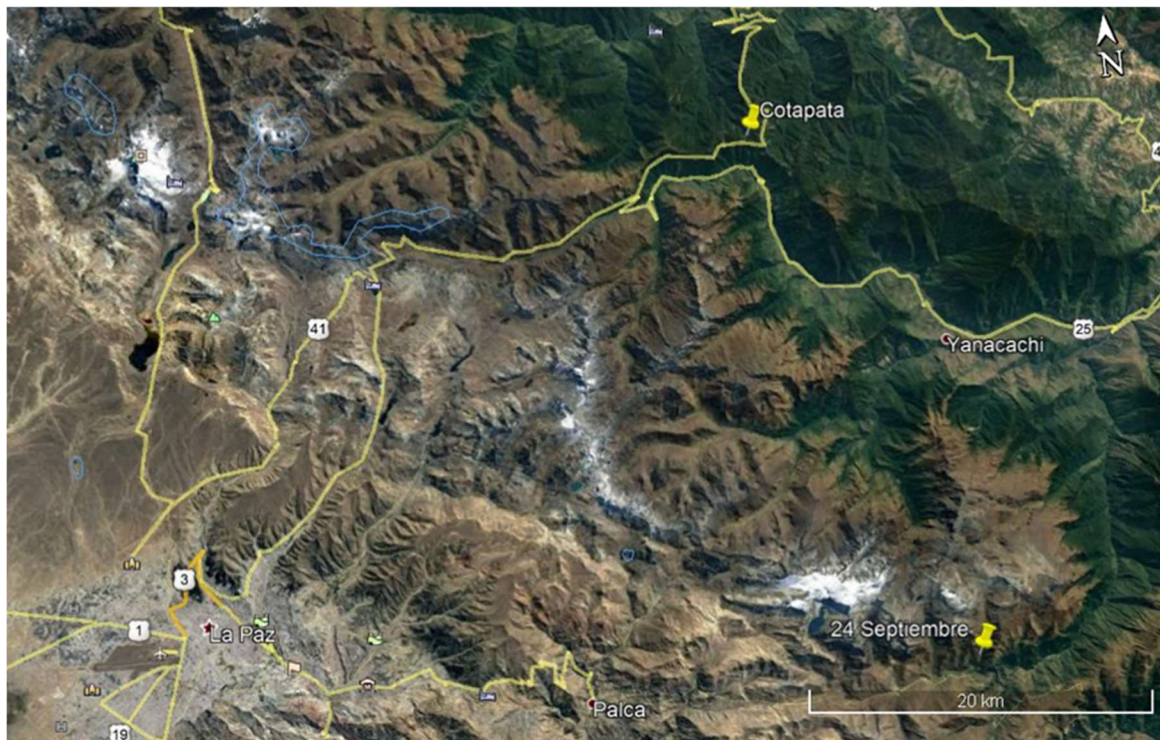


Figura 1. Situación geográfica de la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

1.1. FISIOGRAFÍA

La zona está formada principalmente por relieves o colinas con pendientes moderadamente escarpadas (pueden variar entre el 16% y el 70%) y en algunos casos montañosas tal y como se aprecia en la Figura 2. Los paisajes predominantes son terrazas altas disectadas y pendientes aluviales muy inclinados donde se han originado suelos superficiales con distinto grado de granulometría.

1.2. GEOMORFOLOGÍA

La zona objeto de estudio se ubica en la unidad geomorfológica denominada como Yungas. Esta región se caracteriza por ser de carácter montañosa con altitudes que fluctúan entre los 600 y 3.000 metros, siendo su principal característica la presencia de cuencas muy profundas y montañosas de gran elevación con declives fuertemente inclinados. Así pues, la topografía que se refleja en la zona es muy variable e irregular, siendo así habitual o posible la generación de deslizamientos y derrumbes constantes de material que se encuentre en el terreno.

Como curiosidad, las poblaciones y campamentos mineros artesanales suelen estar ubicados en lo hondo de valles, con el riesgo constante de caída de bloques o rocas (Alfonso et al., 2019). En este caso, la entidad minera estudiada cumple con estas alarmantes características tal y como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Imagen donde se puede observar el relieve del terreno, así como la planta de procesamiento y las casas ubicadas en lo hondo del valle.

La geomorfología muestra que la Cooperativa Aurífera de Cotapata se encuentra en una región donde convergen dos fallas, además que se encuentra contigua a una zona con formación sinclinal, por lo tanto, la susceptibilidad a sismos es considerablemente alta.

5. MARCO GEOLÓGICO

Bolivia se puede dividir en seis provincias fisiográficas, de este a oeste comprenden: el Escudo Precámbrico, la Llanuras Chaco-Benianas, la zona Subandina, la Cordillera Oriental, el Altiplano y la Cordillera Occidental (Figura 3). Las últimas cuatro provincias descritas anteriormente comprenden el Orógeno Andino del Mesozoico-Cenozoico de Bolivia, que alberga una gran cantidad de yacimientos minerales muy importantes para la economía del país (Arce-Burgoa, 2009).

La explotación minera objeto de estudio, Cotapata, se encuentra en la Cordillera Oriental, concretamente en la faja de oro y antimonio (Au-Sb).

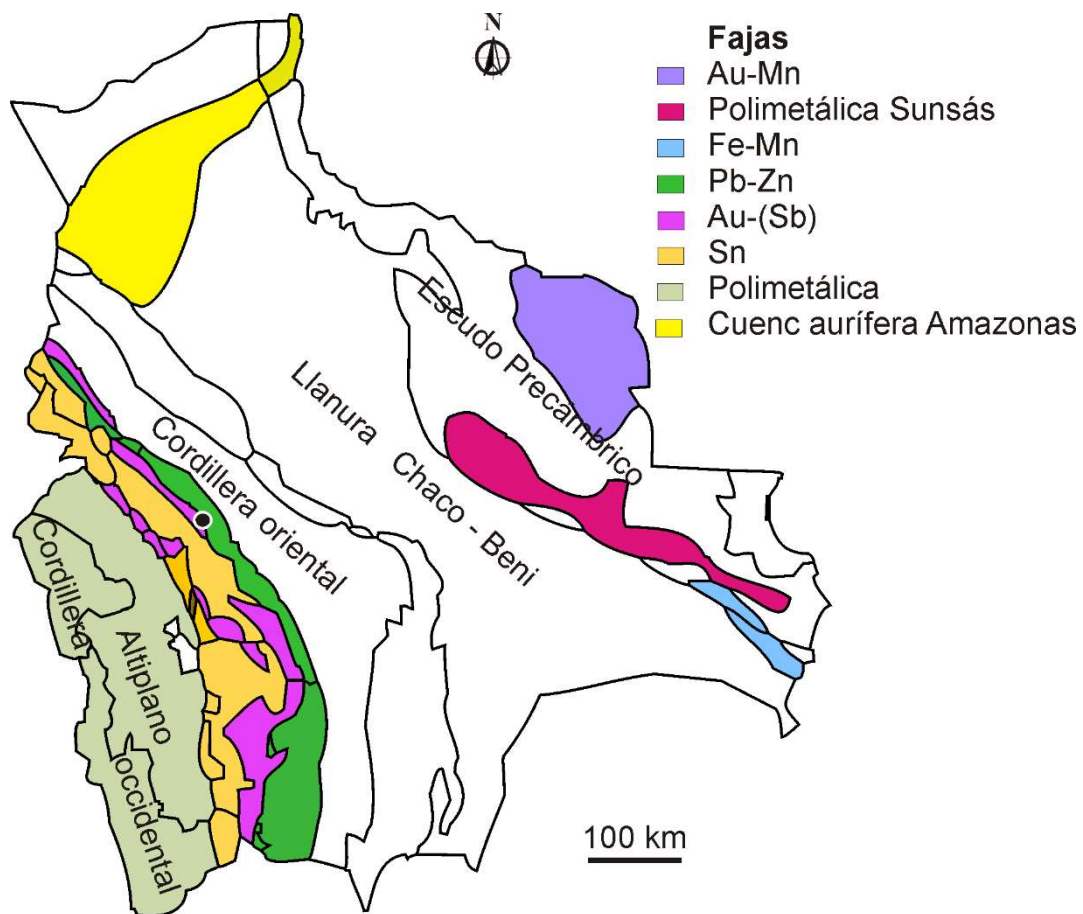


Figura 3. Fajas metalogénicas y provincias fisiográficas de Bolivia (Arce-Burgoa, 2009).

5.1. LA CORDILLERA ORIENTAL

La Cordillera Oriental constituye una importante región montañosa fanerozoica, principalmente formada por potentes secuencias de cuarcitas, pizarras, areniscas, calizas, lutitas y limolitas, que pertenecen a la época del Paleoceno inferior (Forani et al., 1991). Estas secuencias siliciclásticas rellenan una cuenca marina de una extensión aproximada cercana a los 280.000 km² (Arce-Burgoa, 2007).

En la Cordillera Oriental, los cabalgamientos regionales de dirección nor-noroeste y sud-sudoeste, y las fallas transversales de orientación general este-oeste, constituyen las estructuras dominantes que controlan tanto la mineralización polimetálica como el emplazamiento de extrusivos del Oligoceno Superior-Mioceno (Arce-Burgoa, 2007).

Los diferentes estudios de las mineralizaciones de oro de la Cordillera Andina Oriental sugieren que su formación está estrechamente ligada a sistemas hidrotermales y acumulaciones de sulfuros presentes en el lecho submarino moderno (Forani et al., 1991).

5.2. LA FAJA DE ORO-ANTIMONIO DE LA CORDILLERA ORIENTAL

El cinturón de Au-Sb situado en la Cordillera Andina Oriental, se extiende a lo largo de los más de 1.600 km que comprenden des del norte de la ciudad de Cuzco (Perú), hasta el sur de Salta en el noroeste de Argentina (Figura 4). Incluye grandes depósitos con vetas de oro y antimonio (Haerberlin et al., 2002).

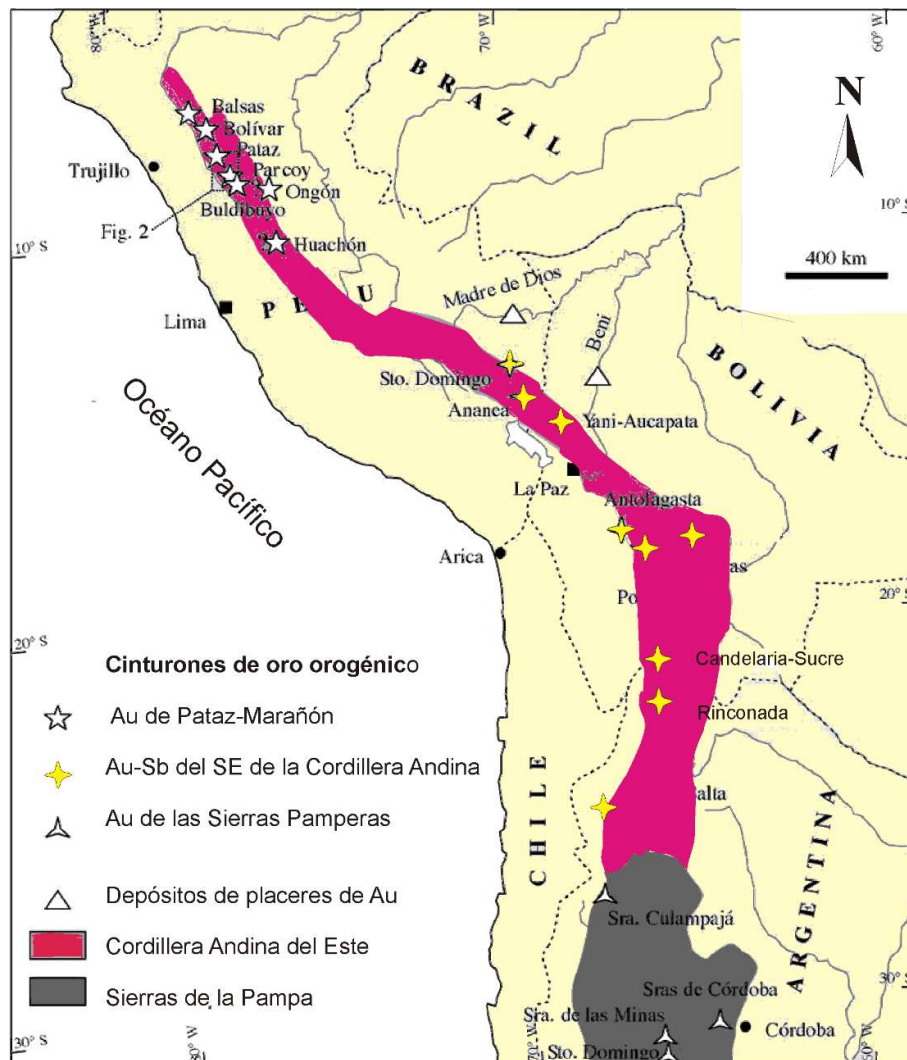


Figura 4. Localización del cinturón de Au-Sb situado en la Cordillera Andina Oriental (modificado de Haerberlin et al. 2002).



Esta faja, dispone de tres cinturones distintivos de depósitos orogénicos de Au±Sb que contienen más de 500 depósitos y ocurrencias (Tistl, 1985; Lehrberger, 1992). Estos tres son los que aparecen a continuación (Arce-Burgoa et al., 2009):

- Ubicado con una tendencia noroeste, este cinturón, se inicia cerca de la capital de Bolivia, La Paz, a través del cinturón Oruro-Challapata hasta el distrito de Amayapampa.
- En dirección norte-sur, se extiende otro cinturón que une el distrito de Caracota-Carma con el distrito de Candelaria en el límite de Argentina.
- Des del distrito de Apolobamba, cerca del límite con Perú, travesando los distritos de Aucapata-Yani y Cajuata-Los Machos, hasta el departamento de Cocapata-El Molino, este cinturón transcurre con una dirección noroeste.

Los depósitos de oro orogénico de esta unidad acostumbran a formar vetas que se encuentran encajadas en rocas sedimentarias del Ordovícico medio y Siluriano inferior. En estos depósitos auríferos, la mineralogía se puede correlacionar con intrusiones del Mesozoico y Terciario.

Se trata de una mineralogía relativamente uniforme y preservan dos eventos paragenéticos principales. En primer lugar, los productos que pertenecen al primer evento incluyen oro nativo, pirita, arsenopirita y, ocasionalmente scheelita. Por otra parte, el evento más reciente, se caracteriza por haber sido formado a temperaturas más bajas, lo cual implica la deposición de sulfuros que contienen Pb, Zn, Cu y Sb (Lehrberger, 1992; Dill, 1998; Arce-Burgoa, 1999, 2002) y también una segunda generación de pirita.

5.3. GEOLOGÍA REGIONAL

De acuerdo con las observaciones recogidas en el campo y a la información geológica que aparece registrado en el mapa geológico 6045 (escala 1:100.000) denominada como Coroico y publicada por el Servicio Geológico de Bolivia el año 1994, en el área de la Cooperativa Aurífera Cotapata predomina rocas pelíticas de edad paleozoica pertenecientes a la formación Coroico. Esta formación está compuesta de pizarras de color gris oscuro que se alternan con areniscas marrones y niveles de cuarcita gris blanquecido. Estos materiales albergan principalmente vetas de cuarzo con oro libre y/o pirita/arsenopirita aurífera.

A nivel regional, todo el conjunto de rocas sedimentarias conforma una estructura anticlinal, cuyo eje presenta una orientación general/media noroeste. Por otro lado, es frecuente observar fallas compresivas paralelas a los planos de estratificación y que, a la vez, fueron producto de los esfuerzos del ciclo tectónico hercínico.

También existen fallas geológicas de orientación general norte-sur y noroeste, de alto ángulo y que son consideradas como producto de los esfuerzos distensivos.

Las estructuras mineralizadas corresponden a las vetas principales de Sampa y San Rafael, compuestas de cuarzo aurífero y que generalmente rellenan el espacio producido por la formación de fracturas de orientación noroeste-sureste e inclinaciones hacia el norte.

Por otra parte, también existen las otras vetas que presentan inclinaciones hacia el sur y pueden considerarse mantos, debido a su bajo buzamiento. En las intersecciones de las vetas principales con los mantos, suelen focalizarse las zonas con mayor contenido de oro.



Las vetas son generalmente lenticulares (tipo rosario), con una anchura que puede variar desde los 5 cm hasta 60 cm, y van siguiendo paralelas a la dirección de la estratificación (noroeste-sureste a norte-sur) y con buzamientos promedios de 65° en dirección norte.

5.3.1. Estratigrafía

El terreno está constituido principalmente por sedimentos o unidades que pertenecen al paleozoico, y corresponden a la formación Coroico, como metalimolitas y pelitas con finas intercalaciones samíticas, que debido al metamorfismo regional cambian gradualmente a pizarras, tilitas y esquistos.

5.3.2. Yacimiento y mineralogía

El tipo de yacimiento es primario y de acuerdo al comportamiento estructural y composición mineral de las vetas, se trata de un estilo de mineralización que corresponde a un depósito de tipo orogénico.

La composición mineral principal de las vetas que contienen el oro consta de cuarzo, pirita, calcopirita, arsenopirita, clorita y otros óxidos de hierro. Asimismo, en algunos puntos del cinturón de Au-Sb de la Cordillera Andina Oriental se pueden hallar trazas de schelita, calcopirita o galena.

Como es típico en este tipo de depósitos, el oro puede aparecer en forma de granos aislados, desde diversas micras hasta varios milímetros dentro del cuarzo. Asimismo, también existe evidencia de oro de granulometría fina en los cristales de pirita y arsenopirita (Forani et al., 1991).

5.3.3. Geología Estructural

La evolución tectónica manifestada en la zona en forma de plegamientos, fallas y metamorfismo regional de las rocas paleozoicas ha sido causada por las fases orogénicas, Hercinica y Andina. La primera fase, fue probablemente de mayor intensidad, estuvo principalmente causada por el plegamiento intenso con esquistosidad, acompañado de un epimetamorfismo regional. Las deformaciones Andinas, fueron probablemente de menor intensidad que las anteriores, acentuando y deformando las estructuras hercinicas, se presentan en forma de pliegues amplios y fallas, algunas de estas inversas que afectan al material paleozoico plegando la esquistosidad y basculando las estructuras anteriores.

Se pueden diferenciar tres regiones estructurales. En primer lugar, la región suroeste (prolongación sur de la Cordillera Real), la cual presenta pliegues de gran amplitud, sinclinales suaves y anticlinales estrechos, con una fracturación intensa. Seguidamente, se encuentra la región central y noroeste, que constituye una faja plegada intensamente, con sinclinales amplios y suaves, en cambio, los anticlinales son estrechos, replegados, fracturados y presentan esquistosidad y metamorfosis regional. Finalmente, la región este, presenta una faja de rocas principalmente pelíticas, plegadas con antiformas y sinformas, con una esquistosidad alta y metamorfismo regional.

La cooperativa se encuentra situada en la parte central más importante del geosinclinal de eje granitoide de la Cordillera Real; existen depresiones tectónicas rellenas por sedimentos cretácicos terciarios y cuaternarios. Desde finales de la época terciaria, existe una evolución avanzada de erosión que prosigue hasta la actualidad, labrando profundos valles.

El valle de Huarinilla y sus afluentes se caracterizan por ser una zona rica en depósitos auríferos aluviales, así como también existen en la zona filones granodioríticos que se caracterizan por la presencia de vetas cuarcíticas de oro subvolcánico, muy relacionado con los yacimientos de wólfram, antimonio y bismuto (Ribera et al., 1995).

5.3.4. Zona de Estudio

A lo largo del presente trabajo, con el objetivo de extender y aplicar los avances mineralógicos alcanzados con el yacimiento de Cotapata en otras zonas mineralógicas parecidas a la zona de estudio, se han añadido a modo de comparación datos de otros yacimientos minerales metálicos del cinturón Au-Sb. En la Figura 5, se puede observar las diferentes minas de oro a lo largo de Bolivia marcadas de color amarillo, así como la ubicación de las diferentes cooperativas mineras tratadas en este trabajo.

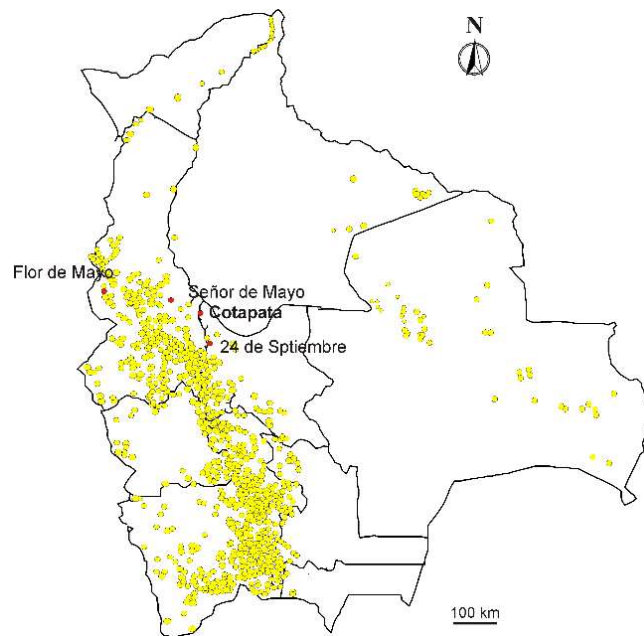


Figura 5. Ubicación de la minería artesanal de oro en Bolivia.

6. MINERÍA

6.1. DESCRIPCIÓN DE LAS LABORES MINERAS

En la cooperativa aurífera de Cotapata se centran principalmente en la extracción de oro por medio de labores subterráneas. La cooperativa no sigue un método de explotación basándose en estudios y análisis, de hecho, se limitan únicamente en seguir e intuir de manera visual las vetas que encuentran en diferentes orientaciones. Al tratarse de una mina relativamente estrecha y sin demasiada amplitud de galerías (Figura 6), en el campo, no se pudo observar al detalle las diferentes orientaciones de las vetas. Sin embargo, otros depósitos de tipo orogénico que se encuentran en el mismo cinturón disponen de buenos afloramientos en interior de mina, ya que las galerías son más anchas y existen algunas cámaras. Este es el caso de la mina de la cooperativa aurífera “Señor de Mayo”. En ella se ha visto que existen vetas en dos direcciones muy diferentes, una de ellas son vetas de alrededor de unos 70° de inclinación, mientras que las otras son mantos, es decir, tienen una inclinación muy suave. En ese caso se ha visto que el oro se encuentra en los mantos y no en las vetas inclinadas (Alfonso et al., 2019).

La explotación minera dispone de labores en dos niveles distintos. Las galerías de la mina presentan una sección cuadrada, con anchura de 2 metros y altura de 2,2 metros con un gradiente de 0,05%. Por otro lado, las chimeneas, intermedios y ratoneras tienen una sección de 1,2x1,5 metros.

No tienen horarios bien definidos y establecidos para realizar las labores de perforación y voladura.



Figura 6. Entrada de la mina en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

6.2. PERFORACIÓN

La perforación se efectúa mediante martillos de perforación con pistón de avance y lubricadora con barrenos de 1,5 a 2,5 metros de longitud, las cuales son accionadas por una compresora eléctrica Atlas Copco de 110 KV. Las perforaciones realizadas son cargadas posteriormente con explosivos.



6.3. VOLADURA

En las labores de voladura se utilizan explosivos del tipo ANFO, mecha y detonadores. Los barrenos se tapan con tierra a modo de retacado para limitar la expansión de gases, posteriormente se procede con la voladura.

El efecto de impacto de la onda de choque y los gases en rápida expansión penetran en las grietas iniciales ampliándolas y creando otras nuevas, lo que produce una fragmentación efectiva de la roca.

En la cooperativa de Cotapata los barrenos en el frente de explotación tienen una media de 1,20 metros de profundidad y 0,80 metros de diámetro, y se cargan 3 barrenos.

6.4. VENTILACIÓN

Una vez efectuada la voladura, se lleva a cabo el proceso de ventilación de los frentes de explotación. El proceso de ventilación se basa en a través de un sistema de aire insuflado por medio de mangueras flexibles conectadas a un ventilado, realizar aportaciones de aire fresco y limpio al frente, para crear así una atmósfera respirable y segura para los trabajadores. De todas maneras, la ventilación también es lograda de manera natural.

6.5. EXTRACCIÓN Y TRANSPORTE DEL MINERAL

El transporte del material explotado en la mina se realiza mediante carros metaleros (Figura 7A) o también denominados en Bolivia como "*pachajchos*" con capacidad para albergar 1 tonelada. La extracción y transporte se lleva a cabo de manera directa des de los topes o galerías de explotación hasta la salida de la mina. Estos carros se desplazan mediante rieles o líneas de cauville (Figura 7B) hasta un buzón de recepción o zona de almacenamiento de material de la mina.





Figura 7. A) Carros metaleros en la Cooperativa Aurífera de Cotapata. B) Líneas de Cauville en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

7. PROCESAMIENTO MINERAL

El procesamiento engloba todas las actividades mineras que tienen como objetivo conseguir el material de valor comercial a partir de una materia prima mineral. En este caso, el oro representa el material de interés debido a su valor económico, y para lograr obtenerlo se deben seguir una serie de etapas.

Posteriormente a las voladuras que se realizan en el interior de mina, el material es transportado a lo largo de 300 metros mediante carros metaleros (Figura 7A), con capacidad para albergar 1 tonelada, hasta un buzón de recepción (Figura 8) donde el material es soltado y desciende por gravedad unos 3-4 metros de manera directa. En este punto, el ROM (Run-Of-Mine) o todo-uno sufre una fragmentación primaria basada en el golpeo de las rocas extraídas de la mina.



Figura 8. Buzón de recepción del material que proviene de mina en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

Una vez en el punto de menor altura del buzón de recepción, el material es transportado durante unos 500 metros de forma subterránea mediante de nuevo carros metaleros, hasta llegar a la planta de procesamiento o también llamada ingenio (Figura 9).





Figura 9. A/B) Entrada del material de mina hacia la planta de procesamiento mediante carros metaleros en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

Las etapas de procesamiento del mineral seleccionadas, dependen esencialmente de los materiales a tratar, así como de sus propiedades físicas, dureza y composición.

Aquí se tritura la roca para reducirla de tamaño a través de un circuito de molienda en húmedo, basado en el uso de un molino de bolas (Figura 10A). En este punto, junto con el material a moler se añade una cierta cantidad de mercurio. Posteriormente al molino, el material entra en una espiral (Figura 10B) que separa los tamaños de partícula más grandes de los finos. La parte granulométrica de menor tamaño pasa a la siguiente etapa, mientras que la de mayor tamaño es recirculada de nuevo al molino para reducir su volumen.

La fracción más fina accede a una mesa de sacudidas (Figura 10C) o también llamada “shaking table”, que separa el material por la densidad de las partículas. El conjunto más ligero se separa del resto de material y es considerado como residuo, mientras que el más pesado es atendido como el producto comercializable que vende la cooperativa, el conocido concentrado de pirita.





*Figura 10. Elementos de la planta de procesamiento de la Cooperativa Aurífera de Cotapata.
A) Molino de Bolas. B) Espiral. C) Shaking Table.*

Para una mayor comprensión, se adjunta el diagrama de flujo de la planta de procesamiento (Figura 11).

ESQUEMA DEL PROCESAMIENTO
 (Cooperativa Aurífera Cotapata)

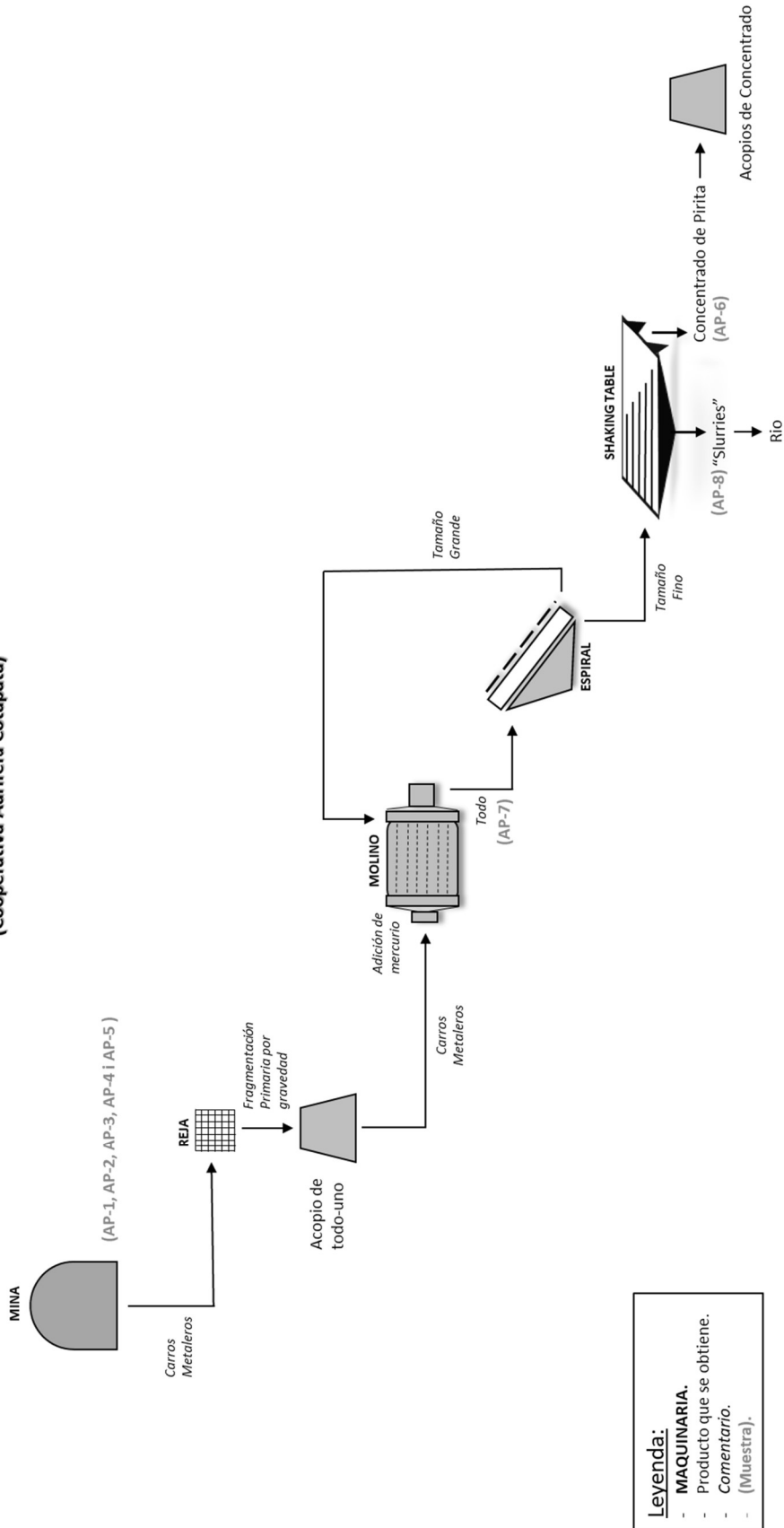


Figura 11. Diagrama de flujo en la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

8. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

8.1. TRABAJO DE CAMPO

La etapa de trabajo de campo y obtención de muestras se divide en dos fases: muestreo para el estudio geológico del yacimiento y muestreo en la planta de procesamiento de mineral.

8.1.1. Muestreo para estudio geológico

Durante la etapa de observación del depósito mineral, se realizó un muestreo de los materiales que formaban las vetas en la mina, utilizando un martillo de geólogo y bolsas porta-muestras.

El principal criterio aplicado es la obtención de muestras que sean suficientemente representativas de los materiales que se están explotando y van a la planta de procesamiento.

8.1.2. Muestreo de la planta de procesamiento mineral

Se observó y se estudiaron los diferentes procesos que se emplean en la Cooperativa Aurífera Cotapata para la separación del oro. Se tomaron muestras del procesado de los materiales, concretamente de las siguientes etapas: (Observar el esquema que aparece en la Figura 11)

- El material previo a la entrada del molino para su correspondiente molienda.
- El material posterior a la salida del molino, ya molturado.
- Los materiales residuales del proceso, las también llamadas colas.

8.2. ETAPA DE LABORATORIO

La caracterización de los minerales en el presente estudio se ha llevado a cabo mediante diversas técnicas analíticas con el fin de obtener una información detallada de las leyes y la mineralogía de los materiales explotados en el campo y la evolución de los mismos a lo largo del tratamiento en planta.

A continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de las técnicas utilizadas a lo largo del presente trabajo.

8.2.1. Análisis granulométricos

Las muestras fueron tratadas en el Laboratorio de Procesamiento Mineral de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Manresa (EPSEM). Para la realización del análisis granulométrico se utilizaron los siguientes tamices: 1,18 mm, 710 μm , 600 μm , 500 μm , 425 μm , 355 μm , 250 μm , 160 μm y 63 μm . El material al que se le ha aplicado este tipo de análisis pesaba alrededor de 1,40 y 1,90 kg.

8.2.2. Análisis químicos

EL objetivo primordial de realizar este tipo de análisis ha sido para obtener datos de concentraciones de metales y otros elementos que presentan las muestras seleccionadas. Las muestras que se recogieron en el campo se enviaron a los laboratorios ALS MINERALS (ALS Laboratory Group S.L.) para su correspondiente análisis químico. Los análisis químicos se realizaron para obtener el grado de recuperación del oro (Au) y la ley del concentrado.



Para la selección del tipo de análisis se ha tenido en cuenta los diferentes límites de detección y el rango de valores para los que cada técnica es aceptable. De esta manera, el método seleccionado ha sido el AU-GRA21 con límites de detección entre 0,05 y 1000 ppm.

8.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos-X es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. No se trata pues de un método analítico químico, pero permite indirectamente estimar la composición de la muestra analizada con una buena aproximación del contenido en elementos mayoritarios.

El equipo utilizado ha sido el difractómetro de polvo PANalyticalX'Pert (monocromador de grafito, radiación α de Cu a $\lambda=1,54061$ Å, 45 kV-40 mA, rango de escaneo 4-100° con un 0,017° 2 θ de ángulo de barrido y 50s de tiempo de medida).

Los análisis DRX se efectuaron mediante un difractómetro ubicado en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB). Para una correcta y necesaria interpretación de los diagramas de difracción, se ha trabajado con un software informático, el X'Pert HighScore Plus, que permite obtener una valoración semicuantitativa del contenido en los diferentes minerales.

8.2.4. Microscopía óptica

Se realizaron probetas pulidas de las diferentes muestras de mineralización tomadas del propio yacimiento y planta de procesamiento.

Las muestras se observaron en un microscopio petrográfico con luz reflejada (Nikon Eclipse E400 POL) del Laboratorio de Geología de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM), lo que permite identificar los diferentes minerales presentes en las probetas y observar las texturas que presentan.

8.2.5. Microscopía electrónica

El microscopio electrónico de barrido (en inglés; Scanning Electron Microscope – SEM) se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir del barrido de la misma con un haz de electrones como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra.

Los microscopios electrónicos de barrido pueden incorporar un detector de rayos X del tipo “dispersivo” en energía (en inglés; Energy Dispersive Spectrometer – EDS) que permite identificar cuáles son las energías de los rayos X emitidos por la muestra, para así, saber qué elementos químicos existen en dicha muestra. Debido a que permite trabajar con bajas corrientes de sonda, es un método muy poco destructivo, que lo convierte en imprescindible para el análisis semicuantitativo de cristales de tamaño de grano muy fino (menos de 1 μ m) incluso hidratados, y en muestras con texturas rugosas. Así pues, el microanálisis semicuantitativo mediante SEM-EDS se puede considerar una herramienta muy poderosa (Melgarejo et al., 2010).

Para al análisis de microscopía electrónica (SEM) se ha utilizado el Hitachi Tabletop Microscope TM-1000 que pertenece al Departamento de Ingeniería Minera, Industrial y TIC de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).

El TM-1000 utiliza un voltaje de 15 kV, un detector de electrones retrodispersados (en inglés; Solid State Backscattered Electron, BSE), una magnificación entre 80 – 10.000 X y tiene conectado un analizador EDS Bunker Quantax 50.

Asimismo, también se utilizó el microscopio electrónico ESEM Quanta 200 FEI, XTE 325-D8395 que funciona con electrones retro dispersados con un voltaje de 20 kV. Este microscopio pertenece a los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB).

8.2.6. Microanálisis mediante microsonda electrónica

La microsonda electrónica es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para el análisis químico puntual de minerales. La preparación de la muestra que se quiere analizar es similar al microscopio electrónico.

Para la determinación cuantitativa de la química mineral de ciertos materiales que contienen oro se utilizó la microsonda electrónica JEOL JXA-8230 que pertenece a los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB). Las condiciones del análisis fueron 25 kV, 20 nA, un diámetro de haz de 1 μm , y un tiempo de 10 s, excepto para el oro que fueron 4 minutos con lo que se obtuvo un límite de detección de 200 ppm (0,02%). Para una calibración externa se utilizaron estándares naturales y sintéticos. Los elementos analizados fueron S, Pb, Sb, Ag, Bi, As, Se, Au, Fe, Zn y Cu.

9. RESULTADOS

9.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS

A partir de los ensayos granulométricos (Figura 12), se puede observar que tanto en el material que sale del molino como en el concentrado y colas, el P50 se encuentra entorno a las 250 μm . En el concentrado, este es ligeramente superior, 310 μm mientras que las colas 270 μm .

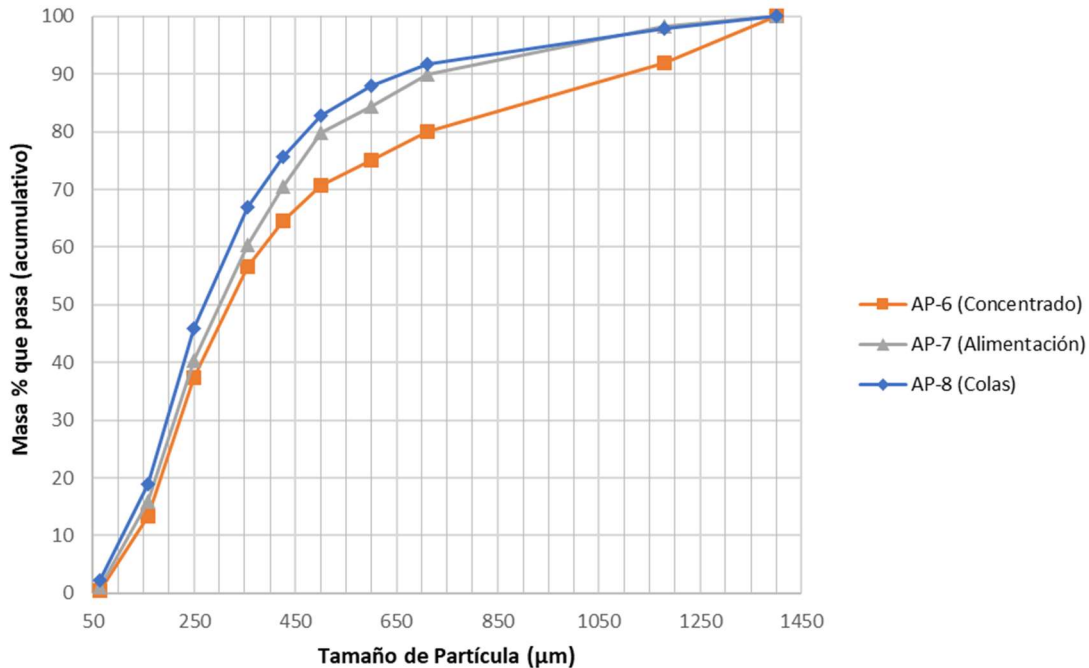


Figura 12. Distribución de tamaños de partículas de las muestras recogidas en planta.

9.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Tabla 1, se pueden identificar los resultados del análisis químico realizado para las diferentes etapas del material para averiguar el contenido de oro en estas.

Tabla 1. Contenido en oro de la alimentación y productos del procesamiento en la planta de Cotapata.

Material	Muestra	Tamaño de partícula	Contenido de Au (ppm)
Concentrado	AP-6	1,18 mm – 425 μm	263,00
		355 μm	120,00
		250 μm	104,50
		160 μm	139,50
		63 μm	305,00
Alimentación	AP-7	1,18 mm – 63 μm	29,10
Colas	AP-8	1,18 mm – 63 μm	18,85

La Tabla 1 anterior muestra altas concentraciones de oro en el material denominado como concentrado y con el que la cooperativa comercializa. Los porcentajes más elevados se encuentran en el tamaño de partícula más elevado y el más pequeño.

Por otro lado, las otras dos etapas del material analizado, la alimentación y las colas, revelan una menor cantidad de oro que el concentrado.

9.3. MINERALOGÍA

La alimentación de la planta de procesamiento se produce mediante el material que proviene de la mina. La mineralogía principal de ésta es el cuarzo que rellena las vetas en la explotación. También llegan cantidades menores de filosilicatos como la sericita y clorita. En cuanto a los minerales que forman las menas metálicas, constan principalmente de pirita y arsenopirita, así como en ocasiones, también se encuentran menores cantidades de esfalerita, galena y, todavía en menor proporción, calcopirita y oro nativo. Asimismo, conjuntamente con todo este material, existe evidencia de oro, que bien se puede presentar ocasionalmente de forma liberada o atrapado en ciertos sulfuros.

En los afloramientos de la mina, el oro puede llegar a verse a simple vista, ya que, muy ocasionalmente, puede llegar a tener un tamaño de incluso alrededor de 1 mm.

Respecto a la mineralogía del material concentrado, se basa en grandes concentraciones de sulfuros, es decir, pirita y arsenopirita. De todas maneras, también se pueden identificar pequeñas porciones de galena, esfalerita e incluso cuarzo. Finalmente, aquí, es dónde se albergan las mayores cantidades de oro.

En la Figura 13, se muestra una comparativa de la mineralogía presente en las diferentes granulometrías del material concentrado.

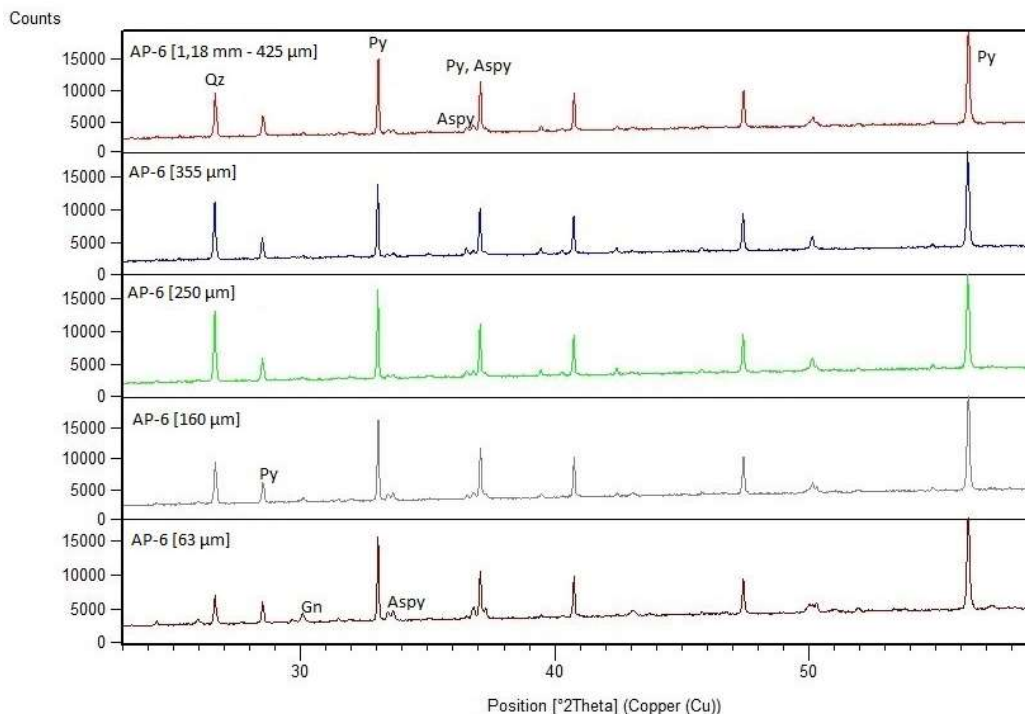


Figura 13. Diagramas de difracción de rayos X comparativos entre diferentes granulometrías del concentrado.

Se puede observar que, a mayores tamaños de partícula, existen concentraciones de cuarzo mayores, mientras que a medida que el tamaño disminuye la concentración también. Por otro lado, en granulometrías inferiores aparecen minerales ricos en galena y arsenopirita, es decir, a medida que aumenta el tamaño de grano, la cantidad de sulfuros se incrementa mientras que la de cuarzo disminuye. Respecto a la pirita, se mantiene constante en las diversas clasificaciones granulométricas. A continuación, en la Tabla 2 se ilustran los porcentajes cuantitativos y significativos de los diferentes minerales en cada muestra granulométrica.

Tabla 2. Variación de la composición mineralógica con la granulometría del concentrado, en % en peso.

Mineral	1,18 mm – 425 μm	355 μm	250 μm	160 μm	63 μm
Cuarzo	31	40	41	15	17
Pirita	33	35	32	63	37
Arsenopirita	26	16	17	15	33
Galena	-	-	1	1	1
Esfalerita	10	9	8	5	10

Por otro lado, en la Figura 14, muestra una comparación entre las colas del material procesado y el concentrado. En las colas, se puede identificar grandes cantidades de cuarzo, así como puntualmente cristales de arsenopirita. Por otro lado, el concentrado de mayor tamaño granulométrico muestra presencia de cuarzo, pero en menor cantidad.

Respecto al concentrado de menor tamaño de partícula, se pueden identificar galena y grandes cantidades de pirita y arsenopirita. Además, la esfalerita se encuentra sobre todo en las fracciones de tamaño de partícula más pequeño del concentrado.

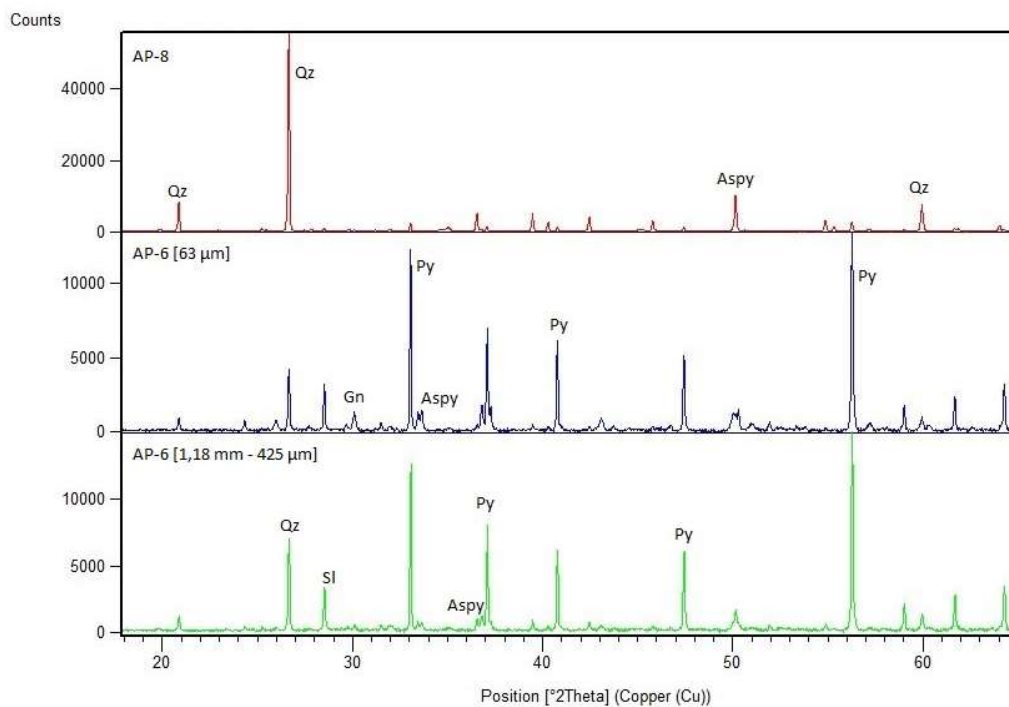


Figura 14. Diagramas de difracción de rayos X comparativos entre diferentes etapas del procesado.

La mineralogía de los materiales analizados revela una no-liberación de ciertos minerales. Especialmente en el caso del oro, se puede ver de forma muy clara. En la Figura 15, se puede observar un grano de oro atrapado y retenido por otros materiales, generalmente sulfuros como pirita y arsenopirita.

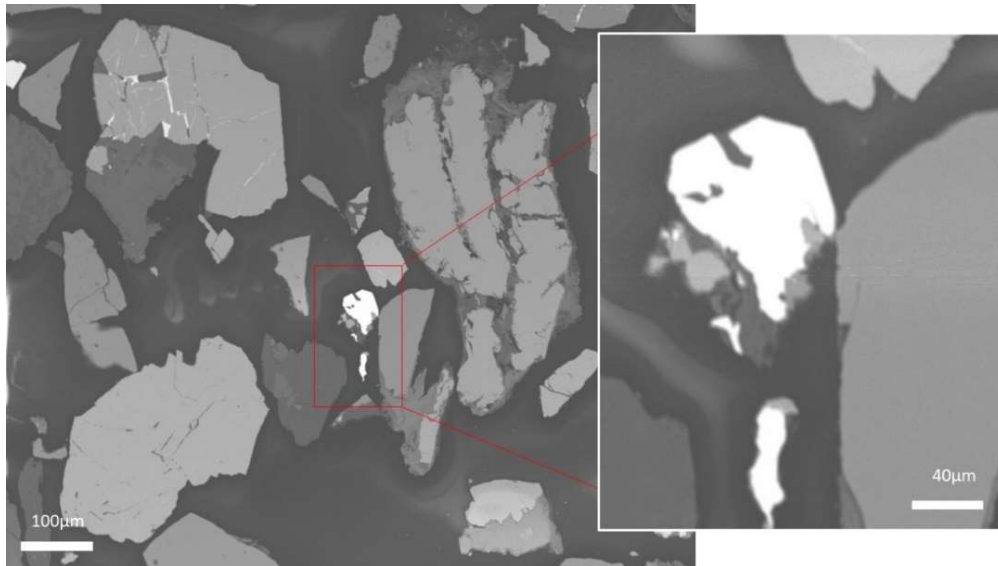


Figura 15. Imagen de un grano de oro parcialmente liberado y parcialmente rodeado por pirita y cuarzo.

La situación que se presenta en la Figura 15 no es siempre uniforme. A diferencia de este caso, en la Figura 17 se puede identificar un grano de oro completamente libre. En el yacimiento de Cotapata, se pueden encontrar las dos situaciones.

Otros minerales que contiene el depósito siguen con esta tendencia. A veces se pueden identificar de forma liberada, mientras que otras veces se encuentran retenidos o atrapados en otros minerales. En la Figura 16 se pueden identificar estas dos situaciones.

Por ejemplo, en la Figura 16A, se pueden identificar un grano de pirita liberado, así como otro de arsenopirita bastante fracturado, mientras que sin embargo en la Figura 16B, se observa un solo grano formado básicamente por pirita con diferentes fragmentos de arsenopirita alojados en el interior de la pirita.

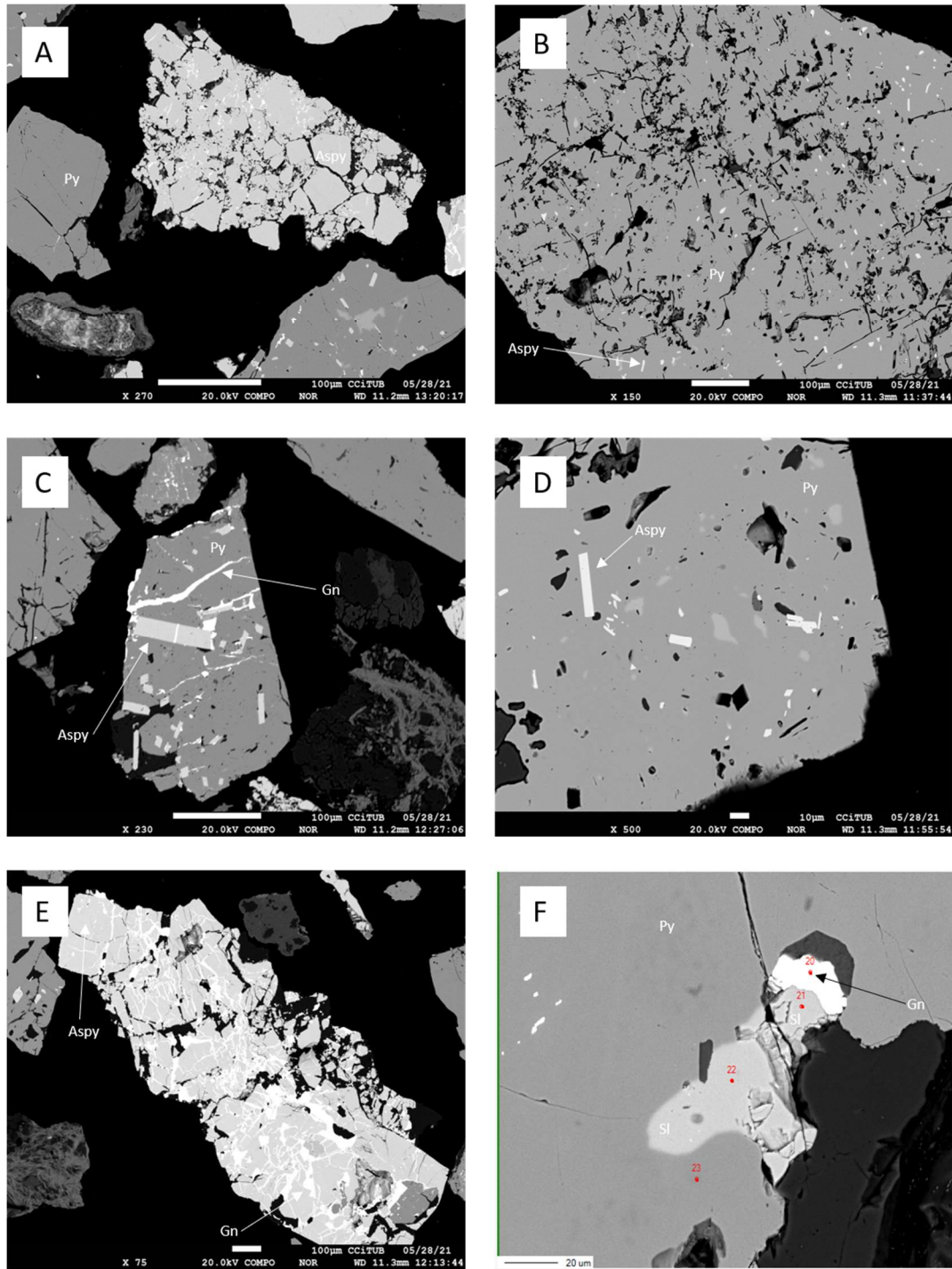


Figura 16. Imágenes de SEM que muestran diferentes minerales del yacimiento de Cotapata.
A) Granos de pirita y arsenopirita. B) Grano de pirita con inclusiones de arsenopirita. C) Pirita con inclusiones de galena y arsenopirita. D) Pirita con inclusiones de arsenopirita.
E) Arsenopirita con inclusiones de galena. F) Grano de pirita con acoplamiento de galena y esfalerita.



9.4. QUÍMICA MINERAL

A través de la microsonda electrónica, se obtuvieron las diferentes composiciones químicas de los sulfuros que aparecen en las Tablas 3 y 4. De forma inexplicable, en las composiciones obtenidas del análisis no se consiguieron los datos de proporciones de oro que se esperaban. De todas maneras, tal y como se ha observado en los análisis químicos (Tabla 1), existe la presencia de oro en las diferentes muestras. En los mapas composicionales (Figuras 18, 19 y 20) realizados en pirita y arsenopirita corroboran la presencia de oro en estos minerales.

A lo largo del presente trabajo, tal y como ya se ha mencionado anteriormente, con el objetivo de extender y aplicar los avances mineralógicos alcanzados con el yacimiento de Cotapata en otras zonas mineralógicas parecidas a la zona de estudio, se han añadido a modo de comparación datos de composiciones químicas de minerales metálicos de otros yacimientos minerales metálicos del cinturón Au-Sb.

Tal y como muestra la Tabla 3, los minerales principales que se presentan en el yacimiento de Cotapata son la pirita, arsenopirita, esfalerita y galena. Por lo que afecta a la pirita, los valores medios de hierro se encuentran varían entre el 45,60% y 46,77%, mientras que el azufre fluctúa entre el 52,14% y 53,54%. En este yacimiento el contenido de arsénico en la pirita puede estar comprendido entre el 0,00% y 0,13%, con un contenido medio de 0,08%.

Por otro lado, las proporciones de arsénico en la arsenopirita están entorno al 46-47%. En cuanto a minerales menos frecuentes comparativamente con los sulfuros mencionados anteriormente, como la galena, su contenido en plomo asciende hasta el 85,91% y acostumbra a estar entorno a este valor. Finalmente, respecto a la esfalerita, la proporción de media de zinc se encuentra en un 65%.

Los granos de oro encontrados muestran una composición media de un 0,20% de arsénico, 0,90% de azufre, 8% de plata y 90,90% de oro. Para un mayor detalle consultar la Figura 17 (A y B) y la Tabla 4.

Tabla 3. Composición química de los minerales metálicos presentes en el yacimiento de Cotapata.

Elementos	AP-6-1-1 Py	AP-6-1-2 Gn	AP-7-1-1 Py	AP-7-1-3 Aspy	AP-7-1-3 Py	AP-7-1-4 SI
S	52,90	12,88	52,77	20,79	53,54	32,52
Se	0,12	0,17	0,01	0,32	0,02	0,12
As	0,13	0,00	0,43	46,48	0,00	0,00
Sb	0,00	0,01	0,09	0,13	0,01	0,01
Fe	46,59	0,11	46,43	32,64	46,67	1,53
Zn	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	65,42
Cu	0,00	0,02	0,02	0,04	0,01	0,00
Ag	0,00	0,25	0,00	0,00	0,04	0,00
Pb	0,19	85,91	0,25	0,03	0,05	0,05
TOTAL	99,94	99,35	100,01	100,43	100,34	99,65

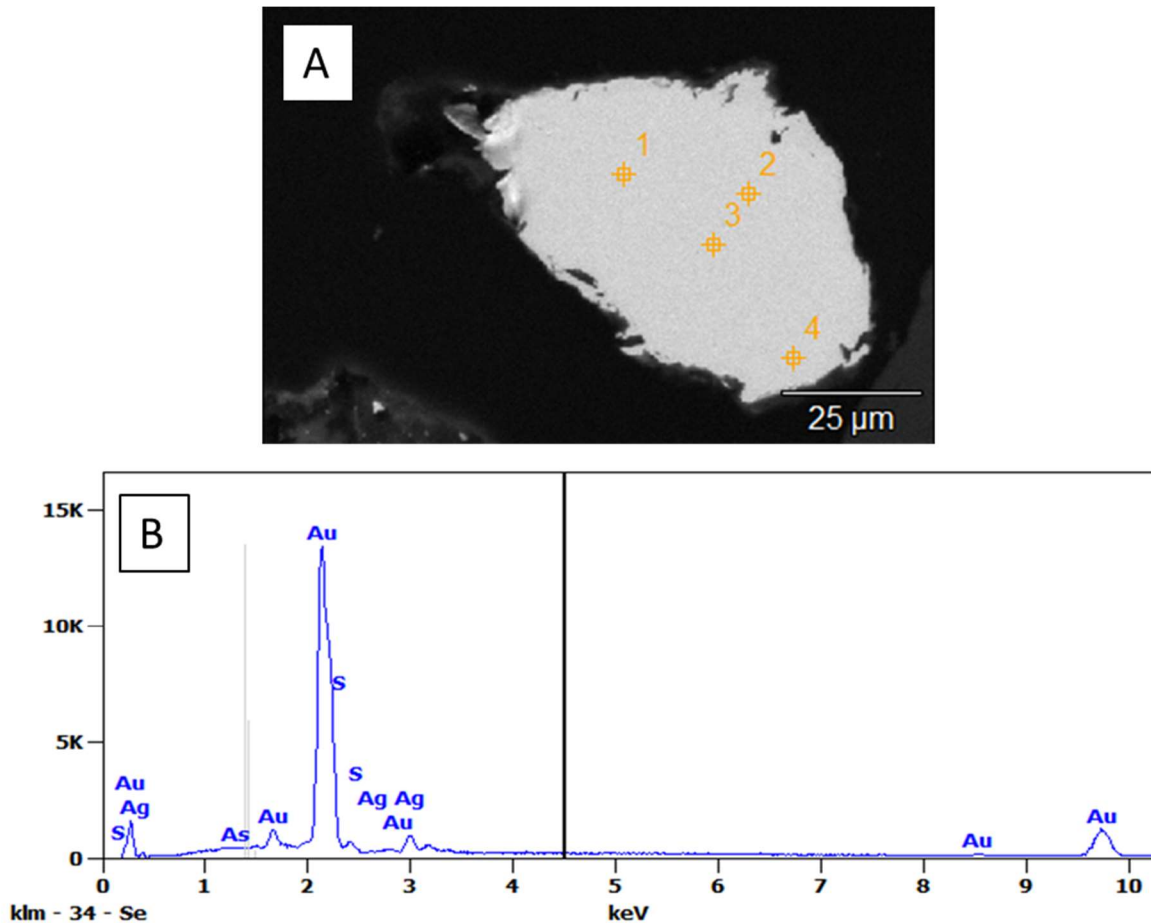


Figura 17. A) Imagen de SEM de un grano de oro del concentrado de Cotapata. B) Espectro EDS del mismo grano de oro.

Tabla 4. Composición química semicuantitativa del grano de oro de la Figura 16, en un grano presente en una muestra de concentrado. Resultados expresados en % en peso.

Muestra	S	As	Ag	Au
AP-6-1-9-1	0,85	0,32	8,06	90,77
AP-6-1-9-2	0,88	0,04	7,71	91,37
AP-6-1-9-3	0,99	0,20	8,38	90,44
AP-6-1-9-4	0,89	0,29	8,37	90,46

Asimismo, en la Tabla 5, los minerales principales de los otros yacimientos parecidos al de Cotapata son la pirrotina, pirita, calcopirita, arsenopirita y galena, tal y como se mencionaba anteriormente la mineralogía es parecida pero la proporción de esta puede fluctuar. En el caso del yacimiento de señor de mayo (SM), la pirrotina es mucho más abundante que la pirita, su composición entorno al hierro se encuentra entre el 57,32% y 59,45% y el azufre esta entre el 38,10% y el 39,19%. Respecto a flor de mayo (R), predomina la calcopirita con proporciones de cobre entorno al 34%.

Por otro lado, en el yacimiento 24 de setiembre (SEP), domina la presencia de pirita y arsenopirita. Respecto a la pirita, los valores de hierro se mueven entorno al 46% y al azufre 53,87%. Finalmente, los valores de arsénico en la arsenopirita fluctúan entre el 47,21% y 48,49%.

Tabla 5. Composición química de los minerales metálicos presentes en los yacimientos de 24 de septiembre (SEP), señor de mayo (SM) y flor de mayo (R).

Elementos	SM-1-4 Po	SEP-8-14 Py	SEP-9-1 Cpy	SEP-9-3 Py	SEP-9-4 Aspy	SEP-9-15 Gn	R10b-2 Cpy
S	38,43	53,87	34,36	53,06	20,54	11,62	34,90
Se	0,13	0,05	0,05	0,18	0,19	0,23	0,13
As	0,00	0,16	0,00	0,77	47,21	0,00	0,00
Sb	0,06	0,00	0,01	0,02	0,00	0,11	0,00
Bi	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,79	0,00
Fe	59,45	46,35	29,69	46,31	32,95	0,53	29,64
Zn	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,05
Cu	0,00	0,02	34,43	0,01	0,01	0,00	34,15
Ag	0,00	0,04	0,00	0,06	0,00	0,21	0,00
Pb	0,13	0,17	0,03	0,00	0,02	75,25	0,00
TOTAL	98,20	100,67	98,60	100,42	100,93	98,74	98,87

Las siguientes Figuras 18, 19 y 20, demuestran la evidencia de los elementos ya mencionados anteriormente y que forman parte de los minerales de la Tabla 4 referente a la composición química de los minerales metálicos del yacimiento de Cotapata.

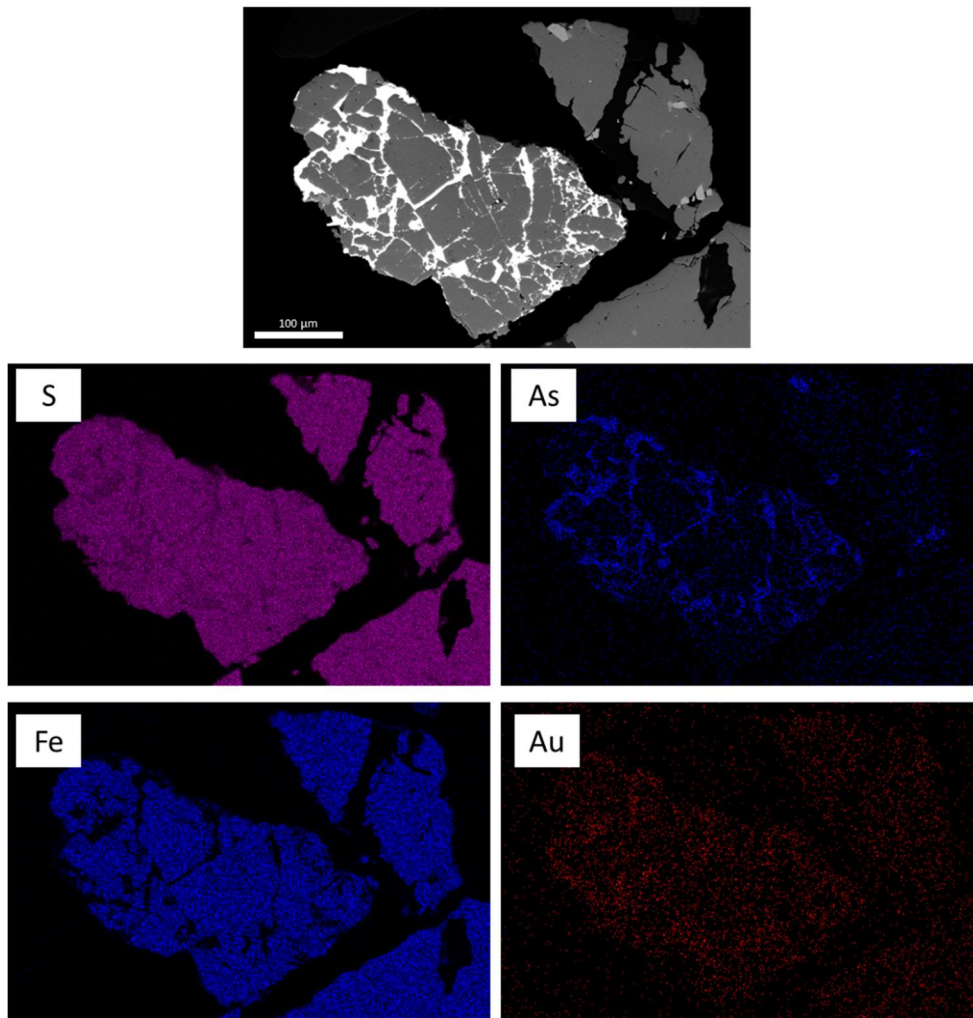


Figura 18. Mapa composicional de un grano de pirita y arsenopirita.

En la Figura 18 se puede identificar que la mayor parte del grano está formado por hierro y azufre, es decir, se trata de una pirita. Asimismo, también se encuentran pequeñas vetas de arsénico. Finalmente, en la parte derecha inferior de la imagen, se observa una repartición relativamente homogénea de oro a lo largo del grano.

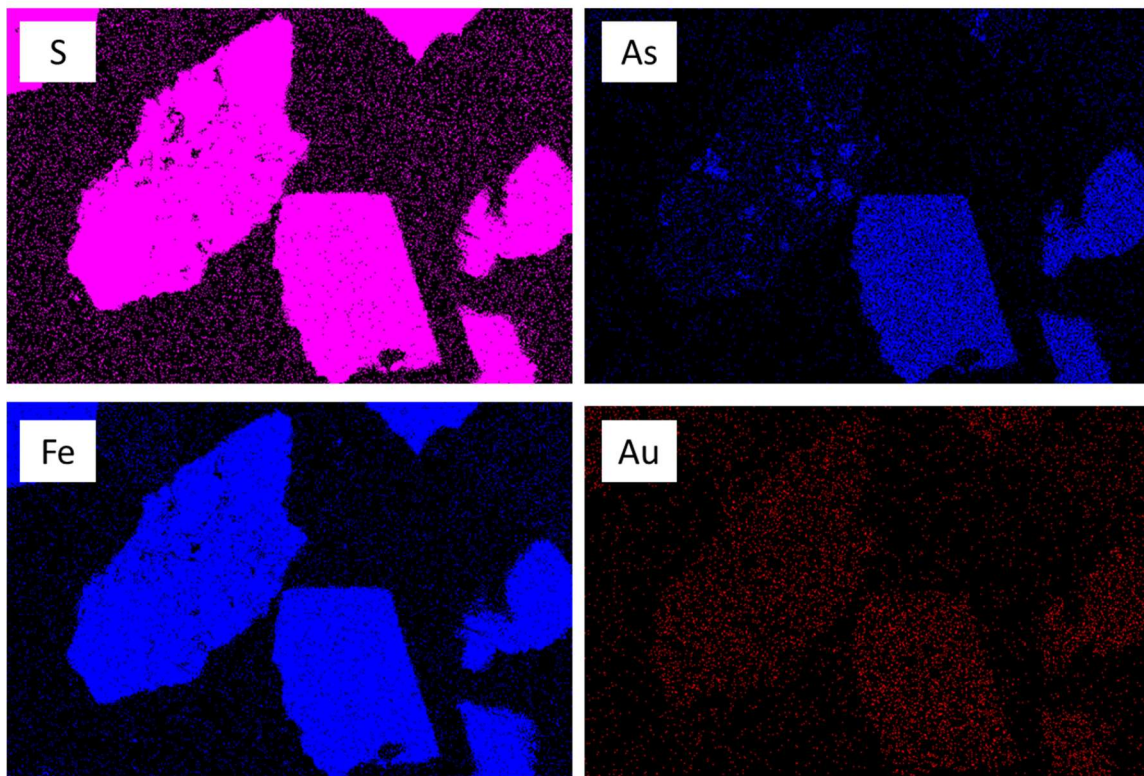
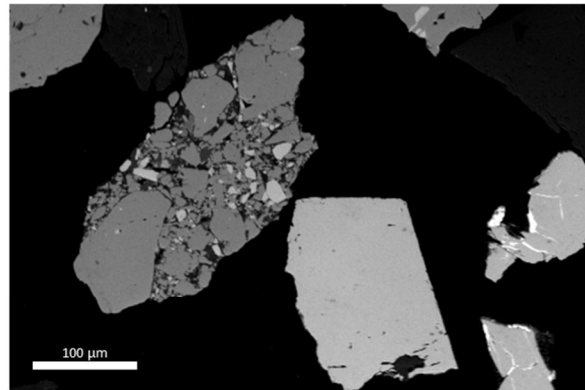


Figura 19. Mapa composicional de granos de pirita y arsenopirita.

Por otro lado, en la Figura 19 se pueden observar dos granos principales. En primer lugar, el de mayor tamaño y forma irregular, se trata de una pirita ya que muestra grandes cantidades de hierro y azufre. El segundo grano con una forma geométrica más parecida a un cubo y de menor tamaño que el anterior, es una arsenopirita. Igual que en la Figura 18, la repartición del oro es homogénea a lo largo de la imagen.

Finalmente, en la Figura 20, a diferencia de las anteriores, muestra un grano de oro totalmente liberado. En este mapa composicional, se identifica de forma notable la distribución total y homogénea del oro a lo largo del grano, así como evidencias de plata como elemento acompañante. Además, y de forma muy leve, existen trazas de arsénico en el grano. Por otro lado, se pueden observar otros tipos de grano que aparecen en la imagen, los cuales son sulfuros.

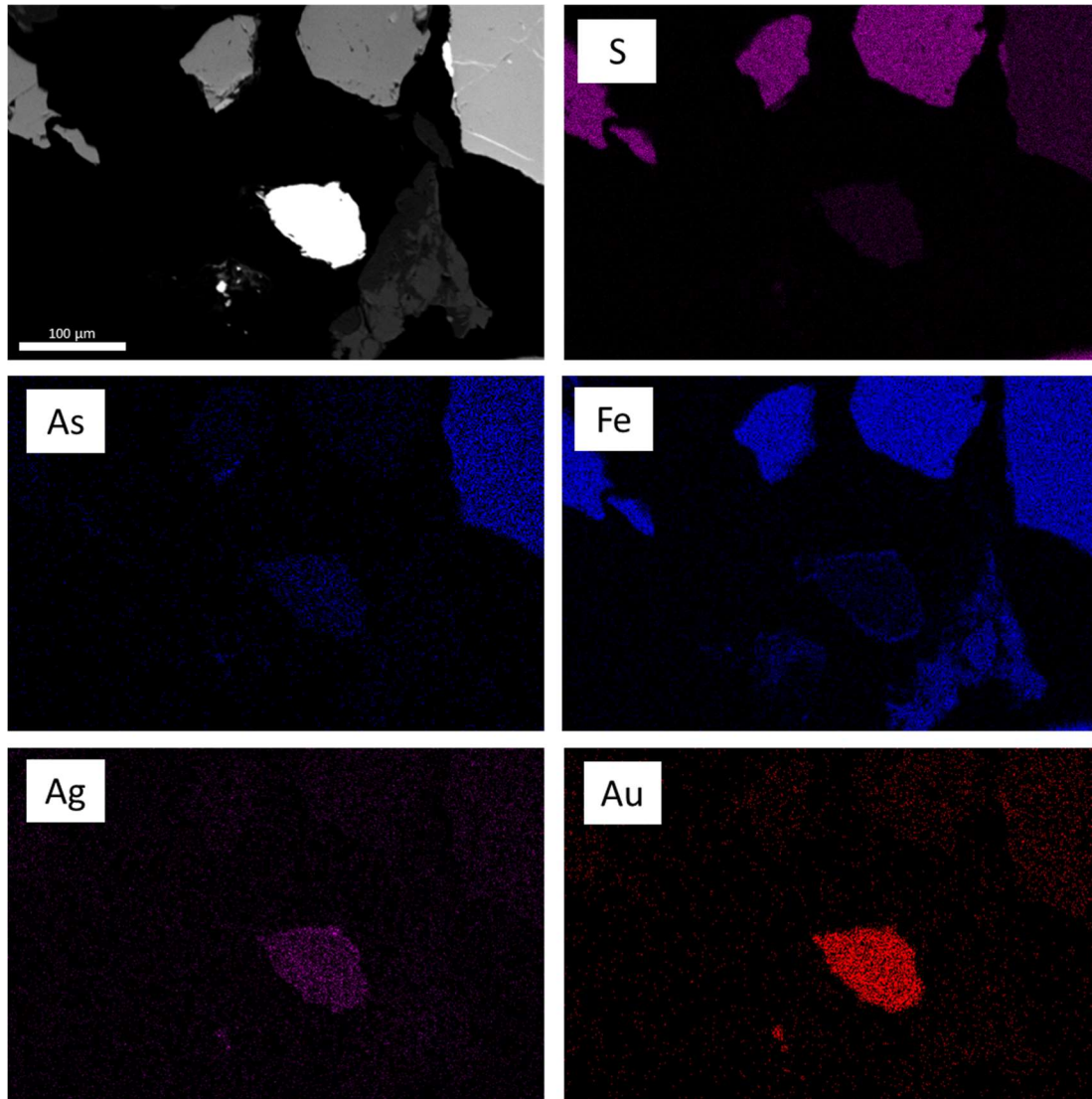


Figura 20. Mapa composicional de un grano de oro.

10. DISCUSIÓN

10.1. MINERALOGÍA DEL DEPÓSITO

La mineralogía de los depósitos minerales es un aspecto muy importante para entender los estudios de la génesis de los minerales, así como la investigación geometalúrgica que ayuda a aumentar la recuperación del oro en su procesamiento (Chryssoulis et al., 2005). Los valores presentados anteriormente, muestran una gran riqueza y uniformidad mineralógica del depósito. Tal y como se ha observado anteriormente, el yacimiento presenta grandes cantidades de oro. Des del punto de vista mineralógico, este oro es del tipo refractario o complejo, el cual se define como aquel que se encuentra bloqueado o retenido en sulfuros y que a la vez su procesamiento es más difícil y costoso que otras categorías de oro (Vaughan, 2004).

El oro puro es muy raro o difícil de encontrar en la naturaleza (Harris, 1990). En el yacimiento objeto de estudio, este tipo de oro refractario se suele presentar de dos formas distintas; visible e invisible. Respecto al primer grupo, es aquel tipo de oro que tal y como se ha visto en las Figuras 15 y 17, se puede identificar de forma visual, ya sea con el ojo humano o con diferentes técnicas analíticas. Este tipo, se puede presentar totalmente liberado y en forma de grano (Figura 17), o retenido parcialmente por diversos sulfuros (Figura 15).

Por otro lado, el concepto de “oro invisible” se centra en la idea que el oro actúa como sustitución de algunos elementos que forman los sulfuros, además no es detectable mediante microscopía óptica o SEM (Cook, et al., 1990). La incorporación del oro hacia estructuras de sulfuros ha quedado definida por diferentes investigaciones (Boyle, 1979). En la mayoría de depósitos de bajo grado, no todo el oro se presenta de forma nativa en granos liberados, es más, la mayor parte se presenta como “oro invisible” en sulfuros, particularmente en pirita y/o arsenopirita (Large et al., 2020). En el caso de la cooperativa objeto de estudio, las proporciones más elevadas de oro se han hallado con la pirita y arsenopirita, de hecho, existe una correlación directa entre la cantidad de pirita y arsenopirita sobre la cantidad en oro (Figura 21). Para llegar a un procesamiento exitoso de este tipo de oro tan dificultoso, únicamente existe un camino, estudiar y entender la mineralogía del “oro invisible” en el depósito mineral, así como su distribución en los sulfuros (Cook, et al., 1990).

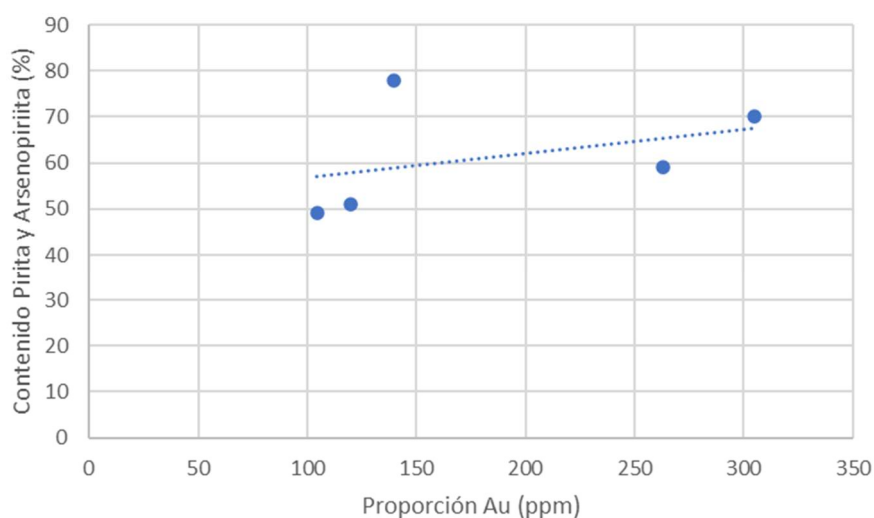


Figura 21. Correlación entre el contenido de arsenopirita + pirita y el contenido en oro del concentrado de la Cooperativa Aurífera de Cotapata.



Tal y como se ha observado anteriormente (Figura 21), existe una clara correlación entre el contenido de pirita y arsenopirita con el contenido de oro. Esta correlación es muy buena para cuatro de los puntos, teniendo un R de 0,90. Esto, evidencia el hecho que el oro se suele encontrar dentro de la mineralogía de estos sulfuros. También, prueba que la mayoría de oro que se encuentra en el yacimiento es de este tipo, el comúnmente llamado oro orogénico o “oro invisible”, y que por lo tanto es mucho menos frecuente encontrarlo de forma totalmente liberada.

10.2. LIBERACIÓN DE PARTÍCULA

A partir de los estudios granulométricos realizados de los materiales de la planta de procesamiento de la Cooperativa Aurífera de Cotapata se ha deducido una mala praxis en cuanto a la reducción de partícula del material que proviene de mina. Tal y como se observaba en la Figura 12 tanto el material que sale del molino como en el concentrado y colas, el P50 se encuentra entorno a las 250 μm . En el concentrado, este es ligeramente superior, 310 μm mientras que las colas 270 μm . En cambio, las partículas de oro observadas tienen un tamaño aproximado de 40 μm .

Uno de los principales motivos por los que la Cooperativa Aurífera de Cotapata pierde buena parte del producto de interés económico, el oro, recae en el tamaño de liberación de partícula. A modo de comparación, en la Figura 22, se puede identificar diversos análisis granulométricos de diferentes plantas de procesamiento ubicadas en Perú que al igual que en la cooperativa objeto de estudio, extraen oro. A diferencia de la Figura 12, en la Figura 22 el P50 se encuentra entorno a las 20 μm .

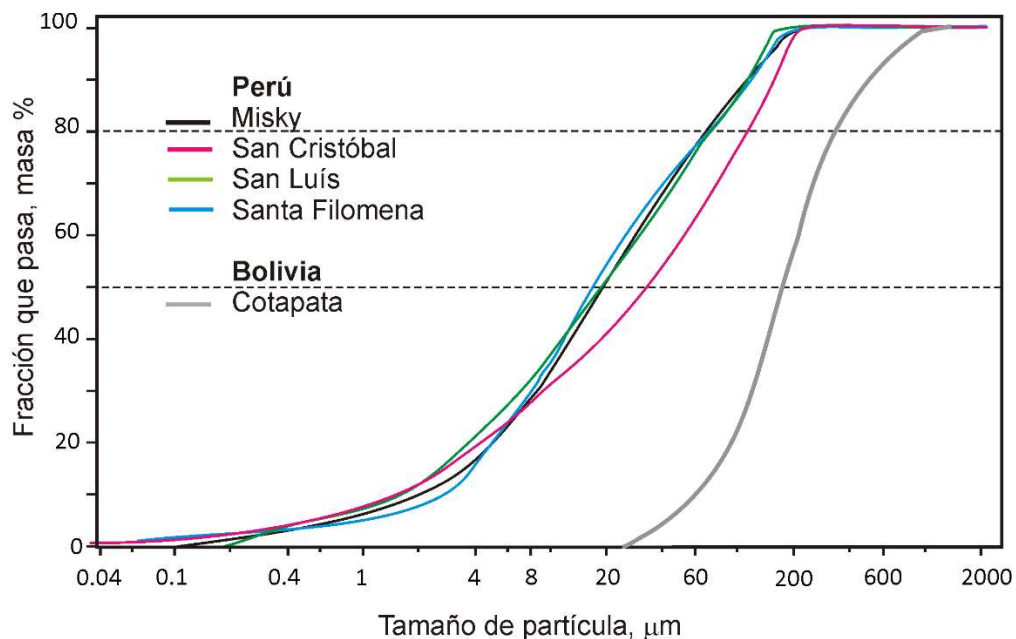


Figura 22. Distribución de tamaños de partículas de las diferentes cooperativas mineras parecidas a la Cooperativa Aurífera de Cotapata.

Las diferentes cooperativas que aparecen en la Figura 22, desarrollan de forma notable las diferentes etapas de procesamiento, así como disfrutan de una correcta recuperación del mineral. Así pues, para una correcta recuperación del oro en la Cooperativa Aurífera de



Cotapata, se debe revisar y mejorar el sistema de procesamiento actual, centrándose en solucionar los problemas que presentan en cuanto a la fragmentación del material.

Por último, es necesario mencionar que la mayoría del oro observado en el presente estudio, se ha hallado en el denominado “concentrado de pirita”, donde el tamaño granulométrico es más inferior.

10.3. ALTERNATIVAS AL PROCESAMIENTO ACTUAL

El objetivo o reto de la industria metalúrgica es encontrar una mejor manera de procesamiento que a la vez sea poco costosa, que active el oro que se encuentra adjunto a los sulfuros para que pueda ser minado y procesado de forma económicamente positiva (Vaughan, 2004).

El proceso que sigue la cooperativa a día de hoy sigue siendo poco rentable. Es necesario adoptar métodos de procesamiento libres de mercurio (Esdaile et al., 2018).

Para mejorar la recuperación del oro que se encuentra dentro de la pirita o arsenopirita, se debería desarrollar e implementar un sistema de digestión de los sulfuros, ya sea un proceso basado en la biolixiviación o incluso cianuración. Estas dos técnicas, permiten la separación de los dos elementos, oro y sulfuros, mediante el uso de productos químicos.

Estas dos alternativas, suelen ser una manera de separar el oro de forma eficaz y no contaminante, siempre y cuando se desarrollen de forma correcta y segura. Previamente a la implementación de estas opciones, es necesario realizar una revisión de los tamaños de partícula que salen del molino. De hecho, sin una fragmentación correcta, la aplicación de estas dos alternativas no tiene sentido, ya que para que se apliquen de manera efectiva necesitan tamaños de partícula muy por debajo de los actuales.

11. CONCLUSIONES

La minería artesanal del oro en Bolivia convive en un contexto donde las condiciones de vida y laborales de sus trabajadores son muy duras y precarias. Teniendo en cuenta la riqueza y variedad mineralógica del país, se evidencia un gran contraste en cuanto a las formas de extracción del mineral, así como en el procesamiento mineral, las cuales destacan principalmente por ser rudimentarias y sin demasiados conocimientos técnicos. Por consecuencia, el rendimiento de extracción de las menas minerales tiene una rentabilidad económica muy por debajo de su potencial. Para solucionar este alarmante problema, es necesario un soporte técnico directo que cuente con el apoyo y subvención de los respectivos gobiernos y asociaciones, así como con la ayuda científica y técnica de organizaciones sin ánimo de lucro y convenios con universidades de todo el mundo.

En la actualidad, la Cooperativa Aurífera de Cotapata se centra en la extracción del oro, pese a ello, el producto con el que comercializa se denomina “concentrado de pirita” que es dónde se aloja la mayor cantidad de oro. Los resultados del estudio mineralógico muestran una clara evidencia de diferentes series mineralógicas del grupo de los sulfuros en el yacimiento, principalmente se encuentra mucha pirita y arsenopirita, así como galena, esfalerita y puntualmente pequeñas proporciones de plata. A nivel mineralógico, las mayores cantidades de oro se han encontrado adjuntas con pirita y arsenopirita, es por eso que existe una correlación directa entre el contenido de sulfuros y de oro. Pese a los inconvenientes que han surgido durante el uso de la microsonda, se han podido observar diferentes granos de oro mediante el SEM-EDS, los cuales la mayoría de ellos no se encontraban de forma liberada ya que quedaban retenidos con los sulfuros.

Con el presente trabajo, se ha podido demostrar la presencia de altos contenidos de oro en los sulfuros presentes en el yacimiento, pese a ello, la rentabilidad de la explotación y del procesamiento se halla muy lejos de ser óptima.

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, la distribución granulométrica del material que sale del molino no es la adecuada para optimizar al máximo el procesamiento mineral y es por ello que se pierden grandes cantidades de mena. Es necesario reducir aún más el tamaño de partícula para poder concentrar mejor el material. Se recomienda una revisión exhaustiva de la actividad minera para revisar de nuevo su eficacia e introducir cambios que permitan a la cooperativa aumentar el rendimiento y eficacia de la explotación y procesamiento mineral.

Por otro lado, se ha podido observar dónde se suele concentrar más el oro. En este caso, en el comúnmente llamado “concentrado de pirita” las proporciones más elevadas de oro se encuentran en los tamaños de partícula más elevados, 263 ppm, y más pequeños, 305 ppm. En cambio, en el material que denominan como “colas”, tiene una proporción de 18,85 ppm.

Finalmente, destacar qué la cooperativa utiliza mercurio en ciertas etapas del procesamiento. Pese a conocer los peligros de utilizar este producto siguen sin hacer caso a las advertencias, además su uso en esta actividad minera no está ni justificado ni se aplica siguiendo ningún principio físico-químico.

En último lugar, se remarca la necesidad de realizar futuros proyectos con el objetivo de revertir la situación que la minería artesanal vive en países en vías de desarrollo, así como con la finalidad



de crear una actividad minera responsable y sostenible que esté integrada con la sociedad y respete el medio ambiente.



REFERENCIAS

- Alfonso, P., Anticoi, H., Yubero, T., Bascompta, M., Henao, L., García-Valles, M., Palacios, S., Yáñez, J. 2019. The importance of Mineralogical Knowledge in the Sustainability of Artisanal Gold Mining: A Mid-South Peru Case. *Minerals*. 9, 345, 1-20.
- Arce-Burgoa, O. 1999. Sediment-hosted gold mineralization at Pederson (San Bernardino) project, Bolivia. *Bolivia Mining Conference*, Santa Cruz, Bolivia, 1999, 10 p.
- Arce-Burgoa, O. 2002. Potencial geológico-minero de Bolivia: Memorias del XV Congreso Geológico Boliviano, Santa Cruz, Bolivia. *Revista Técnica de YPF*, 20, 18–24.
- Arce-Burgoa, O., 2007, *Guía a los Yacimientos Metalíferos de Bolivia*.
- Arce-Burgoa O., Goldfarb R. J. 2009. Metalogenia de Bolivia. *Society of Economic Geologists*, 79, EE.UU.
- Boyle, R.W. 1979. *The geochemistry of gold and its deposits*. Geological Survey, 280.
- Calas, G. 2017. Mineral Resources and Sustainable Development. *Elements* 13, 301-306.
- Campbell, B. 2007. The challenges of development, mining codes in Africa and corporate responsibility. Disponible en: http://migs.concordia.ca/workshop/MIGS_Campbell_Feb07.pdf Consultado el 17 de marzo de 2021.
- Chryssoulis, S.L., McMullen, J. 2005. Mineralogical investigation of gold ores. *Dev. Miner. Process.*, 15, 21– 71.
- Cook, N.J., Chryssoulis, S.L. 1990. Concentrations of “Invisible Gold” in the common sulfides. *Canadian Mineralogist* 28, 1-16.
- Costa, M. 2009. La minería del oro y su proceso de tratamiento en el asentamiento minero artesanal de Misky, Perú. Trabajo Final de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa.
- De Haan, S., Zimmerer, K. S., Jones, A. D., Creed-Kanashiro, H., Tello, M., Amaya, F. P., Hultquist, C. 2020. Indigenous smallholder struggles in Peru: Nutrition security, agrobiodiversity, and food sovereignty amid transforming global systems and climate change. *Journal of Latin American Geography*, 19(3), 74-111.
- Dill, H.G. 1998. Evolution of Sb mineralisation in modern fold belts: a comparison of the Sb mineralisation in the Central Andes (Bolivia) and the Western Carpathians (Slovakia). *Miner. Deposita* 33, 359 – 378.
- EPA, 2011. Reducing mercury pollution from gold mining. Disponible en: <http://www.epa.gov/oia/toxics/asgm.html>. Consultado el 12 de marzo de 2021.

- Esdaile, L., Chalker, J.M. 2018. The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chem. Eur. J.* 24, 6905–6916
- Freixas, A. 2016. Mejora integral de la minería del oro a pequeña escala, Bolivia. Trabajo Final de Máster. Escuela Politècnica Superior de Ingeniería de Manresa.
- Fornari, M., Hérail, G. 1991. Lower Paleozoic gold occurrences in the 'Eastern Cordillera' of Southern Peru and Northern Bolivia: A genetic model. Balkema, Rotterdam. ISBN 9061911958.
- Ghose, M.K., Roy, S. 2005. Contribution of Small-Scale Mining to Employment, Development and Sustainability – An Indian Scenario. *Environment, Development and Sustainability* 9, 283-303.
- Haerberlin, Y., Moritz, R., Fontboté, L. 2002. Paleozoic orogenic gold deposits in the eastern Central Andes and its foreland, South America. *Ore Geology Reviews*. 22, 41-59.
- Harris, D.D. 1990. The Mineralogy of gold and its relevance to gold recoveries. *Miner. Deposita* 25, S3–S7.
- Hickie, D. and Wade, M. 1998. Development of guidelines for improving the effectiveness of environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 18, 267–287.
- Hilson, G. 2008. 'Fair trade gold': antecedents, prospects and challenges. *Geoforum* 39 (1), 386–400.
- IGF (Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development). 2017. Global Trends in Artisanal and Small-Scale Mining (ASM): A Review of Key Numbers and Issues; The International Institute for Sustainable Development: Winnipeg, MB, Canada.
- Kondo, S. 2002. Foreign direct investment and the environment: lessons from the mining sector. In: Ruffing, K., Witherell, W., Burgeat, E. (Eds.), *Foreign Direct Investment and the Environment*, the Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Kumah, A., 2005. Sustainability and gold mining in the developing world. *Journal of Cleaner Production* 14, 315-323.
- Large, R.R., Maslennikov, V.V. 2020. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits. *Minerals* 10, 1-21.
- Lehrberger, G. 1992. Metallogenese von Antimonit – Gold – Lagerstätten in marinen Sedimenten der Ostkordillere Boliviens. München. *Geol. Hefte* 6.



- López, D.J. 2017. Problemas derivados de la recuperación de oro mediante amalgamación con mercurio en la cooperativa 24 de setiembre, Bolivia. Trabajo Final de Máster. Escuela Politècnica Superior de Ingeniería de Manresa.
- Melgarejo, J.C., Proenza, J.A., Galí, S. Llovet, X. 2010. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 62 (1), 1-23.
- Pavilonis, B., Grassman, J., Johnson, G., Diaz, Y., Caravanos, J. 2017. Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes. Environmental Research 154, 1-9.
- Pimentel, B.S., Santibañez, E., Barbosa, G. 2015. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. Journal of Cleaner Production. 112, 2145-2157.
- Poulin, J., Gibb, H., Prüss-Üstün, A., 2008. Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels.
- RCS Global. 2016. STATE GOLD-BUYING PROGRAMMES: Effective Instruments to Reform the Artisanal and Small-scale Gold Mining Sector. International Institute for Environment and Development.
- Ribera, M., Morales, C.B. 1995. Caminos de Cotapata. Instituto de Ecología, La Paz.
- Seccatore, J., Veiga, M., Origliasso, C., Marin, Tatiane, M., De Tomi, G. 2014. An estimation of the artesanal small-scale production of gold in the world. Science of the Total Environment 496, 662-667.
- Tistl, M., 1985. Die Goldlagerstätten der nordlichen Cordillera Real/Bolivien und ihr geologischer Rahmen. Berl. Geowiss. Abh. 65 102 pp.
- UNEP. 2010.— United Nations Environment Programme Proceeding of Inception Workshop: Strategic Planning for Artisanal and Small-scale Gold Mining in Asia, 19–21 January 2010, Pasig City, Philippines.
- Vaughan, J.P. 2004. The process mineralogy of gold: the classification of ore types. Gold process mineralogy part 1. Jom 56 (7), 46-48.
- Velásquez-López, P.C., Veiga, M.M., Hall, K., 2010. Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. Journal of Cleaner Production. 18 (3), 226–232.
- Zolnikov, T., Ramirez, D. 2018. A systematic review on the management and treatment of mercury in artisanal gold mining. Science of the Total Environment 633, 816-824.