

# **POBLEMÀTICA ASOCIADA AL USO DEL MERCURIO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA MINERÍA ARTESANAL DE CHÁPARRA, SUR DE PERÚ**

*Autor: Juan Alberto Yáñez González*

*Tutora: Pura Alfonso Abella*

*Titulación: Máster en Ingeniería de los Recursos Naturales*

*Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa*

Manresa, 11 de Enero de 2013

## RESUMEN

Cháparra es un pueblo del sur de Perú cuya actividad principal es la minería artesanal del oro. El yacimiento que se explota en este lugar es un depósito de óxidos de hierro, cobre y oro de tipo IOCG (*Iron-Oxide Copper Gold deposit*). La mena de oro es procesada mediante el uso de mercurio, el cual se añade durante la trituración y molienda de la roca en molinos artesanales, obteniendo una amalgama de oro (mercurio + oro) por un lado y colas residuales por el otro. Esta amalgama es concentrada, eliminando el exceso de mercurio, y quemada al aire libre o en espacios preparados para ello (retortas). Al quemar esta mezcla, el mercurio se evapora y se obtiene el oro que finalmente es vendido. Parte del mercurio es condensado y recuperado, por lo que es aprovechado de nuevo, pero otra parte va directamente a la atmósfera.

Además, la manipulación del mercurio produce efectos adversos sobre la salud de las personas. Las vías por las que entran en contacto con el mercurio son: (1) la inhalación de los vapores durante la quema de la amalgama o durante el funcionamiento de los molinos sin protección; (2) el contacto dérmico por su manipulación sin protección de guantes; y (3) su ingesta, a través del consumo de pescado y/o por beber agua contaminados por mercurio.

Se han muestreado las rocas de las vetas que contienen la mena de oro del yacimiento de Cháparra y las colas tras su procesado. Las vetas han sido estudiadas con el fin de determinar el tipo de mineralización y alteración presente en este tipo de depósito (IOCG), así como la ley de oro presente. Por otro lado, las colas han sido analizadas para determinar: (1) la eficiencia del mercurio para recuperar el oro comparando las leyes entre mena y cola; y (2) para definir la pérdida de mercurio y otros metales que aún permanecen en las colas, ya que son fuente de contaminación de suelos y por ende el resto del medio ambiente (aguas, aire, etc.).

La mineralogía de las muestras ha sido determinada mediante difracción de polvo de rayos X y microscopía óptica y electrónica (SEM). Los análisis de oro y de metales pesados han sido realizados mediante INAA (*Instrumental Neutron Activation Analysis*) y AR-ICP (*Aqua Regia – Inductively Coupled Plasma*).

El oro del yacimiento de Cháparra se encuentra en los óxidos de hierro (hematites), en el cuarzo y los sulfuros (pirita, covellita) de las vetas. A parte de oro se han encontrado otros minerales que caracterizan los depósitos IOCG, como monacita, uraninita, bismuto nativo, plata, gran variedad de sulfosales, y otros sulfuros como la pirrotina, arsenopirita, galena y esfalerita. La alteración que se ha encontrado en las vetas es principalmente clorítica, sericítica, albítica, argílica avanzada, además de otros minerales supergénicos como yeso y escorodita.

Las leyes de oro en el yacimiento son de  $>30$  g/t. Éstas, en el caso de las colas aún son elevadas, entre 5,28 y  $>30$  g/t, demostrando así la baja eficiencia del mercurio como recuperador del oro. Además, las concentraciones de metales en las colas han dado unos valores muy elevados, superando los límites de contaminación considerados como peligrosos para los suelos. Los límites para el Hg y el As son 10 y 50 ppm, respectivamente; mientras que las concentraciones en las colas para el Hg se encuentran entre 49 y 324 ppm y para el As entre 209 y 727 ppm. Mientras que para otros elementos potencialmente tóxicos como el Cd, Zn, Pb y Cu exceden los límites solamente en ciertos casos.

**Palabras clave:** Mercurio, Amalgama, Minería artesanal, Oro, Depósito IOCG, Colas residuales, Contaminación, Perú

## ABSTRACT

Chaparra, southern Peru, is an artisanal gold mining locality. Here gold is exploited in an Iron-Oxide Copper Gold deposit (IOCG). The gold ore is processed by the use of mercury, which is added during the crushing and milling of rocks on artisanal mills. In this process, a gold amalgam (mercury + gold) is obtained, on one side, and a residual tailing on the other. For gold recovering, this amalgam is burned in the open air or in a prepared space for it (retort). Mercury is evaporated and the gold is obtained, ready to be sold. Some of the mercury is condensed and recovered, to be used again, but another part goes directly to the atmosphere.

Furthermore, manipulation of mercury produces adverse effects on human health. The pathways in which they come into contact with mercury are: (1) vapour inhalation during burning of amalgam or during the process of amalgamation on the artisanal mills without protection; (2) skin contact without protective gloves; y (3) intake through the consumption of fish and/or drinking mercury-contaminated water.

On one side, rocks from veins which contain the gold ore and tailings, obtained after the processing, have been sampled. The veins have been studied in order to determine the type of mineralization and the present alteration in this type of deposit (IOCG), as well as the gold grade. On the other side, the tailings have been analyzed to determine: (1) the efficiency of mercury to recover the gold, comparing the grades between ore and tailing, and (2) the loss of mercury and other metals that still remain in the tailings, because they are a source of soil contamination and therefore the rest of the environment (water, air, etc.).

The mineralogy from the samples has been determined by X-ray powder diffraction and optical and scanning electron microscopy (SEM). Analyses of gold and heavy metals have been performed by INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) and AR-ICP (Aqua Regia – Inductively Coupled Plasma).

Gold from the Chaparra deposit is located into iron-oxides (hematite), in quartz and sulfides (pyrite, covellite). Besides gold, other minerals that characterize this IOCG deposit are monazite, uraninite, native bismuth, silver, a wide variety of sulfosalts, and other sulfides such as pyrrhotite, arsenopyrite, galena and sphalerite. The alteration found is mainly chloritic, sericitic, albitic, advanced argillic, and other supergene minerals like gypsum and scorodite.

The gold grades from the deposit are >30 g/t. The grades in the case of the tailings are still high, between 5.28 and >30 g/t, demonstrating the low efficiency of mercury recovering gold. In addition, concentrations of metals in the tailings are very high, exceeding pollution limits considered hazardous for soils. The limits are 10 and 50 ppm for Hg and As, respectively; as the grades into the tailings are 49-324 ppm for Hg and

209-727 ppm for As. Whereas other potentially toxic elements, such as Cd, Zn, Pb and Cu, exceed the limits only in certain cases.

**Keywords:** Mercury, Amalgam, Artisanal mining, Gold, IOCG deposit, Tailings, Contamination, Peru

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no hubiera sido posible sin la oportunidad que me brindó la ONG *Minería Para el Desarrollo* (MPD) de participar en el proyecto de cooperación "*Contribución para la sostenibilidad de la pequeña minería del sur del Perú*". Del mismo modo les doy las gracias a todos los miembros de MPD, especialmente Silvia y Eva que me acompañaron y me ayudaron durante una parte de mi estancia en Perú, y en particular a Roger, con quien conviví durante algo más de un mes y me ayudó a realizar el muestreo en Cháparra.

A la contraparte de Perú formada por *Red Social* y *SONAMIPE*, de quienes guardo en el recuerdo, por su continua colaboración y apoyo para el desarrollo de los proyectos de cooperación, que durante los últimos años MPD ha llevado a cabo.

Al *Centro de Cooperación para el Desarrollo* (CCD) sin cuya contribución económica no hubiera sido posible la elaboración de este proyecto de cooperación y como consecuencia el presente trabajo.

A mi tutora Pura Alfonso, con quien sigo aprendiendo, por su apoyo e implicación durante el desarrollo del actual trabajo.

A mi familia, dándome su apoyo y su fuerza para el desarrollo de mi trabajo, especialmente mi madre que ha estado y está, desde la distancia, a mi lado.

A mis amigos, tanto las nuevas amistades cosechadas en Manresa, que me ayudaron a mi llegada, como los viejos amigos de la infancia que aún conservo, por interesarse en el desarrollo de mi nueva etapa en Manresa.

A mi pareja Cinthia, que en los momentos más difíciles del desarrollo del trabajo me supo animar y ver el lado positivo de las cosas.

## PREFACIO

El presente trabajo está englobado en el proyecto de cooperación “*Contribución para la sostenibilidad de la pequeña minería del sur del Perú*” que ha tenido lugar en distintos pueblos mineros del sur de Perú, entre ellos Cháparra, a lo largo de los meses de junio y agosto de 2012. Ha sido desarrollado por la ONG *Minería Para el desarrollo* (MPD), con el apoyo del *Centro de Cooperación para el Desarrollo* (CCD) y la contraparte de Lima, formada por *Red Social* y *SONAMIPE* (antigua *AMASUC*).

El proyecto de cooperación ha tratado de aportar conocimientos a los mineros artesanales para mejorar el rendimiento de sus actividades mineras, proponer métodos de extracción efectivos desde el punto de vista tanto económico como medioambiental, contribuir para la formalización de los mineros ilegales, etc.



## ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	6
PREFACIO.....	7
MEMORIA.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. OBJETIVOS.....	12
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	13
2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA .....	13
2.2. GEOGRAFÍA FÍSICA.....	14
2.2.1. RELIEVE .....	14
2.2.2. HIDROLOGÍA.....	15
2.2.3. CLIMA.....	15
3. MARCO GEOLÓGICO .....	16
3.1. CORDILLERA OCCIDENTAL: EL BATOLITO DE LA COSTA .....	16
3.1.1. EL BATOLITO DE LA COSTA.....	18
3.1.2. EL SEGMENTO DE AREQUIPA .....	18
3.1.3. GEOLOGÍA DE CHÁPARRA.....	19
4. RECURSOS MINERALES DE PERÚ .....	21
4.1. GEOLOGÍA ECONÓMICA .....	21
4.2. MINERÍA EN PERÚ .....	21
4.3. MINERÍA ARTESANAL DE PERÚ .....	23
5. TIPO DE YACIMIENTO: IOCG .....	25
5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DEPÓSITOS IOCG .....	25
5.2. DEPÓSITOS IOCG DE LOS ANDES.....	28
6. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LA MINERÍA POR EL USO DEL MERCURIO .....	30
6.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE .....	30
6.2. EFECTOS SOBRE EL SER HUMANO .....	31
7. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	33
7.1. TRABAJO DE CAMPO .....	33
7.2. TRABAJO DE LABORATORIO.....	36

7.2.1. ESTUDIO MINERALÓGICO .....	36
7.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO .....	37
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	38
8.1. MINERALIZACIÓN Y ALTERACION HIDROTHERMAL .....	38
8.2. GEOQUÍMICA DE MENAS Y COLAS .....	57
8.3. CONTAMINACIÓN Y PROBLEMAS POR EL USO DE MERCURIO.....	62
8.3.1. LOS MOLINOS Y EL MERCURIO .....	62
9. CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA .....	66
ANEXOS .....	70
ANEXO 1: TIPO DE ANÁLISIS PARA CADA MUESTRA.....	71
ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS DE ROCAS Y COLAS .....	72
ANEXO 3: DIFRACTOGRAMAS.....	76

# MEMORIA

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en Latinoamérica está muy lejos de desaparecer. Un motivo para ello es el incremento continuo del precio del oro y el otro es la crisis actual, provocando que aumente el número de personas, tanto hombres como mujeres, que se dedican a este tipo de minería. Tanto es así que esta actividad posee una gran importancia económica y social para los países en vías de desarrollo, entre ellos Perú.

La MAPE desarrolla una parte importante de su actividad en explotaciones mineras (principalmente de oro) abandonadas por las grandes compañías, las cuales consideran que ya no son rentables para su explotación. Sin embargo, éstas sí pueden resultar económicamente rentables para el pequeño minero, el cual encuentra en ellas la oportunidad obtener sustanciosos rendimientos para su beneficio y el de su familia. Esta minería involucra a unas 40 000 familias peruanas (Proyecto GAMA *et al.*, 2002). Así se forman los centros poblados, empezando como pequeños campamentos mineros alrededor de las explotaciones, aumentando de tamaño con la llegada de más familias en busca de una forma de sobrevivir. A menudo, los mineros construyen sus viviendas en las proximidades a las minas, lo que provoca unas condiciones insalubres para la población.

Al ser gentes de pocos recursos, los medios que utilizan para la explotación minera son sencillos y rudimentarios. Además desarrollan su actividad en unas condiciones de trabajo muy duras (ausencia en muchas ocasiones de elementos de protección como cascos, falta de ventilación en el interior de las minas, cavidades angostas, etc.). Entre las técnicas que utilizan están los molinos manuales que hacen servir para triturar las rocas, que constituyen la mena de oro, añadiendo mercurio a la mezcla de roca y agua, el cual capta el oro mediante un proceso de amalgamación. Este es uno de los principales problemas que presenta la MAPE, ya que el mercurio es uno de los elementos más tóxicos que existen, tanto para el medio ambiente como para el hombre.

El gobierno de la República del Perú, ha promulgado una ley respecto a la MAPE, la Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal. Por ello, ahora mismo hay tres tipos de minería, la formal, la informal y la ilegal: (1) La primera es la que cumple los requisitos exigidos por la ley (contrato de la concesión, gestión ambiental correctiva, autorización para el uso del terreno, etc.); (2) la informal es aquella que se encuentra en proceso de formalización, pero que aún no cumple las normas administrativas, técnicas, sociales y medioambientales que rigen actividades mineras; y (3) la minería ilegal es la que realiza la actividad minera que no cumple las normativas anteriores y que la realiza en zonas en las que está prohibido su ejercicio. El plazo para la formalización caduca el 18 de abril de 2014 para todas las regiones, excepto para la región de Madre de Dios, que acaba el 15 de marzo de 2013.

Cháparra es uno de tantos pueblos mineros que se encuentra ante la situación de cumplir a tiempo los requisitos para la formalización. De hecho, hay grupos de mineros que se han organizado formando una asociación para lograr la deseada formalización. Estos trabajadores, como en otras zonas, explotan los yacimientos de oro que se encuentran en los alrededores del pueblo. Estos yacimientos se caracterizan por ser ricos en óxidos de hierro y tener un bajo contenido en sulfuros. Como ya se ha dicho antes, utilizan el mercurio para recuperar el oro, afectando a la salud de los mineros y habitantes y al medio ambiente. Este no es el único problema del mercurio, sino que también este método presenta una baja eficiencia, no recuperando una gran cantidad de oro que permanece en los lodos (colas o *relaves*) residuales de los molinos.

### 1.1. OBJETIVOS

Este trabajo pretende demostrar el grado de insostenibilidad del uso del mercurio para la recuperación del oro en la minería artesanal de Cháparra, Perú. Para ello deberemos: (1) Conocer las características del yacimiento del cual se extrae el oro; (2) Determinar el grado de aprovechamiento del oro total presente en las menas tratadas; (3) Evaluar el grado de contaminación producida por el uso del mercurio.

Los objetivos específicos del presente trabajo se describen a continuación:

- Determinar la mineralización y alteración de las vetas que caracterizan el tipo de yacimiento presente en Cháparra.
- Definir la geoquímica tanto de las menas como de las colas residuales. Determinar las leyes de oro en el yacimiento y en los residuos después del procesamiento con mercurio.
- Establecer el grado de contaminación provocada por el uso del mercurio y los metales residuales que permanecen en los lodos tras la trituración de las rocas que van a parar a los suelos desnudos.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

El poblado de Cháparra está situado en el distrito del mismo nombre, cuya capital es Achanizo, en la provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, al Sur de Perú (Figura 1). Se encuentra en el fondo del valle del río Cháparra a 1 100 msnm, de caudal irregular, que desemboca en el océano Pacífico y en cuyas orillas se concentran los centros poblados.

Las distancias a las capitales más importantes de Perú son de 683 km hasta Lima, situada al norte y 422 km con la ciudad de Arequipa, hacia el sur. Para llegar hasta el poblado de Cháparra desde Lima, se ha de tomar la carretera Panamericana Sur hasta el kilómetro 623, donde se une con una vía afirmada y recorrer 45 km hasta llegar al poblado. El viaje puede llegar a durar unas 10 horas, aproximadamente. Limita por el oeste con el océano Pacífico, por el noroeste con el distrito de Chala, por el norte con el distrito de Huanuuanu, por el este con el distrito de Quicacha y por el sur con el distrito de Ático.

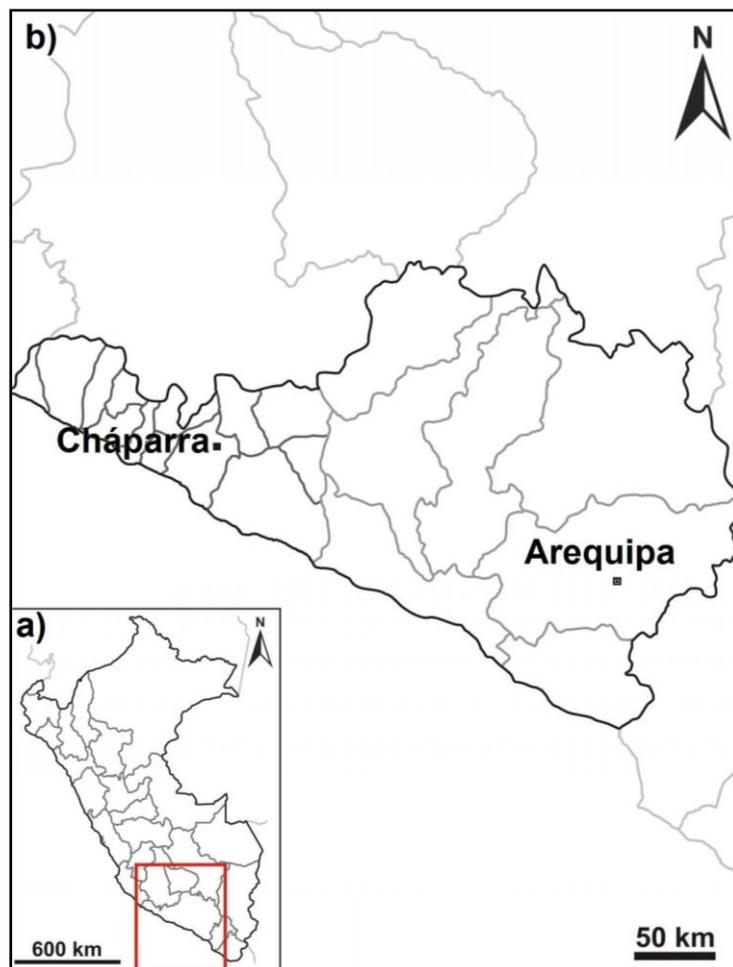


Figura 1. a) Mapa de Perú, con la localización del departamento de Arequipa; b) Situación geográfica del poblado de Cháparra, en el distrito de Cháparra, dentro de la provincia de Caravelí.

El distrito de Cháparra se fundó en 1995, aunque tiene mucha más historia, debido a la evidencia de varios restos de asentamientos prehispánicos (Arata Pozzuoli *et al.*, 2010). Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática de Perú (INEI, 2007) la población del distrito de Cháparra era de 3 846 habitantes. Las principales fuentes de trabajo se encuentran en el sector minero, en primer lugar, el agropecuario y por último, el comercio.

## 2.2. GEOGRAFÍA FÍSICA

### 2.2.1. RELIEVE

La topografía de Perú se ve afectada por varias características, tales como la litología, las estructuras geológicas, la altitud, la climatología, etc. Por ello, en Perú se pueden diferenciar hasta ocho unidades geomorfológicas (Olchauski Lomparte, 1980): (1) Faja Litoral; (2) Cadena Costanera; (3) Peneplanicie Costanera; (4) Peneplanicie Subandina; (5) Cadena Andina; (6) Pampa de Parinacochas; (7) Lomas Andinas; y (8) Valles Transversales.

Cháparra pertenece a la unidad geomorfológica de la Cadena Costanera (al este de la Faja Litoral) y se encuentra en un valle transversal (Figura 2). Presenta cerros que cada vez se van haciendo más pronunciados, dando lugar a una topografía más accidentada, llegando hasta los 2 500 msnm (Olchauski Lomparte, 1980). El río drena en dirección SO, formando el valle donde se encuentra ubicado Cháparra. Se trata de un valle angosto con anchuras variables entre 0,5 y 1 km, donde se encuentran los terrenos de cultivo y los pueblos (Olchauski Lomparte, 1980).

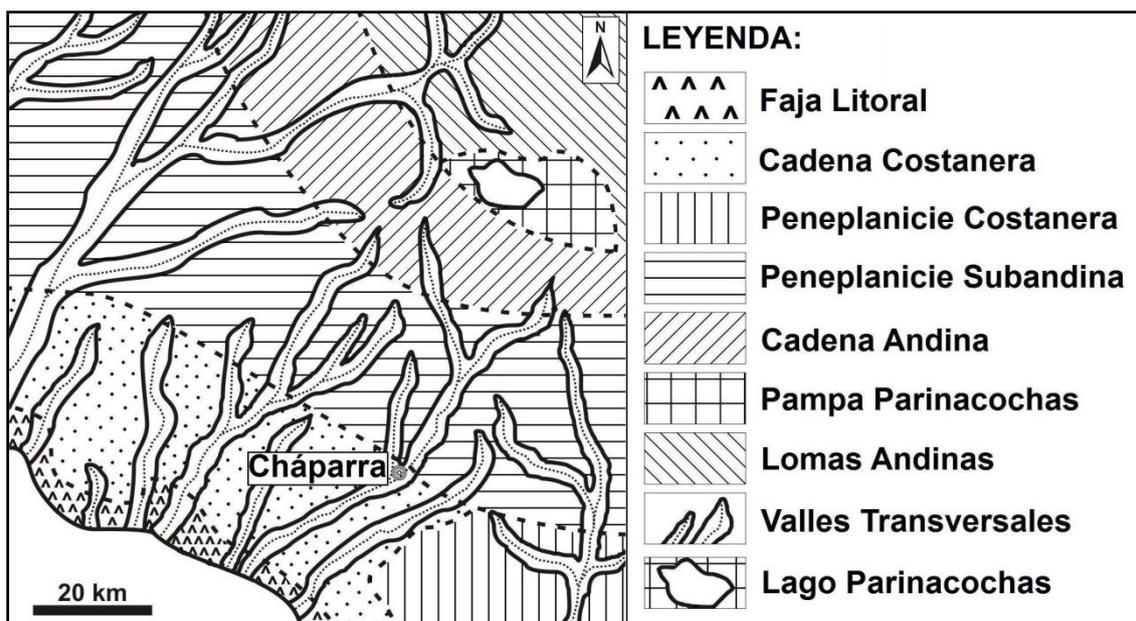


Figura 2. Unidades geomorfológicas (Modificado de Olchauski Lomparte, 1980).

### 2.2.2. HIDROLOGÍA

Perú tiene 3 grandes sistemas hidrográficos: el Pacífico, el Atlántico y el del lago Titicaca. La cuenca del río Cháparra pertenece al sistema hidrográfico del Pacífico y cubre un área de 1 288 km<sup>2</sup> (ONERN, 1975). Su origen se encuentra a 3 900 msnm, entre los cerros Tereniso y Toro Yarusca (ONERN, 1975), en la Quebrada Sayrine, con una longitud aproximada de 96,60 km.

El río nace por filtración de la laguna Parinacochas mediante filtración y su caudal varía dependiendo de la estación (Olchouski Lomparte, 1980). Es en verano, durante los meses de enero a marzo, cuando aumenta su caudal considerablemente debido, principalmente, a las precipitaciones. Mientras que durante el invierno su caudal disminuye tanto, que en ocasiones casi no fluye agua.

### 2.2.3. CLIMA

El clima en la zona de estudio es variado, debido a las diferencias de cota. En el pueblo y en la zona del río (600 – 1 300 msnm), el clima es templado y húmedo con pocas precipitaciones durante todo el año, las cuales se concentran en verano, durante los meses de enero a marzo. En las zonas más altas (1 400 – 2 500 msnm), donde se encuentran las minas, el clima es más bien seco, árido y se torna más cálido, en cambio en invierno, durante la noche las temperaturas bajan considerablemente, dando lugar a un frío intenso.

Cada cierto tiempo (de forma cíclica), se producen fuertes precipitaciones, dando lugar a fuertes flujos de derrubios, denominados *huaicos* en el lenguaje común, que pueden llegar a arrasar los pueblos que se encuentran en las quebradas estrechas.

### 3. MARCO GEOLÓGICO

El relieve actual de Perú es fruto de los sucesivos ciclos orogénicos que ha sufrido el territorio debido a diversos episodios de sedimentación, deformación, elevación, erosión y peneplanización (Palacios Moncayo, 1995). Perú se caracteriza principalmente por el Sistema Andino, cuya orientación es NO-SE, el cual lleva asociado los principales elementos estructurales como fallas, ejes de plegamiento, elongación de cuerpos intrusivos mayores, alineamiento de conos volcánicos, etc. (Palacios Moncayo, 1995). Los Andes peruanos presentan dos cambios en su rumbo, las llamadas deflexión Huancabamba (en el norte) y deflexión Abancay (en el sur), y coinciden con los cerros Illescas en el norte y península de Paracas en el sur (Palacios Moncayo, 1995).

Las rocas más antiguas encontradas datan del Precámbrico, siendo remanentes de antiguas cordilleras, las cuales son poco conocidas, ya que las rocas están muy metamorfizadas como para poder obtener información (Palacios Moncayo, 1995). A pesar de esto, se conocen al menos dos ciclos orogénicos, siendo el más evidente la Orogenia Brasílica del Precámbrico Superior (600 Ma) (Palacios Moncayo, 1995). Del Paleozoico se reconocen la Orogenia Caledónica al NE y la Hercínica en la Cordillera Oriental, con dos ciclos sedimentarios del Paleozoico Inferior y del Paleozoico Superior, ambos con múltiples fases de deformación (Eohercínica, Tardihercínica y Finihercínica) en la parte superior (Palacios Moncayo, 1995). Ya en el Mesozoico y Cenozoico aparece el Ciclo Andino, con diversas etapas de sedimentación y fases de deformación, como la Fase Peruana del Cretácico Superior, la Fase Incaica del Cenozoico Inferior, la Fase Quechua (12-15 Ma) y otras más a finales del Cenozoico y comienzos del Cuaternario (Palacios Moncayo, 1995).

La Cordillera de los Andes se puede dividir de Oeste a Este en siete/ocho partes (Chacón Abad, 1995) (Figura 3): (1) Cordillera de la Costa; (2) Llanura Preandina (Faja Costanera); (3) Cordillera Occidental; (4) Altiplano (Depresiones Interandinas); (5) Cordillera Oriental; (6) Cuenca del Titicaca; (7) Cadena Subandina; y (8) Llanura Amazónica.

#### 3.1. CORDILLERA OCCIDENTAL: EL BATOLITO DE LA COSTA

La zona de estudio se encuentra enmarcada en el denominado Batolito de la Costa, el cual se localiza en la Cordillera Occidental de Perú. Se trata de la mayor fase plutónica del magmatismo del Mesozoico de Perú, extendiéndose más de 1 600 km paralelo a la costa y más de 65 km de ancho, con más de 1 000 plutones, Cobbing *et al.* (1977) los agrupan en superunidades.

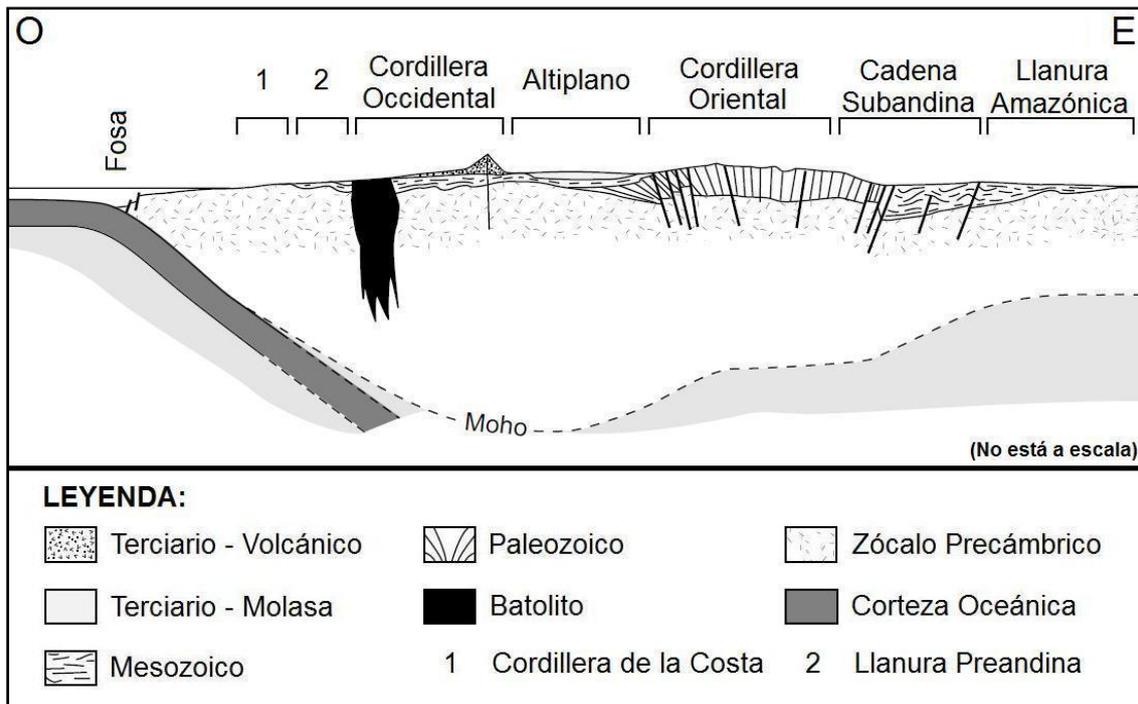


Figura 3. Corte transversal de los Andes peruanos (Modificado de Cobbing y Pitcher, 1972).

Esta cordillera está compuesta por un cinturón de rocas volcánicas marinas (principalmente de composición andesítica) que afloran a lo largo de la costa (Cobbing, 1982). Las rocas que la componen son lavas almohadilladas, flujos de lava y sedimentos volcanoclásticos, depositados en un graben constituido sobre un zócalo fracturado, procedentes de una cadena de islas volcánicas que se extendían sobre el límite externo del margen continental, principalmente durante el Cretácico (Cobbing, 1982). Este cinturón volcánico o cuenca de ante-arco (Cobbing, 1978) limitaba al este con un cinturón sedimentario, cuyo material se encontraba igualmente depositado sobre un graben (Cobbing, 1978), constituido principalmente por clastos bien seleccionados en la parte inferior y carbonatos en la superior (Cobbing, 1982). Cobbing (1976) denomina a estos dos cinturones como eugeosinclinales y miogeosinclinales, actualmente cuencas de ante-arco y tras-arco, respectivamente.

La cuenca de ante-arco se plegó a finales del Albiense, emplazándose diversos plutones a lo largo de un lineamiento batolítico bien definido (Cobbing, 1982), continuando hasta comienzos del Cenozoico, al mismo tiempo que se sedimentaba la cuenca de tras-arco (Cobbing, 1978). Fue durante el Cenozoico cuando tuvo lugar la orogenia Inca (Steinmann, 1929), afectando a toda la Cordillera Occidental aumentando el espesor de la corteza, emergiendo el cinturón orogénico y erosionando una superficie sobre la cual se depositaron entre 2 000 y 3 000 m de material volcánico terrestre entre el Eoceno y el Mioceno Superior (Cobbing, 1982). Hoy en día los Andes continúan elevándose al igual que el vulcanismo sigue activo en el sur de Perú.

Estos últimos depósitos volcánicos (Eoceno y Mioceno) son más ácidos que las rocas volcánicas del Cretácico y aparentemente están relacionados con innumerables stocks

de composición granodiorítica que se encuentran emplazadas en las rocas volcánicas del Cenozoico e incluso entre los sedimentos plegados del Cretácico (Cobbing, 1982). Gracias a estos stocks se desarrollaron las mineralizaciones polimetálicas (Bellido y De Montreuil, 1972), que desde hace siglos y que hoy en día se continúan explotando.

### 3.1.1. EL BATOLITO DE LA COSTA

El batolito está constituido por una gran cantidad de plutones de diferentes tamaños. Cobbing (1982) los relaciona mediante su litología y texturas y los trata como unidades litoestratigráficas, las cuales se denominan superunidades (Cobbing *et al.*, 1977). Cobbing *et al.* (1977) introdujeron el concepto de Batolito Segmentado al observar que cada superunidad tenía una longitud finita del batolito y este último segmento estaría compuesto por un determinado conjunto de superunidades, mientras que el segmento adyacente estaría caracterizado por otras. Por tanto, el Batolito de la Costa está compuesto por cinco segmentos (Cobbing, 1982) (Figura 4): (1) Segmento de Piura (250 km); (2) Segmento de Trujillo (250 km); (3) Segmento de Lima (400 km); (4) Segmento de Arequipa (1000 km); y (5) Segmento de Toquepala (200 km). Los Segmentos de Lima y Arequipa son los mejor reconocidos y estudiados, y están constituidos por siete y cinco superunidades, respectivamente.

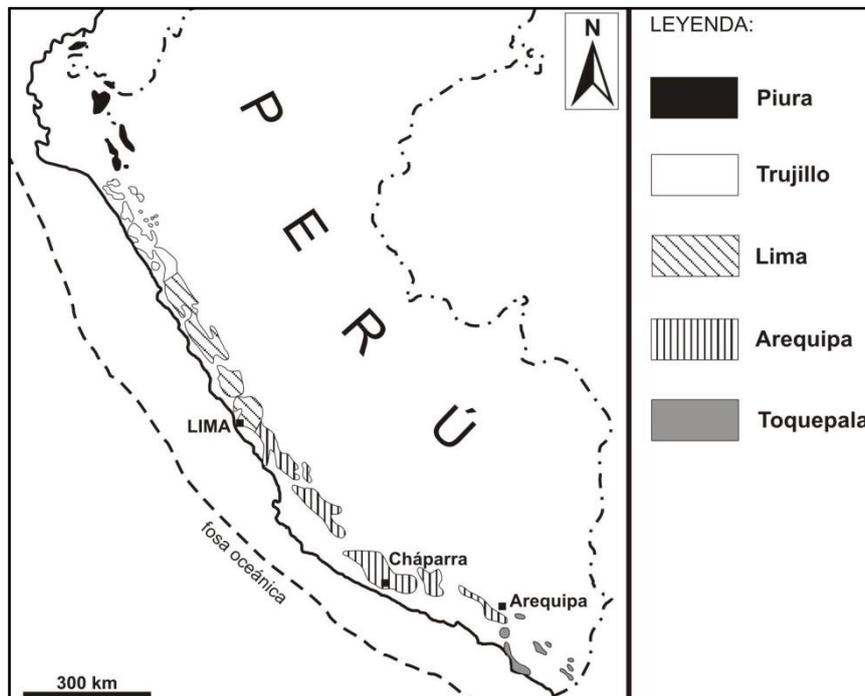


Figura 4. Los cinco segmentos en los que está dividido el Batolito de la Costa de Perú (Cobbing, 1982).

### 3.1.2. EL SEGMENTO DE AREQUIPA

Dentro del Batolito de la Costa, Cháparra se encuadra en el Segmento de Arequipa. Este segmento con una longitud aproximada de 1 000 km se encuentra formado por cinco superunidades (Cobbing, 1982):

- *Superunidad Patap*: constituida por gabros, con edades de 102 Ma los plutones que conforman esta superunidad, se encuentran ampliamente dispersos y sólo quedan pequeños afloramientos.
- *Superunidad Linga*: su rango composicional varía entre monzodiorita y monzogranito, y presenta edades de 97 Ma. Es una superunidad muy compleja, la cual se divide en dos grupos. Una gran fase de plutones compuestos principalmente por monzodioritas cortada por otra gran fase de plutones de composición más ácida que varía entre monzotonalita a monzogranito.
- *Superunidad Pampahuasi*: compuesta por tonalitas que se encuentran en zonas restringidas en forma de plutones medianos, con edades comprendidas entre 80-95 Ma.
- *Superunidad Incahuasi*: presenta edades similares a la anterior superunidad con 80-95 Ma, sin embargo está comprendida por grandes plutones que en algunas zonas forman el mayor volumen del batolito, constituidos principalmente por monzodioritas. Los plutones suelen ser grandes y conjuntos complejos (100 x 50 km), cuya litología tiende a ser gradacional.
- *Superunidad Tiabaya*: es la más importante de las cinco, ya que aflora en todo el segmento de Arequipa, mostrando relaciones transversales con todas las intrusiones anteriores. Su litología varía de diorita a monzogranito, pero es más común la presencia de granodiorita. Los plutones son de diversos tamaños y bastante homogéneos, aunque también los hay zonados. Esta superunidad ha sido datada en 81 Ma.

La edad del plutonismo del Segmento de Arequipa varía entre 102 y 80 Ma, donde no ha vuelto a haber más actividad intrusiva, al contrario que en el Segmento de Lima, el cual ha tenido actividad hasta hace 33 Ma (Cobbing, 1982).

### 3.1.3. GEOLOGÍA DE CHÁPARRA

Cháparra se encuentra enclavada en la Superunidad Linga del Batolito de la Costa. En sus proximidades también nos encontramos con distintos afloramientos geológicos como la Superunidad Tiabaya, el Complejo Bella Unión, la Formación Chocolate, la Formación Guaneros, la Formación Huaylillas y depósitos aluviales del holoceno.

En la Superunidad Linga (Cenomaniense, Cretácico Superior) de Cháparra predomina la monzonita (presenta variaciones internas entre monzogabro, monzodiorita, tonalita, granodiorita, monzogranito y granito) (Olchanski Lomparte, 1980). Esta Superunidad es muy importante, ya que a su emplazamiento estuvo asociada la mineralización de soluciones de Cu y en segundo lugar de Fe (Agar, 1978).

La Superunidad Tiabaya (Campaniense, Cretácico Superior), que aflora al Norte, corresponde a la secuencia final de la intrusión del Batolito de la Costa en el Segmento de Arequipa, emplazándose a lo largo de una franja central y longitudinal, limitada al SO por la Superunidad Linga y al NE por la Superunidad Incahuasi, siendo así la secuencia de mayor volumen de este Segmento (Olchouski Lomparte, 1980). Este mismo autor divide la Superunidad en tres grupos de rocas con contactos discordantes y nítidos: (1) gabrodiorita-diorita cuarcífera; (2) tonalita dominante que varía a granodiorita (la que aflora al norte de Cháparra); y (3) monzogranito.

El Complejo Bella Unión (Cretácico Medio-Superior) es un conjunto muy variado, dominando brechas de intrusión de naturaleza andesítica o dacítica en grandes bloques angulosos o subangulosos (Olchouski Lomparte, 1980). Este complejo ocupa una faja continua e intermedia con rumbo que varía de EO a NO-SE.

La Formación Chocolate (Jurásico Inferior), que aflora al SO de Cháparra, en Achanizo, está conformada por secuencias de rocas volcánicas y lavas andesíticas intercaladas con sedimentos (areniscas y conglomerados) (Olchouski Lomparte, 1980). Se encuentra afectada por grandes fallas de dirección NO predominante. Su ambiente de formación parece haber sido costero-litoral (marino-continental) (Olchouski Lomparte, 1980).

La Formación Guaneros (Jurásico Medio-Superior) descansa sobre la Formación Chocolate mediante una discordancia erosional y está formada por rocas volcánicas de naturaleza andesítica y areniscas intercaladas con lutitas, limolitas y margas fosilíferas (Olchouski Lomparte, 1980).

Por último, la Formación Hualillas (Mioceno) está compuesta por ignimbritas grises a rosadas aflorando sobre el Complejo Bella Unión y la Formación Guaneros. Y los depósitos más recientes pertenecen al Holoceno, siendo depositos aluviales de material grueso y arenas finas.

## 4. RECURSOS MINERALES DE PERÚ

### 4.1. GEOLOGÍA ECONÓMICA

El origen de los recursos metálicos de Perú se relaciona con los ciclos orogénicos precámbricos, paleozoicos y principalmente al ciclo andino (Canchaya y Aranda, 1995). A este último ciclo se le deben mineralizaciones de oro, plata, cobre, plomo, zinc, estaño, etc. las cuales se establecen dentro de provincias metalogénicas a escala regional, que en general muestran orientación sub-paralela respecto a la cadena andina (Canchaya y Aranda, 1995).

Soler *et al.* (1986) agrupan las provincias metalogénicas en cuatro segmentos principales:

- *Segmento Norte*: se caracteriza por estar comprendido por sulfuros masivos con mineralizaciones de Cu-Zn-Ag; brechas y pórfidos de Cu asociados a stocks sub-volcánicos con ciertas zonas con alteración hidrotermal; vetas y diseminaciones de Au, Ag y Cu asociadas a actividad volcánica-hidrotermal.
- *Segmento Central*: comprende yacimientos estratoligados con mineralizaciones de Zn-Pb; yacimientos estratoligados de sulfuros masivos de Cu y Zn-Ba y Zn-Pb-Ag; yacimientos estratoligados en rocas carbonatadas con mineralizaciones de Pb-Zn-Ag; yacimientos asociados al Batolito de la Costa con vetas de Cu y Fe, vetas, diseminaciones y skarns de Cu-(Mo-W) y pórfidos de Cu-Au-Mo; vetas y cuerpos de reemplazamiento de Cu, Pb, Zn, diseminación de Au, y también asociados al Batolito de la Costa con vetas de Sn, W, Ag, pórfidos de Cu y Mo-W.
- *Segmento Centro-Sur*: vetas de Au asociadas a la Superunidad Tiabaya del Batolito de la Costa; yacimientos tipo skarn ricos en Cu asociados a rocas plutónicas; vetas de Ag, Au, Cu, Pb y Zn emplazadas en rocas volcánicas; vetas y diseminados de U en ignimbritas peralcalinas.
- *Segmento Sur*: mineralizaciones de Cu, Zn, Pb, Au, Ag, W, Sn, Mo, etc. en vetas, stockworks, yacimientos hidrotermales, etc.

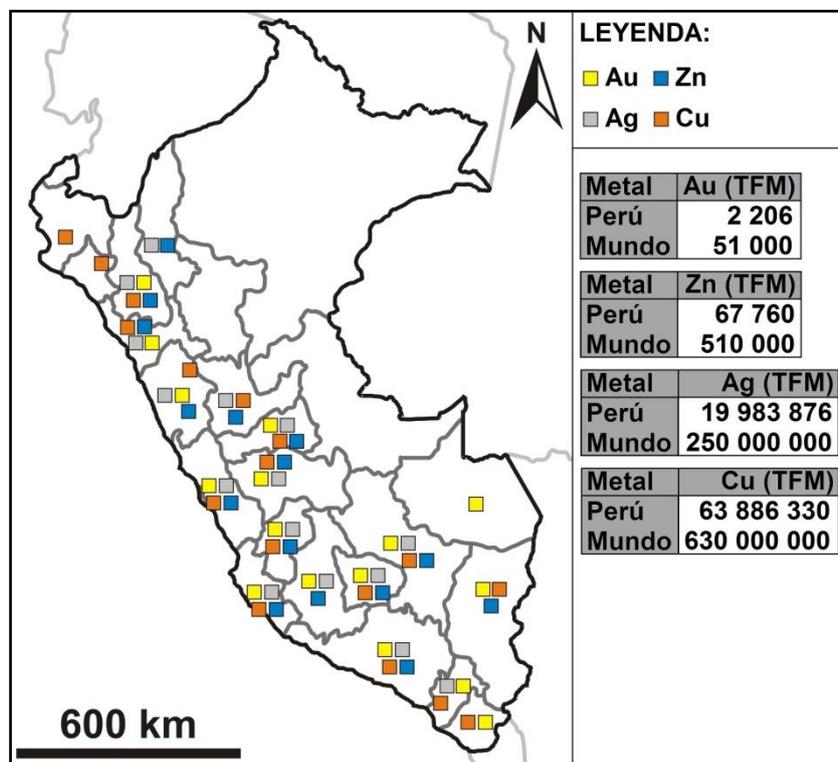
### 4.2. MINERÍA EN PERÚ

Perú es uno de los países más ricos en recursos de minería polimetálica. Tanto es así que el sector minero es el sector económico más importante del país. Como se puede apreciar en la Tabla 1, Perú es uno de los principales productores mineros del mundo, siendo el primer productor mundial de plata, segundo de cobre y sexto de oro, convirtiéndose en uno de los principales destinos de inversión en exploración y desarrollo de proyectos mineros en Latinoamérica (MEM, 2011).

**Tabla 1. Puesto de Perú en el ranking mundial y latinoamericano de producción minera para 2010 (MEM, 2011).**

Metal	Mundo	Latinoamérica
Plata (Ag)	1	1
Zinc (Zn)	2	1
Estaño (Sn)	3	1
Plomo (Pb)	4	1
Oro (Au)	6	1
Mercurio (Hg)	4	2
Cobre (Cu)	2	2
Molibdeno (Mo)	4	2
Selenio (Se)	9	2
Cadmio (Cd)	12	2
Hierro (Fe)	17	5

Existe una enorme y variada riqueza en recursos minerales, concentrados sobre todo en la Cordillera de los Andes, y la mayor parte del territorio está aún por explorar y explotar, con tan solo el 1,05% del territorio con actividad minera y por el otro lado el 11,54% se encuentra en concesión para actividad minera (MEM, 2011). El potencial minero se refleja en la producción de oro, plata, plomo, zinc, molibdeno, estaño y nuevos yacimientos de hierro y uranio (MEM, 2011). En la Figura 5 podemos ver los principales reservas en Perú, y en tabla adjunta las reservas probables y probadas de Au, Ag, Zn y Cu, comparándolo con las reservas mundiales para el año 2009 en unidades de toneladas métricas finas (TMF) (MEM, 2011).



**Figura 5. Ubicación de las grandes reservas de Au, Ag, Zn y Cu en Perú. En la tabla adjunta se puede ver las TMF de cada uno de los metales en comparación con el total mundial. El Au representa el 4,3%, la Ag el 13,3%, el Zn el 8% y el Cu el 10,1% respecto al total mundial para el año 2009 (MEM, 2011).**

#### 4.3. MINERÍA ARTESANAL DE PERÚ

La primera evidencia de minería en Perú data de hace 4 500 años, tras el hallazgo arqueológico de herramientas y restos de láminas de oro en el departamento de Apurímac (centro-sur de Perú) (Martínez Castilla, 2002). Los mineros españoles incorporaron a sus tareas técnicas precolombinas, tales como *quimbaletes* (molinos) para la molienda y *huayras* (horno a viento) para la fundición, mientras que ellos introducían el uso del mercurio y expandía la perforación de túneles inclinados o semi-verticales (Martínez Castilla, 2002).

Este tipo de técnicas en la minería artesanal y de pequeña escala, tuvo su auge a principios de la década de 1980, debido al endurecimiento de las condiciones políticas y sociales que sufrió el país durante esta década, marcada por subversión y la guerra interna, la crisis económica, el abandono de las zonas rurales y la migración (ARM, 2011). Ahora de nuevo, debido a la nueva crisis mundial y el consiguiente aumento los precios de los metales, este sector sigue en apogeo. Prácticamente en todo Perú hay minería artesanal, concentrándose en nueve departamentos del país (Figura 6).



Figura 6. Zonas de gran concentración de minería artesanal y de pequeña escala (ARM, 2011).

Las características principales de este sector son (ARM, 2011):

- La explotación de depósitos de pequeña magnitud; explotan vetas de espesor bajo-medio, que no resisten inversión mecanizada moderna.
- Recuperación económica inmediata.
- Pequeña inversión inicial.

- Ingresos económicos más altos que en cualquier otro sector laboral.
- Se desarrolla en localizaciones con accesos dificultosos.
- Escasa formación y educación medioambiental.
- Existe un mercado ilegal para la adquisición de materias.
- También existe un mercado ilegal para varios productos que se comercializan (menas, colas, amalgamas de oro, mena parcialmente procesada).
- Prácticas medioambientales inaceptables asociadas al uso intensivo de mercurio.

La importancia de la minería artesanal y de pequeña escala queda manifiesta por el hecho de que en el año 2000 representaban el 12,63% de la producción total de oro en Perú y en el 2009 aumentó hasta el 16,61% (Tabla 2).

**Tabla 2. Niveles de producción de oro fino entre los años 2000 y 2009, dividido en Total Nacional, Mediana y Gran Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal (ARM, 2011).**

PERÚ	PRODUCCIÓN DE ORO EN TMF <sup>(1)</sup>										TOTAL
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
<i>Total Nacional</i>	133,0	138,0	158,0	173,0	173,0	208,0	203,0	170,0	180,0	201,0	<b>1 737,0</b>
<i>Media-Gran Minería</i>	116,2	119,0	138,7	153,0	149,8	181,1	175,9	141,0	151,0	167,6	<b>1 493,3</b>
<i>Pequeña Minería</i>	0,3	0,3	0,3	1,0	1,2	1,9	2,1	3,0	3,0	4,7	<b>17,8</b>
<i>Minería Artesanal <sup>(2)</sup></i>	16,5	18,7	19,0	19,0	22,0	25,0	25,0	26,0	26,0	28,7	<b>225,9</b>

<sup>(1)</sup> Tonelada Métricas Finas

<sup>(2)</sup> Incluye vetas y embalses de colas



**Tabla 3. Resumen de los modelos genéticos alternativos para Sistemas IOCG (Barton y Johnson, 2004).**

Fuente de fluido	Magmático	No magmático	
		Cuenca/Superficie	Metamórfico
<i>Proceso fundamental</i>	Liberación de salmuera, procedente del magma, pobre en S <sup>2-</sup> y rica en metales; ascenso por diferencia de densidad Enfriamiento, reacción del encajante ± mezcla de fluido proporciona la trampa	Convección térmica de salmueras no magmáticas; los metales provienen del encajante El enfriamiento, el encajante o la mezcla de fluidos proporciona la trampa; un fluido secundario puede proporcionar metales	Liberación metamórfica de salmueras por desgasificación o reacción con otros fluidos; ascenso por diferencia de densidad Enfriamientos por reacción con el encajante ± mezcla de fluidos, proporcionan la trampa
<i>Asociaciones ígneas</i>	Suite K-Alta oxidada; varía la composición de dioritas a granitos	Rocas de gabro a granito; ejemplos no magmáticos conocidos Fuente de calor clave en la mayoría Origen de materiales diverso, reflejado en su geoquímica	Conexión no necesaria, aunque presente normalmente Podría haber una fuente de calor Pueden ser fuente de material
<i>Alteración hidrotermal en encajante feldespático</i>	Na(Ca), otros (K, H <sup>+</sup> ) enlazados con el magma Na(Ca) regional coinciden, pero no directa relación con Cu(-Au)	K (tipo I), H <sup>+</sup> ± Na(Ca) en zonas de afloramiento Na(Ca) ± K (tipo II) en zonas de recarga	Principalmente alteración K y H <sup>+</sup> asociada con los depósitos Asociación regional de Na(Ca) refleja el origen
<i>Relación de óxidos de Fe con Cu(-Au)</i>	Algunos óxidos de Fe con Cu(-Au), pueden ser equivalentes más profundos o de altas T Óxidos de Fe estériles se pueden formar a partir de distintos fluidos y normalmente de sistemas hidrotermales más antiguos en la misma zona	Las zonas ricas en Mt son más profundas, más jóvenes y de mayor T; también es normal Mt o Hm con Cu Óxido de Fe estéril representa la falta de trampas de S para Cu o la falta de fluidos secundarios con Cu	Presencia de óxidos de Fe, pero en menor cantidad (Bt o Chl común); óxido de Fe normalmente generado por ruptura de minerales máficos
<i>Marco local: profundidad / estructura</i>	Niveles someros a corteza media; normalmente en estructuras regionales pero cerca de las intrusiones causantes	En corteza superior frágil (principalmente); conductos generados por estructuras regionales o vulcano-tectónicas	Niveles de corteza media a somera, en o cerca de estructuras mayores; los fluidos superficiales requieren niveles someros
<i>Marco global</i>	Ambientes extensionales o de arco que producen magmas característicos (alcalino o ricos en K oxidado)	Regiones con fuentes de salmueras apropiadas (zonas áridas o materiales ricos en Cl), sistemas de conducción y termo-dirigidos	Regiones con rocas ricas en Cl; zona compresiva (ej. cuencas de colapso) o metamorfismo prógrado
<i>Referencias</i>	Hauck (1990), Pollard (2000), Groves y Vielreicher (2001)	Barton y Johnson (1996, 2000), Haynes <i>et al.</i> (1995), Haynes (2000)	Williams (1994), De Jong <i>et al.</i> (1998), Hitzman (2000)



## 5.2. DEPÓSITOS IOCG DE LOS ANDES

Los yacimientos de IOCG de los Andes aparecen preferentemente entre el Jurásico Medio-Superior (170-150 Ma, aproximadamente) y el Paleoceno (65-60 Ma, aproximadamente), estableciéndose paralelos a los cinturones orogénicos y coincidiendo en el tiempo con el magmatismo (Sillitoe, 2003). Las provincias IOCG se localizan principalmente en la Cordillera de la Costa y áreas inmediatamente adyacentes del norte de Chile y sur de Perú, donde están estrechamente relacionados con los batolitos del Mesozoico y los principales sistemas de falla de arco paralelo (Sillitoe, 2003).

Al tratarse del sistema IOCG más joven del mundo, hace pensar que, de los modelos genéticos mencionados anteriormente, magmático y no magmático (metamórfico), el posible modelo que adapta mejor a los depósitos IOCG de los Andes es el magmático. Esto se debe a que al ser tan jóvenes los Andes, estos no se ven afectados por los complejos efectos de metamorfismo y deformación tardíos (Sillitoe, 2003).

Hay poca información detallada en cuanto al ambiente tectónico, salvo que todos los depósitos importantes se formaron durante extensión regional, situados en fallas (dúctiles a frágiles) y fracturas de diversas direcciones (Sillitoe, 2003).

Sillitoe (2003) expone que los estilos de depósito de IOCG del norte de Chile y sur de Perú incluyen los estilos de mineralización más representativos y comunes, tanto en solitario como combinados. Estos estilos son (Sillitoe, 2003):

- *Vetas*: son los depósitos más abundantes, con cientos de ejemplos por todo el cinturón de la Cordillera de la Costa, especialmente en el norte de Chile (mayor productor de Cu entre 1860 y 1870, en cambio actualmente sus minas, o no se tienen en cuenta o están casi agotadas). Las vetas son producto de reemplazamiento y relleno de espacios abiertos asociado.
- *Chimeneas de brechas*: aparecen localmente.
- *Skarns cálcicos*: aparecen localmente.
- *Mixto*: aparte de vetas, brechas y skarns, aparecen también zonas de stockworks y mantos de reemplazamiento. La combinación de estilos es la segunda manera en que aparecen los depósitos más importantes de los Andes.

Al igual que otros muchos depósitos IOCG de alrededor del mundo, algunos yacimientos de los Andes carecen de una genética clara que los relacione con intrusiones concretas a pesar de encontrarse en las proximidades (< 2 km) con afloramientos de complejos plutónicos, incluyendo las fases dioríticas más jóvenes (Marschik y Fontboté, 2001). En cambio, las dataciones radiométricas llevadas a cabo por diferentes estudios tanto de las mineralizaciones/alteraciones (ej. Marschik y

Fontboté, 2001) como de los complejos plutónicos (ej. Ullrich *et al.*, 2001) que aparentemente no tiene relación, dan edades equivalentes, como por ejemplo la mineralización de Cu de Candelaria (Chile) con edades de 116-114 Ma y para el complejo plutónico contiguo de Ojancos con edades de  $117,2 \pm 1,0$ - $110,5 \pm 1,7$  Ma.

Por otro lado, la mayoría de los principales depósitos IOCG en vetas del norte de Chile y algunos del sur de Perú se encuentran alojados en plutones (dioríticos en Chile y gabrodioríticos en Perú), con edades similares, mostrando así su estrecha relación (Sillitoe, 2003). Independientemente de las rocas encajantes, las vetas de los IOCG comparten el espacio de las fallas con diques de andesita, basalto, dolerita, diabasa, diorita, gabro o simplemente máficos, y son típicamente pre- o sin-mineralización (Ruiz *et al.*, 1965).

Como ya se ha podido ver anteriormente, los IOCG se pueden subdividir en 2 grupos, los dominados por magnetita y los dominados por hematites. La mayor parte de las veces están acompañados ambos subtipos en las vetas por calcopirita  $\pm$  bornita, mientras que en otras zonas las vetas, brechas y mantos están más enriquecidos en hematites (Sillitoe, 2003). Las zonas con hematites dominante, al profundizar se observa que se cambia gradualmente a magnetita (Espinoza *et al.*, 1996; Gelcich *et al.*, 1998; Zamora y Castillo, 2001), en consonancia con zonación vertical generalizada propuesta por Hitzman *et al.* (1992). Lo mismo ocurre si somerizamos, cambiando la riqueza en magnetita a hematites (Marschik y Fontboté, 2001). La pirita y los sulfuros de Cu (calcopirita, calcocita, bornita, etc.) que aparecen generalmente son posteriores a los óxidos de hierro (Ruiz *et al.*, 1965; Lobo-Guerrero, 2006), aunque también hay coincidencia en el tiempo (Sillitoe, 2003).

En cuanto a las alteraciones que acompañan a este tipo de depósitos en los Andes, los ricos en magnetita normalmente están acompañados por actinolita, biotita y cuarzo y en menor medida apatito, clinopiroxeno, granate, hematites y feldespato potásico, además de estrechas aureolas de actinolita, biotita, albita, feldespato potásico, epidota, cuarzo, clorita, sericita y escapolita (Ruiz *et al.*, 1965; Espinoza *et al.*, 1996); y los depósitos dominados por hematites suelen contener sericita y/o clorita, con o sin feldespato potásico o albita, y poseen aureolas de alteración de los mismos minerales (Sillitoe, 2003).

La riqueza en oro es mayor en el subtipo de hematites que en el de magnetita (Ruiz *et al.*, 1965). Ambos subtipos están caracterizados por cantidades anómalas de Co, Ni, As, Mo y U en forma de cobaltita, saflotira, danaita (Co y Ni), nicolita, cloantita (Ni y As), molibdenita, uraninita (Ruiz *et al.*, 1965) y arsenopirita (Hopf, 1990). En menor cantidad aparecen Zn y Pb en diversos depósitos (Espinoza *et al.*, 1996). También cabe destacar la presencia de TT.RR. (Marschik *et al.*, 2000).

## 6. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LA MINERÍA POR EL USO DEL MERCURIO

El procesamiento para recuperar oro presenta 3 problemas principales: (1) la pérdida de oro recuperado con mercurio que aún permanece en los lodos; (2) la contaminación medioambiental que provoca el vertido de los lodos sobre suelo desnudo con mercurio y otros metales; y (3) la intoxicación de las personas que manejan el mercurio y la amalgama sin protección.

### 6.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Debido al mal uso del mercurio, la amalgamación deriva en una descarga estimada de 1 000 Tm de mercurio al año en los ecosistemas de los países en desarrollo (Veiga y Baker, 2004). Hasta mediados del siglo XVIII en Latinoamérica Eisler (2004) estima que se liberaron 1,5 kg de mercurio por cada kilogramo de oro. Debido a estas técnicas ineficientes, en muchas regiones de Latinoamérica, Veiga y Baker (2004) estiman que se liberan alrededor de 2 gr de mercurio al medio ambiente por cada gramo de oro recuperado.

El mercurio se puede liberar al medio de tres formas diferentes atendiendo a su toxicidad: (a) vapor de mercurio; (b) compuestos orgánicos de mercurio; y (c) sales de mercurio (Câmara *et al.*, 1997).

El vapor de mercurio en la atmósfera puede ser transportado a largas distancias y (Gochfeld, 2003) y como es altamente soluble en agua, a razón de 0,08 mg/L a 25 °C (ATSDR, 2000), durante las lluvias es eliminada una pequeña fracción de la atmósfera, por tanto es otra fuente de entrada en el medio (Gochfeld, 2003). Sin embargo, la forma más probable en que el mercurio entre con el medio es mediante la oxidación con oxidantes atmosféricos como el oxígeno, el ozono y el cloro, pasando de  $Hg^0$  a  $Hg^{2+}$ , que es incluso más soluble (Gochfeld, 2003). Otra forma es que el  $Hg^0$  se adhiera a partículas finas como polvo, y se deposite sin necesidad de lluvia (Fitzgerald, 1995).

Cuando entra en el medio acuático, el mercurio se puede transformar en Me-Hg ( $CH_3Hg^+$ ) mediante procesos bióticos o abióticos. Esta es una de las especies de mercurio más tóxicas para un gran número de seres vivos, más aún que el mercurio inorgánico. El proceso más común para la metilación es la biótica, mediante bacterias sulfuroductoras que se encuentran en sedimentos de ríos, lagos y estuarios (Zillioux *et al.*, 1993). Para que este proceso tenga lugar las condiciones del medio deben ser: (a) una baja oxigenación de las aguas; (b) la existencia de una concentración mínima de sulfato en el medio, ya que la metilación se acopla a la reducción del sulfato a sulfuro por parte de las bacterias; (c) presencia mínima de sulfuro en el medio; (d) presencia de emisores de grupos metilos; (e) la forma en la que se encuentra en mercurio inorgánico inicialmente; y (f) presencia de ciertos enzimas (Gaona Martínez, 2004). El proceso abiótico más común es la transmetilación por parte de especies

organometálicas de otros metales como plomo, arsénico o estaño (Gaona Martínez, 2004).

Este Me-Hg se encuentra disponible para entrar en la cadena alimentaria: el Me-Hg es consumido por los peces y otros organismos como algas, plantas o cultivos, éstos son consumidos por el hombre y adquieren ese mercurio.

## 6.2. EFECTOS SOBRE EL SER HUMANO

Las vías por las que el mercurio entra en el cuerpo humano son a través del consumo de pescado contaminado en mercurio, inhalación directa, consumo de agua contaminada en mercurio y en contacto directo con la piel (Picado Pavón, 2008). Picado Pavón (2008) describe el siguiente proceso por el que se asimila el mercurio en el cuerpo: (1) absorción; (2) distribución; (3) metabolismo; y (4) excreción. La concentración de mercurio orgánico en la sangre o el pelo del cuero cabelludo son buenos indicadores de exposición a mercurio en los seres humanos (Lindqvist, 1984); además de los indicadores anteriores, para el mercurio metálico las muestras de orina también son un buen indicador (Akagi *et al.*, 1995).

Las principales vías de exposición para el ser humano son por inhalación de vapores de  $Hg^0$  y por ingestión de metilmercurio (Me-Hg). La ingestión de mercurio metálico no es especialmente tóxico debido a su baja tasa de absorción por el tracto gastrointestinal (Bouwer, 1999).

Los vapores son extremadamente peligrosos, ya que el vapor es absorbido completamente por los pulmones y después es oxidado a  $Hg^{2+}$  (Magos *et al.*, 1978). Los vapores traspasan las membranas mucho mejor que el  $Hg^{2+}$ , lo cual explica la gran cantidad de vapor de mercurio en el cerebro antes de ser oxidado y su toxicidad afecta al Sistema Nervioso Central (SNC) más que el  $Hg^{2+}$  (Bouwer, 1999).

La ingestión de mercurio se hace por vía indirecta a través del pescado que se encuentra contaminado, principalmente, en forma de Me-Hg con un 75-95% (Gochfeld, 2003) lo cual puede provocar la enfermedad Minamata. Este nombre proviene de un pueblo pesquero de Japón que en la década de 1960 sufrió cientos de muertes causadas por la contaminación de mercurio procedente de los vertidos de mercurio de una planta química que se ubicaba cerca de la bahía, la cual fue contaminada envenenando a los peces desde 1950 (Kurland *et al.*, 1960; Gochfeld, 2003).

Algunos de los síntomas tras una corta exposición a los vapores de mercurio incluyen debilidad, escalofríos, gusto metálico, náuseas, vómitos, disnea (dificultad para respirar) y tos, constricción del campo visual, pérdida de audición, palpitaciones, temblores, pérdida de coordinación, etc., mientras que una exposición prolongada produce aún peores síntomas, hemoptisis (expulsión de sangre por los pulmones) y

otros efectos neurológicos y en algunas ocasiones neumonitis intersticial que puede llegar a conducir hacia la muerte (Bouwer, 1999; Gaona Martínez, 2004). El SNC es el órgano crítico en la exposición a vapores causando, con exposiciones agudas, reacciones psicóticas caracterizadas por delirios, alucinaciones y tendencias suicidas (Gaona Martínez, 2004). La ingestión puede causar gastroenteritis ulcerosa y necrosis tubular aguda llegando a causar la muerte por anuria (ausencia de micción) en caso de no realizarse diálisis (Gaona Martínez, 2004). Se pueden desarrollar síndromes nefríticos en los riñones como resultado de la ingestión de  $Hg^{2+}$  (Gaona Martínez, 2004). En dosis altas, afecta al Sistema Nervioso Periférico con síntomas de debilidad muscular y con intoxicación crónica, los síntomas son irreversibles por la destrucción de las células neuronales (Gaona Martínez, 2004). Hay que destacar que el SNC en desarrollo (prenatales y niños) es mucho más sensible que SNC de los adultos (Gaona Martínez, 2004).

## 7. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de este trabajo se divide principalmente en dos partes: el trabajo de campo (muestreo) y de laboratorio (preparación de las muestras, análisis, etc.), los cuales se describen a continuación.

### 7.1. TRABAJO DE CAMPO

Se han utilizado tanto un mapa geológico (INGEMMET, 2001) y otro topográfico (IGN, 1997), ambos con una escala de 1:100 000, con el fin de comprobar la geología y la topografía de las zonas que se iban muestreando. Para realizar el estudio de la zona se han tomado varias muestras de diferente tipología, unas para el reconocimiento del tipo de yacimiento de Cháparra y las leyes de oro, y otras para la determinación de la contaminación provocada por la recuperación de oro con el uso del mercurio. Las muestras se recogieron entre el 3 y el 16 de julio de 2012.

- *Muestreo para el estudio geológico*: muestras de roca de las minas (R,  $n = 30$ , de 14 minas diferentes).
- *Muestreo para la determinación de leyes de oro y otros metales como el mercurio*: colas (L,  $n = 5$ ).

En todos los puntos de muestreo se han tomado las coordenadas UTM (sistema WGS 1984) para su ubicación cartográfica (Figura 9).

Para el muestreo de rocas se han visitado 14 labores mineras pertenecientes a 8 zonas mineras diferentes (Tabla 4). Se han tomado muestras de colas de las zonas representativas del área (Tabla 4) de las que también se ha muestreado la mena, antes de su procesamiento, para determinar el grado de recuperación de oro que se obtiene mediante el uso del mercurio.

**Tabla 4. Relación de las muestras recogidas (tipo, características y coordenadas UTM).**

Código	Tipo	Características	UTM (WGS '84)
R-1	Roca	Minas de MACDESA: Cuarzo masivo con sulfuros y óxidos de hierro	X: 0619019 Y: 8264196
R-2a, b	Roca	Zona minera "San Martín": óxidos de hierro	X: 0619199 Y: 8259570
R-3a, b	Roca		X: 0618960 Y: 8259549
R-4a, b, c, e	Roca	Zona minera "Paralela": óxidos de hierro y sulfuros de hierro y cobre	X: 0622138 Y: 8260878
R-5a, b, c, d	Roca	Zona minera "Cambio Zona Baja": óxidos de hierro, sulfuros	X: 0625744 Y: 8259649
R-6a, b	Roca		X: 0625665 Y: 8259681
R-7a, b	Roca	Zona minera "Gallinazo": óxidos de hierro	X: 0625482 Y: 8258751
R-8	Roca		X: 0625395 Y: 8258832

Código	Tipo	Características	UTM (WGS '84)
R-9a, b	Roca	Zona minera "Comuna Alta": óxidos de hierro	X: 0623963 Y: 8255293
R-10a, b	Roca	Zona minera "Alto Perú": óxidos de hierro	X: 0627678 Y: 8257704
R-11	Roca		X: 0627740 Y: 8257748
R-12a, b, c	Roca		X: 0622333 Y: 8260735
R-13 a, b	Roca	Zona minera "600-Aurex": óxidos de hierro y sulfuros	X: 0622494 Y: 8260728
R-14	Roca		X: 0622580 Y: 8260713
R*	Roca	Muestra <i>ex-situ</i> entre las zonas mineras "Paralela" y "600-Aurex": óxidos de hierro con Au libre	/
L-1	Cola	Procesado de "Cambio Zona Baja"; Aguas arriba de Cháparra	X: 0623566 Y: 8260337
L-2	Cola	Procesado de "Comuna Alta"; Dentro de Cháparra	/
L-3	Cola	Procesado de distintas zonas mineras; Dentro de Cháparra	/
L-4	Cola	Procesado de distintas zonas mineras; Dentro de Cháparra	/
L-5	Cola	Procesado de distintas zonas mineras; Dentro de Cháparra	/

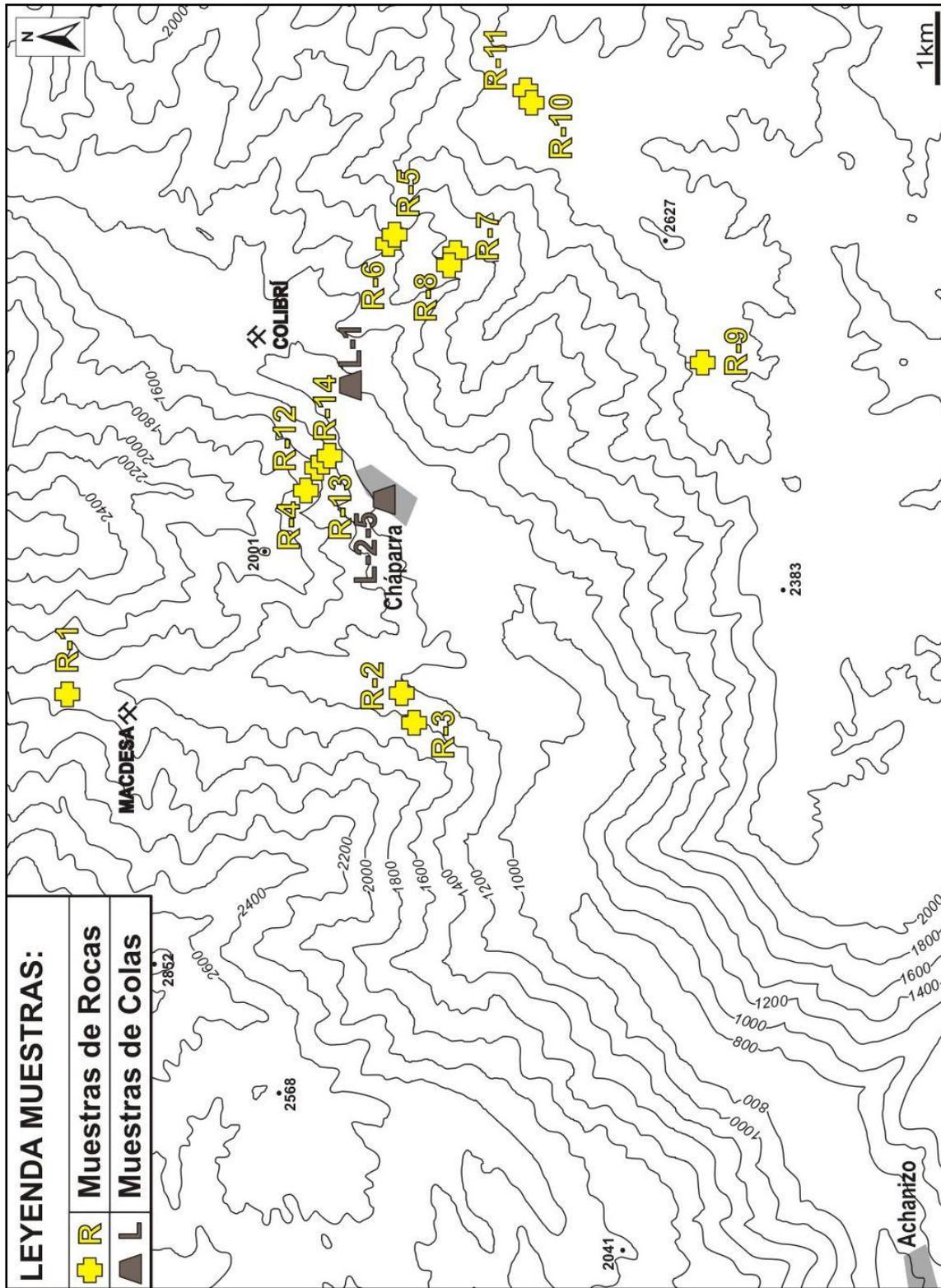


Figura 9. Mapa topográfico de la zona de Cháparra con los puntos de muestreo y tipos de muestreo (curvas de nivel cada 200 m) (Adaptado de IGN, 1997).

## 7.2. TRABAJO DE LABORATORIO

Para el estudio de las muestras recogidas se han realizado diferentes tipos de análisis para determinar la composición química y su mineralogía. En el Anexo 1 se muestra el tipo de análisis al que se han sometido las diferentes muestras.

### 7.2.1. ESTUDIO MINERALÓGICO

- *Difracción de Rayos-X (DRX)*: se trata de una técnica que permite identificar la composición mineralógica principal de las muestras cristalinas, las cuales deben estar pulverizadas para poder ser analizadas. El equipo utilizado ha sido el difractómetro de polvo *PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1* con detector *X'Celerator* del CCiT (Centros Científicos y Tecnológicos) de la Universidad de Barcelona (UB). Se han analizado un total de 13 muestras R, utilizando una radiación  $\text{CuK}_\alpha$  con filtro de Ni.

Para poder interpretar los diagramas de difracción y obtener las fases minerales de las que está compuesta cada muestra analizada, es necesario trabajar con softwares informáticos, en este caso el MacDiff y principalmente el X'Pert HighScore Plus (versión 2.2b).

Se han preparado 6 probetas pulidas de diferentes muestras R, para el análisis bajo microscopio óptico y electrónico:

- *Microscopía Óptica de Luz Reflejada*: el microscopio óptico de luz reflejada nos permite reconocer las asociaciones minerales y las texturas de los minerales opacos y además nos permite reconocer la secuencia paragenética.
- *Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)*: se ha utilizado el *Hitachi Tabletop Microscope TM-1000* del Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales de la Escuela Politécnica Superior de Ingenieros de Manresa (EPSEM) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). El *TM-1000* utiliza un voltaje de 15 kV, un detector BSE (*Solid State Backscattered Electron*), una magnificación de 20 – 10 000 X y un analizador EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*) *Bruker Quantax 50* que permite realizar un análisis cualitativo (y cuantitativo) de los elementos (desde el B (5) al Am (95)) presentes en las fases minerales, lo cual ayuda a identificar los minerales que en microscopía óptica no se puede. Asimismo se han tomado fotografías de las muestras y espectrogramas que permiten identificar las fases minerales.

### 7.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se ha realizado para obtener resultados de concentraciones de metales y otros elementos que presentan las muestras de rocas y colas (en especial el oro).

- *Muestras de rocas y colas*: se han analizado 11 muestras (6 de roca y otras 5 de colas) para realizar un análisis químico en los laboratorios ACTLABS de Canadá, para obtener las leyes de oro de las rocas y la cantidad que se pierde durante el procesado en los molinos con la mezcla de mercurio.

La técnica utilizada para tratar las muestras ha sido 1EPI "Au+14", el cual proporciona una alta calidad, mediante:

- *INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis)*: Esta técnica que implica el bombardeo de neutrones sobre la muestra induciendo rayos gamma proporcionando su "huella", se trata de una técnica analítica adecuada para el análisis de muestras geológicas. En el caso que nos ocupa se han analizado Au, As, Sb, Ba, Hg y W.
- *AR-ICP (Aqua Regia – Inductively Coupled Plasma)*: esta técnica determina cuantitativamente los elementos en materiales geológicos mediante digestión en agua regia. Este método nos permite analizar metales base y sulfuros.

Para estos análisis se han preparado 30 g de cada muestra, cada una de ellas pulverizada hasta alcanzar un tamaño de grano  $\leq 100 \mu\text{m}$ .

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. MINERALIZACIÓN Y ALTERACION HIDROTHERMAL

Las mineralizaciones que presenta Cháparra se encuentran enclavadas en el Batolito de la Costa en el sur de Perú, concretamente se encuentra dentro de la Superunidad Linga, donde se localizan depósitos menores de IOCG en forma de vetas, las cuales son probablemente del Cretácico Superior (Vidal, 1985).

La mineralización en su mayoría está constituida por óxidos de hierro, como hematites y goethita, y sulfuros, tanto de hierro como de cobre (pirita, calcopirita y covellita, principalmente) como se puede ver en las Figura 10 a Figura 12 y Anexo 2. Lo que hace importante a este yacimiento es la presencia de oro, además de minerales de tierras raras como la monacita, de uranio en uraninita, entre otros.

En San Martín la mineralización se encuentra en vetas de cuarzo tapizado con óxidos de hierro, que le da ese color rojizo tan característico (Figura 10a); en Paralela la hay gran variabilidad con óxidos de hierro, zonas ricas en azufre en forma de sulfatos de hierro, sulfuros de cobre (Figura 10b), vetas de cuarzo con sulfuros (Figura 10c). Las minas de Gallinazo, Comuna Alta y Alto Perú presentan vetas muy ricas en óxidos de hierro (y cuarzo) (Figura 11). La zona de 600-Aurex contienen vetas de óxidos de hierro (y cuarzo) (Figura 12a) y de zonas alteradas a sulfatos de hierro (Figura 12b). La muestra R\* se trata de una roca recogida *exsitu* (entre Paralela y 600-Aurex), debido a que se puede ver oro libre a simple vista sin la necesidad de una lupa (Figura 12c).

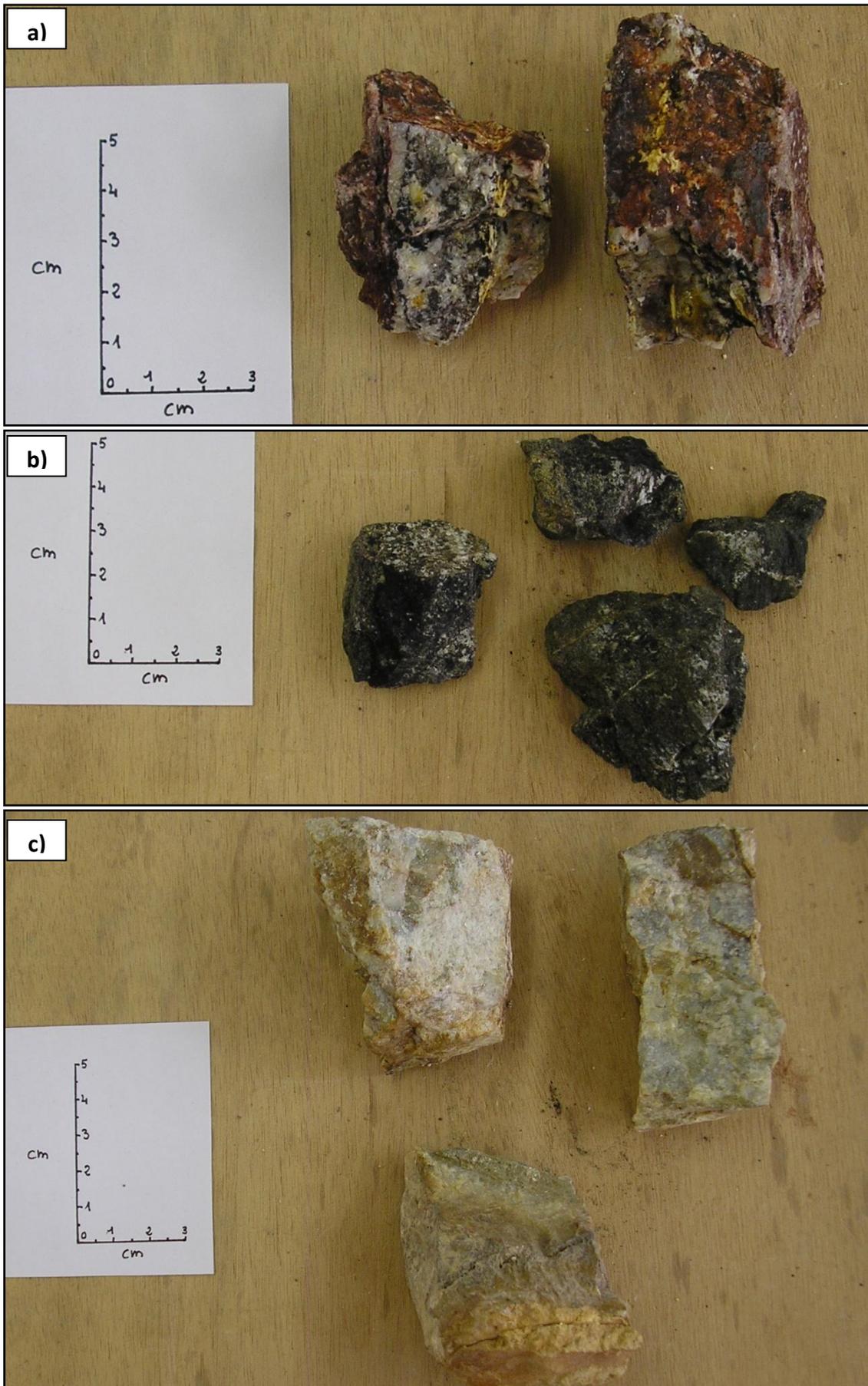


Figura 10. Fotografías de muestras de rocas de las vetas de las distintas minas. a) R-3a, San Martín; b) R-4a y c) R-4e, ambas de Paralela.

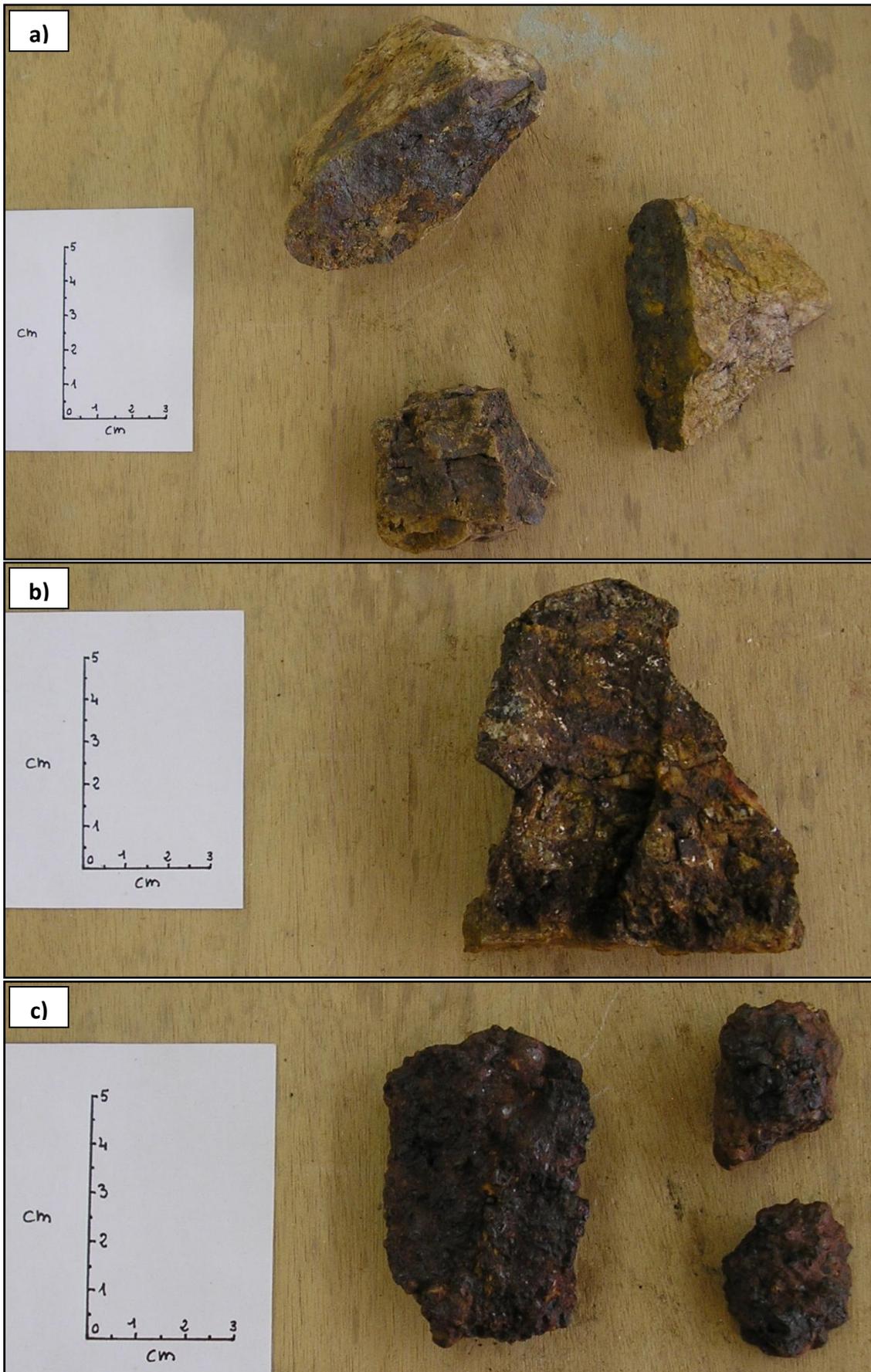


Figura 11. Fotografías de muestras de rocas de vetas de las distintas minas. a) R-7b, Gallinazo; b) R-9a, Comuna Alta; c) R-10b, Alto Perú.

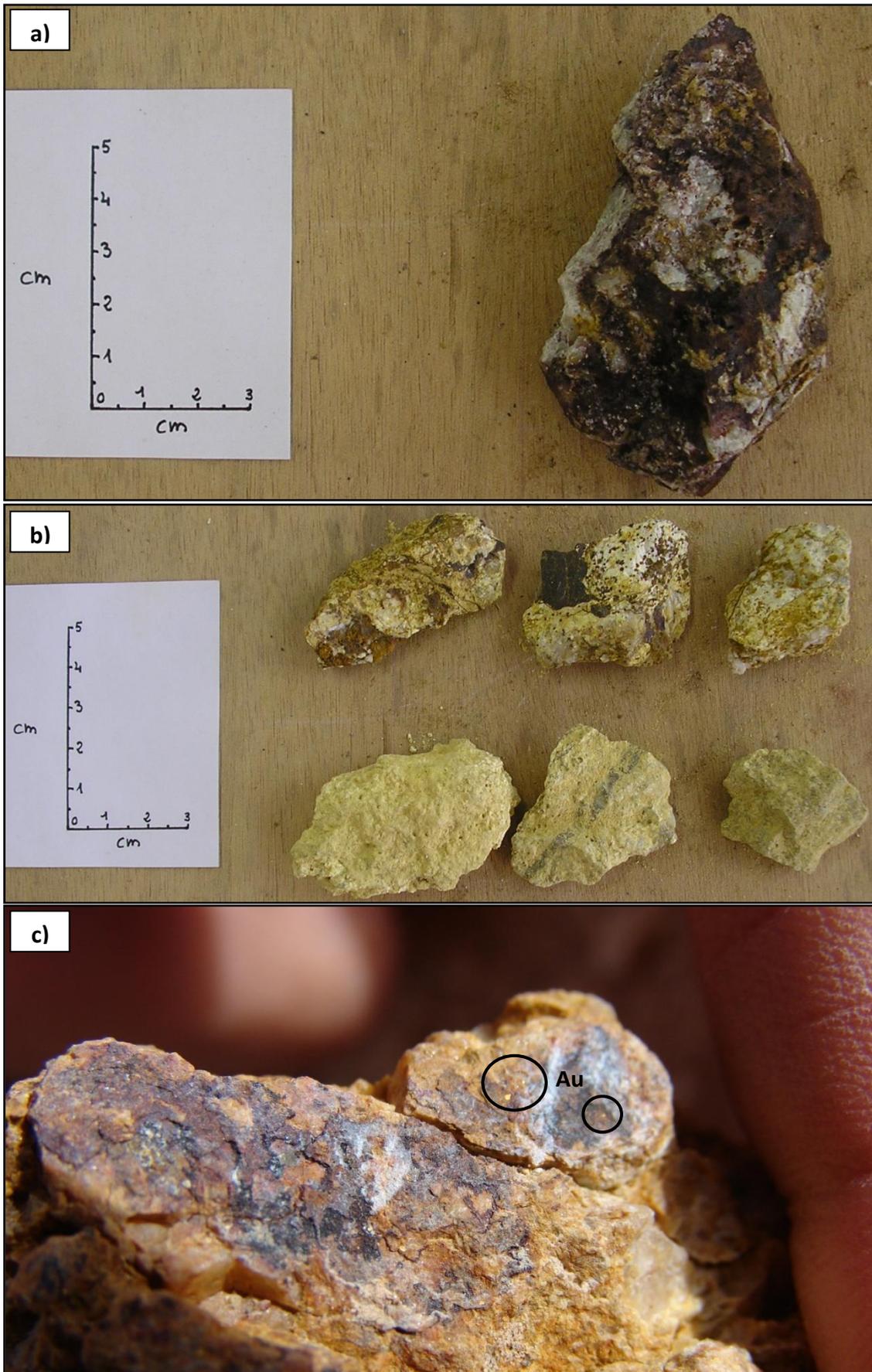


Figura 12. Fotografías de rocas de vetas de distintas minas: a) R-12a y b) R-14 de 600-Aurex; c) Fotografía de una roca con oro (Au) libre (R\*) recogida de una escombrera entre las zonas mineras de Paralela y 600-Aurex.

Las mineralizaciones se concentran principalmente en vetas que no superan, generalmente, el metro de potencia, las cuales se encuentran enclavadas en zonas de falla (Figura 13 y Figura 14). Estas vetas son de colores muy rojizos, dando los óxidos de hierro a las vetas esta coloración, que se pueden identificar a visu, como el hematites y la goethita, y otro tipo de mineral más difícil de identificar a visu como la natrojarosita y la jarosita (sulfatos de hierro) (Figura 15), la cual en un principio se puede confundir con limonita, (otro óxido de hierro). Asimismo, se localizan otros tipos de mineralización, como los sulfuros (Figura 16), pero estos se presentan en menor cantidad. En ambos casos, las vetas presentan una cantidad considerable de cuarzo. Todas las mineralizaciones, ya sean óxidos, sulfuros o cuarzo contienen oro, sin embargo la mineralización más rica es la de óxidos de hierro.

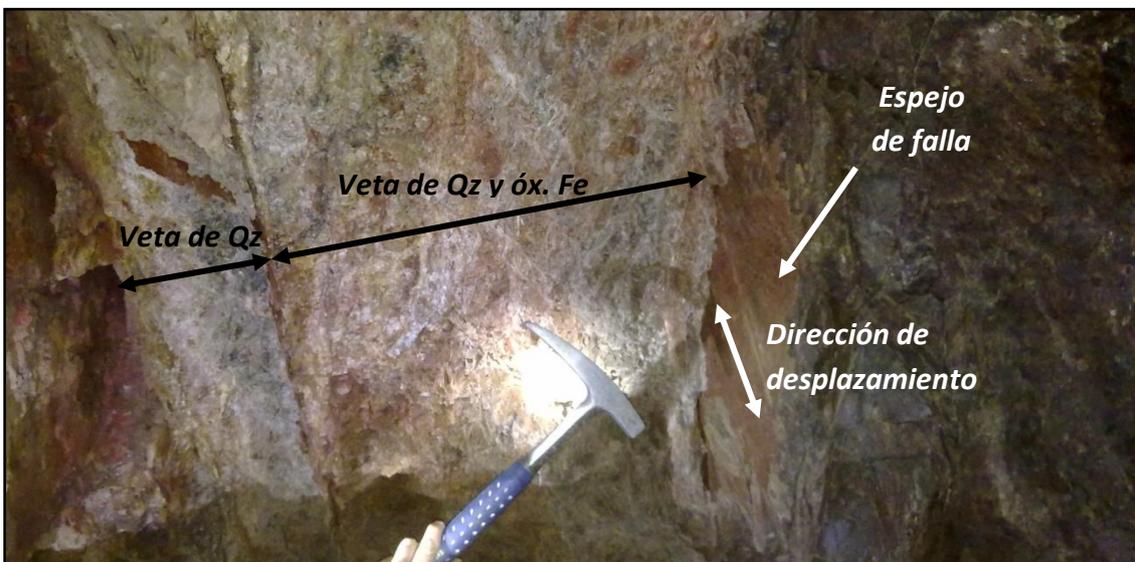


Figura 13. Vetas de cuarzo (Qz) y de óxidos de hierro (óx. Fe) + cuarzo. Minas de MACDESA.



Figura 14. Veta de óxidos de hierro (óx. Fe) y cuarzo (Qz). Minas de San Martín.

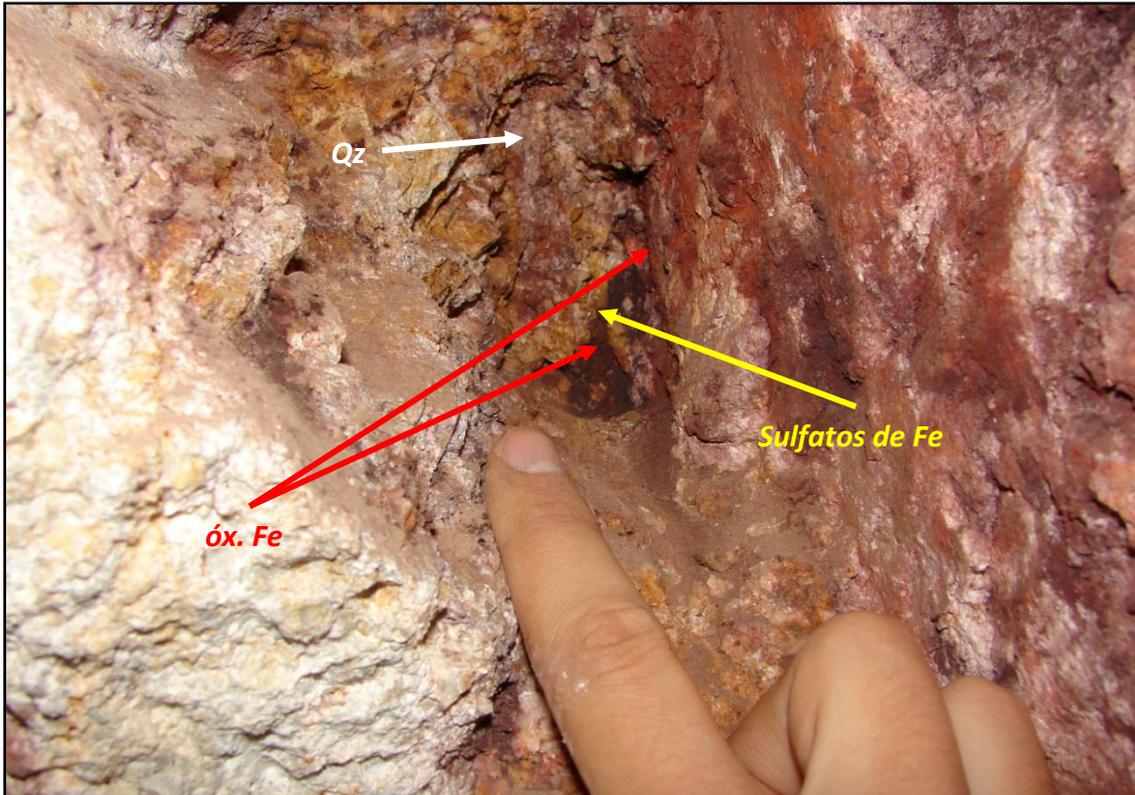


Figura 15. Vetillas con óxidos de hierro (óx. Fe; colores rojizos) y sulfatos de hierro (colores amarillentos) además de cuarzo (Qz). Minas de San Martín.



Figura 16. Mineralizaciones de sulfuros de hierro y cobre. Mina Paralela.

En la Tabla 5 se puede ver la composición de diferentes muestras con su mineralogía principal, minerales secundarios y accesorios tras su estudio bajo microscopio óptico de luz reflejada y SEM. En todas ellas se han observado una gran variedad de minerales. Los minerales mayoritarios son cuarzo y pirita en la mayoría de los casos, otros minerales comunes y que aparecen en cantidades considerables en ciertas ocasiones son la covellita, sulfosales y TT.RR. en forma de fosfatos (monacita), además de Au nativo en todas ellas, ya sea dentro de la pirita o en el cuarzo.

**Tabla 5. Mineralogía de las rocas tras el análisis con microscopía óptica de luz reflejada y SEM.**

Muestra	Zona	Minerales secundarios y accesorios	Minerales principales
R-1	MACDESA	Oro nativo [Au] Calcopirita [CuFeS <sub>2</sub> ] Esfalerita [ZnS] Galena [PbS] Covellita [CuS] Bismutinita [Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ] Telurobismutina [Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ] Tennantita [(Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Estannita [Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub> ] Annivita [Cu <sub>10</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> (Bi,Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Monacita [(Ce,La,Nd)PO <sub>4</sub> ]	Pirita [FeS <sub>2</sub> ] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ]
R-4a	Paralela	Oro nativo [Au] Tetraedrita [Cu <sub>10</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Yodargirita [AgI] Galena [PbS] Escorodita [FeAsO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Garavellita [FeSbBiS <sub>4</sub> ] Monacita [(Ce,La,Nd)PO <sub>4</sub> ]	Pirita [FeS <sub>2</sub> ] Covellita [CuS] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ]
R-4c	Paralela	Oro nativo [Au] Calcopirita [CuFeS <sub>2</sub> ] Arsenopirita [FeAsS] Yodargirita [AgI] Tetraedrita [Cu <sub>10</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Bismuto nativo [Bi]	Pirita [FeS <sub>2</sub> ] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Covellita [CuS]
R-4e	Paralela	Oro nativo [Au] Arsenopirita [FeAsS] Escorodita [FeAsO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Galena [PbS] Annivita [Cu <sub>10</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> (Bi,Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Monacita [(Ce,La,Nd)PO <sub>4</sub> ]	Pirrotina [Fe <sub>1-x</sub> S] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Jarosita [KFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ] Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O]

Muestra	Zona	Minerales secundarios y accesorios	Minerales principales
R-6a	Gallinazo	Oro nativo [Au] Plata nativa [Ag] Bismuto nativo [Bi] Galena [PbS] Calcopirita [CuFeS <sub>2</sub> ] Apatito [Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,Cl,F)] Zircón [ZrSiO <sub>4</sub> ] Rutilo [TiO <sub>2</sub> ] Bismutinita [Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ] Silicatos de Fe y Al	Ferrocordierita [(Fe <sup>2+</sup> ,Mg) <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub> ] Pirita [FeS <sub>2</sub> ]
R-12c	600-Aurex	Oro nativo [Au] Bismuto nativo [Bi] Uraninita [UO <sub>2</sub> ] Monacita [(Ce,La,Nd)PO <sub>4</sub> ] Percleveita [(Ce,La,Nd) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ] Tetraedrita [Cu <sub>10</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Bismutinita [Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ] Arsenopirita [FeAsS] Galena [PbS] Covellita [CuS] Esfalerita [ZnS]	Pirita [FeS <sub>2</sub> ] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ]

La mineralización de MACDESA tiene una gran variedad mineralógica. Sus minerales principales son el cuarzo y la pirita. El oro se encuentra incluido en las piritas mayoritariamente (Figura 18a, Figura 19a y b), no obstante también aparece en el cuarzo (Figura 19e). Otros minerales que aparecen son covellita, calcopirita, galena, esfalerita, bismutinita, sulfosales (tennantita y annivita) y estannita siempre englobados por la pirita (Figura 19a, b y c). En cambio, la monacita y la telurobismutita se encuentran en el cuarzo (Figura 19d).

La mineralización de Paralela es mucho más rica en pirita y covellita, con cuarzo en mucha menor cantidad. La pirita se encuentra muy fracturada con una matriz de covellita recristalizada en agregados policristalinos. Las sulfosales forman vetillas atravesando la pirita y la covellita, por tanto se trata del episodio más tardío de formación de fases minerales (Figura 18b, c y Figura 20c). Al SEM se ha comprobado que lo que parecía en principio una matriz monominerálica de covellita, en realidad se encuentra acompañada por sulfosales, concretamente por tetraedrita. Por lo tanto, hay dos etapas de formación de sulfosales: la de la matriz junto a la covellita, la tetraedrita; y la garavellita que atraviesa y rellena las fracturas presentes en la pirita y la matriz anterior. Los rellenos de garavellita se encuentran rellenos por escorodita, siendo éste de formación posterior (Figura 20c). Se puede encontrar oro tanto dentro de la pirita (Figura 20a) como la matriz de covellita (Figura 18e). Dentro de la pirita también encontramos Au (Figura 18e). Otros minerales característicos de los depósitos de IOCG que presenta esta muestra es la monacita. Cabe destacar la presencia de plata

en forma de yoduro, la yodargirita, un mineral poco común. La fuente de yodo se puede deber a la influencia marina durante las tormentas o por agua oceánica transportada durante la temporada de huracanes (Mann, 1984). En ocasiones, la pirita contiene tanto oro (Figura 20d) como bismuto nativo (Figura 20e).

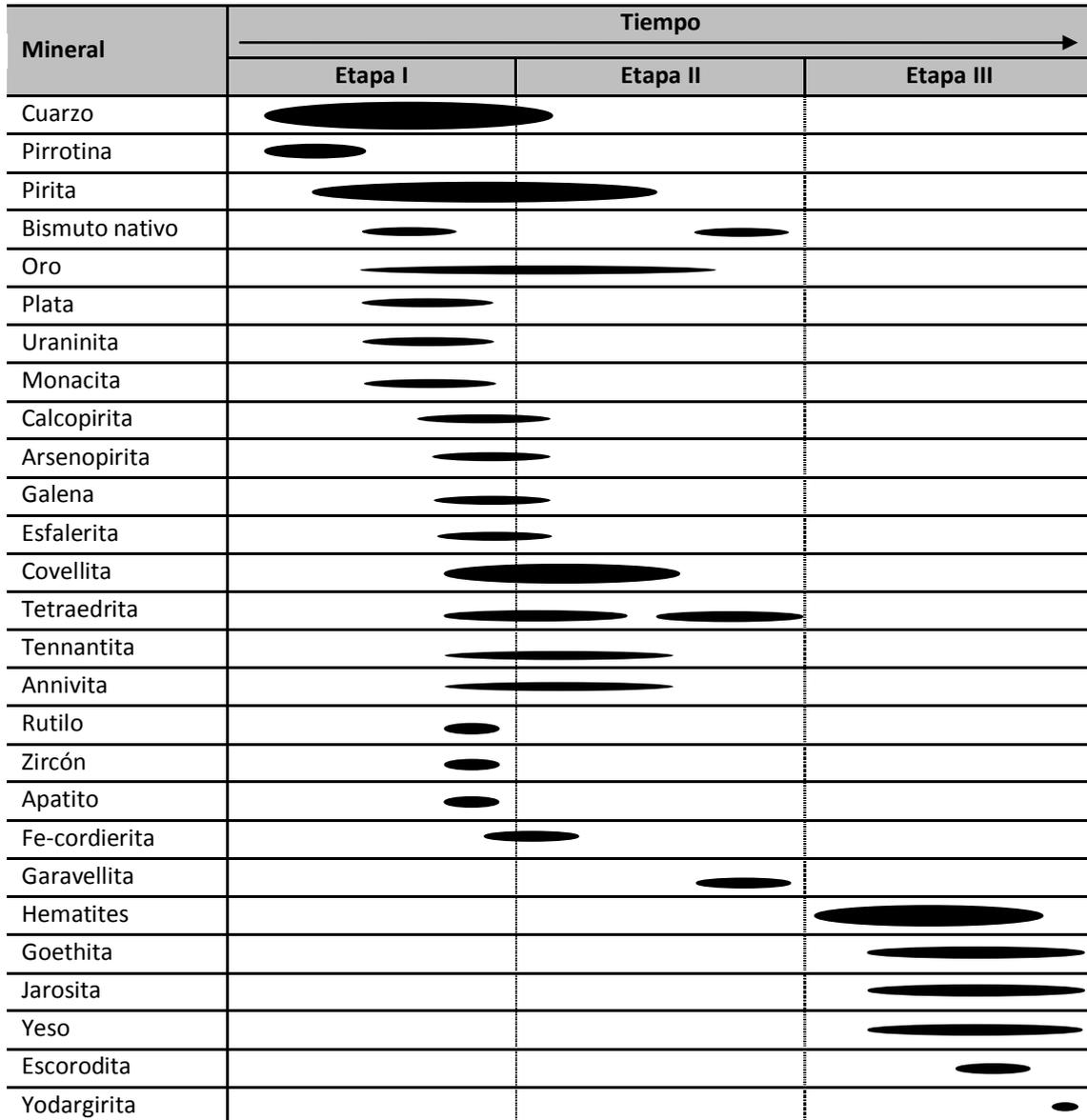
En algunas partes de esta zona la mineralogía es totalmente diferente a la descrita anteriormente. Contiene una mayor cantidad de ganga, no sólo de cuarzo, si no de otros minerales de alteración como el yeso y la jarosita y natrojarosita. La presencia de sulfuros se reduce, principalmente, a la pirrotina. Lo más característico de la pirrotina es que está muy alterada a sulfatos, yeso y jarosita. Se ve muy bien la sustitución del sulfuro por los sulfatos, manteniendo la forma hexagonal de la pirrotina, avanzando desde el exterior hasta el interior (Figura 18f y Figura 21b). Junto a este cambio, aparece un arseniato, la escorodita. Al igual que las anteriores, contiene oro (Figura 20f). Otros minerales presentes, pero en menor cantidad son la galena, la covellita, la annivita (Figura 21a), la arsenopirita y la monacita (Figura 21c).

La mineralización en Cambio Zona Baja se caracteriza por presentar la ganga constituida mayoritariamente por ferrocordierita, además de apatito, rutilo y zircón. El sulfuro principal sigue siendo la pirita, con calcopirita, galena y bismutinita poco abundantes. Aparte de oro (Figura 21e), también hay plata (Figura 21f) y bismuto nativo (Figura 21d).

La mineralización en 600-Aurex, al igual que en MACDESA, posee una gran riqueza mineralógica. Los minerales mayoritarios son la pirita y ganga de cuarzo. La pirita se encuentra brechificada (Figura 22e). A diferencia de las muestras anteriores, el oro es poco frecuente, encontrándose en el interior de pirita (Figura 22d). Contiene una gran riqueza en TT.RR., ya sea en forma de fosfatos (monacita) o en forma de silicatos (percleveita) (Figura 22c). De todas las muestras es la única con minerales de uranio, en forma de óxido, uraninita (Figura 22b y d) englobados en la ganga, rodeada o no por pirita. Presenta otros sulfuros en menor cantidad como arsenopirita, galena, esfalerita, covellita, y bismutinita, además de sulfosales (tetraedrita) y bismuto nativo (Figura 22e).

Se ha elaborado la secuencia paragenética de los minerales correspondientes al yacimiento de Cháparra. Ésta se ha dividido en tres etapas: (I) Mineralización primaria; (II) Fracturación y relleno; y (III) Alteración supergénica (Figura 17). La secuencia comienza con la formación de cuarzo, pirrotina y pirita. Posteriormente comienza la cristalización de oro y bismuto nativo, a la vez que los minerales anteriores siguen formándose, de tal manera que los engloban. La uraninita también queda englobada en la pirita y en el cuarzo, mientras que la monacita únicamente aparece como cristales dispersos en el cuarzo. La pirita suele presentar calcopirita en su interior. También precipitan otros sulfuros como la galena, la esfalerita o la arsenopirita, ya sean incluidos en la pirita como fuera (en el cuarzo). Seguidamente se forma la matriz

policristalina de covellita y tetraedrita por recristalización de los sulfuros de hierro y cobre. Otras sulfosales que se generan son la annivita y la tennantita, apareciendo en el interior de la pirita. Otros minerales de ganga que se generan al final de la etapa de mineralización primaria son el rutilo, zircón, apatito y posteriormente la ferrocordierita entre las etapas I y II. En la etapa de formación de fracturas, éstas son rellenadas por una segunda tetraedrita o por otra sulfosal, garavellita. Asimismo, dentro de las fracturas también precipita bismuto nativo. Por último, la alteración supergénica genera sulfatos como la jarosita y el yeso, la escorodita y la yodargirita.



**Figura 17. Secuencia paragenética del yacimiento de Cháparra. Etapa I: Mineralización Primaria; Etapa II: Fracturación y Relleno; Etapa III: Alteración Supergénica.**

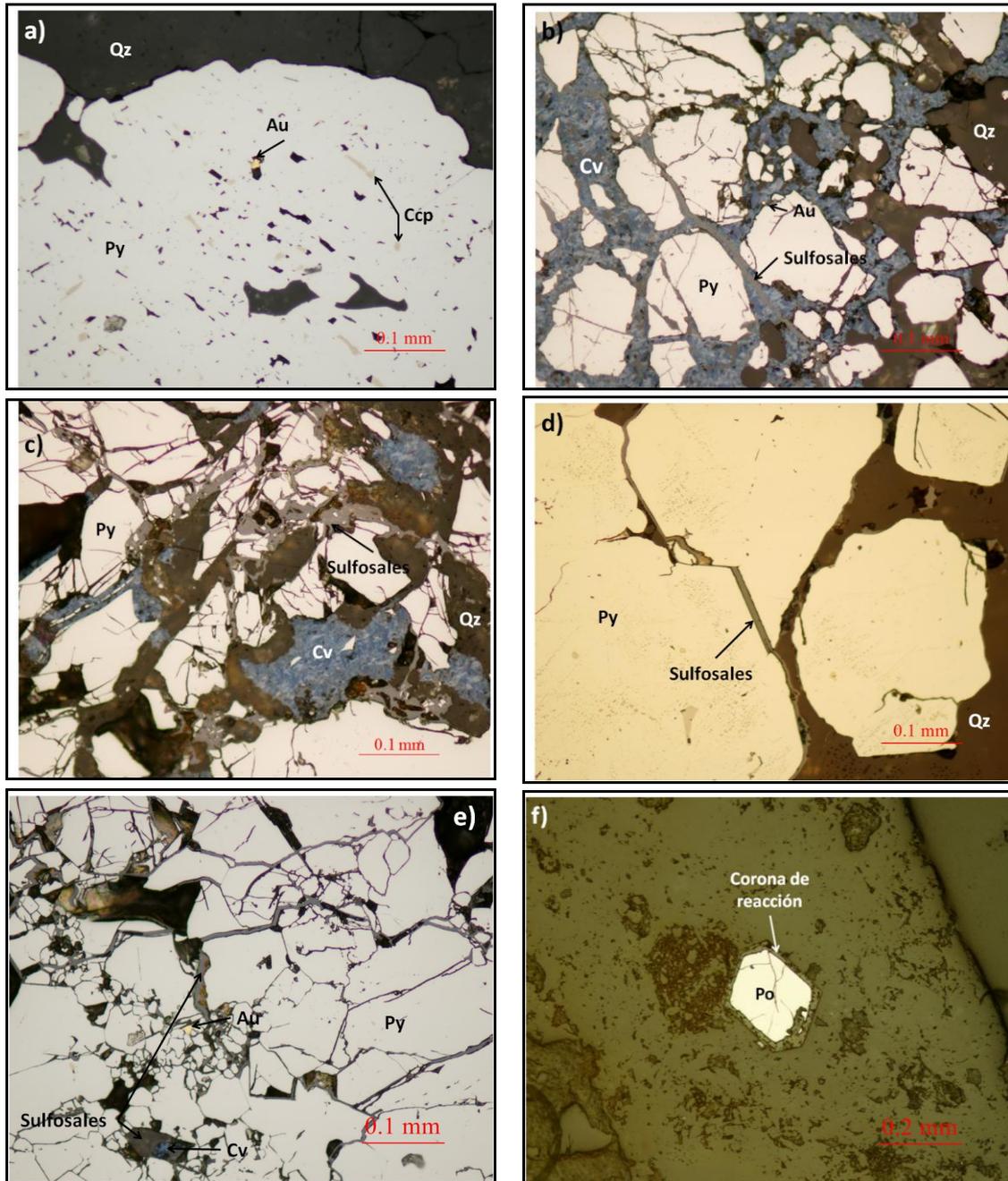
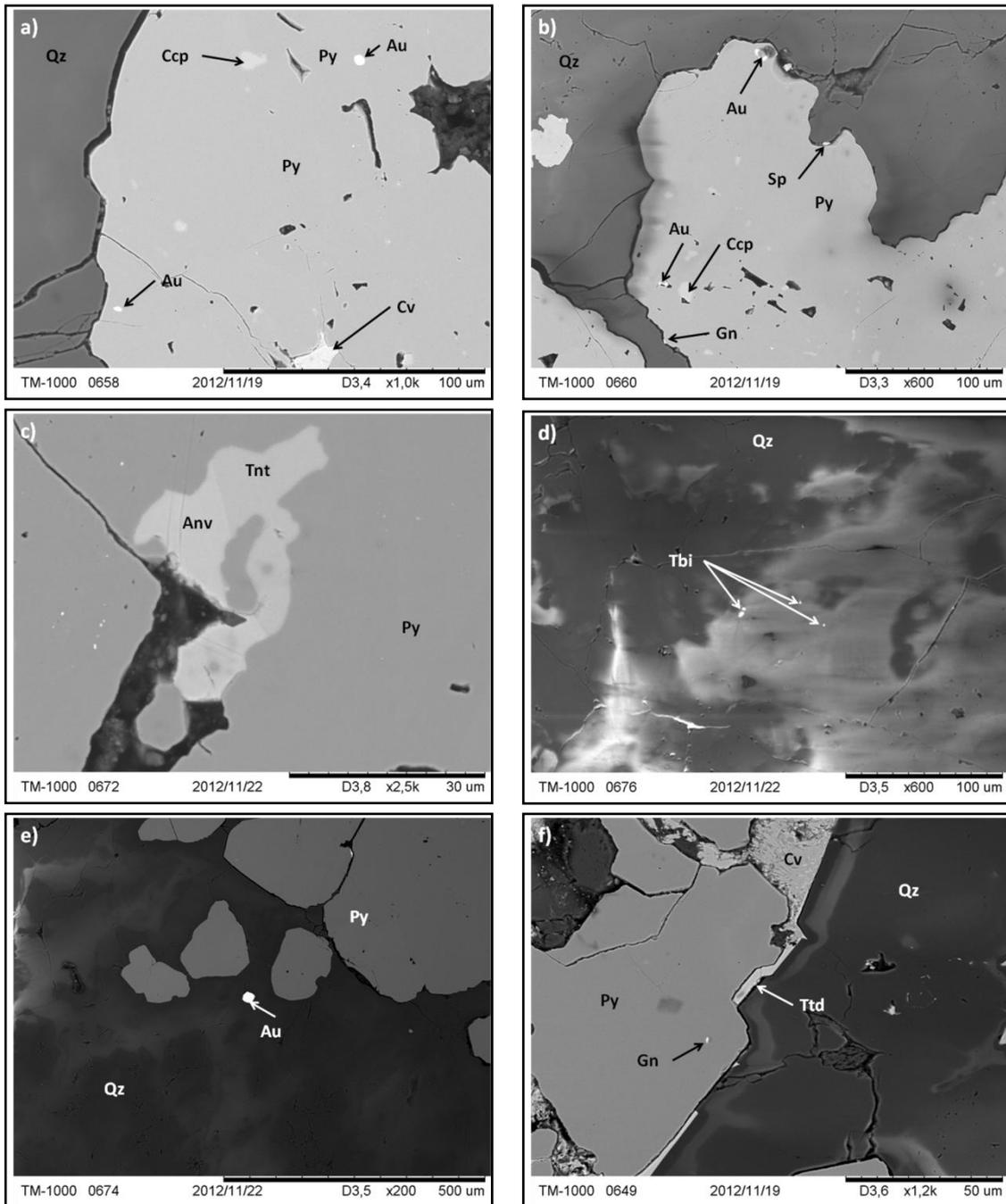


Figura 18. Imágenes de microscopio óptico de luz reflejada de las muestras R-1 (a), de MACDESA; R-4a (b), R-4c (c-e) y R-4e (f) de Paralela. a) Cristal de Py con textura poikilitica. La Py contiene un grano de Au y varios cristales con bordes curvos de Ccp; b) Cristales de Py fracturados y recrystalización de Cv en agregados policristalinos. Las sulfosales rellenan las fracturas y son posteriores a la Cv. Se observa un pequeño cristal de Au en el centro de la imagen junto al borde de la Py; c) Cristales de Py muy fracturadas, con agregados policristalinos de Cv y sulfosales relleno las fracturas, siendo posterior a la Cv y al Qz; d) Bordes intergranulares rectos de Py rellenos de sulfosales y alrededor de la Py; e) Un pequeño cristal de Au se puede ver en centro de la imagen englobado en Py, la cual tiene varias fracturas rellenas por sulfosales y también con Cv; f) Cristal de Po hexagonal con el borde externo alterado con una corona de reacción alrededor manteniendo la forma hexagonal de la Po. Au: oro; Ccp: calcopirita; Cv: covellita; Py: Pirita; Qz: cuarzo.



**Figura 19. Fotografías de SEM de las muestras R-1 (a-e) y R-4a (f). a) Cristal de Py con inclusiones de Au, presenta Cv en el interior de una fractura, y también posee “manchas” de Ccp. La Py tiene bordes de reacción en contacto con el cuarzo Qz; b) Py con Au y Ccp en su interior, con Sp y Gn en los bordes del grano de Py en contacto con el Qz; c) Py con dos sulfosales juntas en su interior con un borde en común, la Tnt (Cu y Fe) y la Anv (Cu, Fe y Zn); d) Pequeños cristales de Tbi incluido en el Qz; e) Au incluido en Qz, fuera de la Py; f) La Py presenta bordes de alteración a sulfosales (Ttd) y agregados policristalinos de Cv, tanto alrededor del a Py, como en fracturas junto a las sulfosales. La Py incluye un grano de Gn. Anv: annivita; Au: oro; Ccp: calcopirita; Cv: covellita; Gn: galena; Qz: cuarzo; Sp: esfalerita; Tbi: telurobismutita; Tnt: tennantita; Ttd: tetraedrita.**

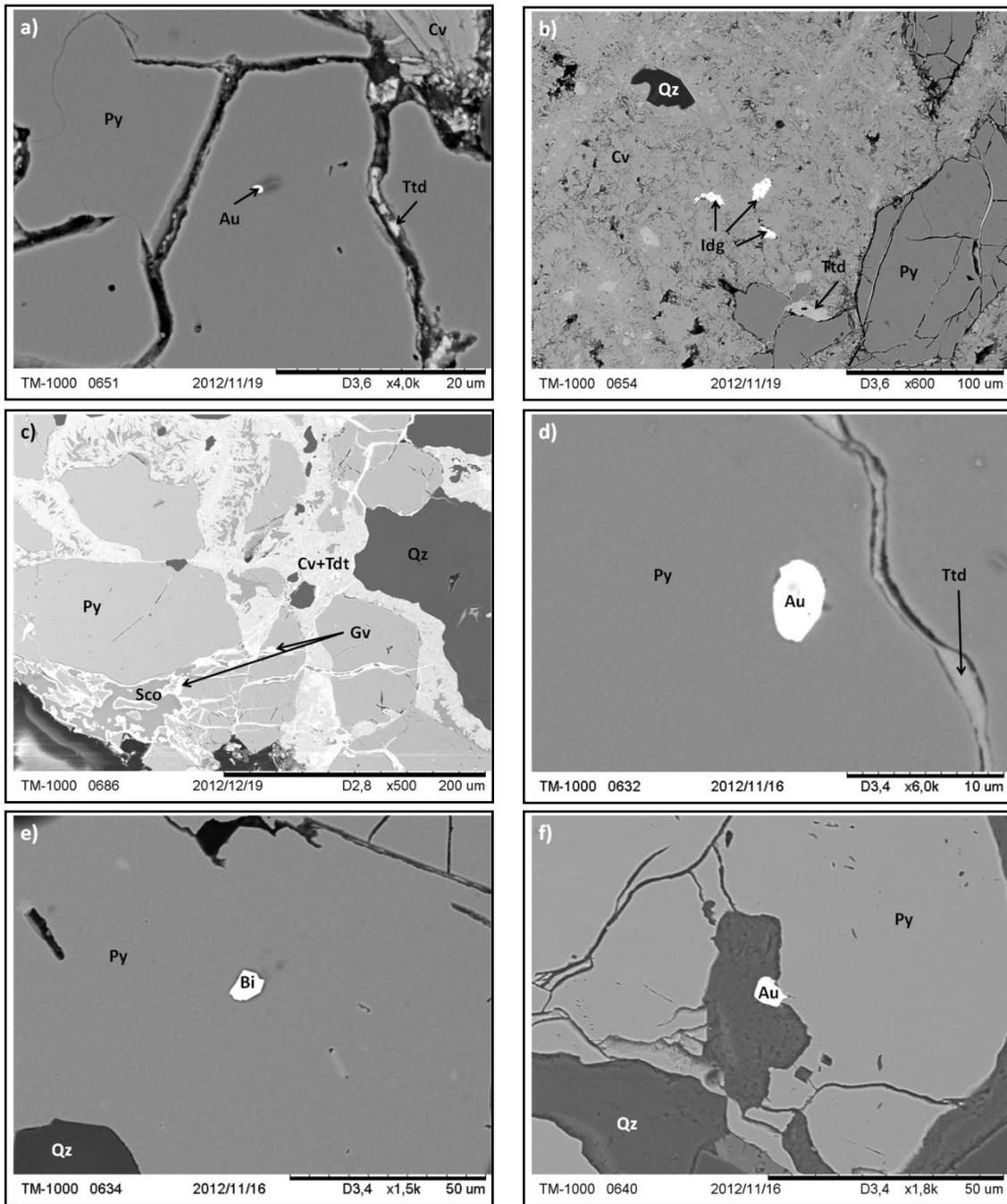
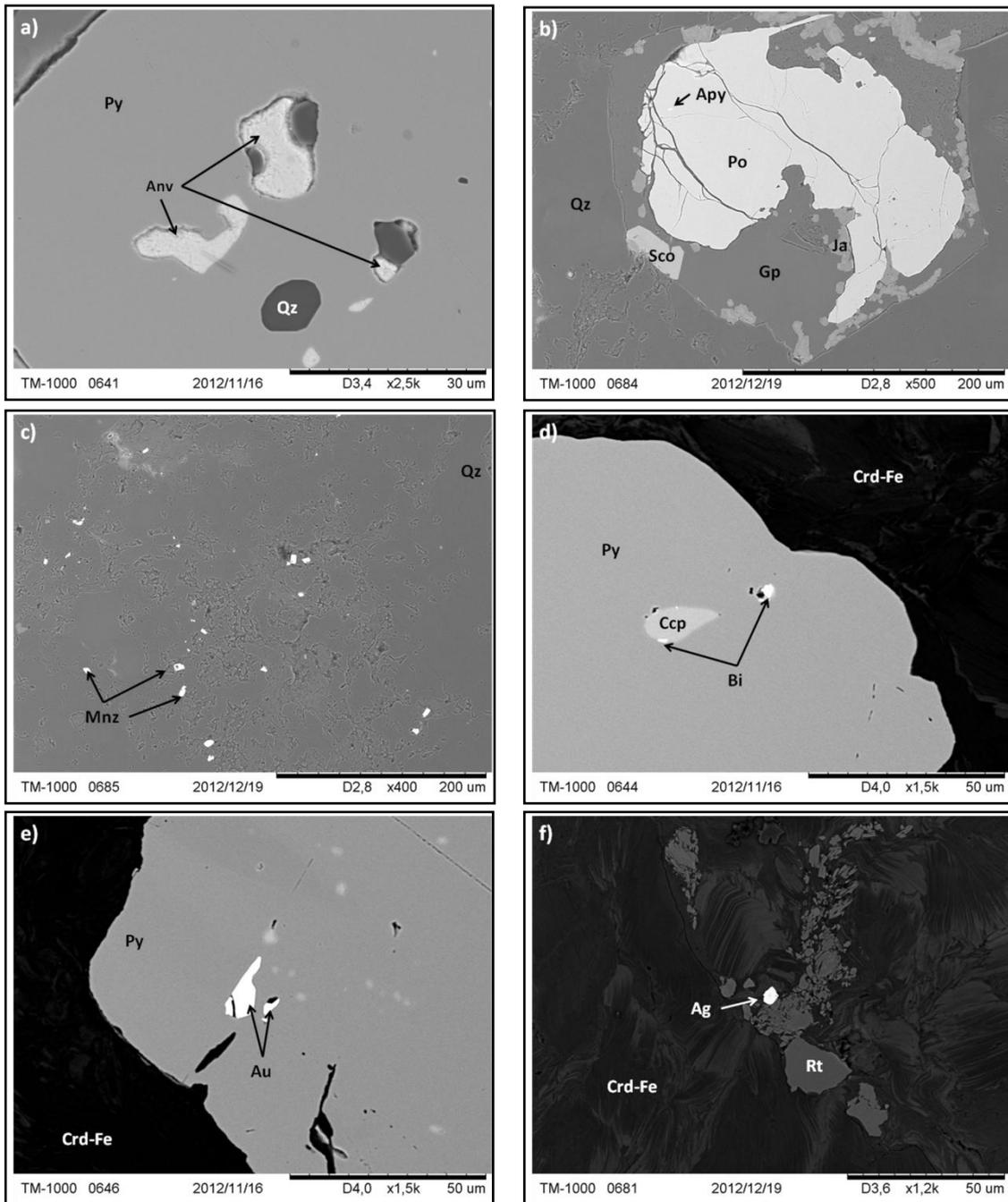


Figura 20. Imágenes SEM de las muestras R-4a (a-c), R4c (d-e) y R-4e (f). a) Au incluido en Py, la cual está fracturada y rellena de sulfosales (Ttd), con Cv a su alrededor; b) Cristales de Py fracturada rellena de sulfosales (Ttd) y rodeada por agregado policristalino de Cv y sulfosales, posteriores a la Py. Entre los agregados de Cv hay 3 granos masivos de Idg (Agl); c) Cristales de Py rodeados de agregados policristalinos de Ttd y Cv, y las fracturas que atraviesan la Py y la matriz policristalina están rellenas por Gv y Sco, más tardía que la Gv, ; d) Au incluido en Py, la cual está fracturada y rellena de Ttd; e) Bi en el interior de Py; f) Grano de Au entre Py y Qz. Au: oro; Bi: bismuto nativo; Ccp: calcopirita; Cv: covellita; Gv: Garavellita; Idg: yodargirita; Qz: cuarzo; Sco: Escorodita; Ttd: tetraedrita.



**Figura 21.** Imágenes SEM de las muestras R-4e (a-c) y R-6a (d-f). a) Anv y Qz en el interior de Py; b) Cristal de Po siendo sustituida por alteración a Gp y Ja. En uno de los bodes aparecen bien formados dos cristales de Sco; c) Pequeños cristales de Mnz en Qz masivo; d) Pequeños granos de Bi incluidos en Py, uno de ellos entre Ccp y Py; e) Cristales de Au incluidos en Py; f) Ag en Crd-Fe junto a Rt. *Ag: plata; Anv: Annivita; Apy: arsenopirita; Au: oro; Bi: bismuto nativo; Ccp: calcopirita; Crd-Fe: ferrocorderita; Gp: yeso; Ja: jarosita; Mnz: monacita; Po: pirrotina; Py: pirita; Rt: rutilo; Sco: escorodita.*

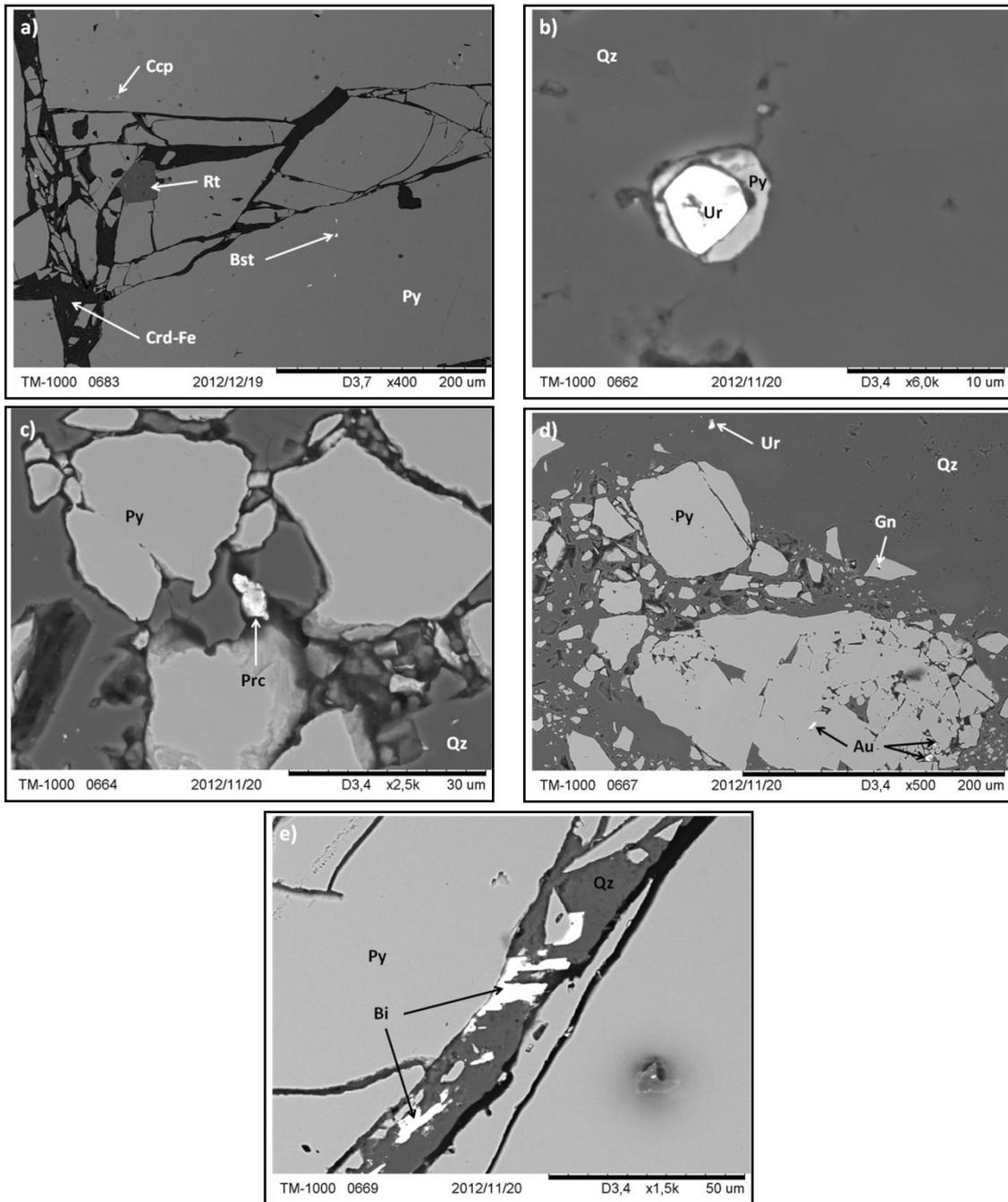


Figura 22. Imágenes SEM de las muestras R-6a (a) y R-12c (b-e). a) Grandes cristales de Py fracturados, con Crd-Fe y Rt entre los cristales y Bst incluidos en la Py; b) Ur rodeada de Py; c) Cristal de Prc (silicato de TT.RR.) en matriz de Qz; d) Granos de Au en Py, Ur en matriz de Qz y Gn dentro de Py. La Py se encuentra brechificada; e) Fractura de Py rellena de Qz y cristales de Bi. Au: oro; Bi: bismuto nativo; Bst: bismutinita; Ccp: calcopirita; Crd-Fe; Gn: galena; Prc: percleveita; Py: pirita; Rt: rutilo; Qz: cuarzo; Ur: uraninita.

Las principales alteraciones que nos encontramos en este estudio son la propilítica (cloritización y albitización + cuarzo), la argílica avanzada (jarosita-natrojarosita) y la sericítica (moscovita-sericita-cuarzo). Hay que destacar la presencia de yeso (-anhidrita) y otros minerales de alteración como el feldespato potásico y flogopita, vermiculita, natrolita, además de cuarzo generalizado, más o menos abundante, en prácticamente todas las muestras.

En la Tabla 6 se muestran la mineralogía y alteraciones principales que presentan las distintas zonas mineras estudiadas (Figura 23):

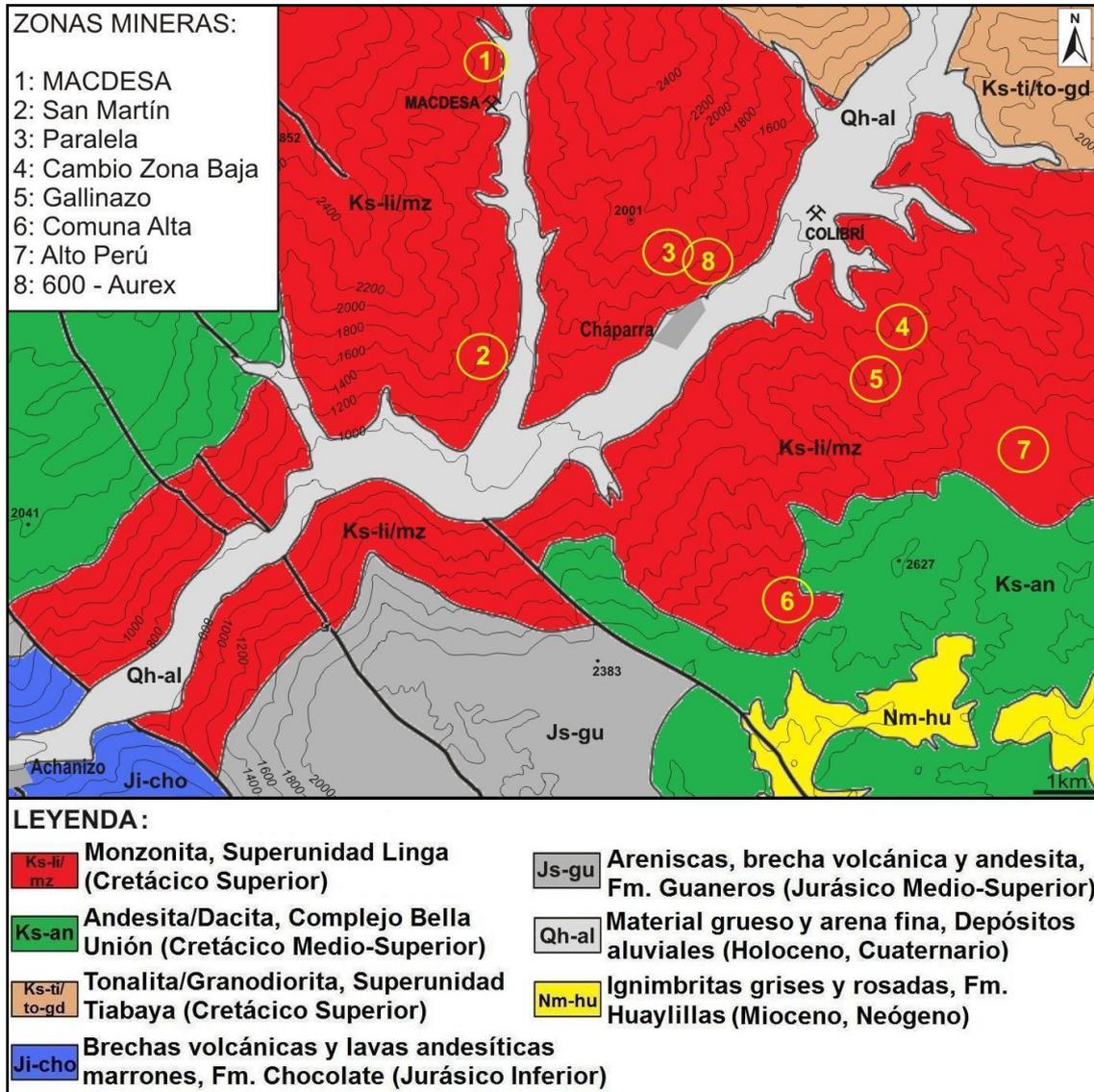


Figura 23. Mapa geológico y topográfico con las diferentes zonas mineras estudiadas (Adaptado de INGEMMET, 2001 e IGN, 1997).

- *San Martín* (muestras R-2b, R-3a y R-3b): las muestras recogidas del interior de las minas presentan alteraciones sericítica en forma de moscovita en las muestras R-2b y R-3b; albítica por la aparición de albita en la muestra R-3a y R-3b; y clorítica por el clinocloro (clorita de Fe-Mg) presente en la R-2b. Asimismo, las muestras R-3 presentan yeso (y anhídrita), pudiendo haberse formado por alteración de la piritita.
- *Paralela*: la muestra característica de esta zona es la R-4b y muestra una sericitización con moscovita y cuarzo; una alteración argílica avanzada con la presencia de jarosita-natrojarosita (sulfatos de K y Na con Fe<sup>3+</sup> hidratados) que a *visu* pueden confundirse con limonita (óxido de hierro) por su color amarillento;

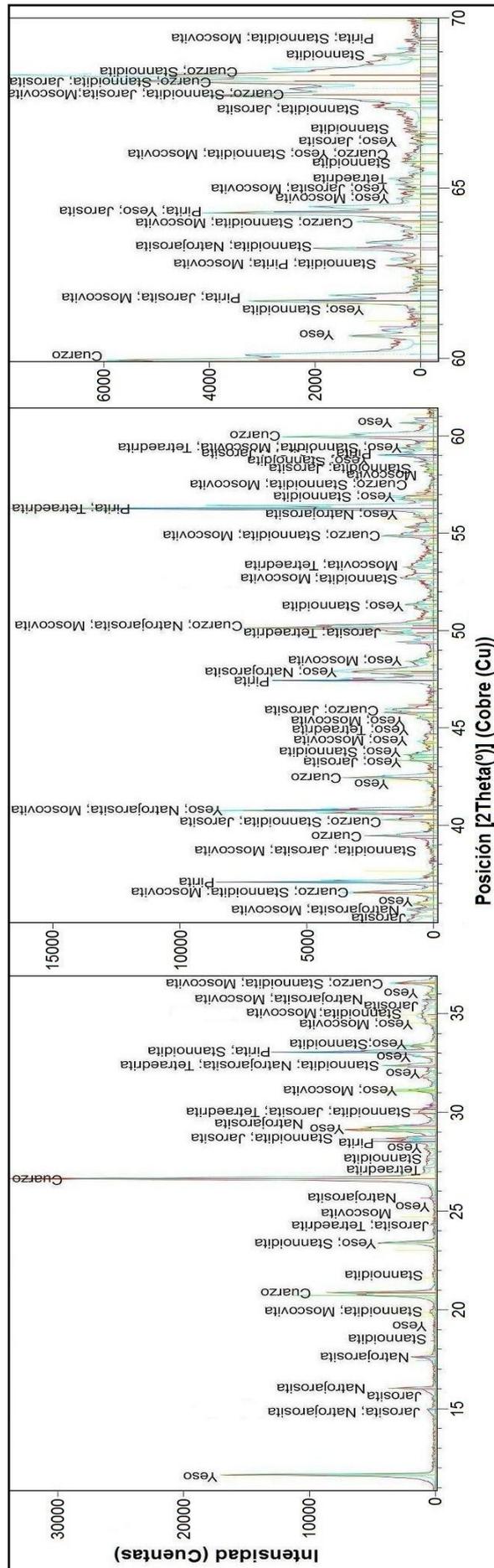
además contiene sulfato de calcio hidratado, yeso. Otros minerales en la muestra, pero con menor presencia, son la stannoidita (sulfuro de Cu, Fe y Sn) y la tetraedrita (sulfosal de Cu (-Fe)) (Figura 24).

- *Cambio Zona Baja* (muestras R-5a y R-6a): Su alteración principal es la cloritización con clinocloro y también cuarzo, yeso, piritita y en menor cantidad vermiculita.
- *Comuna Alta* (muestra R-9a): se caracteriza por tener óxidos de hierro (hematites y goethita), acompañados por una cloritización y una alteración sódico-potásica con natrolita (zeolita de Na) y feldespato potásico. También encontramos cuarzo asociado.
- *Alto Perú* (muestras R-10b y R-11): presenta tanto hematites como goethita. Asimismo, presentan una alteración clorítica + cuarzo.
- *600-Aurex* (muestras R-12c, R-13a y R-14): esta zona presenta una alteración argílica avanzada con jarosita y natrojarosita, yeso, cuarzo y en la muestra R-12c flogopita (grupo de la biotita). Las muestras R-13 y R-14 contienen cantidades menores de antimonita (sulfuro de antimonio).
- *Muestra R\**: se trata de una muestra *ex-situ*, recogida en una escombrera entra las zonas Paralela y 600-Aurex. Su recogida se debe a la presencia de oro libre que se puede ver a simple vista o con la ayuda de una lupa común. Los resultados del análisis de DRX da lugar a minerales típicos de alteración Na-Ca con albita-anortita, y sericítica con sericita-moscovita-illita + cuarzo.

**Tabla 6. Resultados de la DRX con la mineralogía principal de las rocas. Se observan diferentes alteraciones: albitización (albita), cloritización (clinocloro), sericitización (sericita-moscovita), argílica avanzada (jarosita-natrojarosita), etc. Difractogramas en Anexo 3.**

Muestra	Zona	Mineralogía Principal
R-2b	San Martín	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ] Albita [NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ] Moscovita [KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ]
R-3a	San Martín	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Moscovita [KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ]
R-3b	San Martín	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Anhidrita [CaSO <sub>4</sub> ] Albita [NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]
R-4b	Paralela	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Piritita [FeS <sub>2</sub> ] Natrojarosita [NaFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ] Jarosita [KFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ] Stannoidita [Cu <sub>8</sub> Fe <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>12</sub> ] Tetraedrita [(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> ] Moscovita [KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ]
R-5a	Cambio Zona Baja	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Piritita [FeS <sub>2</sub> ] Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ] Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Vermiculita [(Mg,Fe <sup>++</sup> ,Al) <sub>3</sub> (Al,Si) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O]

Muestra	Zona	Mineralogía Principal	
R-6a	Cambio Zona Baja	Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]	Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ]
R-9a	Comuna Alta	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Hematites [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] Goethita [Fe <sup>3+</sup> O(OH)] Natrolita [Na <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )·2H <sub>2</sub> O]	Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ] Feldespató potásico [(K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]
R-10b	Alto Perú	Goethita [Fe <sup>3+</sup> O(OH)] Hematites [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]
R-11	Alto Perú	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Goethita [Fe <sup>3+</sup> O(OH)] Hematites [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	Clinocloro [(Mg,Fe <sup>++</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]
R-12c	600-Aurex	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Pirita [FeS <sub>2</sub> ]	Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Flogopita [KMg <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub> ]
R-13a	600-Aurex	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Jarosita [KFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ]	Natrojarosita [NaFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ] Antimonita [Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]
R-14	600-Aurex	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Jarosita [KFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ] Natrojarosita [NaFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ]	Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O] Antimonita [Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]
R*	Entre Paralela y 600-Aurex	Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ] Anortita [CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ] Albita [NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ] Sericita [(Na,K)Al <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ]	Moscovita [KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ] Illita [K,H <sub>3</sub> O(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> {(OH) <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> O}]



**Figura 24. Difractograma donde se puede ver la mineralogía principal de mineralización y alteración de la muestra R-4b. Los principales son, como se puede ver en la Tabla 6, cuarzo, pirita, yeso, jarosita, natrojarosita, moscovitita, stannoidita, y tetraedrita.**

## 8.2. GEOQUÍMICA DE MENAS Y COLAS

Los análisis realizados en las menas y colas se presentan en la Tabla 7. Las mineralizaciones contienen valores de Au que varían entre >30 000 y 954 ppb (>30 – 0,954 g/t), dándose los valores más bajos para Alto Perú y los más elevados para San Martín. No obstante, se pueden diferenciar en dos tipos de valores, los que son superiores a 20 000 ppb (20 g/t) y los inferiores a 4 000 ppb (4 g/t). Los de leyes más altas de Au contienen >30 000 ppb (>30 g/t) en San Martín, 26 600 ppb (26,6 g/t) en Gallinazo y 24 500 ppb (24,5 g/t) en Comuna Alta. De todas las muestras analizadas, ninguna de ellas tiene leyes apreciables de Ag, siendo el mayor valor de 7,7 ppm (7,7 g/t) en Comuna Alta. Con respecto al Cu, los valores se encuentran muy dispersos, entre 7 y 5 520 ppm. De todas ellas, las leyes más destacadas de Cu son de Comuna Alta con 5 520 ppm y Alto Perú con 1 080 ppm, los demás se encuentran por debajo de 300 ppm. En cuanto al Pb, sólo una de las muestras es superior a centenar de ppm, la muestra Comuna Alta con 215 ppm. El resto de muestras tienen valores de <2-33 ppm. El contenido en As es bajo en todos los casos, con valores inferiores a 331 ppm, excepto en Comuna Alta, con una ley de 10 900 ppm. El porcentaje en S sólo es alto en una muestra de San Martín, con el 3,472%. El resto es inferior al 0,711% de S, lo cual se debe a la baja cantidad de sulfuros de esas muestras, ya que son principalmente mineralizaciones de óxidos de hierro, como el hematites y la goethita. Respecto al resto de metales, el Cd tiene leyes de 0,6-3,5 ppm, el Mn de 24-499 ppm, el Mo de 13-56 ppm, el Ni de 11-31 ppm, el Ba de <50-500 ppm, el Hg <1 ppm, el Sb de 0,8-11,9 ppm y el W de <4-513.

En relación a los resultados de las colas, las leyes de Au son muy altas en 3 de las 5 muestras analizadas. Las colas de Cambio Zona Baja tienen una ley de 26 800 ppb (26,8 g/t), en Comuna Alta las leyes son de >30 000 ppb (>30 g/t). Otras colas corresponden al procesamiento de material procedente de diversas explotaciones (L-3, L-4 y L-5). La L-4 contiene 15 800 ppb (15,8 g/t) de Au, L-3 y L-5 tienen una ley de 7 550 y 5 280 ppb (7,55 – 5,28 g/t), respectivamente.

Aparte de las dos muestras anteriores (L-3 y L-5), en los lodos se pierden elevadas concentraciones de Au. Esto conlleva grandes pérdidas económicas a los dueños y trabajadores de las minas que procesan su mineral en los molinos con el uso del Hg como técnica para recuperar el Au. Por otro lado, estos lodos contienen otros metales de bajo poder económico, pero que en cambio, conllevan una contaminación del medio, como lo son el Cd, el Pb, el Zn y el As, entre otros, que proceden de los minerales procesados. Del mismo modo que estos metales pesados proceden de las rocas trituradas y procesadas, la aparición de altas concentraciones de Hg en estas colas se debe a la utilización del Hg para atrapar el oro suelto tras la trituración de las mismas.

Tabla 7. Concentraciones de Au, Ag, Cu, Pb, Zn As, Hg, entre otros de las muestras de rocas y colas, mediante las técnicas de análisis INAA y AR-ICP.

Analito	Au	Ag	Cd	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	S	As	Ba	Hg	Sb	W	Mass
Unidades	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	g
Límite de Detección	5	0,2	0,5	1	3	2	1	2	1	0,001	2	50	1	0,2	4	
Método de Análisis	INAA	MULTI INAA / AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	AR-ICP	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA
<b>Colas</b>																
L-1	<b>26 800</b>	4,0	2,0	131	63	13	12	27	11	0,342	<b>404</b>	<50	68	3,6	10	22,1
L-2	> <b>30 000</b>	11,1	<b>47,7</b>	<b>1 500</b>	383	27	9	<b>2 170</b>	<b>1 780</b>	0,114	<b>727</b>	<50	49	47,9	18	24,6
L-3	7 550	1,5	<0,5	69	32	35	9	19	11	<b>0,853</b>	<b>411</b>	<50	<b>117</b>	21,1	10	24,9
L-4	<b>15 800</b>	3,8	6,5	<b>1 150</b>	355	33	12	<b>802</b>	<b>1510</b>	0,369	<b>370</b>	<50	<b>324</b>	10,8	24	21,6
L-5	5 280	6,5	1,1	70	190	38	20	63	19	<b>1,945</b>	<b>209</b>	<50	<b>252</b>	12,7	51	20,1
<b>Rocas</b>																
R-3a	> <b>30 000</b>	2,9	1,0	51	23	26	18	33	18	<b>3,472</b>	226	500	<1	11,9	513	19,3
R-7b	<b>26 600</b>	1,4	1,5	7	63	40	23	4	6	0,075	12	<50	<1	3,0	12	19,4
R-9a	<b>24 500</b>	7,7	3,5	<b>5 520</b>	107	13	19	<b>215</b>	<b>331</b>	0,026	<b>10 900</b>	<50	<1	11,7	<4	23,4
R-10b	954	0,3	2,4	257	499	43	11	<2	19	0,010	331	<50	<1	2,7	24	25,5
R-11	3 240	0,5	2,2	<b>1 080</b>	485	56	11	3	9	0,009	236	440	<1	0,8	14	24,0
R-12a	1 770	0,3	0,6	102	24	43	31	<2	2	0,711	126	<50	<1	1,8	39	23,1

Los valores más destacados están marcados en **negrita** y  *cursiva*.

Estos lodos son vertidos directamente sobre el suelo desnudo sin ningún tipo de tela impermeable que evite la filtración a través del suelo. Esto provoca la contaminación del mismo y aunque recojan las colas para venderlas y procesarlas para recuperar el oro que aún queda, siguen quedando remanentes de otros lodos anteriores y más antiguos que se van acumulando y filtrando. En cuanto a normativas de contaminación de suelos no hay ningún estándar normalizado debido a la gran variabilidad de suelos en las distintas partes del mundo. Con el fin de comparar los resultados de las colas con niveles de referencia de concentraciones de metales en suelos se han recopilado: (1) las concentraciones normales que pueden presentar los suelos de forma natural (Mas y Azcúe, 1993); (2) los niveles a partir de los cuales se considera que un suelos está contaminado; y (3) las concentraciones en las que se considera que un suelo se encuentra peligrosamente contaminado (Junta de Andalucía, 1999) (Tabla 8).

**Tabla 8. Niveles normales, de contaminación y peligrosos de metales en suelos. Entre paréntesis de Niveles de Contaminación se representan valores medios. En Niveles de Contaminación Peligrosos los valores entre paréntesis son los niveles de intervención recomendados por la Junta de Andalucía.**

Metal	Niveles Normales en Suelos (ppm) <sup>(1)</sup>	Niveles de Contaminación (ppm) <sup>(2)</sup>	Niveles de Contaminación Peligrosos (ppm) <sup>(2)</sup>
Cd	0,35	0,5-3 (1,75)	2-12 (>7)
Zn	90	60-300 (180)	120-3000 (>600)
Pb	35	40-550 (295)	60-2500 (>350)
Cu	30	17-100 (58,5)	100-800 (>300)
As	6	10-30 (20)	20-300 (>50)
Hg	0,06	0,3-2 (1,15)	>10
Ni	40	40-80 (60)	70-700 (>200)
Mo	1,2	1-10 (5,5)	4-200 (>200)

<sup>(1)</sup> Mas y Azcúe (1993)

<sup>(2)</sup> Junta de Andalucía (1999)

El Cd presenta un valor, 47,7 ppm, muy por encima del valor considerado como nivel de contaminación peligrosa, >7 ppm (Figura 25a). Este valor pertenece a los lodos L-2 (Comuna Alta). El *relave* L-4 contiene una concentración muy cercana al nivel límite de contaminación peligrosa con 6,5 ppm. El *relave* de Cambio Zona Baja (L-1), se encuentra dentro del rango de suelo contaminado de 1,75 ppm, pero no peligroso con 2,0 ppm. La cola L-5 se encuentra algo por encima de los niveles normales en suelos con 1,1 ppm, aunque bajo, sigue siendo un nivel de contaminación. Por último, L-3 presenta una concentración en Cd por debajo de 0,5 ppm, por tanto no se considera como un suelo contaminado en Cd.

Hay dos colas que presentan un contenido en Zn por encima de los niveles peligrosos de contaminación de >600 ppm, con 1 780 y 1 510 ppm de L-2 (Comuna Alta) y de L-4, respectivamente (Figura 25b). Las colas restantes se encuentran por debajo de los niveles normales en suelos con <90 ppm.

Los niveles de Pb en los lodos L-2 (Comuna Alta) y L-4 se encuentran por encima de los 350 ppm considerados como suelos contaminados peligrosamente con 2 170 y 802 ppm, respectivamente (Figura 25c). La concentración de Pb en los lodos de L-5 es casi el doble que en suelos naturales (63 ppm frente a 35 ppm), nivel que en algunos países se considera como un suelo contaminado (ver rango en Tabla 8). En cambio, las otras dos colas se encuentran por debajo de los niveles normales en suelos.

Los niveles de Cu son muy altos en L-2 (Comuna Alta) y L-4, muy por encima de los 300 ppm de contaminación peligrosa con 1 500 y 1 150 ppm, respectivamente (Figura 25d). Los demás *relaves* se encuentran algo por encima de los niveles en los que se considera que un suelo está contaminado, por encima del valor medio de 58,5 ppm.

Tanto el As como el Hg tienen concentraciones muy por encima de sus límites de contaminación peligrosa en suelos de 50 y 10 ppm, respectivamente (Figura 25e y f). Los valores más bajos son 209 ppm para el As (L-5) y 49 ppm para el Hg (L-2) y los más altos de 727 ppm del As (L-2) y 324 ppm del Hg (L-4).

Para el Ni, todas las concentraciones de las diferentes colas se encuentran por debajo de los valores normales para suelos naturales, <40 ppm (Figura 25g). Sin embargo, para el Mo todas las concentraciones están por encima de los niveles para que un suelo se considere que está contaminado, por encima del valor de medio de 5,5 ppm, con concentraciones entre 13 y 38 ppm, pertenecientes a los *relaves* L-1 (Cambio Zona Baja) y L-5 (Figura 25h).

Los *relaves* de Comuna Alta (L-2) y L-4 superan ampliamente las concentraciones de contaminación considerada como peligrosa en Cd, Zn, Pb y Cu (proviene de sulfosales y sulfuros). En cambio, todas las colas superan considerablemente los límites peligrosos de As y Hg, el primero procede principalmente de sulfosales y el segundo por su uso como "herramienta" para recuperar el oro. Respecto al Mo, éste supera los niveles contaminación "normales" en suelos en todos los *relaves*. El Ni, es el único elemento que se mantiene por debajo de los niveles normales en suelos naturales en todas y cada una de las colas.

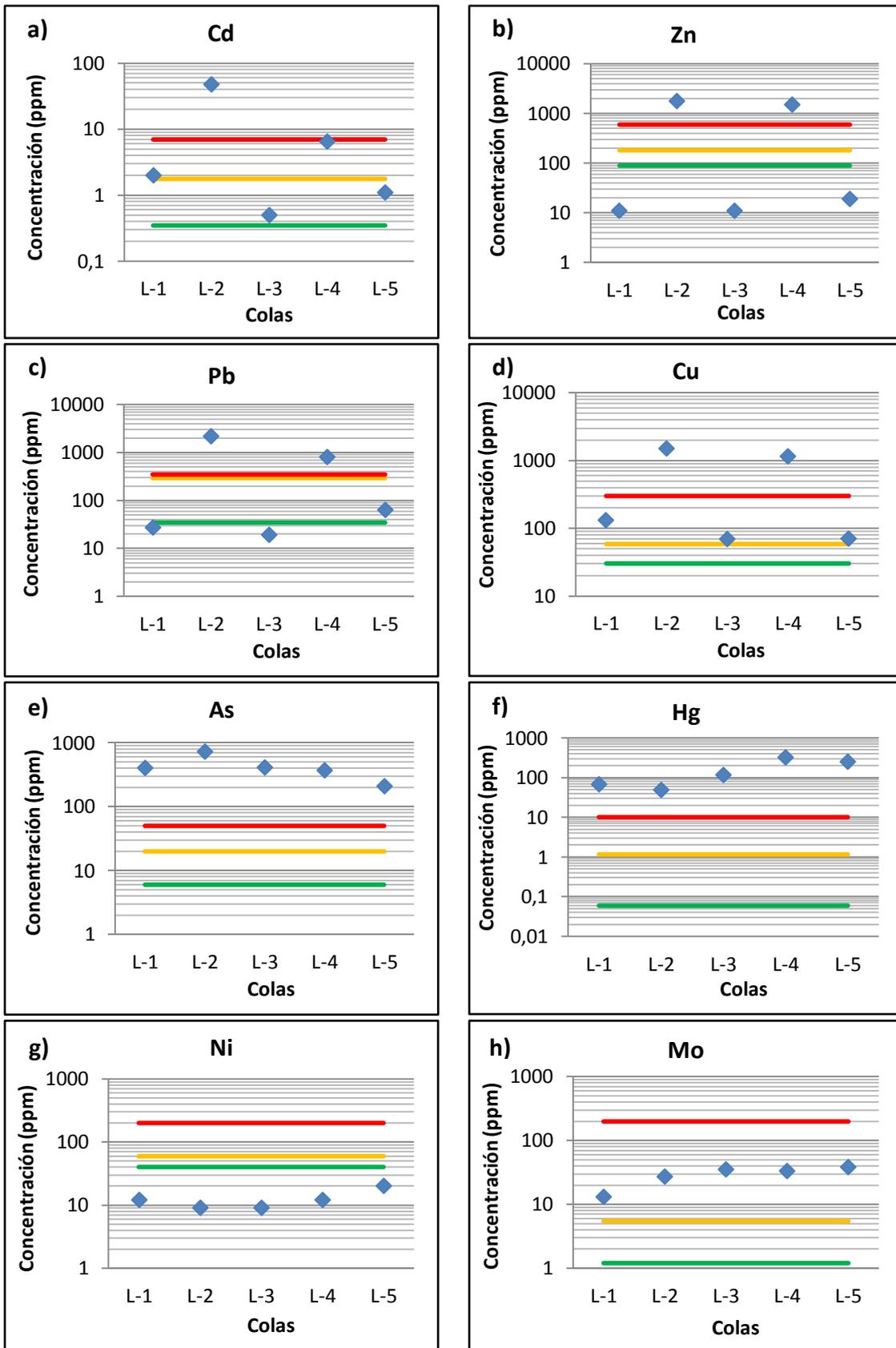


Figura 25. Gráficos con las concentraciones de los metales más peligrosos (Cd, Zn, Pb, Cu, As, Hg, Ni y Mo) de cada cola. Línea Verde: Niveles Normales en Suelos (Tabla 8); Línea Amarilla: Niveles de Contaminación (valores medios de la Tabla 8); Línea Roja: Niveles Peligrosos de Contaminación (valores recomendados de la Tabla 8).

### 8.3. CONTAMINACIÓN Y PROBLEMAS POR EL USO DE MERCURIO

Los mineros de Cháparra, algunos procesan su propio material alquilando molinos artesanales o *quimbaletes* y a cambio, los dueños se quedan con las colas residuales. Otros venden directamente las rocas sin procesar a los dueños de los molinos, procesándolo en molinos de bolas y en molinos artesanales y a continuación, los dueños venden el oro y las colas, donde aún queda gran cantidad de oro que el mercurio no ha podido recuperar, a plantas minero-metalúrgicas para su procesado. Los molinos artesanales que utilizan para triturar la roca se mezcla con agua, además de mercurio líquido, que es el que atrapa los pequeños granos de oro que se desprenden de la roca. El uso del mercurio en la minería artesanal para extraer el oro es frecuente en la problemática que se observa en Cháparra, lo cual puede llegar a producir graves problemas de contaminación ambiental, como se puede comprobar en el apartado anterior contaminando el suelo.

Uno de los problemas a los que se enfrentan, no solo los mineros, si no la población en general son las posibles enfermedades que pueden contraer directa (manipulación del mercurio sin protección entrando en contacto con los gases en o *quimbaletes*, durante la amalgamación, etc.) o indirectamente (ingestión a través del agua o alimentos). Otro problema es la contaminación medioambiental, aparte de los suelos, que provocan el mercurio y otros metales en las aguas (ya sean superficiales o subterráneas), vegetación y fauna. Por último, el uso del mercurio no es sostenible ya que produce una baja eficiencia en la recuperación de oro.

#### 8.3.1. LOS MOLINOS Y EL MERCURIO

Los mineros, tras la extracción, transportan en sacos las rocas que contienen oro en fragmentos pequeños de pocos centímetros hasta las plantas de trituración. Aquí se tritura la roca hasta pulverizarla, primero en molinos de bolas y posteriormente va a parar a los molinos manuales, los *quimbaletes* (Figura 26a). En los *quimbaletes* se mezcla la roca pulverizada con agua añadiendo también el mercurio. En el proceso de balanceo del molino (Figura 26a), es cuando se va produciendo la amalgamación, es decir, la mezcla de mercurio + oro. De esta forma se separa el oro de la mezcla de roca y agua, tras lo cual se vacía el molino, dejando únicamente la amalgama. El lodo, que se forma por la mezcla de agua + polvo de roca + restos de mercurio (Figura 26c), va a parar a unas piscinas o estanques de colas (Figura 26b), también denominados *relaves* (Figura 26d).

Una vez retirados los lodos, se recoge la amalgama que queda en el fondo del molino manualmente, con o sin guantes (Figura 26e). Esta amalgama se vierte y se envuelve sobre una tela permeable y con la ayuda de un cordel se hace presión para eliminar el exceso de mercurio filtrando a través de la tela. A continuación, ya

eliminado el exceso de mercurio, se obtiene una bola de amalgama medianamente sólida de color plateado (Figura 26f).



Figura 26. a) *Quimbaletes* en funcionamiento; b) Estanque de *relaves* junto a los molinos; c) Conducto por donde circula el *relave* para ir a desembocar al estanque, se ven pequeñas gotas de mercurio (puntos grises brillantes); d) *Relave* sedimentado; e) Recogida del mercurio con el oro de los *quimbaletes* una vez vaciados; f) Bola de amalgama de mercurio + oro.

A continuación, para extraer el oro de la amalgama se quema, a este proceso también se le conoce como *refogeo*, ya sea al aire libre sin ningún tipo de protección, en retortas pequeñas y portátiles o en retortas grandes en el interior de una construcción (retorta comunal). A la amalgama se le aplica una fuente de calor como un soplete. Como el mercurio es mucho más volátil que el oro, se evapora quedando

únicamente el oro. Este oro aún contiene algunas impurezas, que se eliminan a altas temperaturas en el proceso de fundición.

Los vapores de mercurio que se producen durante esa combustión, se pierden totalmente en la atmósfera si se quema sin ningún tipo de artilugio como las retortas, además el trabajador respira esos vapores tóxicos. Si se quema en retortas este problema se reduce bastante. Las retortas no dejan que los gases de mercurio se escapen a la atmósfera, siendo retenidos para poder recuperar el mercurio en estado líquido. La retorta comunal está compuesta por una cámara de quemado, un tanque de enfriamiento, un recipiente de recolección, unos tubos de enfriamiento y un motor extractor, recoge los vapores del mercurio durante el *refogeo* (Costa *et al.*, 2009), evitando el escape de gases y la inhalación de la persona que lo use en cada momento. El problema reside en que no es un proceso cerrado, las retortas siguen teniendo escapes de gases que respiran las personas y que contamina el aire, lo que se debe al mal uso y a la falta de mantenimiento.

Los lodos residuales procedentes de los molinos aún contienen un alto contenido en oro, además de mercurio y otros metales dañinos para el medio ambiente como cobre, arsénico, plomo o zinc. El suelo de los estanques donde se va acumulando el *relave* no está impermeabilizado, provocando filtraciones a través del suelo, lo cual conlleva a la contaminación de suelos y por consiguiente aguas y plantas.

## 9. CONCLUSIONES

El estudio de las vetas del yacimiento de Cháparra muestra la mineralización típica de los depósitos tipo IOCG. Mayoritariamente son vetas de óxidos de hierro, principalmente hematites. Estos óxidos van acompañados por cuarzo y cantidades menores de sulfuros de hierro y cobre, con abundante pirita, covellita y pirrotina. Otros sulfuros presentes, aunque en muy poca cantidad respecto a los anteriores, son la calcopirita, la arsenopirita, la galena y la esfalerita. Lo que también caracteriza este yacimiento es su contenido en oro, el cual se encuentra en los óxidos, en los sulfuros y en el cuarzo. Destaca también la presencia de sulfosales, como la tetraedrita o la tennantita, las cuales están asociadas a la covellita o se encuentran de forma más tardía rellenando fracturas. Otra característica propia de los depósitos IOCG, y que se encuentra en el yacimiento de Cháparra, es la presencia de TT.RR., como monacita, y de uranio (uraninita). Igualmente se encuentran cantidades menores de bismuto nativo y plata. La plata se presenta de forma nativa o formando la yodargirita (Agl). Por último las alteraciones mayoritarias son la clorítica (clinocloro), sericítica (sericita-moscovita), albítica (albita) y argílica avanzada (jarosita y natrojarosita), además otros minerales de alteración supergénica como el yeso y la scorodita.

La determinación de las leyes de oro de las mineralizaciones y de las colas residuales, indica las pérdidas de oro durante el procesado con el mercurio en los molinos. Estos lodos aún contienen elevadas concentraciones de oro, lo cual demuestra que el método de recuperación mediante la formación de una amalgama es una técnica de muy baja eficiencia.

El tipo de procesamiento que utilizan en Cháparra, acarrea otro problema, a parte del indicado anteriormente. Los lodos procedentes de los molinos, además de contener cantidades significativas de mercurio, son ricos en otros elementos potencialmente tóxicos (cadmio, plomo o arsénico). Las concentraciones de los metales en los lodos, los cuales se depositan directamente sobre el suelo, superan los límites de contaminación considerados como peligrosos, principalmente para el caso del mercurio y arsénico, mientras y para el Pb, Cd, Zn y Cu exceden los límites únicamente en algunas zonas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agar, R. (1978) La Mineralización de Cobre y la Superunidad Linga del Batolito de la Costa. Anales del IV Congreso Peruano de Geología. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. Tomo No. 62
- Akagi, H., Malm, O., Branches, F.J.P., Kinjo, Y., Kashima, Y., Guimares, T.R.D., Oliveira, R.B., Haraguchi, K., Pfeiffer, W.C., Takizawa, Y., Kato, H. (1995) Human exposure to mercury due to gold mining in the Tapajos River Basin, Amazon, Brazil: Speciation of mercury in human hair, blood and urine. *Water, Air, and Soil Pollution*, 80: 85-94
- Arata Pozzuoli, A., Farfán López, O., Marcos Jauregui, E., Verapinto Cruz, M.D.C (2010) Producción de frutas y derivados: experiencias sistematizadas en el valle de Cháparra, Arequipa. DESCO, Programa Regional Sur, 50 pp.
- ARM (2011) Analysis for stakeholders on formalization in the artisanal and small-scale gold mining sector based on experiences in Latin America, Africa, and Asia: Peru Case Study. Alliance for Responsible Mining, 32 pp.
- ATSDR (2000) Toxicological Profile for Mercury. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta
- Barton, M.D., Johnson, D.A. (1996) Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology (Boulder)*, 24: 259-262
- Barton, M.D., Johnson, D.A. (2000) Alternative brine sources for Fe-Oxide(-Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals. En: Porter, T.M. (ed.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 1, Australian Mineral Foundation, pp. 43-60
- Barton, M.D., Johnson, D.A. (2004) Footprints of Fe oxide(-Cu-Au) systems. *University of Western Australia Special Publication* 33: 112–116
- Bellido, E., De Montreuil, L. (1972) Aspectos generales de la metalogenia del Perú. *Boletín del Servicio de Geología y Minería. Perú, Geología Económica*, 1: 149 pp.
- Bouwer, W. (1999) An environmentally sound gold recovery process for small-scale gold mining. *Cape Technikon Theses & Dissertations*. Paper 57
- Câmara, V.M., da Silva, A.P., Maciel, M.V., Pivetta, F., Perez, M.A. (1997) Mercury Exposure and health effects among urban residents due to gold commercialization in Poconé, MT, Brazil. *CETEM, Série Tecnologia Ambiental*, 19: 20 pp.
- Canchaya, S., Aranda, A. (1995) 'V. Geología económica'. En: INGEMMET (ed.), *Geología del Perú*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Sector Energía y Minas, Boletín 55 de la Serie A: Carta Geológica Nacional, pp. 81-95
- Chacón Abad, N. (1995) 'I. Geomorfología'. En: INGEMMET (ed.), *Geología del Perú*, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Sector Energía y Minas, Boletín 55 de la Serie A: Carta Geológica Nacional, pp. 11-15
- Cobbing, E.J. (1976) The geosynclinals pair at the continental margin of Peru. *Tectonophysics*, 36: 157-165
- Cobbing, E.J. (1978) The Andean geosynclines in Peru and its distinction from Alpine geosynclines. *Journal of Geological Society of London*, 128: 421-460
- Cobbing, E.J. (1982) The segmented Coastal Batholith of Peru: its relationship to volcanicity and metallogenesis. *Earth Science Reviews*, 18: 241-251
- Cobbing, E.J., Pitcher, W.S. (1972) Plate tectonics and the Peruvian Andes. *Nature Physical Science* 240: 51-53

- Cobbing, E.J., Pitcher, W.S., Taylor, W.P. (1977) Segments and super-units in the Coastal Batholith of Peru. *Journal of Geology*, 85 (5): 625-631
- Costa, M., Alfonso, P., Palacios, S. (2009) Proceso de tratamiento para la recuperación de oro en el asentamiento minero artesanal de Misky, Perú. En: Segundo Congreso Internacional sobre Geología y Minería en la Ordenación del Territorio y en el Desarrollo. Utrillas, Aragón, 8-10 de mayo, pp. 231-242
- De Jong, G., Rotherham, J., Phillips, G.N., Williams, P.J. (1998) Mobility of rare-earth elements and copper during shear-zone-related retrograde metamorphism. *Geologie en Mijnbouw*, 76: 311-319
- Eisler, R. (2004) Mercury Hazards from Gold Mining to Humans, Plants, and Animals. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 181: 139-198
- Espinoza R., S., Véliz G., H., Esquivel L., J., Arias F., J., Moraga B., A. (1996) The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. En: Camus, F., Sillitoe, R.H., Petersen, R. (eds.) *Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and metallogeny*. Society of Economic Geologist, Special Publication, 5: 19-32
- Fitzgerald, W. (1995) Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET). *Water, Air and Soil Pollution* 80 (1), 245-254
- Gaona Martínez, X. (2004) El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona
- Gelcich E., S., Espinoza P., C., Vivallo S., W. (1998) Yacimientos metalíferos de las Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa Recursos Minerales de Chile*, 3: 17
- Gochfeld, M. (2003) Cases of mercury exposure, bioavailability, and absorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56: 174-179
- Groves, D.I., Vielreicher, N.M. (2001) The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulfide deposit, South Africa; an end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit group. *Mineralium Deposita*, 36: 189-194
- Hauck, S.A. (1990) Petrogenesis and tectonic setting of middle Proterozoic iron oxide-rich ore deposits; an ore deposit model for Olympic Dam-type mineralization. En: Pratt, Walden P., and Sims, P.K. (eds.) *The Midcontinent of the United States: Permissive terrain for an Olympic Dam-type deposit? U.S. Geological Survey Bulletin* 1931, pp. 4-39
- Haynes, D.W. (2000) Iron oxide copper(-gold) Deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. En: Porter, T.M. (ed.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 1: Adelaide, Australian Mineral Foundation, pp. 71-90
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T., Reed, M.H. (1995) Olympic Dam ore genesis: a fluid mixing model. *Economic Geology*, 90: 281-307
- Hitzman, M.W. (2000) Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why. En: Porter, T.M. (ed.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 1: Adelaide, Australian Mineral Foundation, pp. 9-26
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. (1992) Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58: 241-287

- Hopf, S. (1990) The Agustina mine, a volcanic-hosted copper deposit in northern Chile. En: Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E., Frutos, J. (eds.) Stratabound copper deposits in the Andes. Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Special Publication, 8: 421–434
- Hunt, J.P. (2005) Geological Characteristics of Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) Type Mineralisation in the Western Bushveld Complex. Master Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
- IGN (1997) Cháparra, Perú (1:100 000). Serie J631, Hoja 2139 (32-o), Edición 2-IGN. Instituto Geográfico Nacional, Lima
- INEI (2007) Resultados del XI Censo Nacional de Población y VI de Vivienda. Instituto Nacional de Estadística e Informática
- INGEMMET (2001) Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cháparra (1:100 000). Serie J731, Hoja 32-o. Carta Geológica del Perú. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Sector de Energía y Minas, República del Perú
- Junta de Andalucía (1999) Revisión de normativas sobre contaminación de suelos de otros países y comunidades. Umbrales y valores de contaminación. En: Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía
- Kurland, L.T., Faro, S.N. Siedler, H. (1960) Minamata disease. *World Neurology*, 1 (4): 370-395
- Lindqvist, O. (1984) Mercury in the Swedish Environment. Global and Local Sources. National Swedish Environmental Protection Board Report
- Lobo-Guerrero S., A. (2006) Iron Oxide-Copper-Gold Mineralization in the Greater Lufilian Arc, Africa. Logemin S.A., Bogotá, Colombia, 24 pp.
- Magos, L., Halbach, S., Clarkson, T.W. (1978) Role of Catalase in the oxidation of mercury vapour. *Biochemical Pharmacology*, 27: 1373-1377
- Mann, A.W. (1984) Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia. *Economic Geology*, 79: 38-49
- Marschik, R., Fontboté, L. (2001) The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, 96: 1799–1826
- Marschik, R., Leveille, R.A., Martin, W. (2000) La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile. Early Cretaceous iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) mineralization. En: Porter, T.M. (ed.) Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, 1: Adelaide, Australian Mineral Foundation, pp. 163–175
- Martínez Castilla, Z. (2002) Antecedentes históricos de la minería artesanal en el Perú. En: Conferencias de la 2ª Reunión Anual Mundial del CASM (Communities and Small-Scale Mining), Ica, Perú, 23-29 Sep
- Mas, A., Azcúe, J.M. (1993) Metales en sistemas biológicos. Promociones y Publicaciones Universitarias. Barcelona
- MEM (2011) Perú, Sector Minero. Ministerio de Energía y Minas, República del Perú
- Olchanski Lomparte, E. (1980) Geología de los cuadrángulos de Jaquí, Coracora, Chala y Cháparra. Hojas: 31-ñ, 31-o 32-ñ y 32-o. Carta Geológica Nacional, Boletín No. 34 de la Serie A. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
- ONERN (1975) Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la Costa:

- Cuencas de los ríos Acarí, Yauca, Chala y Cháparra, Volumen 1. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Nacionales. República del Perú, 654 pp.
- Palacios Moncayo, O. (1995) 'II. Geología histórica y evolución tectónica'. En: INGEMMET (ed.), Geología del Perú, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Sector Energía y Minas, Boletín 55 de la Serie A: Carta Geológica Nacional, pp. 16-84
- Picado Pavón, F.J. (2008) Fluvial transport and risk of mercury in a gold mining area. Doctoral Dissertation, Lund University, Sweden
- Pollard, P.J., 2000, Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-Oxide Cu-Au mineralization. En: Porter, T.M. (ed.) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, 1: Adelaide, Australian Mineral Foundation, pp. 27-46
- Proyecto GAMA, Ministerio de Energía y Minas, IPEC-OIT, GIN (2002) Minería Artesanal: Una oportunidad de oro para los pobres del Perú. Empresa Editora El Comercio S.A., 8 pp.
- Roberts, D.E., Hudson, G.R.T. (1983) The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 78: 799–822
- Ruiz, F.C., Corvalán, J., Klohn, C., Klohn, E., Levi, B. (1965) Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 305 pp.
- Sillitoe, R.H. (2003) Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38: 787-812
- Soler, P., Grandin, G., Fornari, M. (1986) Essai de synthèse sur la métallogénie du Pérou. *Géodynamique* 1 (1): 33-68
- Steinmann, G. (1929) Geología del Perú. Carl Winters Universitätsbuch, Heidelberg, 488 pp.
- Ullrich, T.D., Clark, A.H., Kyser, T.K. (2001) The Candelaria Cu-Au deposit, III region, Chile: Product of long-term mixing of magmatic-hydrothermal and evaporite-sourced fluids. En Proceedings of the Geological Society of America Annual Meeting, Boston, Massachusetts, 1-10 Nov, Abstracts and Program, 33 (6): A-3
- Veiga, M.M., Baker, R. (2004) Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small Scale Miners, Report to the Global Mercury Project: removal of barriers to introduction of cleaner artisanal gold mining and extraction technologies, GEF/UNDP/UNIDO, 170 pp.
- Vidal, C.E. (1985) Metallogenesis associated with the Coastal Batholith of Peru: a review. En: Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J., Beckinsale, R.D. (eds.) Magmatism at a plate edge. The Peruvian Andes. Blackie, Glasgow, pp. 243–249
- Williams, P.J. (1994) Iron mobility during synmetamorphic alteration in the Selwyn Range area, NW Queensland; implications for the origin of ironstone-hosted Au-Cu deposits. *Mineralium Deposita*, 29: 250-260
- Williams, P., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., Haller, A.d., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R. (2005) Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space Time Distribution, and Possible Modes of Origin. En: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J. & Richards J.P. (eds.) *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 371-406
- Zamora, R., Castillo, B. (2001) Mineralización de Fe-Cu-Au en el distrito Mantoverde, Cordillera de la Costa, III Región de Atacama, Chile. En: Conferencias del 2º Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, Lima, Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 13 pp.
- Zillioux, E.J., Porcella, D.B., Benoit, J.M. (1993) Mercury cycling and effects in freshwater wetland ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 12 (12): 2245-2264

## ANEXOS

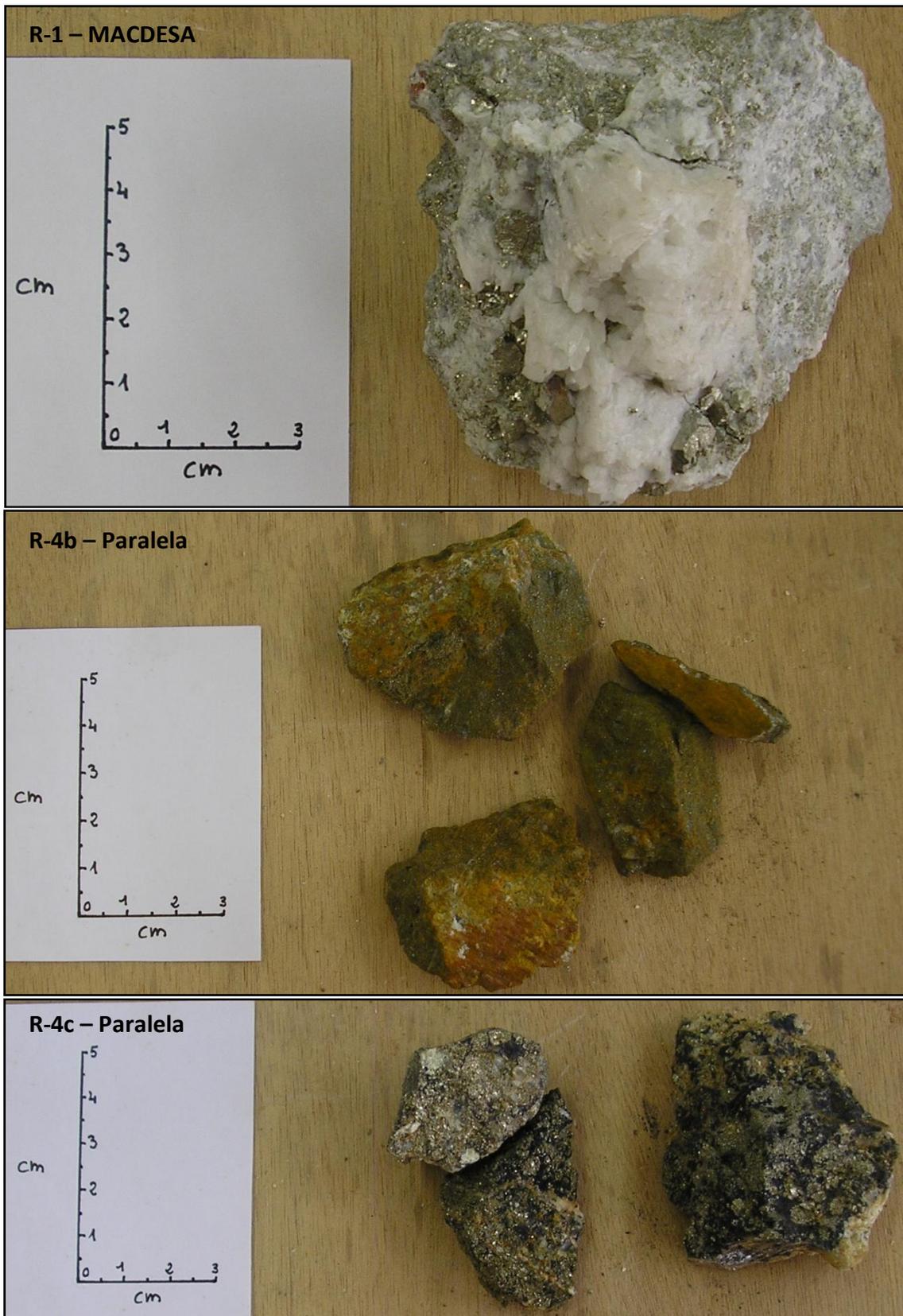
**ANEXO 1: TIPO DE ANÁLISIS PARA CADA MUESTRA**

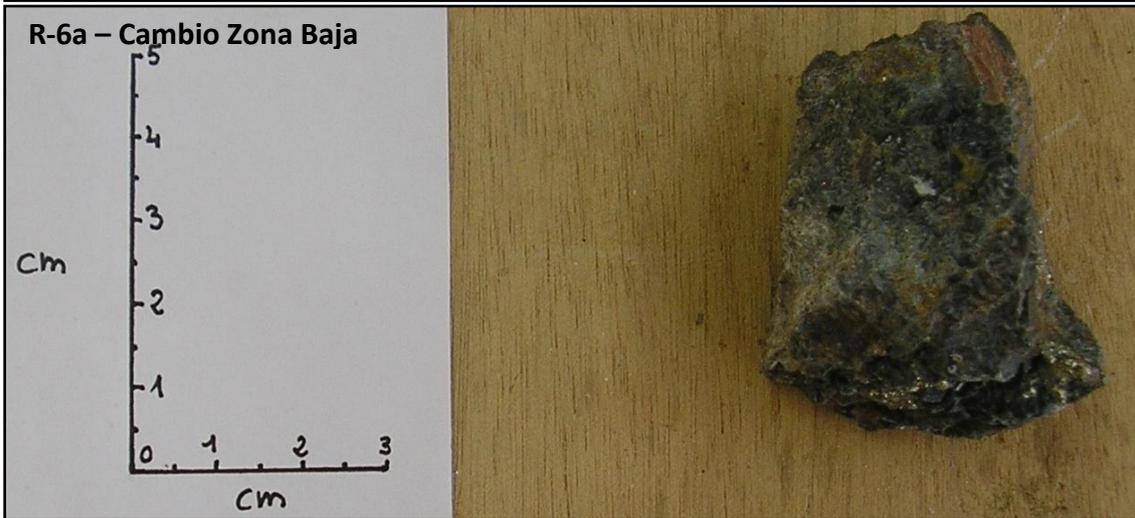
<b>Código</b>	<b>Preparación</b>	<b>DRX</b>	<b>Microscopía Óptica de Luz Reflejada</b>	<b>SEM</b>	<b>Análisis Químico <sup>(2)</sup></b>
R-1	Probeta		X	X	
R-2b	Pulverizar	X			
R-3a	Pulverizar	X			X
R-3b	Pulverizar	X			
R-4a	Probeta		X	X	
R-4b	Pulverizar	X			
R-4c	Probeta		X	X	
R-4e	Probeta		X	X	
R-5a	Pulverizar	X <sup>(1)</sup>			
R-6a	Probeta	X <sup>(1)</sup>	X	X	
R-7b	Pulverizar				X
R-9a	Pulverizar	X			X
R-10b	Pulverizar	X			X
R-11	Pulverizar	X			X
R-12a	Pulverizar				X
R-12c	Probeta	X	X	X	
R-13a	Pulverizar				
R-14	Pulverizar	X			
R*	Pulverizar	X			
L-1	Pulverizar				X
L-2	Pulverizar				X
L-3	Pulverizar				X
L-4	Pulverizar				X
L-5	Pulverizar				X

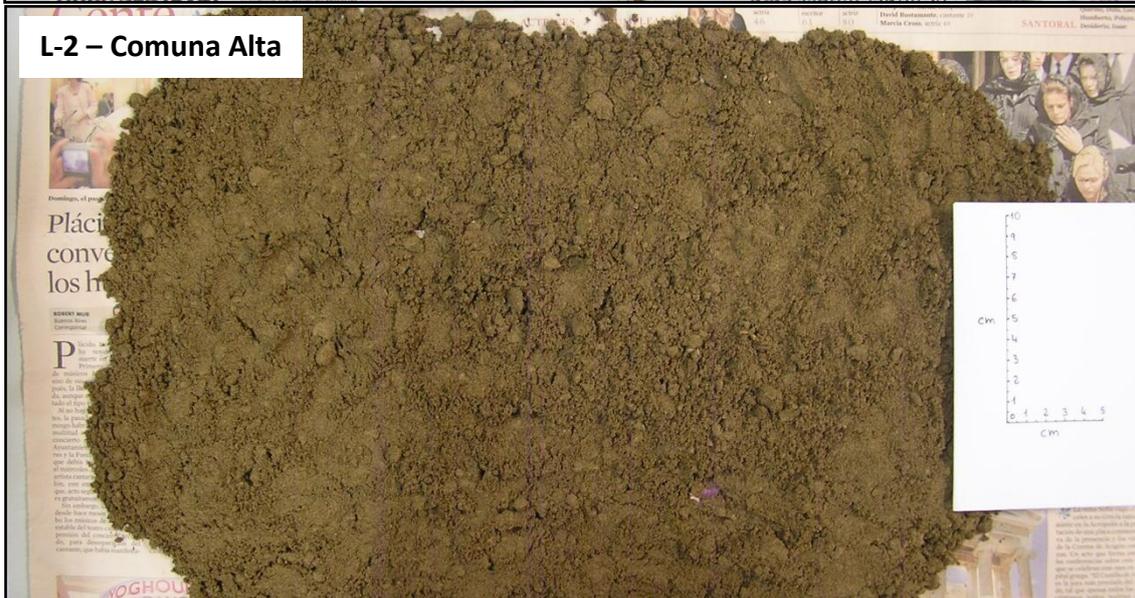
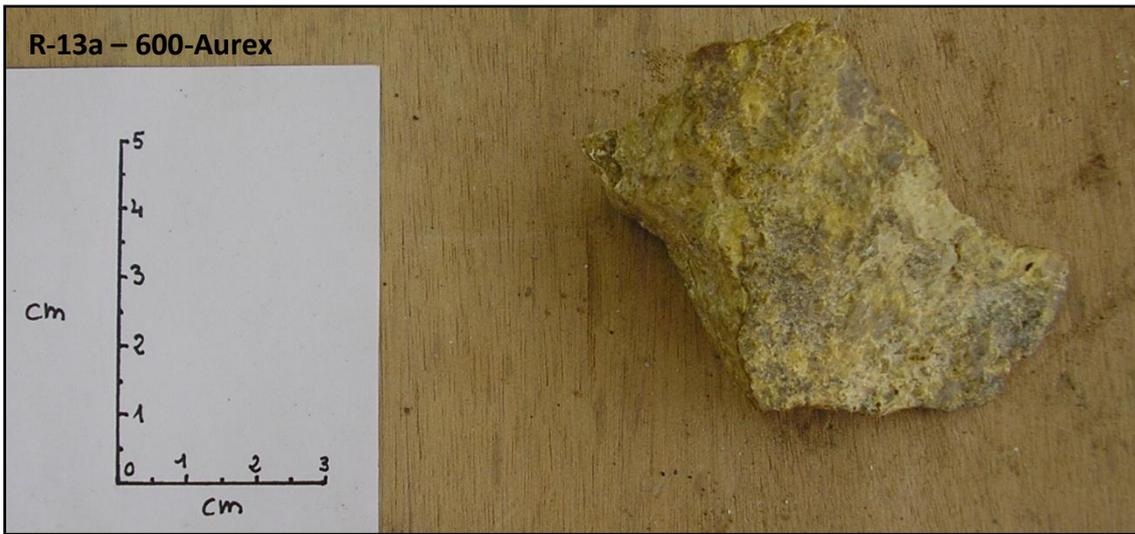
<sup>(1)</sup> La DRX se ha realizado de la capa superficial de alteración de la roca.

<sup>(2)</sup> Tamaño de grano del polvo de las muestras <100 µm.

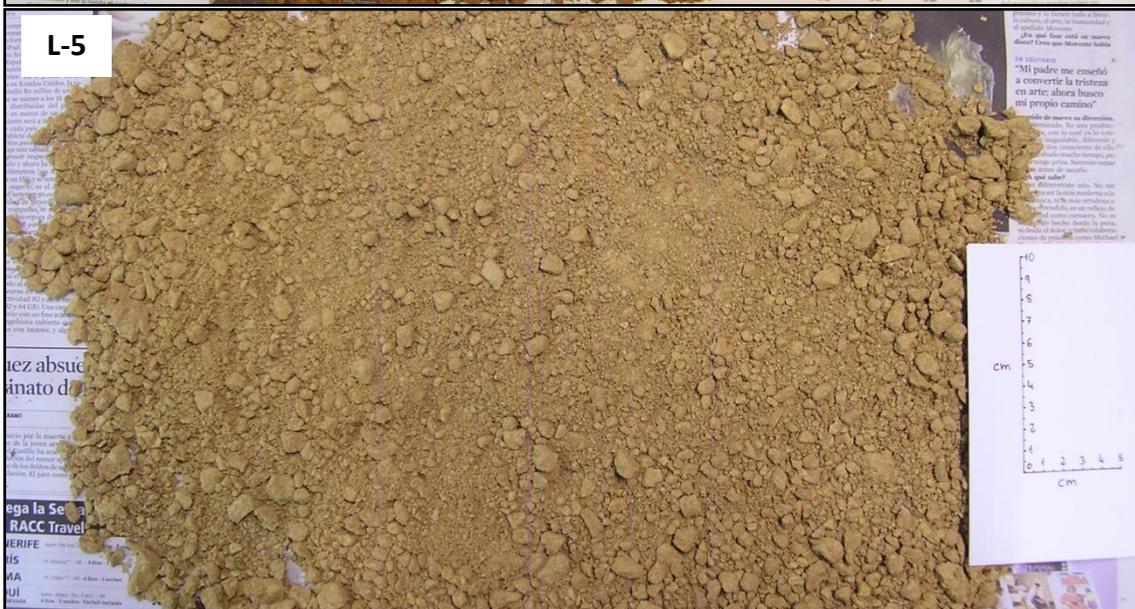
ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS DE ROCAS Y COLAS







**Problemática asociada al uso del mercurio para la recuperación de oro en la minería artesanal de Cháparra, Sur de Perú**



**ANEXO 3: DIFRACTOGRAMAS**

