

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**TEXTURAS Y GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA EN MINERALES DE
MENA EN MINERALIZACIONES POLIMETÁLICAS ALOJADAS EN CUERPOS
DE SKARN DEL DISTRITO DE MOROCOCHA, PERÚ**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR:

Johann Purificación Culqui Puerta

ASESOR:

Lisard Torró i Abat

Lima, junio, 2022

RESUMEN

El crecimiento exponencial de las economías emergentes y la innovación tecnológica dan lugar al aumento de la demanda mundial de los denominados metales críticos dentro de los que encontramos el indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga). Comprender sus expresiones mineralógicas y su distribución espacio-temporal en yacimientos minerales facilitará su exploración y explotación.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo caracterizar texturalmente muestras de mena y contextualizar espacio-temporalmente las concentraciones de In, Ge y Ga en algunas fases en mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn (Ombla Inferior, Porvenir y Manto Italia) del distrito minero de Morococha. Un total de 23 secciones gruesas pulidas fueron estudiadas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. La composición química de esfalerita, calcopirita y galena fue determinada mediante microsonda electrónica y ablación láser conectada a espectrometría de masas de sector magnético acoplada inductivamente a una fuente de plasma. En Ombla Inferior se identificaron dos estadios de mineralización: 1) skarn hidratado (serpentina y magnetita) y 2) mineralización polimetálica (pirrotina, pirita, esfalerita, calcopirita y trazas de marcasita, bornita, tennantita, wittichenita, bismutinita, tsumoíta y covelina). Porvenir se caracteriza por la presencia mayoritaria de serpentina, magnetita y esfalerita. En Manto Italia, el estadio de skarn hidratado/reemplazamiento de carbonatos presenta una primera sub-etapa dominada por magnetita, pirrotina, arsenopirita y pirita y una segunda sub-etapa que comprende esfalerita, galena y calcopirita. Se identificaron hasta 2 generaciones de esfalerita en Ombla Inferior y Manto Italia. La primera generación se caracteriza por presentarse en forma de diminutas inclusiones en forma de estrella diseminadas en calcopirita con macla de transformación y,

principalmente, en forma de masas anhedrales conteniendo finas disseminaciones orientadas de calcopirita, mientras que la segunda generación se caracteriza por no presentar calcopiritosis.

En las muestras estudiadas, la esfalerita es el principal mineral hospedador de In y Ga con concentraciones de hasta 459 y 169 ppm, respectivamente. El Ge presenta concentraciones muy bajas en todas las fases mineralógicas estudiadas (<2 ppm). Las secuencias paragenéticas de los cuerpos polimetálicos estudiados reflejan que las concentraciones más elevadas de In aparecen en la segunda generación de esfalerita, mientras que los contenidos más elevados de Ga se dan predominantemente en esfalerita de la primera generación. La estequiometría y la correlación positiva entre las concentraciones molares de In y Cu en proporciones ~1:1 sugieren que el principal mecanismo de incorporación del In en la estructura cristalina de la esfalerita es una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. En tal sentido, la disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes del distrito de Morococha a partir de los cuales cristalizó la esfalerita jugó un papel importante en la distribución del In a lo largo de la secuencia paragenética y el distrito.

Palabras clave: metales críticos, Morococha, indio, esfalerita, sustitución acoplada, mineralizaciones polimetálicas, skarn, LA-ICP-MS

ABSTRACT

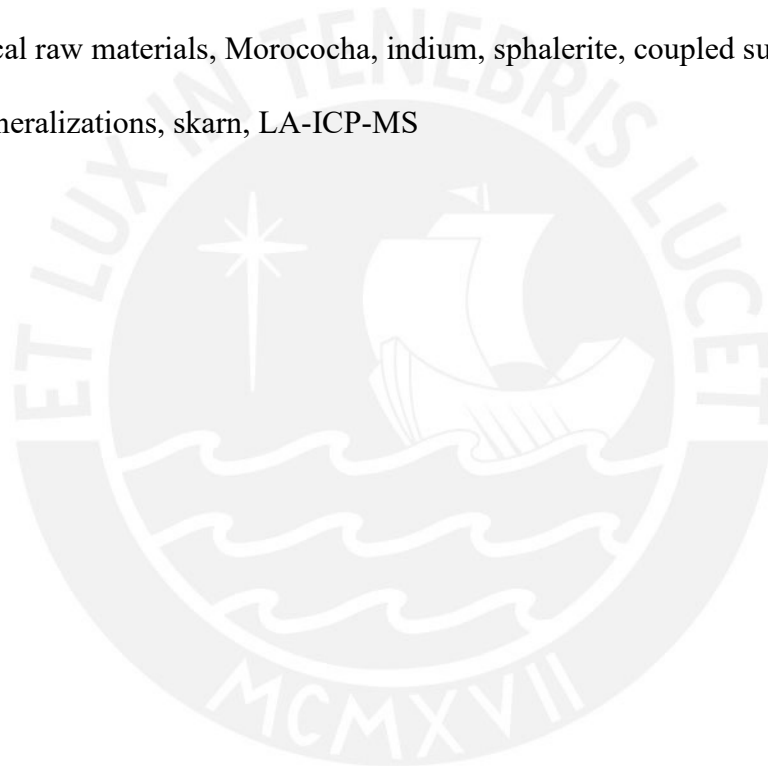
The exponential growth of emerging economies and technological innovation give rise to a global increase in the demand for critical raw materials including indium (In), germanium (Ge), and gallium (Ga). Understanding their mineralogical expression and space-temporal distribution in ore deposits will facilitate their exploration and exploitation.

The present research work aims to texturally characterize and contextualize in space and time the concentrations of In, Ge, and Ga in ore minerals in polymetallic mineralization hosted in skarn bodies in the Morococha mining district (Lower Ombla, Porvenir and Manto Italia). A total of 23 thick polished sections were studied by optical and scanning electron microscopy. The composition of sphalerite, chalcopyrite, and galena was analyzed by electronic microprobe and laser ablation-inductively coupled plasma-sector field-mass spectrometry. Two stages of mineralization were identified at Lower Ombla: 1) hydrous skarn (serpentine and magnetite) and 2) polymetallic mineralization (pyrrhotite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, and traces of marcasite, bornite, tennantite, wittichenita, bismuthinite, tsumoite, and covellite). Serpentine, magnetite and sphalerite characterize the mineralogy at Porvenir. The hydrous skarn/carbonate replacement stage at Manto Italia shows a first sub-stage dominated by magnetite, pyrrhotite, arsenopyrite, and pyrite, and a second sub-stage with sphalerite, galena, and chalcopyrite. Furthermore, up to 2 generations of sphalerite were identified in Lower Ombla and Manto Italia. The first generation is characterized by occurring as tiny star-shaped inclusions along transformation twins of chalcopyrite and as anhedral masses hosting fine oriented disseminations of chalcopyrite, while the second generation specimens are characterized for the absence of *chalcopyrite disease*.

Sphalerite has been identified as the main host of In and Ga in the studied samples, with concentrations up to 459 and 169 ppm, respectively. Germanium has very low contents in all

the studied ore minerals (<2 ppm). The highest contents of In appear in second-generation sphalerite, while the highest Ga values are found in first-generation sphalerite. The stoichiometry and fair positive correlations between the molar proportions of In and Cu at ~1:1 suggest that the main mechanism for In incorporation into the sphalerite crystal lattice was a coupled substitution $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. In this sense, the availability of Cu in the mineralizing fluids of Morococha district from which the sphalerite crystallized played an important role in the distribution of In throughout the paragenetic sequence and the district.

Keywords: critical raw materials, Morococha, indium, sphalerite, coupled substitution, polymetallic mineralizations, skarn, LA-ICP-MS



AGRADECIMIENTOS

En las siguientes líneas muestro mi gratitud a:

Mi familia, en especial a mis padres Napoleón y Aidelí, quienes siempre me apoyan en los proyectos que me propongo; y a mi hermano Bryan por su afecto y constante motivación.

Mi asesor de tesis, el Dr. Lisard Torró por depositar su confianza en mi persona para la realización de esta investigación, por el apoyo constante y la enorme paciencia a lo largo de la elaboración de este trabajo. Asimismo, al Dr. Diego Benites y al Ing. Pablo Valverde por su apoyo intelectual y material para la realización de esta tesis.

La compañía Pan American Silver (Minera Argentum S.A.) por brindar el acceso a las muestras estudiadas y el soporte técnico-intelectual en las excursiones de campo.

Mis amigos Andrea Millán, Pablo Valverde, Brayam Ortiz, Eduardo Tirado y Johan Ramirez por su leal amistad y apoyo incondicional dentro y fuera de la PUCP.

Esta tesis se ha beneficiado de productivas discusiones sobre la geología del distrito minero de Morococha mantenidas con los Dres. Lluís Fontboté y Kalin Kouzmanov (Universidad de Ginebra) y con los Dres. Jean Vallance y Silvia Rosas (Pontificia Universidad Católica del Perú).

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria E041- 01 [número de contrato 107-2018-FONDECYT-BM—IADT-AV] y por la Dirección de Gestión de la Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el marco del proyecto FONCAI-0023- 2019.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Sistemas porfíricos de Cu-(Mo-Au) y estilos de mineralización asociados	1
1.2. Antecedentes en el estudio del distrito minero de Morococha	5
1.3. Elementos de alta tecnología y su presencia en sistemas de pórfidos cupríferos	9
1.4. Problemática	15
1.5. Objetivos del trabajo	16
1.6. Hipótesis	16
1.7. Justificación	17
2. MUESTREO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS	17
2.1. Muestreo y preparación de las muestras	17
2.2. Técnicas analíticas	18
2.2.1. Microscopio petrográfico	18
2.2.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS)	18
2.2.3. Microsonda electrónica (EPMA)	18
2.2.4. Ablación laser ICP-MS	19
3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA	21
3.1. Situación geográfica	21
3.2. Situación geológica	22
3.2.1. Situación Geodinámica	22
3.2.2. Geología Regional	25
3.2.3. Geología del yacimiento	32
4. RESULTADOS	34
4.1. Mineralogía y texturas	34
4.1.1. Ombla Inferior	34
4.1.2. Porvenir	37
4.1.3. Manto Italia	37
4.2. Geoquímica mineral	40
4.2.1. Resultados de EPMA	40
4.2.1.1. Esfalerita	40
4.2.1.2. Calcopirita	43
4.2.1.3. Galena	44
4.2.2. Resultados de LA-ICP-MS	44
4.2.2.1. Esfalerita	44
4.2.2.2. Calcopirita	49
4.2.2.3. Galena	52
5. DISCUSIÓN	53
5.1. Enriquecimiento de metales tecnológicos en el distrito de Morococha y su distribución	53
5.2. Temperatura de formación de la esfalerita	57
5.3. Recomendaciones para la exploración de In en sistemas tipo pórfido en márgenes continentales	58
6. CONCLUSIONES	59
7. REFERENCIAS	61
8. ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un sistema de pórfido cuprífero que muestra las interrelaciones espaciales de un depósito de pórfido de Cu-(Mo-Au) en la zona central y otras tipologías de yacimientos minerales tales como un exoskarn proximal y distal, reemplazamiento en carbonatos (carbonate replacement; mantos), depósitos diseminados distales en sedimentos, venas subepitermales en roca no carbonatada; epitermales “cordilleranos” polimetálicos y epitermales de alta e intermedia sulfuración en el ambiente de lithocap	2
Figura 2: Ubicación de depósitos minerales en los Andes de Perú y Bolivia con descripciones de contenidos de metales críticos como In, Ge o Ga citados en el texto.....	14
Figura 3: Ubicación geográfica del distrito minero de Morococha	22
Figura 4: Mapa esquemático que muestra las principales estructuras tectónicas de los Andes Centrales del Perú, los márgenes longitudinales de la MFTB (DH, Deflexión de Huancabamba; DA, Deflexión de Abancay), la zona de subducción, vectores tectónicos de las placas y la zona de estudio	24
Figura 5: Mapa geológico regional del distrito minero de Morococha.....	30
Figura 6: Microfotografías de la mineralización presente en los skarns de Ombla Inferior y Porvenir	36
Figura 7: Secuencia paragenética generalizada de la mineralización en Ombla Inferior. El grosor de las líneas está relacionado con la abundancia relativa del mineral o generación. La ubicación de las fases o generaciones que presentan concentraciones destacadas de In se resaltan en color rojo.	37
Figura 8: Microfotografías de la mineralización presente en las muestras estudiadas de Manto Italia	39
Figura 9: Secuencia paragenética generalizada de Manto Italia. El grosor de las líneas está relacionado con la abundancia relativa del mineral o generación. Las líneas de color naranja representan las fases minerales o generaciones particulares observadas en esta tesis. La ubicación de las fases o generaciones que presentan concentraciones destacadas de In o Ga se resaltan en color rojo.	40
Figura 10: Diagramas binarios de Zn vs Fe y Zn vs Cu de esfalerita de los cuerpos estudiados.	43
Figura 11: Perfiles de ablación multi elemental representativos de los granos de esfalerita analizados.	45
Figura 12: Diagramas binarios de Bi vs Pb, Cu vs In, Ge vs Ga y Cu +Ag vs Ge + Ga + Sn + In en esfalerita de los cuerpos estudiados.....	48
Figura 13: Perfiles de ablación multi elemental representativos de los granos de calcopirita analizados	49
Figura 14: Perfil de ablación multi elemental representativo de los granos de galena analizados.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Líneas espectrales y estándares usados para la medición y calibración de cada elemento.	19
Tabla 2: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados (datos de microsonda electrónica).....	41
Tabla 3: Análisis representativos de esfalerita en los cuerpos estudiados, incluyendo composición química y fórmula estructural normalizada a $S = 1$. Límites de detección en la Tabla 1 (datos de microsonda electrónica).....	42
Tabla 4: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de calcopirita de los cuerpos estudiados (datos de microsonda electrónica).....	44
Tabla 5: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados (datos de LA-ICP-SF-MS).	47
Tabla 6: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de calcopirita de los cuerpos estudiados (datos de LA-ICP-SF-MS).	51
Tabla 7: Análisis representativos de galena en Manto Italia incluyendo composición química (Datos de LA-ICP-SF-MS).....	52
Tabla 8: Temperaturas de homogenización calculadas mediante el geotermómetro GGIMFis para las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados.	58



1. INTRODUCCIÓN

1.1. *Sistemas porfíricos de Cu-(Mo-Au) y estilos de mineralización asociados*

Los sistemas de pórfidos cupríferos (Mo-Au) representan alrededor de la tercera parte de la extracción mundial de cobre (leyes de 0.2 a 2 %) y la mitad de la extracción mundial de molibdeno (leyes de 0.01 a 0.5 %; Pirajno 2009; Sillitoe 2010). En general, estos sistemas se caracterizan por grandes volúmenes (10 a 100 km³) de rocas alteradas hidrotermalmente que albergan óxidos y sulfuros de interés económico, así como también por la variedad de tipologías de yacimientos asociados (Fig. 1). Tipologías de yacimientos en sistemas de pórfidos cupríferos incluyen mineralizaciones de tipo pórfido Cu (y Cu-Au, Cu-Mo), skarns, cuerpos de reemplazamiento (incluyendo los “*carbonate replacement deposits*”, CRD), vetas subepitermales, epitermales de alta e intermedia sulfuración y depósitos diseminados distales en sedimentos (Seedorff et al. 2005; Sillitoe 2010). En el ambiente epitermal, algunos sistemas alojan, además, mineralizaciones polimetálicas de metales base en vetas y cuerpos de reemplazamiento formados durante estadios relativamente tardíos que reciben el nombre de “cordilleranas” (Einaudi 1982; Fontboté y Bendezú 2009; Catchpole et al. 2015a).

La génesis de estos sistemas se encuentra estrechamente ligada a las dinámicas de bordes de placas convergentes (Pirajno 1992; Seedorff et al. 2005). Observaciones de campo, interpretación geofísica y cálculos teóricos sugieren que las cámaras magmáticas deben presentar un volumen mínimo de 50 km³ para ser capaces de liberar una cantidad de fluidos suficiente como para generar un sistema de pórfido cuprífero (Dilles 1987; Cloos 2001). Estos magmas deben ser hidratados (≥ 4 % en peso, wt%, de agua) y presentar un alto estado de oxidación (Richards 2005, 2018).

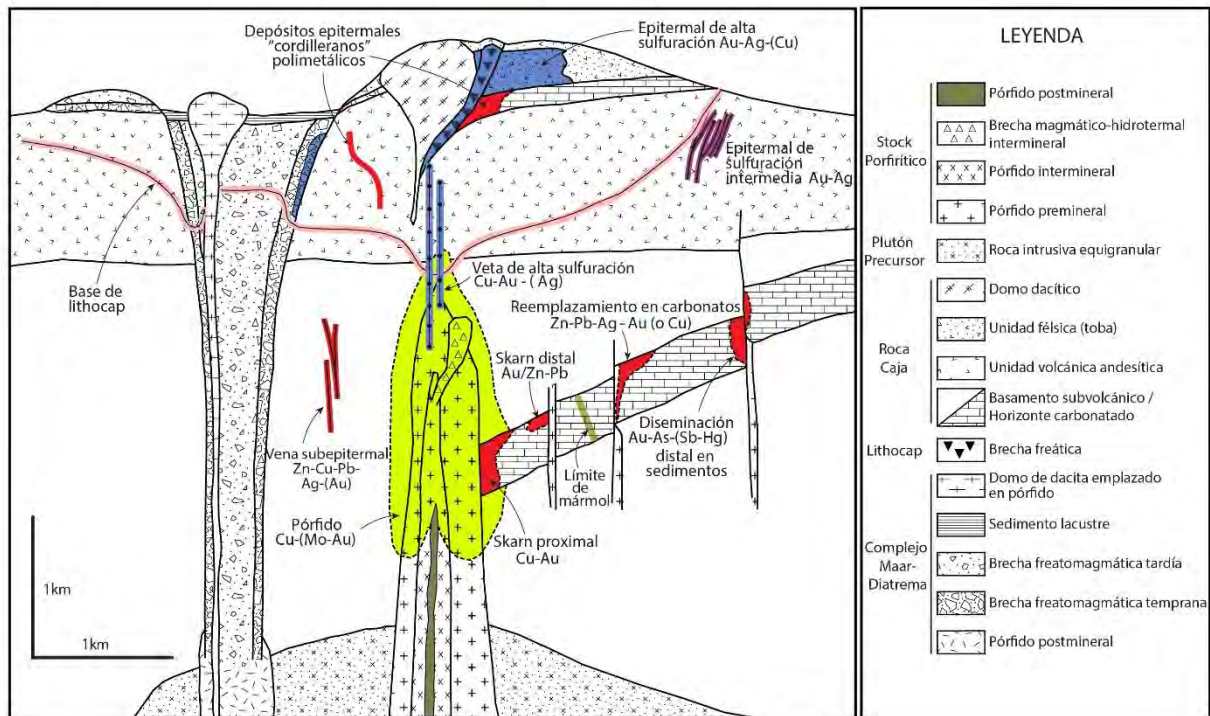


Figura 1: Esquema de un sistema de pórfido cuprífero que muestra las interrelaciones espaciales de un depósito de pórfido de Cu-(Mo-Au) en la zona central y otras tipologías de yacimientos minerales tales como un exoskarn proximal y distal, reemplazamiento en carbonatos (*carbonate replacement*; mantos), depósitos diseminados distales en sedimentos, venas subepitermales en roca no carbonatada; epitermales “cordilleranos” polimetálicos y epitermales de alta e intermedia sulfuración en el ambiente de lithocap (modificado de Sillitoe 2010 y Fontboté 2019).

Los sistemas de pórfidos cupríferos suelen emplazarse en los primeros 4 km de la corteza como stocks centrales conectados a cámaras magmáticas a profundidades que oscilan entre 5 y 15 km (Pirajno 2009; Richards 2018). Los stocks y diques suelen tener diámetros menores a 1 km, pero pueden contar con elongaciones de hasta 14 km (p.ej. Ossandón et al. 2001). Sedorff et al. (2005) indican que el tamaño del stock no guarda relación directa con las dimensiones del depósito o su contenido metálico.

Se pueden diferenciar tres fases de intrusiones en los sistemas de pórfidos cupríferos: preminerales, interminerales y postminerales (Fig. 1; ver Gustafson 1978). Los intrusivos porfíricos inmediatamente preminerales, y su respectiva roca caja, suelen contener las leyes de mineralización más elevadas. En cambio, los intrusivos interminerales suelen estar menos enriquecidos en comparación con la primera fase, especialmente los más jóvenes. Los pórfidos postminerales suelen cortar venas y contener xenolitos de las fases previas. En las partes más

distales de las intrusiones porfiríticas, los xenolitos pueden llegar a ser suficientemente abundantes como para formar brechas caracterizadas por una solidificación unidireccional alternando capas de cuarzo y aplita como producto de fluctuaciones de presión durante la transición entre condiciones magmáticas e hidrotermales (Sillitoe 2010).

Los sistemas de pórfidos cupríferos muestran un patrón, a gran escala, de alteración-mineralización hidrotermal zonado. En la parte más profunda exhiben una alteración sódico-cálcica con minerales como albita/oligoclasa, actinolita y magnetita (Carten 1986; Dilles y Einaudi 1992). En la zona central del sistema, la alteración potásica (biotita + feldespato potásico + magnetita; Ridley 2013) es la que predomina con pirita + calcopirita ± bornita ± molibdenita ± digenita ± calcosina como sulfuros económicos que constituyen la principal mena (Lowell y Guilbert 1970; Seedorff et al. 2005; Ridley 2013). En las partes distales, superpuesto a la alteración potásica y por debajo del *lithocap* de alteración argílica avanzada, las rocas muestran una alteración propilítica con minerales como clorita, epidota, albita y pirita (± esfalerita y galena; Sillitoe 2010). Por encima de la zona central, típicamente, encontramos alteración de clorita-sericita y filica (cuarzo-sericita), esta última con pirita + calcopirita + enargita ± tennantita (Seedorff et al. 2005; Sillitoe 2010). Finalmente, el ambiente de *lithocap* se caracteriza por presentar alteración argílica avanzada con cuarzo residual oqueroso (*vuggy silica*), alunita, pirofilita y caolinita, eventualmente con mineralización sobreimpuesta de pirita + enargita ± calcosina ± covelina como sulfuros económicos (Lowell y Guilbert 1970; Pirajno 2009; Sillitoe 2010).

El desarrollo de los yacimientos alojados en la roca de caja es más común en las zonas donde la roca hospedante es de composición carbonatada (Sillitoe 2010). Típicamente, se encuentran depósitos tipo skarn (estrictamente exoskarns), que presentan rocas dominadas por calcosilicatos (piroxenos y granates; Einaudi et al. 1981; Meinert 1992; Pirajno 2009),

formados durante el metamorfismo regional y de contacto y procesos metasomáticos que involucran fluidos de origen magmático, metamórfico y meteórico (Meinert et al. 2005; Pirajno 2009). En una primera etapa, coetánea a la alteración potásica de las rocas no carbonatadas, la formación de los skarns implica una fase prógrada con procesos de descarbonización y deshidratación y la cristalización de granate, piroxeno y wollastonita (Pirajno 2009; Ridley 2013). Ésta es seguida por una fase retrógrada con formación de minerales hidratados que es sincrónica a la alteración de clorita-sericita y filica de las rocas no carbonatadas. Durante la fase retrógrada cristaliza magnetita, actinolita, epidota, clorita, arcillas, cuarzo, carbonatos y se puede producir una cristalización de mineralización metálica con piritita y calcopiritita, principalmente. Estas zonas mineralizadas en los sistemas porfiríticos incluyen, típicamente, depósitos tipo skarn proximales de $\text{Cu} \pm \text{Au}$ y, en menor medida, skarns distales de Au y/o Zn-Pb (Fig. 1; Meinert et al. 2005). Así mismo, en zonas más distales con respecto a los skarns es posible encontrar yacimientos del tipo CRD que se caracterizan por el reemplazamiento de las rocas carbonatadas por sulfuros de metales base y, también, por la ausencia de calcosilicatos propios de los skarns (Fletcher 1929; Megaw 1998; Ridley 2013). Algunos distritos mineros presentan depósitos tipo skarn y CRD con una distribución zonal alrededor de una intrusión (p. ej. Morococha, Perú; Catchpole et al. 2016).

En el ambiente de *lithocap*, los yacimientos asociados suelen ser, principalmente, epitermales de alta sulfuración (Hedenquist et al. 2001; Sillitoe 2015). La zona más profunda de estos epitermales puede contener enargita o luzonita que comúnmente aparecen en vetas superpuestas a los depósitos de pórfidos cupríferos (Fig. 1; Einaudi 1982; Hedenquist et al. 2000; Torró et al. 2017), mientras que las zonas más someras suelen contener disseminaciones de minerales de $\text{Au} \pm \text{Ag}$, como es el caso del yacimiento de Yanacocha (Perú; Harvey et al. 1999). A lo largo del *lithocap* también pueden emplazarse mineralizaciones epitermales, que van desde estadios de baja a alta sulfuración, con minerales de $\text{Zn-Pb-Ag} \pm \text{Cu}$ a manera de

vetas cordilleranas o cuerpos de reemplazamiento (Fontboté 2018; Fontboté 2020). Estos suelen emplazarse por debajo de una litología impermeable y, por ende, tienden a ser estratoligados con un fuerte control estructural dominado, principalmente, por fallas de alto y bajo ángulo (Sillitoe 2010; Ridley 2013).

1.2. Antecedentes en el estudio del distrito minero de Morococha

El distrito minero de Morococha se localiza en la Cordillera Occidental de los Andes Peruanos y es parte de la franja metalogenética del Mioceno (Petersen 1965; Carlotto et al. 2009; Catchpole et al. 2015a, b). Terrones (1949) resalta la existencia de una sucesión estratigráfica que muestra distintos y variados ambientes sedimentarios, volcánicos y metamórficos en el distrito. Las rocas más antiguas reconocidas en el área corresponden a las filitas del Grupo Excelsior (Devónico; Terrones 1949), sobreyacidas por rocas volcano-sedimentarias del Grupo Mitu (Triásico; Rosas et al. 2007; Spikings et al. 2016) que en el distrito son conocidas como “Volcánicos Catalina” (Terrones 1949). Continúan rocas carbonatadas del Grupo Pucará (Triásico-Jurásico) con sus formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga (Rosas et al. 2007), areniscas y calizas del Grupo Goyllarisquizga (Cretácico Inferior; Mégard 1968), una secuencia carbonatada con las formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha (Cretácico Superior; Terrones 1949; Mégard 1968) y capas rojas correspondientes a la Formación Casapalca (Terciario; Salazar 1983). Nagell (1957) describe la presencia de anhidrita hipógena asociada a menas de Cu y Au. Trabajos de datación en rocas ígneas de la región realizados por Petersen (1965) y Kouzmanov et al. (2008) indican que las rocas intrusivas más antiguas en el distrito están representadas por la microdiorita Codiciada (14.31 ± 0.04 Ma) y la diorita Anticona (14.07 ± 0.04 Ma).

En relación con la distribución de la mineralización, Nagell (1960) dividió el distrito en dos zonas (este y oeste) con respecto al contacto del stock de San Francisco. Bendezú et al.

(2008), Chevalier (2010) y Catchpole et al. (2016) coinciden en que los centros magmáticos-hidrotermales de Codiciada, Ticlio y Toromocho son los responsables de la mineralización en Morococha.

Bendezú et al. (2008) y Chevalier (2010) exponen diferencias en el estilo de mineralización y alteración de los pórfidos de Ticlio (Cu-Au) y Codiciada (Cu-Mo). Los autores sostienen que la parte central del pórfido de Ticlio presenta alteración potásica caracterizada por feldespatos potásicos secundarios y magnetita en *stockworks*. Por otro lado, el pórfido de Codiciada presenta, en la parte central, una fuerte alteración sodico-cálcica y núcleos de silicificación (Bendezú et al. 2008). Dataciones U-Pb en titanita de Codiciada indican una edad de 9.3 ± 0.2 Ma, y dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita de Ticlio dan una edad de 8.04 ± 0.14 Ma (Catchpole et al. 2015b).

Diversos autores indican que cuerpos de skarn, vetas polimetálicas cordilleranas y cuerpos de reemplazamiento (mantos) en el distrito de Morococha se formaron a partir de fluidos hidrotermales procedentes de los tres centros magmático-hidrotermales (Nagell 1960; Petersen 1965; Catchpole et al. 2015a, b, 2016). En cuanto a la mineralización tipo skarn, Catchpole et al. (2015b), en base a dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en flogopita, indican que es posible diferenciar dos o tres eventos sucesivos de formación de skarns de serpentina en un periodo de ~ 2 My entre aprox. 9.3 y 6.9 ± 0.3 Ma (skarn Gertrudis; Catchpole 2011).

Con respecto a las vetas cordilleranas polimetálicas (Zn-Pb-Cu-Ag), las más importantes fueron datadas entre 6.0-5.7 Ma por Catchpole et al. (2015b) y describen una zonación metalífera concéntrica, a escala distrital, que desde la parte central a la periferia incluyen las zonas de $\text{Cu} \rightarrow \text{Zn-Cu} \rightarrow \text{Zn-Pb-Ag} \rightarrow \text{Ag-Pb}$ alrededor del centro intrusivo de Toromocho. Estudios de microtermometría en inclusiones fluidas de las mineralizaciones polimetálicas cordilleranas son ofrecidos por Agneau (2008) y Catchpole et al. (2011, 2015a).

Ageneau (2008) estudió inclusiones fluidas en vetas polimetálicas cordilleranas distales ricas en plata (Buenaventura y Galera), y obtuvo temperaturas de homogenización (T_h) de entre 221 y 294 °C y salinidades de entre 1.2 y 4.8 wt.% NaCl eq. en inclusiones dentro de cristales de cuarzo. En inclusiones fluidas alojadas en granos de esfalerita en las mismas vetas determinó un incremento significativo de la salinidad a T_h relativamente constantes desde las generaciones tempranas ($T_h = 173-250$ °C, salinidad = 4.2-8.3 wt.% NaCl eq.) a las tardías ($T_h = 167-245$ °C, salinidad = 4.2-15.3 wt.% NaCl eq.) de este mineral. Ageneau (2008) argumenta que este incremento de salinidad a T_h relativamente homogénea puede deberse a procesos de ebullición. A partir de datos de microtermometría y de estudios de isótopos estables (C, O), el autor acota que los fluidos mineralizantes de origen magmático se mezclaron con fluidos de origen meteórico, éstos últimos en una proporción importante en mineralizaciones polimetálicas distales. Catchpole et al. (2011, 2015a) realizaron determinaciones microtermométricas así como composicionales mediante ablación láser conectada a espectroscopía de masas acoplada inductivamente a una fuente de plasma (LA-ICP-MS) en inclusiones fluidas. El estudio microtermométrico realizado por estos autores indica que durante el proceso de enfriamiento del fluido magmático a lo largo de la mineralización cordillerana (inclusiones fluidas en asociaciones minerales precoces dan $T_h = 340-380$ °C y salinidad = 2-5 wt.% NaCl eq.), los fluidos experimentaron separación de fases por descompresión y adquirieron salinidades de hasta 35 wt% NaCl eq. Los datos isotópicos (O, H, C) reflejan, además, una signatura magmática dominante en los fluidos hidrotermales y su dilución por mezcla con aguas meteóricas durante los estadios finales de mineralización. Los resultados de LA-ICP-MS de las inclusiones fluidas demostraron que los fluidos hidrotermales a partir de los cuales precipitó la mineralización de tipo cordillerana tienen una composición similar a la de los fluidos en pórfidos cupríferos (Catchpole et al. 2011, 2015a). Los resultados reportados en Catchpole et al. (2011, 2015a) registran una evolución del fluido hidrotermal

desde una precipitación inicial de la mineralización a una profundidad de 2-1.5 km hasta una precipitación final a 300-800 m de profundidad, sugiriendo un proceso de “*telescoping*” por levantamiento y erosión.

En vetas polimetálicas cordilleranas en Morococha, Agneau (2008) y Catchpole et al. (2012) reportaron que las concentraciones de hierro en esfalerita disminuyen a lo largo de la secuencia paragenética desde valores de 15-20 mol.% FeS en granos cristalizados durante etapas tempranas (estadio de cuarzo-pirita y metales base) a valores < 1 mol.% FeS en granos cristalizados en etapas finales (estadio de carbonatos). Otros elementos analizados en esfalerita fueron Mn (1-9 mol.% MnS), Cu (< 1 mol.% CuS) y Cd (0.1-0.3 mol.% CdS). Catchpole et al. (2012) acotan que especies minerales como stannoidita [Cu₈(Fe,Zn)₃Sn₂S₁₂], vinciennita [Cu₁₀Fe₄Sn(As,Sb)S₁₆] y tennantita-tetraedrita muestran un contenido variable de Cu y Fe²⁺/Fe³⁺ entre las diferentes zonas de metales base. Controlados por un mecanismo de sustitución acoplada, dichos minerales muestran un exceso de Cu y composiciones predominantemente férricas en las zonas centrales (zonas de Cu y Zn-Cu), mientras que hacia la periferia (zonas de Zn-Pb-Ag y Ag-Pb) muestran valores estequiométricos de Cu y mixtos de Fe²⁺ y Fe³⁺. Además, los autores identifican en minerales del grupo de la tetraedrita que las relaciones de Ag/(Ag+Cu), Zn/(Zn+Fe) y Sb/(Sb+As) se incrementan sistemáticamente desde las zonas centrales a las periféricas en el distrito. Estos cambios de composición son interpretados por Catchpole et al. (2012) como un reflejo del cambio decreciente del estado de oxidación a lo largo de la evolución de los fluidos, y una reacción creciente con la roca hospedante hacia las partes externas de los depósitos polimetálicos.

1.3. Elementos de alta tecnología y su presencia en sistemas de pórfidos cupríferos

El crecimiento exponencial de las economías emergentes y la innovación tecnológica han dado lugar al aumento de la demanda mundial de los denominados metales críticos. Un total de 30 elementos son considerados indispensables para la sostenibilidad de la sociedad moderna y futura según diferentes organismos internacionales como la Comisión Europea (2020), dentro de los cuales encontramos el indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga), sobre los que se centra el presente estudio.

El consumo del In, Ge y Ga se encuentra en constante aumento. Generalmente son empleados industrialmente bajo las formas de arseniuros o nitruros de galio (GaAs o GaN), tetracloruro o dióxido de germanio (GeCl₄ o GeO₂) y óxido de indio y estaño (ITO; Schwarz-Schampera y Herzig 2002; Foley et al. 2017; Shanks et al. 2017). Dentro de sus numerosos usos, estos compuestos son masivamente empleados en aplicaciones de alta tecnología como *smartphones* (In, Ga), dispositivos optoelectrónicos (In, Ge, Ga) y fibra óptica (In, Ge; Schwarz-Schampera y Herzig 2002; Sahlström et al. 2017; Foley et al. 2017; Shanks et al. 2017). La producción de celdas fotovoltaicas ha tomado gran importancia tecnológica y ambiental debido al incremento en el precio de las energías fósiles y su relación con emisiones contaminantes. En tal sentido, las celdas fotovoltaicas de película delgada se están convirtiendo en una fuente importante de generación de electricidad a partir de luz solar y cuya producción involucra aleaciones de selenio, cobre, indio y galio (CIGS), telururo de cadmio (CdTe) y germanio de manera individual o aleado con otros elementos (Bleiwass 2010).

El In, Ge y Ga no forman yacimientos propios y su extracción se da como subproductos a partir del procesamiento de menas de Al, Ag, Cu, Pb y Zn (Shanks et al. 2017; Comisión Europea 2017, 2020). Es posible encontrarlos en una gran variedad de depósitos metálicos

incluyendo los yacimientos asociados a sistemas de pórfidos cupríferos (Foley et al. 2017; Shanks et al. 2017).

Son muy pocas las referencias sobre la presencia de estos metales en yacimientos de tipo pórfido cuprífero. John y Taylor (2016) mencionan que el In aparece, comúnmente, como traza en calcopirita con concentraciones de hasta 150 ppm (ver Briskey 2005). A diferencia de los pórfidos cupríferos, existen estudios más amplios sobre la distribución de In en yacimientos de pórfidos de estaño (ver Liu et al. 2017, 2018).

La presencia de metales estratégicos, principalmente In, en yacimientos de tipo skarn ha sido investigada recientemente por varios autores. Bauer et al. (2019) reportaron elevadas concentraciones de In en esfalerita asociada a calcopirita en el skarn de Hämmerlein (Alemania). Además, reconocieron roquesita [CuInS₂] como único sulfuro de In a manera de diminutas inclusiones en asociación con esfalerita-calcopirita. La información textural y análisis geoquímico mineral indican que los núcleos de los granos de esfalerita no exceden concentraciones de 5-7 wt.% In; sin embargo, los bordes y microfracturas en este mineral contienen hasta 20 wt.% In. Los autores sugieren que el enriquecimiento de In en esfalerita no es una característica exclusivamente relacionada a procesos hidrotermales primarios, sino que puede incrementarse durante eventos hidrotermales tardíos por la descomposición de una calcopirita enriquecida en In (hasta 0.42 wt.% en este depósito). Así mismo, Liu et al. (2018) reportan contenidos de In en esfalerita, calcopirita y estannita con un promedio de 114 ppm en el skarn de Sn-Cu en Yejiwei (sur de Hunan). Contenidos elevados de In en esfalerita (0.74–4572 ppm) en el skarn de Zn-Sn-In de Dulong (Suroeste de China), y cantidades menores en calcopirita (5.3–1399 ppm), casiterita (0.06–0.48 ppm) y granates (var. andradita, 166–629 ppm) fueron reportados por Xu et al. (2020). En base a la información textural y concentración de In, Xu et al. (2020) diferenciaron cuatro generaciones de esfalerita resaltando una segunda

generación por sus contenidos elevados de In (hasta 4572 ppm), así como por sus contenidos moderados de Cu (6–1254 ppm), Ag (0.65–275 ppm), Sn (0.61–41 ppm) y Co (0.46–202 ppm). Los autores identificaron una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$ como principal mecanismo de incorporación de In en la estructura de la esfalerita; sin embargo, también sugieren un mecanismo de sustitución del tipo $3\text{Zn}^{2+} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{Sn}^{2+} + \text{In}^{3+}$ debido a una correlación positiva entre Sn y Ag, así como entre (Sn+In) y Ag. Cabe resaltar que la incorporación de In en granates sería producto de una sustitución $\text{In}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ (Xu et al. 2020).

Con respecto a mineralizaciones de tipo epitermal, Sahlström et al. (2017) reportaron, en el depósito de Mt Carlton (Australia), contenidos de In en esfalerita de hasta 2169 ppm, de Ge en argidorita [Ag_8GeS_6] de hasta 6.95 wt.% y de Ga en alunita y dickita de hasta 339 y 150 ppm, respectivamente. Además, los autores mencionan que ciertas generaciones de esfalerita en Mt Carlton tienen concentraciones de Ge de hasta 611 ppm y de Ga de hasta 2829 ppm. Jovic et al. (2011) reportaron concentraciones de In de hasta 2.56 wt.% en esfalerita rica en hierro, de hasta 3.02 wt.% en ferrokösterita y de hasta 3.63 wt.% en greenockita en el sistema vetiforme de Pingüino (Argentina). En el distrito de La Carolina (Argentina), Gallard-Esquivel et al. (2018) reportaron concentraciones de In de hasta 5490 ppm en una generación de esfalerita rica en hierro que también muestra contenidos elevados de Cu, Ag, Ga y Ge (este último asociado también a argirodita).

En los Andes Centrales de Bolivia han sido descritos yacimientos polimetálicos xenotermiales y epitermales con altas concentraciones de In a lo largo del Cinturón Estannífero de los Andes Centrales (Fig. 2; Schwarz-Schampera y Herzig 2002). Estas mineralizaciones no se encuentran asociadas a sistemas de pórfidos cupríferos, sino estanníferos (Sn-W). No obstante, la sistematización existente en cuanto a las concentraciones de In en éstas puede ser de gran utilidad durante el estudio de mineralizaciones equivalentes en pórfidos cupríferos.

Ishihara et al. (2011) reportaron concentraciones de In entre 34-5740 ppm para el depósito de Cerro Rico de Potosí, de hasta 3080 ppm en Huari Huari, de hasta 449 ppm en concentrados de zinc de la mina Porco, de hasta 630 ppm en Tatasi, de hasta 1290 ppm en San Vicente y valores entre 2240 y 2510 ppm en las muestras compositas de Oploca y sus venas ramificadas de la mina Siete Suyos. Gran parte del In en Cerro Rico de Potosí se encuentra en esfalerita y minerales de estaño destacando la presencia de petrukita $[(\text{Cu,Fe,Zn})_3(\text{Sn,In})\text{S}_4]$, con hasta 4.86wt.% In). Mediante ablación láser femto-segundo conectada a espectroscopía de masas acoplada inductivamente a una fuente de plasma (fsLA-ICP-MS) y microsonda electrónica (EPMA), Murakami e Ishihara (2013) reportaron concentraciones de In en Potosí de hasta 5290 ppm en esfalerita negra (var. marmatita). Cacho et al. (2019) reportaron concentraciones de In en el depósito polimetálico de Huanuni (depósito transicional entre epitermal y pórfido de Sn) de hasta 2000 ppm en esfalerita, y valores menores en estannita y casiterita; además, encontraron concentraciones de Ge de hasta 0.13 wt.% en estannita-kärsterita. Rocas ígneas asociadas a la mineralización diseminada de Sn-Zn-Pb-Ag en el distrito minero de Santa Fe (Japo, Santa Fe y Morococala) tienen concentraciones de In de 1.5–2.5 ppm, y se reportan concentraciones de In de hasta 200 ppm en sus concentrados minerales (Jiménez-Franco et al. 2018). En Japo y Morococala, la sakuraiita $[(\text{Cu,Zn,Fe})_3(\text{In,Sn})\text{S}_4]$, grupo de la estannita) alcanza valores de hasta 2.03 wt.% de In y la esfalerita, de hasta 0.26 wt.% de In. En el depósito epitermal de Poopó, los contenidos más relevantes de In se encontraron en frankeita, rhodoestannita, esfalerita, casiterita y estannita (Torres et al. 2019). En el distrito de Huari-Huari, Torró et al. (2019a) reportaron concentraciones de In en esfalerita rica en hierro de hasta 3.49 wt.% y en estannita de hasta 2.64 wt.%. Estos minerales aparentemente forman una solución sólida incompleta con roquesita dentro del sistema pseudoternario $(\text{Zn,Fe})\text{S}-\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4-\text{CuInS}_2$. En el distrito de Ánimas-Chocaya-Siete Suyos, Torró et al. (2019b) determinaron que la esfalerita, independientemente de su concentración en hierro, contiene

hasta un 9.66 wt.% de In, y la estannita, de hasta 4.11 wt.%. Torró et al. (2019a, b) sugieren que la disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes durante la cristalización de la esfalerita es esencial para la incorporación de In en su estructura cristalina.

En los Andes Centrales del Perú (Fig. 2), Soler (1987) analizó un total de 1500 muestras provenientes de 89 depósitos entre compositos minerales y concentrados de Pb y Zn diferenciando dos grandes grupos de depósitos: 1) un grupo con contenidos bajos a medios de Cd pero enriquecidos en In con una relación de $In/Cd > 0.10$; y 2) un grupo con contenidos medios a altos de Cd pero empobrecidos en In con una relación de $In/Cd < 0.05$. Dentro del primer grupo encontramos depósitos asociados a magmatismo como el distrito de Morococha, Colquijirca y Cerro de Pasco. En el segundo grupo destacan los depósitos estratoligados sin magmatismo asociado alojados en el Grupo Pucará (p. ej. San Vicente y Shalipayco, de tipo MVT). Los depósitos asociados a magmatismo contienen valores bajos de Ge (inferior a 5 ppm). El Ga es el elemento que presenta mayores variaciones en sus concentraciones. Soler (1987) encontró que los depósitos caracterizados por altos contenidos de In y una baja relación In/Cd presentan concentraciones elevadas de Ga. Petersen (1965) reporta la presencia de gallita $[CuGaS_2]$ en zonas de enargita-pirita del depósito de Yauricocha (vetas polimetálicas de Cu-Ag-Pb-Zn). Rottier et al. (2016) realizaron un estudio mediante EPMA de elementos traza en esfalerita del depósito cordillerano de metales base de Cerro de Pasco. Los autores reportaron concentraciones medias de In de 2620 y 1680 ppm para granos de esfalerita pertenecientes a dos estadios de mineralización (A y B, respectivamente). Benites et al. (2019) reportaron contenidos de In de hasta 1.58 wt.% en esfalerita con finas diseminaciones de calcopirita (calcopiritosis) en el proyecto Ayawilca (depósito cordillerano con cuerpos de reemplazamiento – “mantos” – y vetas de Zn-In-Ag-Sn-Cu). Los autores mencionan que los granos de esfalerita enriquecidos en In son sistemáticamente ricos en Fe, pero que lo contrario no es necesariamente cierto.

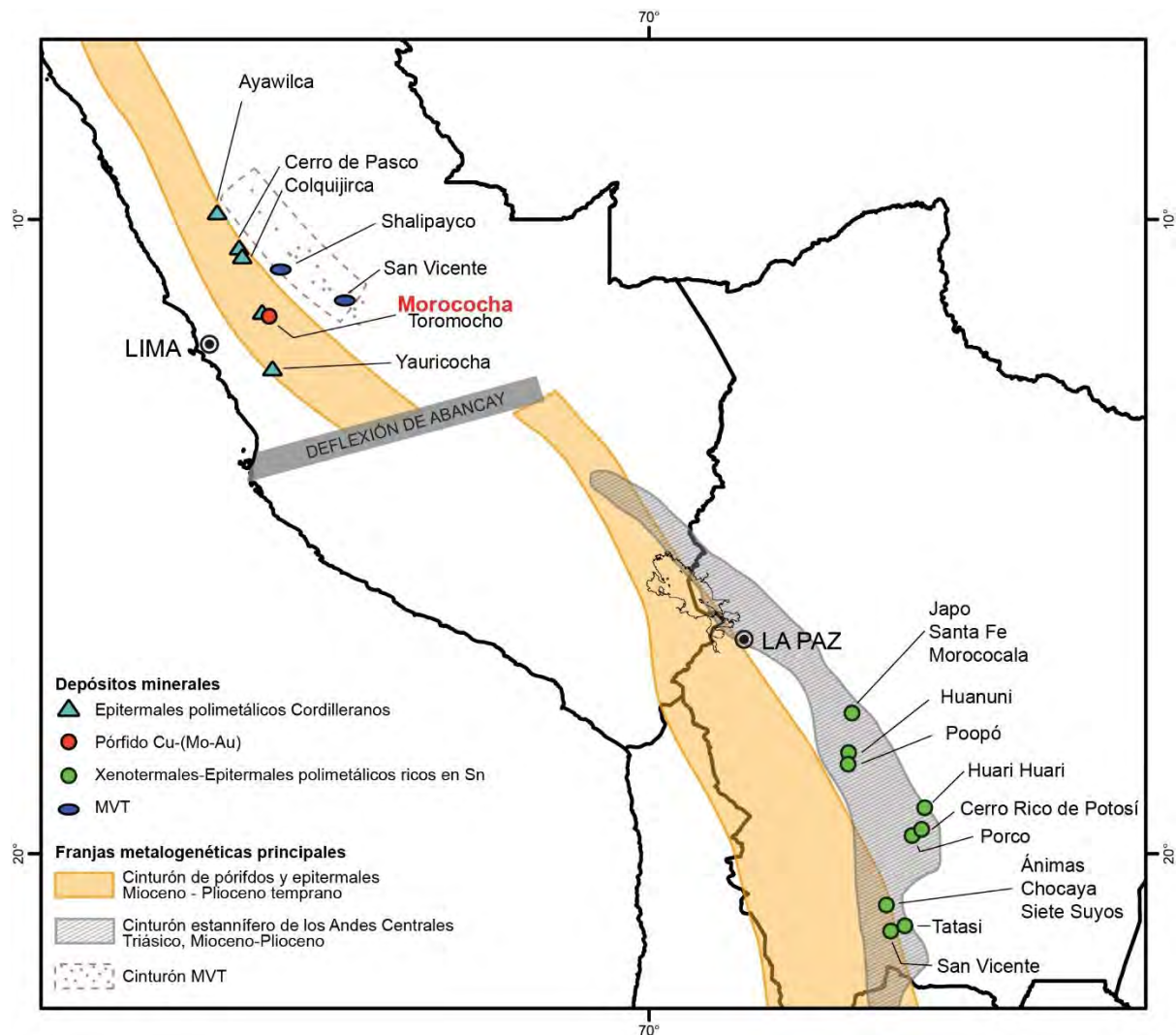


Figura 2: Ubicación de depósitos minerales en los Andes de Perú y Bolivia con descripciones de contenidos de metales críticos como In, Ge o Ga citados en el texto (franjas metalogénicas tomadas de Fontboté 2018).

Valverde (2020) estudió distintas mineralizaciones cordilleranas (vetas y mantos) del distrito minero de Morococha (Veta Morro Solar, Veta Rubí, Veta Isabel, Ramal Alianza, Manto Ivette y Cuerpo Rosita) determinando que las concentraciones más elevadas de In se dan en esfalerita cristalizada durante el estadio de metales base (sub-etapa de Fe-Cu-Zn-As-Sn). Según Valverde (2020), las máximas concentraciones de In se alcanzan en una segunda generación de esfalerita de la Veta Morro Solar (hasta 0.53 wt.%) e identifica una sustitución acoplada $Cu^{+} + In^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ como principal mecanismo de incorporación del In en la estructura de este mineral por la correlación positiva entre In y Cu a proporciones atómicas de 1:1. Por este motivo, el autor concluye que la presencia de Cu en los fluidos mineralizantes del distrito de Morococha desempeñó un papel fundamental en la distribución del In a lo largo de

la secuencia paragenética y a escala de distrito. Finalmente, Valverde (2020) indica que las concentraciones más elevadas de In fueron analizadas en esfalerita de cuerpos mineralizados proximales a los intrusivos más jóvenes (Toromocho – San Francisco) del distrito de Morococha, es decir, en las zonas más enriquecidas en Cu (en comparación a las zonas de Zn-Cu y Zn-Pb-Ag, más alejadas de los centros magmático-hidrotermales, de acuerdo con la zonación metalífera del distrito descrita por Catchpole et al. 2011, 2015a, b).

1.4. Problemática

Las concentraciones de los elementos críticos In, Ge y Ga en yacimientos de los Andes Centrales del Perú han sido escasamente estudiadas (Soler 1987; Benites et al. 2019; Quispe 2020; Valverde 2020), por lo que desconocemos su distribución espacio-temporal en sistemas mineralizantes de nuestro país. Los depósitos ubicados en el distrito minero de Morococha son potencialmente portadores de concentraciones económicas de estos elementos, como demuestra Valverde (2020) para distintas mineralizaciones de tipo cordillerano libres de asociaciones de skarn (*“skarn-free”*) en el mismo. En cambio, la concentración, expresión mineralógica y distribución de estos elementos de alta tecnología no ha sido nunca estudiada en mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn en el distrito de Morococha. Cabe resaltar, además, que al no existir estudios previos sobre contenidos, mineralogía y distribución espacio-temporal de In, Ge y Ga en los yacimientos mencionados – como tipologías de mineralización particular dentro de los sistemas de pórfidos cupríferos –, tampoco existen guías de exploración para dichos elementos en mineralizaciones de este tipo.

1.5. Objetivos del trabajo

Objetivo general:

- Caracterizar texturalmente y contextualizar espacio-temporalmente las concentraciones de In, Ge y Ga en los minerales de mena en mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn del distrito minero de Morococha.

Objetivos específicos:

- Describir la mineralogía y texturas de las mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn del distrito minero de Morococha.
- Analizar la geoquímica de elementos traza (con énfasis en In, Ge y Ga) en minerales de mena en mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn del distrito minero de Morococha.
- Establecer guías para la exploración de In, Ge y Ga en mineralizaciones polimetálicas en distritos de pórfidos cupríferos, incluyendo aquellas alojadas en cuerpos de skarn.

1.6. Hipótesis

En base a los estudios de concentraciones de In, Ge y Ga realizados en diferentes tipos de yacimientos asociados a sistemas de pórfidos cupríferos arriba citados se identifica que estos metales pueden concentrarse en esfalerita, incorporándose en su estructura cristalina mediante sustituciones acopladas. En menor medida, el In puede encontrarse presente en calcopirita y/o en minerales de estaño (estannita + casiterita \pm petrukita). No obstante, estos últimos no han sido descritos en las mineralizaciones del distrito estudiado. Además, se plantea que la disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes del distrito de Morococha a partir de los

cuales cristalizó la esfalerita habría jugado un papel importante en la distribución del In a escala de distrito y a lo largo de la secuencia paragenética.

1.7. Justificación

El avance de la innovación tecnológica da lugar al aumento de la demanda de las materias primas de alta tecnología, incluyendo In, Ge y Ga, por lo que su exploración y explotación es primordial para la sostenibilidad de la sociedad presente y futura. El distrito minero de Morococha se encuentra actualmente en producción por empresas como Pan American Silver Perú S.A.C, que opera Minera Argentum S.A (4.1 y 2.2 Mt de reservas probadas y probables, 0.3 Mt de recursos medidos e indicados; Pan American Silver Corp 2019), Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C. y Volcan. Por lo tanto, la determinación de la geoquímica mineral de las fases potencialmente portadoras de In, Ge y Ga puede favorecer a su proceso metalúrgico e incluso a su recuperación como sub-productos. Cabe resaltar que esta tesis sería el primer estudio que presentaría patrones de distribución de In, Ge y Ga en mineralizaciones polimetálicas encajadas en cuerpos de skarn en el Perú. Además, es importante mencionar que gran parte de la producción de Cu-Zn en el Perú está relacionada directamente con la explotación de yacimientos de tipo skarn (p. ej. Antamina, Las Bambas, Antapaccay).

2. MUESTREO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS

2.1. Muestreo y preparación de las muestras

Se recolectaron un total de 22 muestras clave representativas de los cuerpos estudiados en colaboración con Pan American Silver Perú S.A.C. Las muestras fueron obtenidas a partir de taladros de perforación diamantina y de frentes de explotación en labores subterráneas. El Anexo A contiene una lista de las muestras recolectadas y sus respectivas descripciones

macroscópicas. A partir de estas muestras se fabricaron 23 secciones gruesas pulidas representativas de la mineralización polimetálica en los tres skarns: 9 para Ombla Inferior, 2 para Porvenir y 12 para Manto Italia.

2.2. Técnicas analíticas

2.2.1. Microscopio petrográfico

Se fabricaron 23 secciones pulidas en las instalaciones del laboratorio QEMSCAN en la Sección de Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Estas preparaciones han sido estudiadas mediante un microscopio petrográfico marca “Zeiss Primotech” de polarización con luz transmitida y reflejada equipado con una cámara digital. Fichas individuales con la petrografía de cada sección pulida estudiada quedan recogidas en el Anexo B.

2.2.2. Microscopio electrónico de barrido con analizador de energías (SEM-EDS)

Una selección de las secciones pulidas ha sido estudiada también mediante microscopio electrónico de barrido ambiental Quanta 650 FEI equipado con un sistema de microanálisis EDAX-Octane Pro EDS en el Centro de Caracterización de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CAM-PUCP). Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 keV de voltaje de aceleración y 5 nA. Las imágenes fueron obtenidas en modo de electrones retrodispersados (BSE).

2.2.3. Microsonda electrónica (EPMA)

Los análisis químicos puntuales de los sulfuros presentes en las muestras se analizaron a través de una microsonda electrónica JEOL JXA-8230 equipada con cinco espectrómetros en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB). El equipo

fue operado a un voltaje de aceleración de 20 kV, haz de corriente de 20 nA y diámetro del haz de 5 μm . En la Tabla 1 se enumeran las líneas espectrales de análisis y los estándares usados para la medición y calibración de cada elemento. En el Anexo C se muestran algunos análisis representativos de EPMA.

Tabla 1: Líneas espectrales y estándares usados para la medición y calibración de cada elemento.

Elemento	Línea espectral	Estandar
Sb	L α	Sb
In	L β	In ₂ Se
S	K α	Esfalerita
Pb	M α	PbS
As	L β	GaAs
Fe	K α	FeS ₂
Cu	K α	Calcopirita
Zn	K α	Esfalerita
Ga	K α	GaAs
Ge	K α	Ge
Cd	L β	CdS
Ag	L α	Ag
Sn	L α	Sn

2.2.4. Ablación laser ICP-MS

Los análisis de las concentraciones de elementos traza en sulfuros mediante ablación láser conectada a espectrometría de masas de sector magnético acoplada inductivamente a una fuente de plasma (LA-ICP-SF-MS) fueron desarrollados en el ETH Zürich (Suiza). Se llevaron a cabo con un equipamiento RESolution S-155 (ASI/Applied Spectra) 193 nm ArF con un sistema de láser excimer conectado a un ICP-MS de sector magnético Thermo Scientific™ Element XR™. Se utilizó una repetición de láser de 3 Hz, un diámetro de spot de 19 μm y una densidad de energía láser en una muestra de aproximadamente 2.5 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$. La superficie de la muestra se limpió inmediatamente antes de cada análisis mediante tres pulsos de pre-ablación. La ablación se realizó en una celda de ablación S-155 de doble volumen y lavado rápido (Laurin Technic), fluida con un gas portador que consiste en aprox. 0.5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ He y un gas de reposición que consiste en aprox. 1 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ Ar y 2 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ N₂. El aerosol ablacionado fue

homogenizado mediante un lavado a través de un dispositivo squid antes de introducirse en el plasma.

El instrumento ICP-MS está equipado con una bomba de interfaz de alta capacidad ($80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) para lograr, en combinación con el muestreador de chorro y conos H-skimmer, una eficiencia de detección (basada en U en vidrio NIST SRM612) en el rango de 2% (Guillong et al. 2020). El instrumento fue optimizado para una sensibilidad máxima en todo rango de masas, manteniendo una baja producción de óxidos ($^{248}\text{ThO}^+ / ^{232}\text{Th}^+ \leq 0.15\%$) y U/Th con relaciones aprox. de 1 (en vidrio NIST SRM612). La lista de isótopos analizados y sus correspondientes tiempos de permanencia está disponible en el Anexo D. Un total de 68 escaneos de masa (aprox. 0.72 s de tiempo de barrido cada uno) fueron adquiridos durante aprox. 50 s de medición (25 s de medición de fondo seguido por 25 s de ablación en la muestra).

Los resultados de las intensidades fueron procesadas fuera de línea con la versión autónoma 1.3.2 del programa SILLS (Guillong et al. 2008). Un pellet de sulfuro prensado MASS-1 (anteriormente PS-1; Wilson et al. 2002) se utilizó como material de referencia primario para elementos traza y la corrección de la deriva instrumental mediante el uso de soportes de muestras estándar convencionales. El Cu (calcopirita, cobres grises) y Zn (esfalerita) obtenidos mediante EPMA se utilizaron como patrones internos para las correcciones de sensibilidad relativa. Los datos obtenidos son reportados en el Anexo E.

La reproducibilidad analítica se comprobó mediante mediciones repetidas de los materiales de referencia de vidrio GSD-1G (Guillong et al. 2005) y NIST SRM610 (Jochum et al. 2011), y rangos relativos entre 10-30% (2σ) para la mayoría de los elementos. Las incertidumbres citadas para cada análisis individual corresponden a un error estadístico (2σ) y a la reproducibilidad analítica propagada por adición cuadrática. La precisión se controló mediante mediciones repetidas del pellet de sulfuro UQAC-FeS-1 (data no publicada por D.

Savard, UQAC 2018; ver también en Baumgartner et al. 2020). Los resultados (reportados en el Anexo E) muestran que las mediciones son exactas dentro de las incertidumbres calculadas.

3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

3.1. Situación geográfica

El distrito Minero de Morococha se encuentra a 150 km al este de Lima y a unos 38 km aproximadamente al oeste de la ciudad de la Oroya, capital de la provincia de Yauli, región Junín. El distrito se encuentra en una latitud $11^{\circ}36'$ S y una longitud $76^{\circ}20'$ W entre los 4375 y 5290 m sobre el nivel del mar (Fig. 3; Cerro de Pasco Copper Corporation 1965; Bendezú 2007; Wafforn et al. 2014).

Se puede acceder a través de la Carretera Central del Perú, partiendo desde Lima, recorriendo 137 km hacia el este y luego 2.9 km al norte a través de una vía pública. El clima es típico de la Cordillera de los Andes del Perú caracterizado por presentar dos temporadas definidas: época seca (marzo a septiembre) con temperaturas promedio de 12°C y precipitaciones entre 7.4 y 17.2 mm/mes, y época de lluvias (octubre a marzo) con temperaturas promedio de -2°C y precipitaciones entre 88.4 y 132.3 mm/mes. (Knight Piésold Consultores S.A. 2009; Wafforn et al. 2014).



Figura 3: Ubicación geográfica del distrito minero de Morococha (tomado de Google Earth).

3.2. Situación geológica

3.2.1. Situación Geodinámica

El distrito minero de Morococha pertenece a la franja metalogénica del Mioceno que se extiende, por lo menos, 900 km a lo largo de la Cordillera Occidental del Perú (Fig. 4; Petersen 1965; Noble y McKee 1999; Carlotto et al. 2009; Scherrenberg et al. 2014). La evolución de la Cordillera Occidental está relacionada con la Orogenia Andina, en la cual múltiples eventos de deformación han sido descritos (Mégard 1984; Benavides-Cáceres 1999).

El inicio de la Orogenia Andina se caracteriza, estratigráficamente, por el cese de la entrada marina y el paso a sedimentación continental con la aparición de capas rojas (Mégard 1984; Benavides-Cáceres 1999). Involucró tres episodios principales de acortamiento: 1) la

Orogenia Peruana del Cretácico tardío, 2) la Orogenia Incaica entre el Paleoceno y el Eoceno y 3) la Orogenia Quechua en el Neógeno (Steinmann 1929). De acuerdo con Rosenbaum et al. (2005), la Orogenia Quechua se asocia a la subducción y pinzamiento de la dorsal de Nazca que habría provocado una disminución del ángulo de subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana (Fig. 4). Como resultado, se favoreció la formación de depósitos minerales debido al acortamiento cortical, disminución de actividad volcánica y focalización de los fluidos mineralizantes (Rosenbaum et al. 2005; Bissig et al. 2015; Scherrenberg et al. 2016).

Dentro del sistema orogénico andino en el centro del Perú, la Faja Corrida y Plegada del Maraón (MFTB por sus siglas en inglés; Fig. 4) es el componente central y se extiende, por lo menos, 1000 km con una tendencia estructural NNW-SSE. Se ubica al oeste del Alto del Maraón (Cordillera Oriental) y al este del Batolito de la Costa, y se encuentra delimitado en el norte por la Deflexión de Huancabamba y en el sur por la Deflexión de Abancay.

La historia geológica de la MFTB en el centro del Perú involucra un periodo de extensión y adelgazamiento cortical (pre-orogénico), seguido de un periodo de contracción (Orogenia Andina; Mégard 1984). Scherrenberg et al. (2016), mediante termocronología de baja temperatura (U-Th/He en apatito y trazas de fisión en apatito y zircón) en muestras provenientes de areniscas líticas y unidades ígneas de los Andes Peruanos, determinaron que la historia térmica de la MFTB involucra dos intervalos de vergencia opuesta y deformación cortical a gran escala desde el Cretácico Tardío. El primer intervalo (80-20 Ma) se asocia a una tectónica de piel delgada, con vergencia al este, y el segundo intervalo (20-0 Ma) se asocia a una deformación de piel gruesa, con vergencia al oeste, y a la formación de depósitos minerales de gran envergadura.

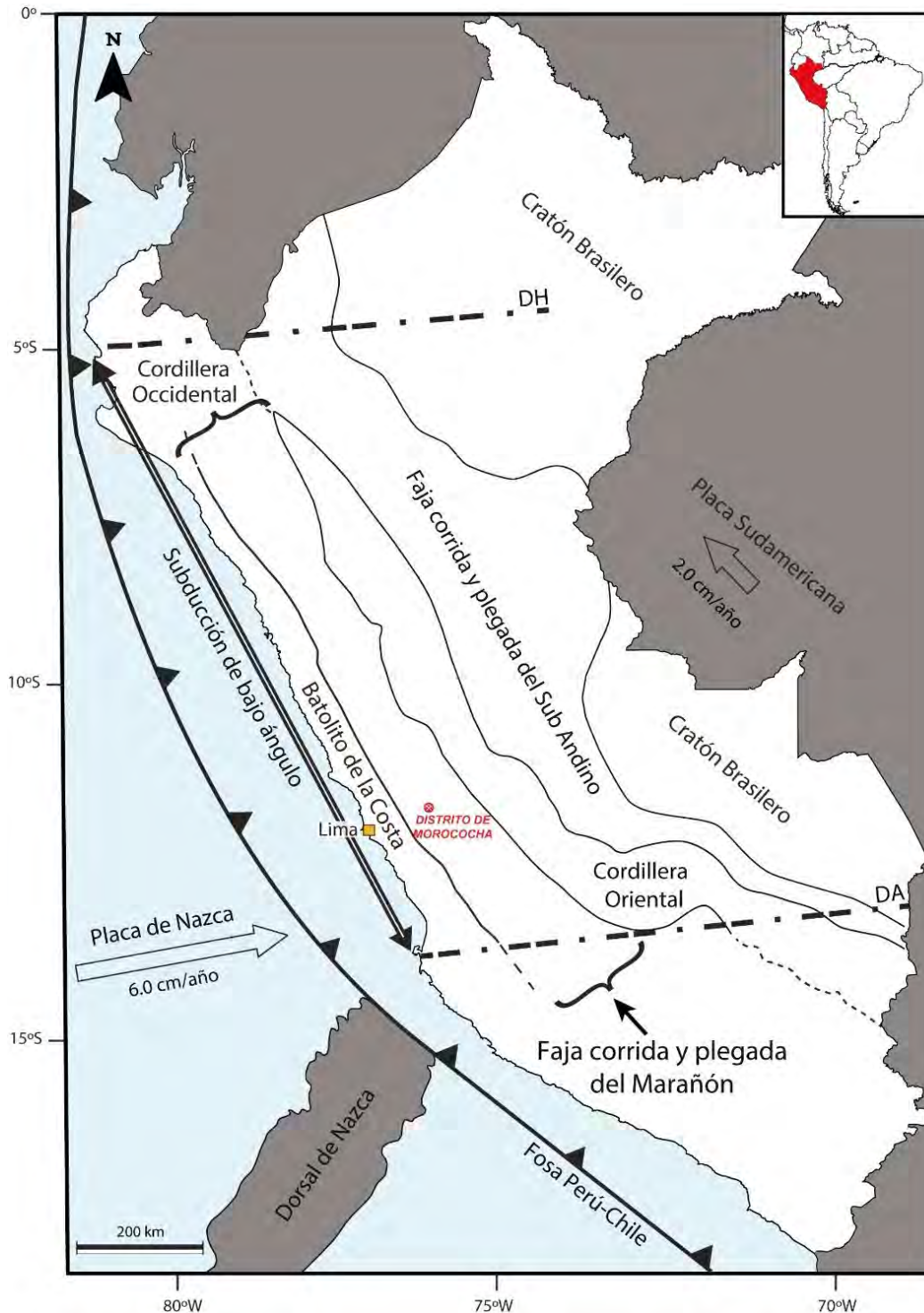


Figura 4: Mapa esquemático que muestra las principales estructuras tectónicas de los Andes Centrales del Perú, los márgenes longitudinales de la MFTB (DH, Deflexión de Huancabamba; DA, Deflexión de Abancay), la zona de subducción, vectores tectónicos de las placas y la zona de estudio (modificado de Scherrenberg et al. 2014).

La MFTB juega un papel clave en la metalogena andina, ya que un gran número de depósitos metálicos se emplazaron a lo largo de sus dominios incluyendo, por ejemplo, Raura (skarn de Zn-Pb), Toromocho (pórfido Cu-Mo), Antamina (skarn de Cu) y Yanacocha (epitermal de Au; Rosenbaum et al. 2005; Carlotto et al. 2009; Bissig et al. 2015). Scherrenberg

et al. (2016) mencionan que próximos a una falla normal de basamento (falla de Chonta), que pudo actuar como conducto para el ascenso y focalización de fluidos magmático-hidrotermales (ver Scherrenberg et al. 2012, 2014), se encuentran emplazados un gran número de depósitos de metales base y metales preciosos de edad miocena.

3.2.2. Geología Regional

El distrito minero de Morococha se ubica en la terminación noroeste del Domo de Yauli (Fig. 5). Yauli es un domo tectónico con una extensión de 30 km que, en la zona de Morococha, se encuentra como un anticlinal de rumbo NNW (Terrones 1949; Petersen 1965; Catchpole et al. 2015b, 2016). En los siguientes párrafos se detallarán las características de las principales unidades litológicas presentes en el distrito de Morococha.

Grupo Excelsior

El Grupo Excelsior, si bien no aflora, contiene las rocas más antiguas que se conocen en el distrito y constituye el basamento del Domo de Yauli (Kobe 1990). Su potencia es aún desconocida. Se compone principalmente de lutitas pizarrosas y filitas negras finamente estratificadas que, en ciertas zonas, muestran un cambio progresivo a esquistos cloríticos y sericíticos (Terrones 1949; Petersen 1965; Rivera y Kobe 1983). Harrison (1943) atribuyó una edad Devónica al Grupo Excelsior debido al descubrimiento de fósiles (braquiópodos) en las ciudades de Tarma y Concepción que fue confirmada posteriormente por Paredes (1972) tras el descubrimiento de varios yacimientos fosilíferos en regiones aledañas (Jauja y Concepción). Este grupo se encuentra predominantemente en la Cordillera Oriental y, estructuralmente, presenta anticlinales de orientación NW-SE. Las rocas del Grupo Excelsior presentan un intenso plegamiento y fracturamiento producto de la orogenia Hercínica (Salazar 1983).

Grupo Mitu

Las rocas del Grupo Mitu son las más antiguas que afloran en el distrito de Morococha (Bendezú 2007; Catchpole et al. 2016). Lepry (1981) precisó que esta unidad presenta espesores que varían entre 300 y 700 m desde la zona suroeste hacia la noreste del Domo de Yauli. Este Grupo comprende dos facies bien definidas: 1) Capas rojas de Potosí y 2) Volcánicos Catalina (Rivera y Kobe 1983; Mégard 1984). Las primeras se encuentran conformadas por brechas calcáreas, areniscas, calizas y conglomerados que sobreyacen discordantemente sobre las rocas del Grupo Excelsior (Terrones 1949; Salazar 1983). Los Volcánicos Catalina consisten en derrames lávicos, ocasionalmente depósitos piroclásticos, de composiciones dacíticas y andesíticas con texturas porfíricas (Terrones 1949). Estas rocas se emplazaron sobre la serie de capas rojas iniciales; sin embargo, se reconocieron afloramientos locales sobre las filitas del Excelsior (Terrones 1949; Salazar 1983). Rosas et al. (2007) les atribuyen una edad triásica, posteriormente confirmada por Spikings et al. (2016) mediante geocronología U-Pb en zircón. No obstante, Panca et al. (2018) señalan que los eventos volcánicos en el Grupo Mitu se produjeron desde el Pérmico Superior hasta el Triásico Superior (260-233 Ma).

Rivera y Kobe (1983) sostienen que el emplazamiento del Grupo Mitu se dio en una cuenca intramontañosa producto del levantamiento de las series subyacentes, posterior a la orogenia Hercínica. Sin embargo, Kontak et al. (1985) relacionaron el Grupo Mitu con un proceso de rifting, constituido por un conjunto de rocas sedimentarias clásticas de origen terrestre y marino ("*Molasse Sediments*"; Ellison et al. 1989; Rosas et al. 2007).

Grupo Pucará

El Grupo Pucará comprende una serie de rocas, principalmente carbonatadas, del Triásico-Jurásico que se formaron en un ambiente post-rift controlado por las fallas asociadas

al Grupo Mitu (Rosas et al. 2007). Este grupo presenta dos facies principales: 1) facie occidental (altas mesetas) y 2) facie oriental (Cordillera Oriental; Mégard 1968). Estratigráficamente, el Grupo Pucará se subdivide en tres formaciones que comprenden series sedimentadas en plataformas carbonatadas de aguas someras, inferiores y superiores (Formación Chambará y Condorsinga), excepto por una fase intermedia (Formación Aramachay) de aguas más profundas (Mégard 1968; Rosas et al. 2007).

La Formación Chambará (Noriano-Rhaetiano) se encuentra constituida principalmente por dolomías y, en menor proporción, por calizas (Mégard 1968; Rosas y Fontboté 1995). Rosas et al. (2007) sostienen que fueron depositadas en un paleoambiente submareal, intermareal y supramareal con desarrollo de *lagoon* y barras. El ambiente submareal está dominado por areniscas oolíticas con paquetes bioclásticos subordinados. Pseudomorfos evaporíticos, asociados a esteras de algas y dolomitización diagenética temprana, caracterizan a los ambientes submareal y supramareal. Por otro lado, los autores clasifican las calizas, subordinada en esta formación, en packstones crinoidales y wackestones bioclásticos. El espesor de la Formación Chambará varía notablemente de un lugar a otro, teniendo en el distrito de Morococha potencias entre 200 y 400 m (Mégard 1968; Rosas et al. 2007).

La Formación Aramachay (Raetiano Superior-Sinemuriano) en la Cordillera Oriental y zonas del Altiplano está constituida por calizas negras laminadas y bituminosas con intercalaciones ocasionales de lutita y limolita, sedimentos propios de cuencas profundas (Rosas y Fontboté 1995; Rosas et al. 2007; Rosas 2016). En contraste, en la Cordillera Occidental la Formación Aramachay ha desarrollado facies bioquímicas propias de plataforma somera (Rosas et al. 2007; Rosas 2016). En Morococha esta formación presenta espesores de 70 a 140 m y está conformada por dolomías ricas en chert y, en menor proporción, por limolitas y calizas (Rosas et al. 2007, 2014; Catchpole et al. 2016). La presencia de chert en las dolomías

es atribuido a un ecosistema dominado por esponjiarios silíceos durante las etapas más tempranas del Jurásico que incluye fósiles de esponjas, restos de esponjas deformadas y abundantes sedimentos espiculíticos transportados (Rosas et al. 2014; Ritterbush et al. 2015). Rosas et al. (2014) y Ritterbush et al. (2015) mencionan que dicho cambio ecológico, posterior a una extinción masiva de invertebrados al final del Triásico en Panthalassa Oriental (ver Ritterbush et al. 2014, 2015), jugó un papel importante en la formación del chert. La producción de sedimentos calcáreos fue reducida, en comparación con las Formaciones Chambará y Condorsinga, por aproximadamente 2 My hasta que el sistema carbonatado se recuperó. Estos autores sostienen que la Formación Aramachay presenta pocos cuerpos mineralizados debido a su poca reactividad y a los rasgos sedimentarios que actúan como trampa para la percolación de fluidos hidrotermales.

La Formación Condorsinga (Sinemuriano Superior-Toarciario) se encuentra dominada por calizas de aguas poco profundas y localmente dolomías. Rosas et al. (2007) sostienen que la principal diferencia con la Formación Chambará es la menor dolomitización (restringida a las partes inferiores de la unidad) y contenido menor de chert (< 3%). Además, dichos autores mencionan que en la zona superior de Aramachay hay presencia de paquetes bioclásticos de la base de Condorsinga, lo que interpretan como una sedimentación de cuenca continua en un paleoambiente abierto y sin restricciones. Las facies submareales de esta unidad se caracterizan por la disolución de ooides, posteriormente cementados por calcita, mientras que las facies supra e intermareales están caracterizadas por lodolitas con laminaciones de algas y brechas (Rosas et al. 2007). Rosas y Fontboté (1995) mencionan que una característica importante en esta formación es la presencia de niveles evaporíticos (lentes, niveles extensos o pseudomorfos). En el distrito de Morococha, además, se reconocieron afloramientos de coladas de basalto andesítico y andesitas alcalinas conocidas como “Basalto Montero”, con un espesor de 15 m (Mégard 1968; Rosas et al. 2007; Catchpole et al. 2016).

Grupo Goyllarisquizga

El Grupo Goyllarisquizga (Cretácico Inferior) aflora principalmente en las zonas norte, noreste y sureste del distrito de Morococha (Salazar 1983; Fig. 5). Sobreyace de manera concordante o ligeramente discordante a las rocas del Grupo Pucará (Salazar 1983; Rivera y Kobe 1983). Se compone de areniscas blancas con intercalaciones de areniscas grises (Mégard 1968). Hacia la parte superior del grupo, las capas se encuentran compuestas por margas grises con alternancias de capas carbonosas y calizas delgadas, subyacentes a una capa de cuarcita (Terrones 1949; Mégard 1968). Capas de basaltos y diques de diabasa suprayacentes a la capa de cuarcita han sido descritos (Terrones 1949; Salazar 1983).

Formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha

Se trata de una secuencia carbonatada del Cretácico Superior que aflora como parte de las estructuras del suroeste del anticlinal de Morococha (zonas de Buenaventura, Galera y Ticlio; Terrones 1949; Salazar 1983; Fig. 5). Mégard (1968) menciona que la Formación Chúlec, hacia la base, se compone de caliza gris con intercalaciones de caliza margosa y lutita gris discordantes al Grupo Goyllarisquizga. Por otro lado, la Formación Pariatambo suprayace concordantemente a la Formación Chúlec y se compone de calizas, en estratos delgados, y margas negras bituminosas y fosfáticas, lo que permite diferenciarla de la Formación anterior de manera relativamente sencilla (Terrones 1949; Mégard 1968; Salazar 1983). Finalmente, la Formación Jumasha presenta una potencia importante, de alrededor de los 330 m, y está compuesta por intercalaciones de calizas margosas, lutitas y calizas dolomíticas (Terrones 1949; Salazar 1983).

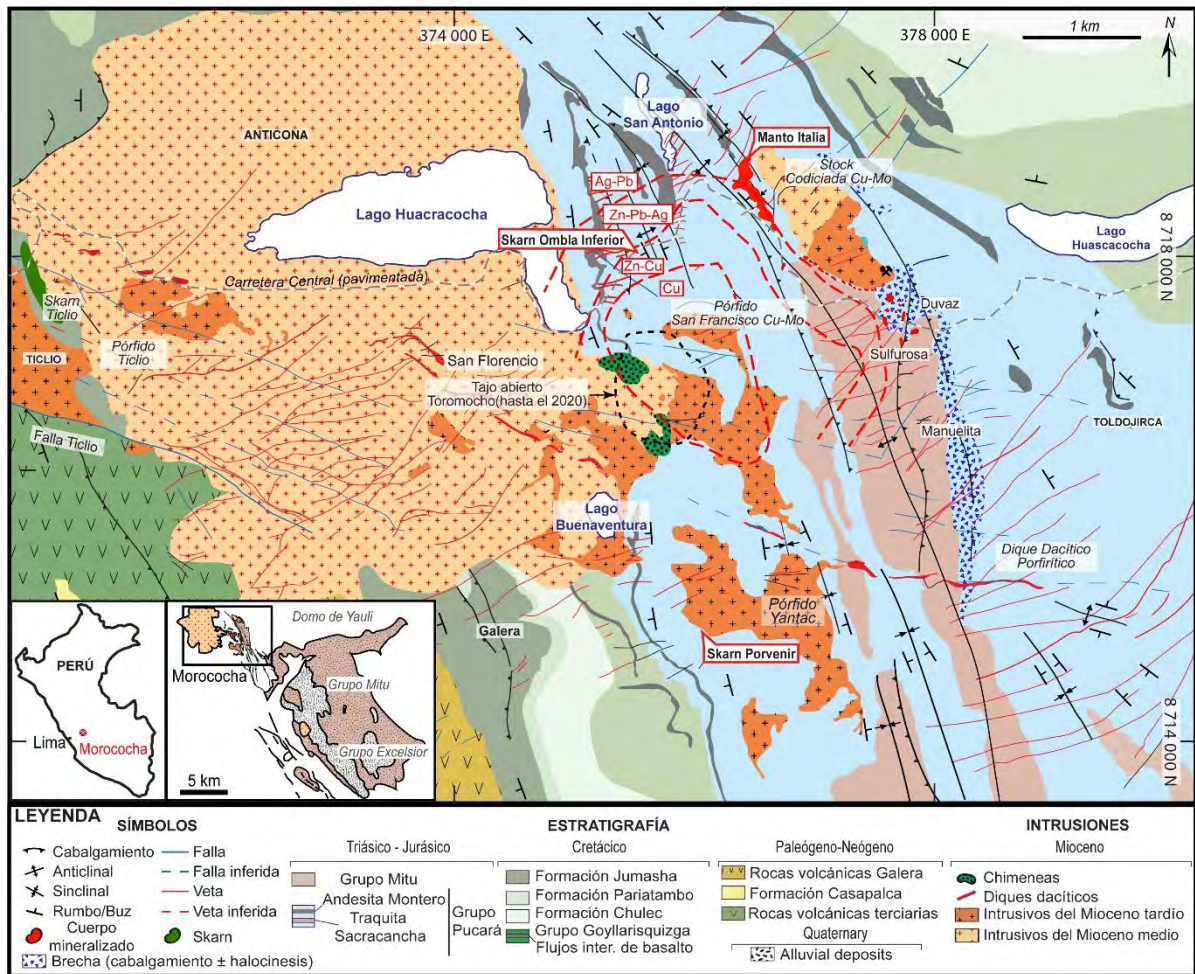


Figura 5: Mapa geológico regional del distrito minero de Morococha (modificado de Bendezú et al. 2008).

Formación Casapalca

Esta formación se compone de capas rojas formadas entre el Cretácico Superior y el Eoceno Medio de acuerdo con Salazar (1983). No obstante, Jenks (1951) estima que en la zona de Cerro de Pasco esta formación pertenece al Cretácico Superior. Salazar (1983) menciona que la Formación Casapalca, asociada a un ambiente continental, puede dividirse en un miembro inferior, Casapalca, consistente en intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas rojas con areniscas calcáreas y areniscas guijarrosas, y un miembro superior (El Carmen) que consiste en bancos de conglomerados cuarcíticos con una matriz calcárea rosácea. En el distrito de Morococha, esta formación presenta afloramientos restringidos en las zonas de Galera y Ticlio (Terrones 1949; Fig. 5).

Rocas Intrusivas

En el distrito de Morococha, múltiples intrusiones se emplazaron, principalmente, en las rocas carbonatadas del Grupo Pucará durante el Mioceno medio y tardío (Petersen 1965; Beuchat 2003; Kouzmanov et al. 2008). El emplazamiento de la microdiorita Codiciada (14.31 ± 0.04 Ma) y de la diorita Anticona (14.07 ± 0.04 Ma) son los eventos magmáticos más antiguos reconocidos en el distrito y se caracterizan por ser intrusiones estériles (*i.e.*, sin mineralización asociada; Beuchat 2003; Kouzmanov et al. 2008; Catchpole et al. 2016). El intrusivo Anticona, de composición cuarzodiorítica y textura porfírica, se ubica en la zona occidental de Morococha (Petersen 1965; Beuchat 2003; Fig. 5).

Posteriormente, luego de un lapso de aproximadamente 5 My, una serie de stocks porfíricos con composiciones dioríticas, granodioríticas y cuarzo-monzoníticas se emplazaron a lo largo de la secuencia sedimentaria y la diorita Anticona hace 9.4 y 7.7 Ma (Beuchat 2003; Kouzmanov et al. 2008; Bendezú et al. 2012 citado por Catchpole et al. 2015b). Esta serie de stocks comprende las intrusiones Ticlio, San Francisco, Gertrudis y Yantac, así como los stocks de Codiciada y Toromocho y son descritos como Serie Morococha (Beuchat 2003; Bendezú et al. 2008; Catchpole et al. 2015a).

Las intrusiones de Codiciada, Ticlio y Toromocho han sido reconocidas como centros magmáticos-hidrotermales del distrito y se encuentran asociados a mineralización metálica (Petersen 1965; Catchpole et al. 2015b, 2016). Codiciada representa el centro magmático-hidrotermal más antiguo (9.3 ± 0.2 Ma, U-Pb en titanita) con un skarn anhidro y vetas de cuarzo-molibdenita asociadas (Catchpole et al. 2015b, 2016). Catchpole et al. (2015b) mencionan que el centro magmático-hidrotermal de Ticlio se emplazó hace 8.04 ± 0.14 Ma de acuerdo con dataciones realizadas mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita. El centro magmático-hidrotermal más joven (Toromocho) se encuentra en la parte central del distrito, cubriendo una

área aproximada de 70 km² (Catchpole et al. 2016). En Toromocho, se han reconocido por lo menos dos pulsos hidrotermales y una serie de como mínimo cinco intrusiones porfíricas abarcando un lapso total de 1.3 My (Kouzmanov et al. 2008; Catchpole et al. 2015b, 2016).

Finalmente, Kouzmanov et al. (2008) mencionan que el evento magmático más joven registrado se trata de un dique dacítico emplazado hace 7.6 ± 0.02 Ma que corta a todas las rocas mencionadas anteriormente en el distrito.

3.2.3. Geología del yacimiento

En el distrito de Morocha los centros magmáticos-hidrotermales han desarrollado una mineralización variada e interconectada (Catchpole et al. 2015b, 2016). Las tipologías de yacimientos minerales reconocidas en el distrito incluyen pórfidos, skarns, cuerpos masivos de pirita y mineralizaciones cordilleranas en vetas polimetálicas y cuerpos de reemplazamiento o “mantos” (Petersen 1965; Nagell 1960; Catchpole et al. 2015a, b, 2016).

Las mineralizaciones tipo pórfido se encuentran asociadas a la intrusión de Toromocho (Cu-Mo), al stock de Codiciada (Cu-Mo), al área de Sulfurosa y a la intrusión Ticlio (Cu-Au; Catchpole et al. 2015b). El pórfido gigante de Toromocho (Cu-Mo) se sitúa en la zona central de Morococha y es el único económicamente explotable que se conoce en el distrito con 1526 Mt y leyes de 0.48% de Cu, 0.019% de Mo y 6.88 g/t de Ag (Knight Piesóld Consultores S.A. 2009; Catchpole et al. 2015b). El depósito presenta una mineralización principal de cuarzo-calcopirita \pm calcosina y, en menor cantidad, venas de cuarzo-pirita-molibdenita alojados en rocas con un importante halo de alteración potásica y sericítica (Catchpole et al. 2015b). Beuchat (2003) realizó dataciones Re-Os en molibdenita obteniendo una edad de 7.9 ± 0.1 Ma.

Las mineralizaciones tipo skarn se encuentran, en general, reemplazando a calizas y dolomías del Triásico y están asociadas a múltiples eventos intrusivos porfíricos (p. ej.

Gertrudis, San Francisco, Yantac, Ticlio y Toromocho; Catchpole et al. 2015b, 2016). Catchpole et al. (2016) mencionan que, colindante a las Formaciones Chambará y Jumasha, se desarrollaron endoskarns de grosularia \pm diópsido con escasa pirita, esfalerita y galena reemplazando intrusivos de Codiciada, Ticlio y Toromocho. Además, estos autores describen endoskarns de grosularia y diópsido desarrollados en la andesita basáltica Montero, y un endoskarn de diópsido desarrollado en los Volcánicos Catalina, en una zona adyacente al endoskarn Codiciada, datado en 9.3 ± 0.2 Ma mediante U-Pb en titanita por Catchpole et al. (2015b). Exoskarns de serpentina-magnetita y diópsido-andradita, desarrollados en alternancias de dolomías y calizas de la Formación Chambará, contienen ensamblajes de epidota, tremolita, talco, flogopita y clorita (Catchpole et al. 2015b, 2016). Basándose en nuevas dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y U-Pb así como en datos previos, Catchpole et al. (2015b) establecen de dos a tres eventos sucesivos de formación de skarn en un periodo de ~ 2 My donde Codiciada y Manto Italia, asociados al centro Codiciada (aprox. 9.3 Ma; Kouzmanov et al. 2008), representan los skarns más antiguos, mientras que Porvenir, asociado a la intrusión Yantac (7.2 ± 0.2 Ma; Beuchat 2003), y Gertrudis, asociado al intrusivo del mismo nombre (6.9 ± 0.3 Ma; Catchpole 2011), representan los skarns más jóvenes.

Los cuerpos masivos de pirita se encuentran, principalmente, en la zona central de Morococha reemplazando a las calizas del Grupo Pucará, cerca del contacto con el Grupo Mitu, y a lo largo del contacto de intrusiones porfiríticas con brechas carbonatadas (Catchpole et al. 2015b). Catchpole et al. (2015b) mencionan que estos cuerpos son estériles en su mayoría, pero son económicamente interesantes en aquellos sectores donde son cortados por vetas polimetálicas (p. ej. Brecha Rosita y Brecha Riqueza).

Las vetas cordilleranas polimetálicas, económicamente importantes por su contenido de Zn, Pb, Ag y Cu, se encuentran emplazadas a lo largo del sistema de fallas de rumbos NNE

y ENE del distrito, cortando a los cuerpos intrusivos, rocas sedimentarias aledañas, cuerpos masivos de pirita y skarns (Petersen 1965; Catchpole et al. 2011, 2015a). Se han discriminado tres estadios de mineralización en estas vetas: 1) estadio de cuarzo-pirita asociada a una alteración sericítica; 2) estadio de metales base con sulfuros y sulfosales como esfalerita, galena, tennantita-tetrahedrita, calcopirita y enargita; y 3) estadio de carbonatos, con abundante rodocrosita (Catchpole et al. 2011, 2012, 2015a). Catchpole et al. (2015b) realizaron dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en adularia en vetas de calcita-adularia que cortan a la asociación de skarn en Manto Italia, obteniendo edades de entre 6.0 ± 0.2 y 6.23 ± 0.12 Ma, similares a las determinadas en adularia de la veta polimetálica Codiciada (5.78 ± 0.10 Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$). Los cuerpos de reemplazamiento tipo mantos se presentan a manera de cuerpos irregulares encajados en las calizas del Grupo Pucará, hacia su contacto con el grupo Mitu (Beuchat 2003; Catchpole et al. 2015a). Catchpole et al. (2015b) mencionan que estos cuerpos se originan en las zonas donde las vetas polimetálicas cordilleranas cortan fallas o contactos litológicos favorables para la precipitación de metales.

4. RESULTADOS

4.1. Mineralogía y texturas

4.1.1. Ombla Inferior

La mineralogía metálica en el skarn de Ombla Inferior está constituida principalmente por magnetita, pirrotina, pirita, calcopirita y esfalerita y contiene trazas de marcasita, bornita, cobres grises (tennantita), wittichenita, bismutinina, tsumoíta y covelina. La magnetita se presenta como agregados anhedrales reemplazados por pirrotina, pirita, calcopirita y esfalerita desde sus bordes y microfracturas (Figs. 6A-B). Además, agregados anhedrales de pirita, por sectores intercrecida con marcasita, también han sido reemplazados por calcopirita y esfalerita (Fig. 6B).

En Ombla Inferior se discriminaron dos generaciones de esfalerita. Texturalmente, la primera generación se presenta como diminutas inclusiones ($< 5 \mu\text{m}$) en forma de estrella diseminadas en una calcopirita de primera generación con maclado de transformación (Tipo 1a; Fig. 6C) y, también, como agregados masivos con reflexiones internas pardo rojizas y abundantes diseminaciones orientadas de calcopirita (calcopiritosis o “*chalcopyrite disease*”, Tipo 1b; Figs. 6D-F). La segunda generación de esfalerita exhibe en general superficies limpias, reflexiones internas pardo amarillentas y escasas diseminaciones de calcopirita (Figs. 6E-F). La segunda generación de esfalerita ha reemplazado a la pirita/marcasita y a la primera generación de esfalerita y ha sido reemplazada localmente por bismutinita (Fig. 6G). La pirita/marcasita y la segunda generación de esfalerita han sido reemplazadas por una tercera generación de calcopirita (Fig. 6H) caracterizada por la ausencia de maclas de transformación. Proporciones menores de bornita aparecen como relleno de microfracturas y oquedades en pirita. La bornita ha sido parcialmente reemplazada por la tercera generación de calcopirita, esta última reemplazada por wittichenita y covelina desde sus bordes (Fig. 6I). Trazas de bismutinita y tennantita con finas inclusiones de tsumoíta se observan también en el interior de algunos granos de la tercera generación de calcopirita (Figs. 6J-K).

Los ensambles minerales y las texturas descritas en Ombla Inferior definen dos estadios de evolución (skarn hidratado y mineralización polimetálica) como se muestra en la secuencia paragenética (Fig. 7). Serpentina y magnetita precipitaron de manera temprana durante el estadio de formación de un skarn magnésico hidratado. Subsecuentemente este ensamble fue superpuesto por una mineralización polimetálica compuesta principalmente por un ensamble de sulfuración baja a intermedia incluyendo pirrotina, pirita/marcasita, escasa bornita,

esfalerita y calcopirita. Finalmente, trazas de tennantita, wittichenita, bismutinita, tsumoíta y covelina han cristalizado de forma tardía.

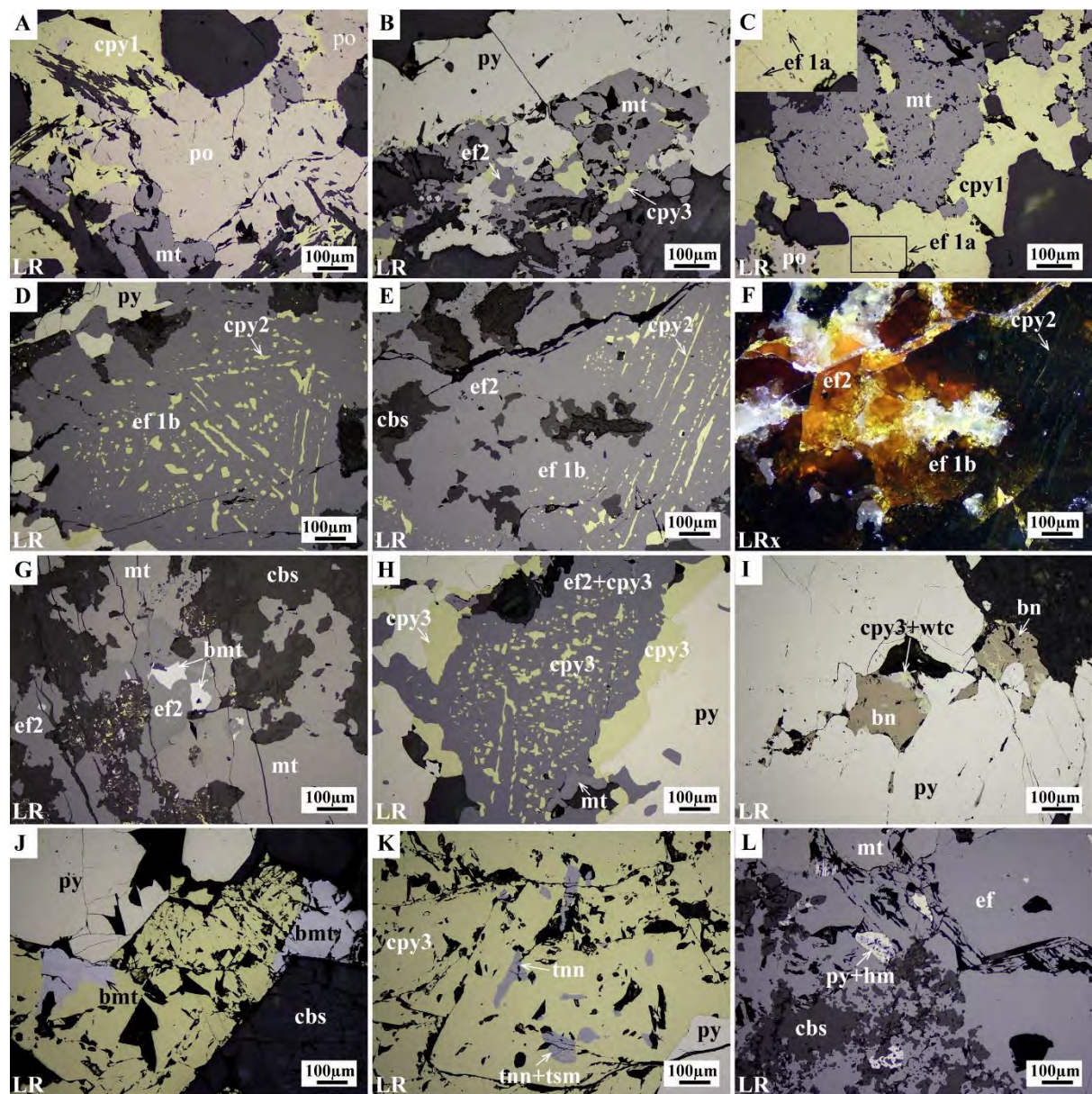


Figura 6: Microfotografías de la mineralización presente en los skarns de Ombla Inferior (A-K) y Porvenir (L). A) Agregados de magnetita anhedral reemplazados por pirrotina y calcopirita (1^{era} generación). B) Agregados de magnetita y pirita reemplazados por esfalerita (2^{da}) y calcopirita (3^{era}). C) Agregados anhedrales de magnetita reemplazados por calcopirita (1^{era}) con micro-inclusiones de esfalerita (1^{era}) en forma de estrella. D) Agregados de esfalerita (1^{era}) con finas diseminaciones orientadas de calcopirita (2^{da}). E-F) Esfalerita (1^{era}) con diseminaciones orientadas de calcopirita (2^{da}) y reemplazada por esfalerita (2^{da}). Nótese que ambas generaciones de esfalerita muestran reflexiones internas con colores diferentes. G) Masa de magnetita reemplazada por esfalerita (2^{da}) y esta última a su vez por bismutinita. H) Cristales de magnetita y pirita reemplazados por esfalerita (2^{da}) y calcopirita (3^{era}). I) Cristales de pirita con cavidades y bordes rellenos por bornita, calcopirita (3^{era}) y wittichenita. J) Cristales de pirita en contacto con calcopirita (3^{era}), esta última reemplazada por bismutinita. K) Agregados masivos de calcopirita (3^{era}) con inclusiones de cobres grises (tennantita) y finas diseminaciones de tsumoíta. L) Cristales de pirita alterados por hematites y englobados por esfalerita. Abreviaciones: 1, 2 y 3: primera, segunda y tercera generación; a y b: tipo a y tipo b (aplica a la primera generación de esfalerita); LR: Luz Reflejada; LRx: Luz Reflejada en nicols cruzados; bmt: bismutinita; bn: bornita; cbs: carbonatos; cpy: calcopirita; ef: esfalerita; hm: hematites; mt: magnetita; po: pirrotina; py: pirita; tnn: tennantita; tsm: tsumoíta; wtc: wittichenita.

Secuencia paragenética skarn de Ombla Inferior			
Mineral	Fórmula	Skarn hidratado	Mineralización polimetálica
Serpentina	(Mg,Fe,Ni,Mn,Al,Zn)Si ₂ O ₅ (OH) ₄		
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄		
Pirrotina	Fe _{(1-x)S}		
Pirita	FeS ₂		hasta 31.1 ppm In
Calcopirita	CuFeS ₂		
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	hasta 76.8 ppm In
Esfalerita	ZnS		
Marcasita	FeS ₂	
Cuarzo	SiO ₂		
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂		
Calcita?	CaCO ₃		
Tetrahedrita - Tennantita	(Cu,Fe) ₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃	
Wittichenita	Cu ₃ BiS ₃	
Bismutinita	Bi ₂ S ₃	
Tsumoita	BiTe		...
Covelina	CuS		...

Figura 7: Secuencia paragenética generalizada de la mineralización en Ombla Inferior. El grosor de las líneas está relacionado con la abundancia relativa del mineral o generación. La ubicación de las fases o generaciones que presentan concentraciones destacadas de In se resaltan en color rojo.

4.1.2. Porvenir

La mineralogía metálica en el skarn de Porvenir está conformada principalmente por agregados anhedrales de magnetita reemplazados por esfalerita, esta última con escasas inclusiones de pirita intercrecida con hematites y marcasita (Fig. 6L). Por sectores, los granos de pirita presentan diminutos cristales de pirrotina a manera de relictos. También se observa esfalerita a lo largo de intersticios y cavidades en serpentina y carbonatos. La esfalerita en Porvenir se caracteriza por presentar reflexiones internas pardo rojizas.

4.1.3. Manto Italia

De acuerdo con Catchpole (2011) y Catchpole et al. (2015b), las fases de mineralización en Manto Italia (Fig. 8) puede subdividirse en tres estadios de evolución: 1) skarn anhidro, 2) skarn hidratado/reemplazamiento de carbonatos y 3) una etapa tardía de reemplazamiento de carbonatos (Fig. 9). El estudio de esta tesis se centra en las asociaciones polimetálicas cristalizadas durante el segundo estadio. Las asociaciones y microtexturas en el primer y tercer estadios se encuentran ampliamente descritos por Catchpole (2011).

El segundo estadio comprende dos sub-etapas: 1) mantos de magnetita enriquecidos en pirrotina y 2) mantos enriquecidos en esfalerita, galena y calcopirita. La mineralización metálica de la primera sub-etapa se caracteriza por un ensamble de baja sulfuración con la presencia de agregados anhedrales de magnetita (Fig. 8A), masas de pirrotina, cristales euhedrales a subhedrales de arsenopirita con tamaños de hasta 700 μm (Fig. 8B) y cristales subhedrales de pirita con tamaños de hasta 500 μm (Fig. 8C). La segunda sub-etapa comprende agregados anhedrales de esfalerita, galena y calcopirita como reemplazamiento de la pirrotina.

Se discriminaron dos generaciones de esfalerita. La primera generación exhibe finas diseminaciones orientadas de calcopirita (Figs. 8D-E). La segunda generación de esfalerita presenta superficies limpias o escasas diseminaciones de calcopirita y por sectores, reemplazamiento por estannita y galena (Fig. 8F). Tanto la pirrotina como la segunda generación de esfalerita han sido reemplazadas por una segunda generación de pirita finamente intercrecida con marcasita (Figs. 8G-H). Además, una segunda generación de calcopirita ha reemplazado a la pirrotina, a la primera generación de pirita y a la segunda generación de esfalerita (Figs. 8H-I). Por otro lado, la galena ha reemplazado a la pirrotina, a ambas generaciones de esfalerita, a la segunda generación de calcopirita y a la estannita, llegando a contenerlas ocasionalmente como relictos (Figs. 8J-K). Finalmente, se observan trazas de bismutinina y bismuto nativo como reemplazamiento de pirrotina desde sus bordes (Fig. 8L). Algunos cristales de pirita han sido reemplazados parcialmente por goethita, seguramente durante etapas de alteración supergénica.

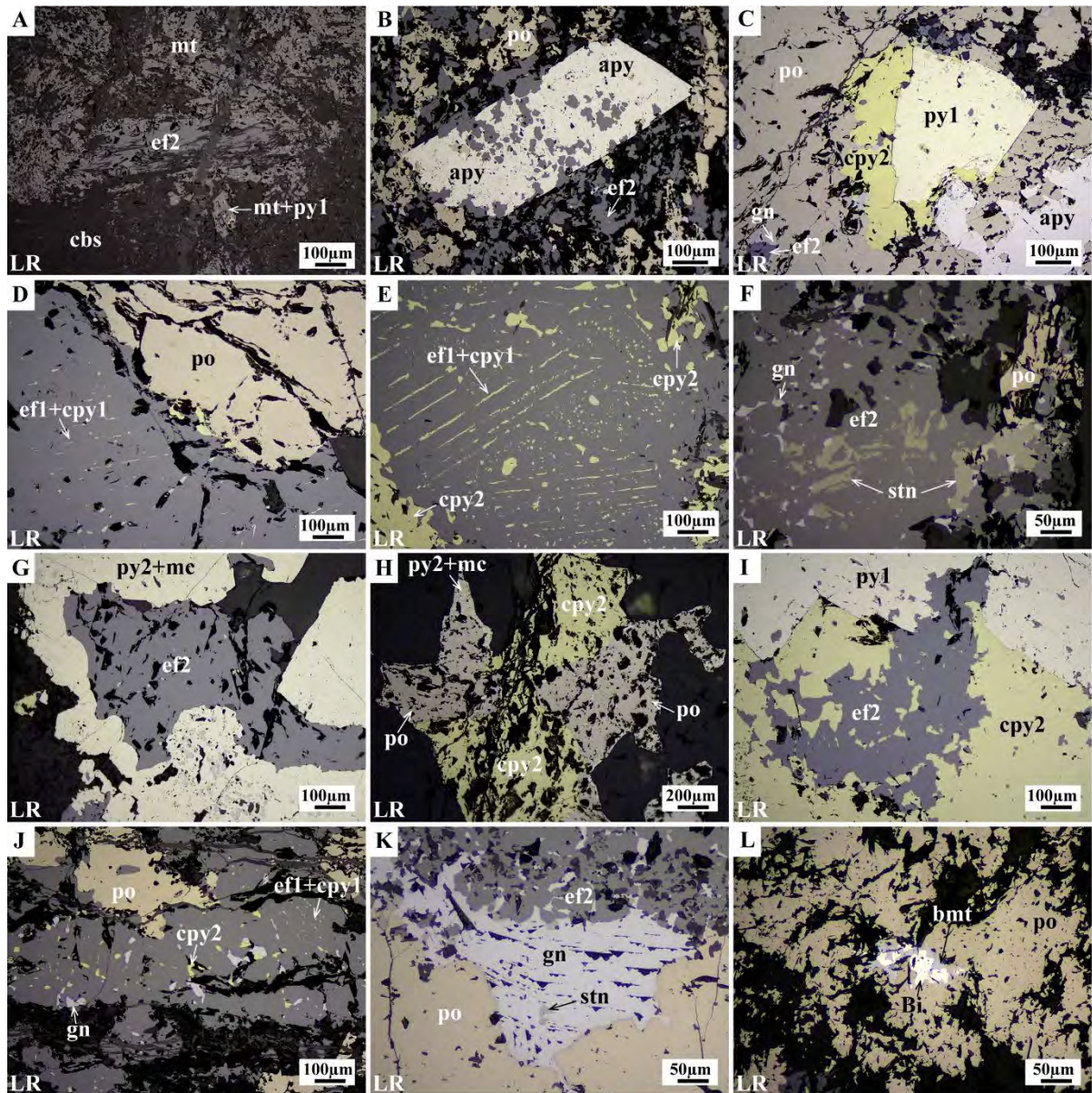


Figura 8: Microfotografías de la mineralización presente en las muestras estudiadas de Manto Italia. A) Agregados de magnetita reemplazados por esfalerita (2^{da} generación) y carbonatos. B) Cristal euhedral de arsenopirita reemplazado por pirrotina y esfalerita (2^{da}). C) Cristal subhedral de pirita (1^{era}) y agregados anhedral de arsenopirita reemplazados por pirrotina y calcopirita (2^{da}). D) Pirrotina reemplazada por esfalerita (1^{era}) con finas diseminaciones orientadas de calcopirita (1^{era}). E) Esfalerita (1^{era}) con abundantes diseminaciones orientadas de calcopirita (1^{era}), reemplazada a su vez por agregados anhedral de calcopirita (2^{da}). F) Esfalerita (2^{da}) reemplazada por estannita y galena. G) Esfalerita (2^{da}) reemplazada por pirita (2^{da}) finamente intercrecida con marcasita. H) Pirrotina reemplazada por calcopirita (2^{da}), pirita (2^{da}) y marcasita. I) Cristales de pirita (1^{era}) reemplazados por esfalerita (2^{da}) y calcopirita (2^{da}). J) Pirrotina reemplazada por esfalerita (1^{era}), esta última con diseminaciones orientadas de calcopirita (1^{ra}) así como porosidad rellena por calcopirita (2^{da}) y galena. K) Galena con relictos de estannita aparece reemplazando a pirrotina y esfalerita (2^{da}). L) Pirrotina localmente reemplazada por bismutinita y bismuto nativo. Abreviaciones: 1 y 2: primera y segunda generación; LR: Luz Reflejada; apy: arsenopirita; Bi: bismuto nativo; bmt: bismutinita; cbs: carbonatos; cpy: calcopirita; ef: esfalerita; gn: galena; mc: marcasita; mt: magnetita; po: pirrotina; py: pirita; stn: estannita.

Secuencia paragenética Manto Italia					
Mineral	Fórmula	Skarn anhidro	Skarn hidratado / Reemplazamiento de Carbonatos		Reemplazamiento de carbonatos Mantos tardíos y cuerpos brechados
			Mantos de magnetita enriquecidos en pirrotina	Mantos enriquecidos en esfalerita, galena y calcopirita	
Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆				
Andradita	Ca ₃ Fe ³⁺ ₂ (SiO ₄) ₃				
Serpentina	(Mg,Fe,Ni,Mn,Al,Zn)Si ₂ O ₅ (OH) ₄				
Tremolita - Actinolita	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂				
Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (Cl/F/OH)				
Escapolita	Na ₄ Al ₃ Si ₉ O ₂₄ Cl - Ca ₄ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ CO ₃				
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂				
Clorita	(Fe,Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH,O) ₈				
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄				
Arsenopirita	FeAsS				
Pirita	FeS ₂				
Pirrotina	Fe _{1-x} S				
Esfalerita	ZnS		hasta 169.13 ppm Ga	hasta 458.9 ppm In	
Calcopirita	CuFeS ₂				
Hematites	Fe ₂ O ₃				
Estannita	Cu ₂ FeSnS ₄				
Marcasita	FeS ₂				
Galena	PbS				
Melnikovita	FeS ₂				
Cuarzo	SiO ₂				
Adularia	KAlSi ₃ O ₈				
Calcita	CaCO ₃				
Sulfosal Pb - Bi - Ag	-				
Bismutinita	Bi ₂ S ₃				
Bismuto nativo	Bi				
Telururo Ag	AuTe ₂				
Telururo canfieldita	Ag ₈ (Sn,Ge)(S,Te) ₈				
Telururo nativo	Te				
Tetrahedrita - Tennantita	(Cu,Fe) ₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃				
Hübnerita	MnWO ₄				
Rodocrosita	MnCO ₃				

Figura 9: Secuencia paragenética generalizada de Manto Italia (refinado de Catchpole 2011). El grosor de las líneas está relacionado con la abundancia relativa del mineral o generación. Las líneas de color naranja representan las fases minerales o generaciones particulares observadas en esta tesis. La ubicación de las fases o generaciones que presentan concentraciones destacadas de In o Ga se resaltan en color rojo.

4.2. Geoquímica mineral

4.2.1. Resultados de EPMA

4.2.1.1. Esfalerita

En la Tabla 2 se presenta un cuadro resumen con las composiciones de los granos de esfalerita analizados mediante EPMA según cuerpo mineralizado y generación. En la Tabla 3 se presentan análisis representativos de esfalerita de los cuerpos estudiados. De manera general, los resultados muestran contenidos de Fe que fluctúan entre 1.68 y 11.05 wt.%, Cu entre valores por debajo de su límite de detección (<l.d.) y 1.33 wt.%, Sn entre <l.d. y 1.21 wt.% y Cd entre <l.d. y 0.16 wt.%. Los granos de esfalerita en Ombla Inferior muestran contenidos de Fe de

hasta 3.59 wt.% en la primera generación, y de hasta 3.24 wt.% en la segunda generación. En Porvenir, la esfalerita contiene hasta 11.05 wt.% Fe y en Manto Italia, hasta 10.96 wt.% Fe en la primera generación y 11.00 wt.% Fe en la segunda generación. Asimismo, en Ombla Inferior se obtuvieron valores de Cu de hasta 0.18 wt.% en la primera generación de esfalerita, en Porvenir de hasta 0.10 wt.% y en Manto Italia de hasta 1.33 wt.% en la primera generación de esfalerita.

Tabla 2: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados (datos de microsonda electrónica).

Cuerpo mineralizado	Generación	Wt%	S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga	
		l.d.	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.02	0.12	0.44	0.06	0.05	0.02	0.10	0.23	
Skarn Ombla Inferior (n=21)	ef1	Min.	33.00	62.95	1.89	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.07	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Max.	33.56	65.26	3.59	0.18	<l.d.	0.23	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.12	1.21	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Prom.	33.28	63.81	2.94	0.03	-	0.06	-	-	-	0.10	0.32	-	-	-
	ef2	Min.	32.34	63.32	1.68	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.07	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Max.	33.49	65.39	3.24	0.14	<l.d.	0.27	0.12	<l.d.	<l.d.	0.16	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Prom.	33.08	64.39	2.46	0.02	-	0.02	0.01	-	-	0.12	-	-	-	-
Skarn Porvenir (n=18)	ef	Min.	32.11	54.39	7.86	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Max.	34.38	56.56	11.05	0.10	<l.d.	0.33	0.16	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Prom.	33.43	55.48	9.88	0.02	-	0.02	0.01	-	-	-	-	-	-	
Manto Italia (n=23)	ef1	Min.	33.75	55.23	8.42	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Max.	34.25	57.43	10.96	1.33	1.21	0.33	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Prom.	33.95	54.92	10.04	0.37	0.32	0.09	-	-	-	-	-	-	-	
	ef2	Min.	33.73	54.35	7.56	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	
		Max.	34.70	58.26	11.00	0.12	<l.d.	0.37	0.18	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.25	<l.d.	<l.d.	
		Prom.	34.11	55.90	9.81	0.03	-	0.06	0.01	-	-	-	0.03	-	-	

Min.: Mínimo; Max.: Máximo; Prom.: Promedio; l.d.: Límite de detección; <l.d.: Debajo del límite de detección

Tabla 3: Análisis representativos de esfalerita en los cuerpos estudiados, incluyendo composición química y fórmula estructural normalizada a S = 1. Límites de detección en la Tabla 1 (datos de microsonda electrónica).

Cuerpo mineralizado	Skarn Ombla Inferior		Skarn Porvenir		Manto Italia	
	Muestra	2019-MOR-41	2019-MOR-42	2019-MOR-52	2019-MOR-54	MO-05-KK-07
	A2	B2	A1	A3	B2	D
S (wt.%)	33.2	33	32.89	33.94	34.05	34.17
Zn	64.86	63.06	56.26	55.04	55.35	57.28
Fe	1.96	3.34	10.25	9.88	10.19	8.66
Cu	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.0752	<l.d.
Sn	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Pb	<l.d.	0.2287	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.2764
Sb	<l.d.	<l.d.	0.1578	<l.d.	<l.d.	<l.d.
As	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Cd	0.1283	0.1239	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ag	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
In	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.2464	<l.d.
Ge	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ga	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Total	100.36	99.89	99.68	99.19	100.10	100.41
S (a.p.f.u.)	1	1	1	1	1	1
Zn	0.958	0.937	0.839	0.795	0.797	0.822
Fe	0.034	0.058	0.179	0.167	0.172	0.145
Cu	-	-	-	-	0.001	-
Sn	-	-	-	-	-	-
Pb	-	0.001	-	-	-	0.001
Sb	-	-	0.001	-	-	-
As	-	-	-	-	-	-
Cd	0.001	0.001	-	-	-	-
Ag	-	-	-	-	-	-
In	-	-	-	-	0.002	-
Ge	-	-	-	-	-	-
Ga	-	-	-	-	-	-

a.p.f.u.: átomos por fórmula unidad; <l.d.: Debajo del límite de detección.

En la Figura 10A se observa que las concentraciones atómicas de Zn y Fe se correlacionan de manera negativa y gran parte de los análisis se ubican a lo largo de la línea $Zn + Fe = 1$ a.p.f.u (átomos por fórmula unidad), lo que sugiere una sustitución simple entre ambos elementos. El diagrama binario de Fe vs. Cu en la Figura 10B indica inexistencia general de correlación entre las proporciones atómicas de Fe y Cu; sin embargo, en dos análisis los

valores de Cu se disparan a concentraciones aproximadas de 0.18 a.p.f.u Fe, lo que posiblemente refleje análisis mixtos de esfalerita y calcopirita.

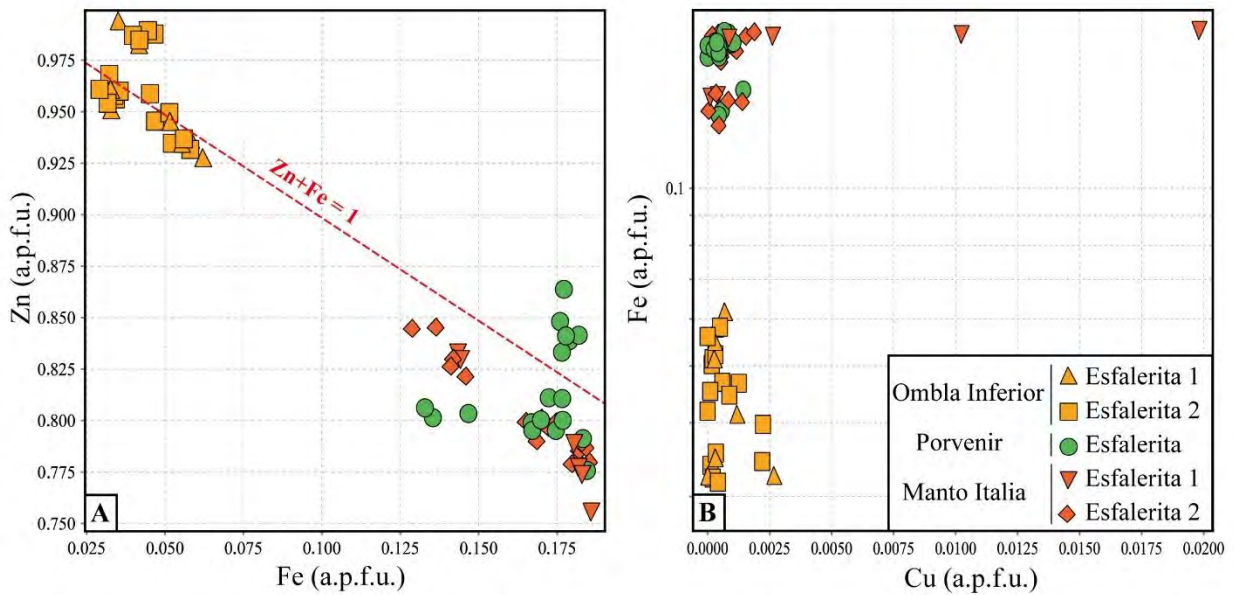


Figura 10: Diagramas binarios de A) Zn vs Fe y B) Zn vs Cu de esfalerita de los cuerpos estudiados.

4.2.1.2. Calcopirita

En la Tabla 4 se presenta un cuadro resumen con las composiciones de los granos de calcopirita analizados según cuerpo mineralizado y generación. Los granos de calcopirita en Ombla Inferior muestran contenidos de Cu de hasta 34.73 wt.% y en Manto Italia, de hasta 34.32 wt.%, mientras que los contenidos de Fe son de hasta 30.15 y 30.28 wt.% en Ombla Inferior y Manto Italia, respectivamente. Estos valores se ajustan a las composiciones estequiométricas esperadas en calcopirita (*i.e.*, 34.63 wt.% de Cu y 30.43 wt.% de Fe). El resto de los elementos suelen presentar concentraciones por debajo de sus respectivos límites de detección, excepto el Zn, Pb y Ag. En el caso del Zn, valores de hasta 0.43 y 1.37 wt.% se han detectado en la primera y tercera generaciones de calcopirita de Ombla Inferior y de hasta 0.21 wt.% en Manto Italia. El Pb alcanza concentraciones máximas de 0.31 wt.% en Ombla Inferior. Finalmente, se han detectado concentraciones de hasta 0.22 wt.% de Ag en calcopirita de segunda generación en Manto Italia.

Tabla 4: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de calcopirita de los cuerpos estudiados (datos de microsonda electrónica).

Cuerpo mineralizado	Generación	Wt%	S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
		l.d.	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.02	0.12	0.44	0.06	0.05	0.02	0.10	0.23
Skarn Ombla Inferior (n=8)	cpy1	Min.	34.54	0.10	29.93	33.95	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Max.	34.90	0.43	30.15	34.58	<l.d.	0.21	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Prom.	34.70	0.24	30.07	34.25	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-
	cpy3	Min.	33.98	0.14	29.58	34.33	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Max.	35.47	1.37	29.85	34.73	<l.d.	0.31	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Prom.	34.54	0.57	29.70	34.58	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-
Manto Italia (n=4)	cpy2	Min.	35.05	0.08	29.88	33.94	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.12	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Max.	35.27	0.21	30.28	34.32	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.22	<l.d.	<l.d.	<l.d.
		Prom.	35.17	0.12	30.09	34.17	-	-	-	-	-	0.18	-	-	-

Min.: Mínimo; Max.: Máximo; Prom.: Promedio; l.d.: Límite de detección; <l.d.: Debajo del límite de detección

4.2.1.3. Galena

Se obtuvieron solamente 2 análisis fiables en granos de galena, que corresponden a muestras de Manto Italia. Los resultados arrojan contenidos de hasta 84.81 wt.% de Pb y de hasta 6.15 wt.% de Ag. Elementos como el Zn, Fe, Cu y Cd muestran valores por debajo de sus respectivos límites de detección.

4.2.2. Resultados de LA-ICP-MS

4.2.2.1. Esfalerita

En la Tabla 5 se presenta un cuadro resumen con las concentraciones elementales obtenidas mediante LA-ICP-MS para esfalerita según cuerpo mineralizado y generación. En la Figura 11 se presentan perfiles de ablación multi-elementales representativos del sulfuro analizado. De manera general los patrones de ablación son suaves y constantes para gran parte de los elementos analizados; sin embargo, algunos elementos presentan perfiles irregulares. Los granos de esfalerita en Ombla Inferior muestran contenidos de Fe de hasta 2.70 wt.% en la primera generación, y de hasta 2.91 wt.% en la segunda generación. En Porvenir, la esfalerita contiene hasta 7.91 wt.% y en Manto Italia, hasta 7.97 wt.% en la primera generación y 7.94 wt.% en la segunda generación. Estos resultados son consistentes con los reportados en el

apartado 4.2.1.1 de esta tesis, lo cual sugiere que ambos métodos analíticos (EPMA y LA-ICP-MS) arrojan concentraciones dentro del mismo orden de magnitud. El rango de concentraciones de Cd en los granos de esfalerita analizados es relativamente estrecho, con hasta 2094 ppm en esfalerita de Ombla Inferior, 2112 ppm en Porvenir y 2258 ppm en Manto Italia.

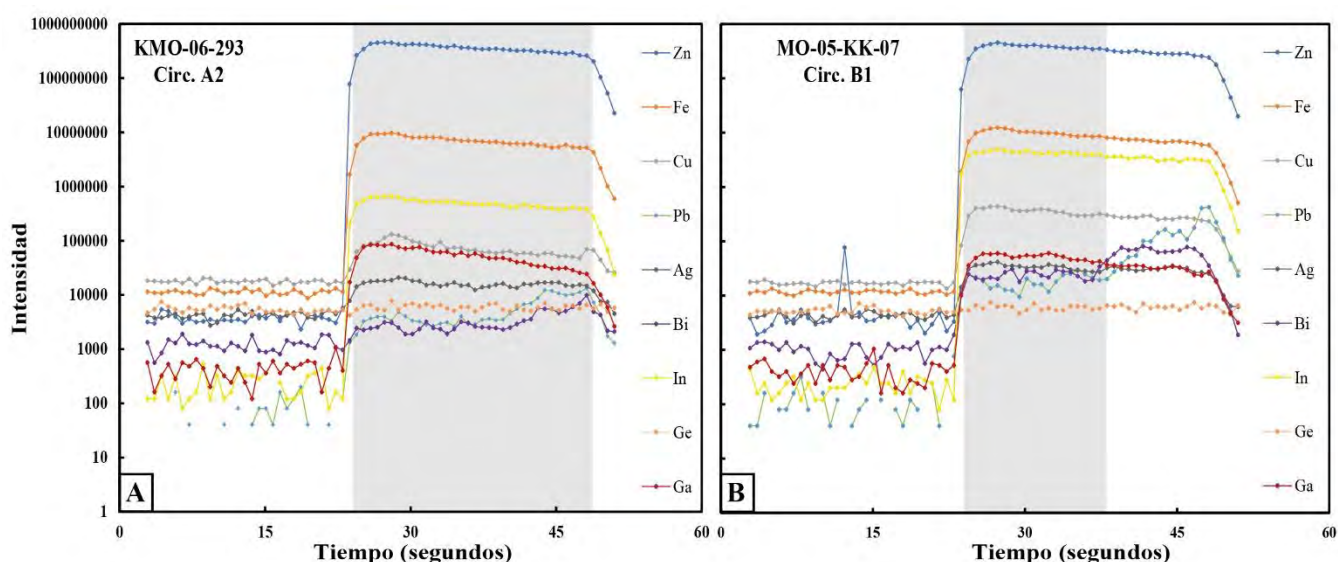


Figura 11: Perfiles de ablación multi elemental representativos de los granos de esfalerita analizados. A) y B) Muestras de Manto Italia. Nótese los picos de Bi y Pb en el espectro (B). El intervalo de integración de los espectros está denotado por el recuadro gris.

Los granos de esfalerita de Ombla Inferior analizados arrojan concentraciones de Cu de hasta 167 y 217 ppm en la primera y segunda generaciones, respectivamente. En Porvenir, alcanzan concentraciones de hasta 416 ppm Cu, mientras que en Manto Italia alcanzan hasta 555 ppm Cu en la primera generación y 506 ppm Cu segunda generación. Con relación al Sn, la máxima concentración se detectó en la segunda generación de esfalerita de Manto Italia, con hasta 38 ppm, mientras que en Ombla Inferior y Porvenir se encontraron valores de hasta 4.4 y 3.2 ppm, respectivamente. Concentraciones significativas de Ag, Pb y Bi se detectaron en los cuerpos estudiados. Esfalerita de Ombla Inferior muestra contenidos de hasta 13 ppm de Ag, de hasta 2.99 ppm de Pb y de hasta 5.48 ppm de Bi. En esfalerita de Porvenir se registraron contenidos de hasta 8.8 ppm de Ag, de hasta 4.92 ppm de Pb y de hasta 8.52 ppm de Bi.

Finalmente, la esfalerita de Manto Italia presenta concentraciones de hasta 15 ppm de Ag, de hasta 5.87 ppm de Pb y de hasta 9.89 ppm de Bi.

En relación con los metales críticos de interés (In, Ge y Ga), todas las muestras de esfalerita de los cuerpos estudiados presentan valores por encima de sus respectivos límites de detección. Con respecto al In, las muestras analizadas de Manto Italia presentan la máxima concentración en la segunda generación de esfalerita (hasta 459 ppm). En el caso de Ombla Inferior, los análisis arrojan concentraciones de In de hasta 77 ppm en esfalerita de segunda generación, mientras que en Porvenir la esfalerita devolvió una concentración máxima de 217 ppm. En cuanto a las concentraciones de Ge, los valores más elevados se detectaron en la segunda generación de esfalerita de Manto Italia (hasta 0.89 ppm), mientras que en Ombla Inferior y Porvenir las concentraciones obtenidas fueron de hasta de 0.47 y 0.57 ppm, respectivamente. Con relación al Ga, la esfalerita de Manto Italia analizada muestra un significativo enriquecimiento en los granos de la primera generación (hasta 169 ppm) en comparación con los de la segunda generación (hasta 21 ppm). En menor medida, la esfalerita de Ombla Inferior y Porvenir alcanza concentraciones de Ga de hasta 7.32 y 0.27 ppm, respectivamente.

La Figura 12 contiene diagramas binarios de correlación entre concentraciones molares de elementos. Se detecta una correlación positiva entre las proporciones moleculares de Bi y Pb (Fig. 12A), que también ha sido detectada en esfalerita de otras localidades por Cook et al. (2009) y Ye et al. (2011). Estos autores indican, en base a los perfiles de ablación, que dicho patrón se debe a la presencia de micro inclusiones de fases mineralógicas portadoras de Bi y Pb dentro de la esfalerita. La Figura 11B muestra perfiles irregulares para Bi y Pb (forman picos), sugiriendo la presencia de micro inclusiones minerales en algunos de los granos analizados.

Tabla 5: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados (datos de LA-ICP-MS).

Cuerpo Mineralizado	Generación ppm	S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Yacimiento de Morococha (n=79)	Min.	438682	543000	10800	27.9	0.15	0.05	0.02	0.2	1669	1.7	19.2	0.15	0.09
	Max.	511638	654000	79760	554.5	38.16	5.87	2.45	37.1	2258	14.6	458.9	0.89	169.13
	Prom.	480559	587511	54201	164.2	2.52	1.00	0.57	12.3	1923	4.2	151.2	0.32	7.02
	RIC	492720 - 466281	63600 - 555000	74890 - 21514	191.5 - 82.4	2.06 - 0.22	1.11 - 0.21	0.88 - 0.04	32.7 - 0.4	2057 - 1782	4.8 - 2.7	209.0 - 49.4	0.41 - 0.20	5.49 - 0.19
Skam Ombla Inferior (n=27)	Min.	455598	631000	13361	49.9	0.20	0.19	<l.d.	<l.d.	1893	1.7	45.4	<l.d.	0.33
	Max.	495397	653000	27003	167.9	3.21	2.99	<l.d.	0.5	2034	4.0	75.2	0.23	7.32
	Prom.	474600	641500	20060	88.1	0.79	0.77	-	0.4	1967	2.7	54.7	0.20	3.26
	RIC	491973 - 459392	6505500 - 634250	25324 - 14370	104.8 - 61.9	0.98 - 0.21	0.81 - 0.21	-	0.5 - 0.4	1995 - 1925	3.5 - 2.1	66.9 - 48.1	0.23 - 0.15	6.12 - 0.59
Skam Porvenir (n=35)	Min.	453856	633000	10800	50.9	0.20	0.10	<l.d.	<l.d.	1872	2.0	44.8	<l.d.	0.78
	Max.	503731	654000	29092	217.3	4.43	1.53	<l.d.	0.8	2094	12.9	76.8	0.47	6.45
	Prom.	479668	645105	17947	93.5	1.27	0.63	-	0.5	1985	3.2	53.4	0.30	2.61
	RIC	491683 - 466287	651000 - 64000	20813 - 12984	103.9 - 71.2	2.12 - 0.43	0.88 - 0.28	-	0.6 - 0.3	2060 - 1909	3.2 - 2.3	54.9 - 46.6	0.37 - 0.25	4.35 - 1.00
Manto Italia (n=17)	Min.	465758	544000	63577	139.2	0.15	0.05	<l.d.	0.4	1669	2.5	162.9	0.18	0.09
	Max.	511638	565600	79055	416.1	3.16	4.92	0.29	37.1	2112	8.8	217.2	0.57	0.27
	Prom.	488729	558354	73987	179.7	0.67	1.06	0.08	23.1	1858	3.9	195.8	0.37	0.19
	RIC	494926 - 482448	560900 - 555000	75592 - 72790	170.3 - 155.0	0.99 - 0.19	1.21 - 0.15	0.16 - 0.03	33.8 - 0.5	2057 - 1758	4.8 - 2.9	209.7 - 170.7	0.44 - 0.30	0.25 - 0.14
Manto Italia (n=17)	Min.	457064	543000	58411	27.9	<l.d.	0.65	<l.d.	0.3	1864	3.0	19.2	<l.d.	6.23
	Max.	494211	574000	79760	554.5	0.26	1.87	0.88	0.6	2258	12.2	72.2	0.19	169.13
	Prom.	475599	559500	68250	238.1	0.22	1.24	0.50	0.4	2056	7.0	46.0	0.19	89.49
	RIC	493838 - 457399	57400 - 54400	78842 - 58494	496.7 - 32.5	0.26 - 0.18	1.78 - 0.72	0.88 - 0.11	0.5 - 0.3	2251 - 1866	11.4 - 3.2	71.3 - 20.4	0.19 - 0.19	166.00 - 11.17
Manto Italia (n=17)	Min.	438682	544000	56281	27.9	0.42	0.10	<l.d.	0.3	1730	2.8	24.7	<l.d.	3.30
	Max.	489272	583000	79411	505.7	38.16	5.87	2.45	0.8	2157	14.6	458.9	0.89	20.62
	Prom.	465057	557231	70606	250.0	10.76	1.53	0.81	0.5	1940	6.7	265.8	0.28	8.80
	RIC	487081 - 448682	566500 - 547000	76613 - 63823	332.5 - 147.5	15.36 - 2.94	2.11 - 0.26	1.40 - 0.15	0.6 - 0.3	2077 - 1787	9.6 - 3.7	338.9 - 150.0	0.23 - 0.16	11.50 - 4.52

Min.: Mínimo; Max.: Máximo; Prom.: Promedio; RIC: Rango intercuartil; l.d.: Límite de detección; <l.d.: Debajo del límite de detección

En el diagrama de Cu vs In mostrado en la Figura 12B, los análisis de esfalerita presentan una correlación positiva entre ambos elementos y se sitúan ligeramente por encima de la línea Cu/In = 1. El diagrama binario de Ge vs Ga en la Figura 12C muestra una correlación positiva entre ambos elementos para esfalerita de Porvenir (aproximadamente a proporciones 1:1), e inexistencia de correlación en esfalerita de Ombla Inferior y Manto Italia. Finalmente, en el diagrama de la Figura 12D se puede observar una correlación positiva entre Cu + Ag vs Ge + Ga + Sn + In en esfalerita de los cuerpos estudiados.

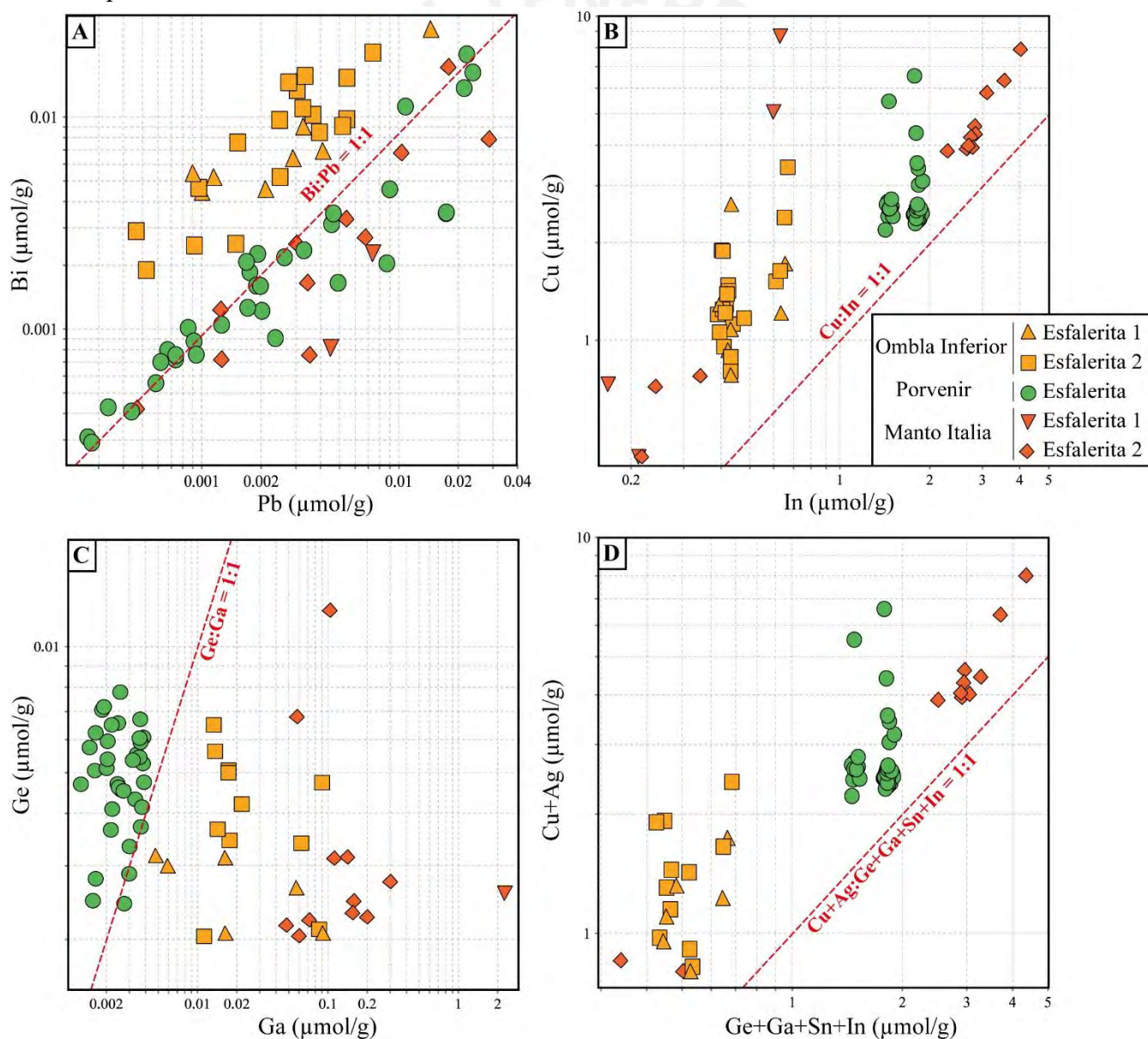


Figura 12: Diagramas binarios de A) Bi vs Pb, B) Cu vs In, C) Ge vs Ga y D) Cu + Ag vs Ge + Ga + Sn + In en esfalerita de los cuerpos estudiados.

4.2.2.2. Calcopirita

En la Tabla 6 se presenta un cuadro resumen con las concentraciones elementales obtenidas mediante LA-ICP-MS en calcopirita según cuerpo mineralizado y generación. En la Figura 13 se presentan perfiles de ablación multi-elementales representativos del sulfuro analizado. De manera general, los patrones de ablación son suaves a ligeramente irregulares para gran parte de los elementos analizados. Los granos de calcopirita de Ombla Inferior muestran contenidos de hasta 1736 y 550 ppm de Zn en la primera y tercera generaciones, respectivamente, mientras que en Manto Italia se alcanzan concentraciones de Zn de hasta 1001 ppm en la segunda generación de calcopirita. Los valores de Cd en calcopirita de Ombla Inferior muestran un ligero enriquecimiento en la primera generación (hasta 9 ppm) con respecto a la tercera generación (hasta 2 ppm) y en Manto Italia se han obtenido concentraciones de hasta 4 ppm de Cd en la segunda generación. Con relación a Ag, los análisis arrojan concentraciones de hasta 2649 ppm en granos de segunda generación de calcopirita de Manto Italia, mientras que para Ombla Inferior la concentración máxima es de 237 ppm en granos de la primera generación.

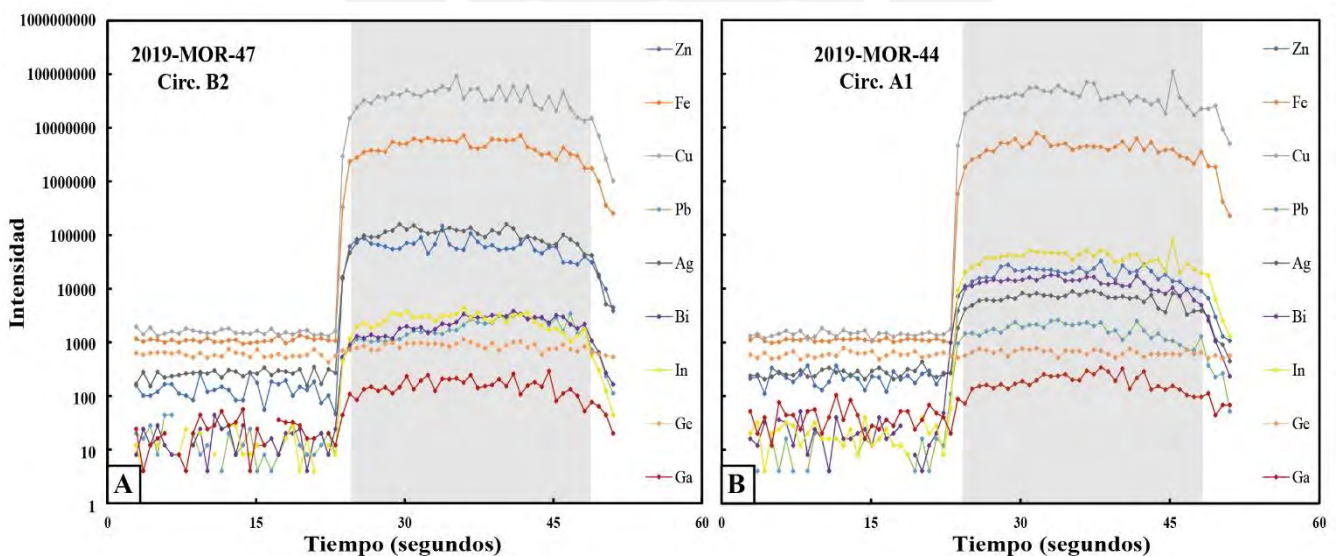


Figura 13: Perfiles de ablación multi elemental representativos de los granos de calcopirita analizados. A) y B) Muestras del skarn de Ombla Inferior. El intervalo de integración de los espectros está denotado por el recuadro gris.

Con respecto al In, las muestras de calcopirita de Ombla Inferior arrojan las máximas concentraciones, de hasta 31 ppm en la tercera generación, mientras que la calcopirita de Manto Italia presenta valores máximos de 11 ppm en la segunda generación. Con relación al Ge, los valores más altos se detectaron en la segunda generación de calcopirita de Manto Italia (hasta 1.9 ppm), mientras que los valores para Ombla Inferior son de hasta 0.83 y 0.19 ppm en la primera y tercera generaciones, respectivamente. En cuanto a las concentraciones de Ga, los granos analizados de calcopirita de segunda generación de Manto Italia arrojan valores de hasta 1.3 ppm, mientras que en Ombla Inferior se alcanzan concentraciones de hasta 0.57 ppm en la tercera generación de este sulfuro. No se observaron tendencias en las concentraciones molares de elementos traza en las muestras de calcopirita analizadas.

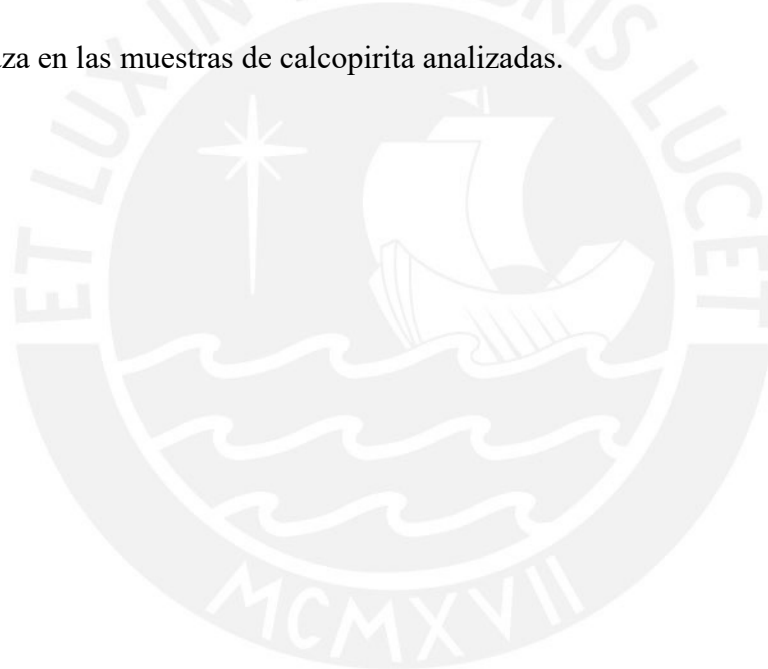


Tabla 6: Resumen de la concentración de múltiples elementos en las diversas generaciones de calcopirita de los cuerpos estudiados (datos de LA-ICP-MS).

Cuerpo Mineralizado	Generación ppm	S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Yacimiento de Morococha (n=11)	Mín.	629513	340	292958	340000.0	11.88	1.74	0.04	0.1	1	12.6	1.9	0.19	0.18
	Max.	760827	1736	339553	347000.0	45.90	6.12	3.02	1.8	9	2648.5	31.1	1.91	1.31
	Prom.	700589	807	319789	343727.3	24.82	2.60	1.03	0.6	4	644.0	12.8	0.68	0.54
	RIC	736242 - 646048	1014 - 473	332372 - 311348	346000.0 - 342000.0	31.20 - 14.79	2.54 - 1.92	2.39 - 0.06	1.3 - 0.1	6 - 1	1719.3 - 16.4	27.3 - 2.4	0.82 - 0.21	0.69 - 0.28
Skarn Ombla Inferior (n=8)	Mín.	707428	961	311941	340000.0	11.88	1.74	<1.d.	0.1	6	197.3	1.9	0.71	0.18
	Max.	737630	1736	330683	346000.0	16.21	2.32	0.08	0.1	9	237.0	2.4	0.83	0.35
	Prom.	727921	1184	318920	342000.0	14.03	2.07	0.06	0.1	7	220.0	2.2	0.78	0.28
	RIC	737293 - 713167	1557 - 975	328165 - 312067	345000.0 - 340000.0	15.85 - 12.22	2.29 - 1.81	0.08 - 0.04	0.1 - 0.1	8 - 6	234.0 - 203.1	2.4 - 1.9	0.83 - 0.72	0.34 - 0.20
Manto Italia (n=3)	Mín.	646048	340	309568	345000.0	23.06	1.80	<1.d.	<1.d.	1	12.6	18.7	<1.d.	0.28
	Max.	760827	550	326156	347000.0	31.20	2.62	<1.d.	<1.d.	2	68.8	31.1	0.19	0.57
	Prom.	702170	426	317421	346250.0	26.89	2.25	-	-	1	27.8	26.7	0.19	0.42
	RIC	753549 - 652058	531 - 340	326156 - 309568	347000.0 - 345250.0	30.65 - 23.36	2.58 - 1.88	-	-	2 - 1	55.7 - 12.8	30.7 - 20.9	0.19 - 0.19	0.56 - 0.28
Manto Italia (n=3)	Mín.	629513	621	292958	342000.0	26.86	<1.d.	0.82	0.5	1	1719.3	7.2	0.22	0.69
	Max.	711868	1001	339553	343000.0	45.90	6.12	3.02	1.8	4	2648.5	11.1	1.91	1.31
	Prom.	662040	813	323317	342666.7	36.46	6.12	2.01	1.2	3	2030.8	8.6	0.89	1.07
	RIC	711868 - 629513	1001 - 621	339553 - 292958	343000.0 - 342000.0	45.90 - 26.86	6.12 - 6.12	3.02 - 0.82	1.8 - 0.5	4 - 1	2648.5 - 1719.3	11.1 - 7.2	1.91 - 0.22	1.31 - 0.69

Min.: Mínimo; Max.: Máximo; Prom.: Promedio; RIC: Rango intercuartil; l.d.: Límite de detección; <l.d.: Debajo del límite de detección

4.2.2.3. Galena

Se obtuvieron solamente 4 análisis de muestras de galena procedentes de Manto Italia. En la Tabla 7 se presentan análisis representativos de este sulfuro. En la Figura 14 se presenta un perfil de ablación representativo donde se observa que los patrones de ablación son suaves y constantes para la mayoría de los elementos analizados. Los resultados arrojan valores de hasta 5712 ppm de Ag. Elementos como Sb (5123 ppm), Cd (hasta 36 ppm) y Tl (3.9 ppm) muestran valores por encima de sus respectivos límites de detección. Con relación a los metales críticos de interés, solamente el In presenta valores medibles de hasta 2 ppm.

Tabla 7: Análisis representativos de galena en Manto Italia incluyendo composición química (Datos de LA-ICP-MS).

Cuerpo mineralizado	Manto Italia	
	Muestra	MO-05-KK-06A
		MO-05-KK-06A
	A2	B2
S (ppm)	109207	102397
Zn	<l.d.	<l.d.
Fe	<l.d.	12
Cu	7.4	6.8
Sn	-	-
Pb	848000	848000
Sb	5124	4326
As	<l.d.	<l.d.
Cd	36	28
Ag	5712	4883
Tl	3.7	3.8
In	2	1.9
Ge	<l.d.	<l.d.
Ga	<l.d.	<l.d.

<l.d.: Debajo del límite de detección.

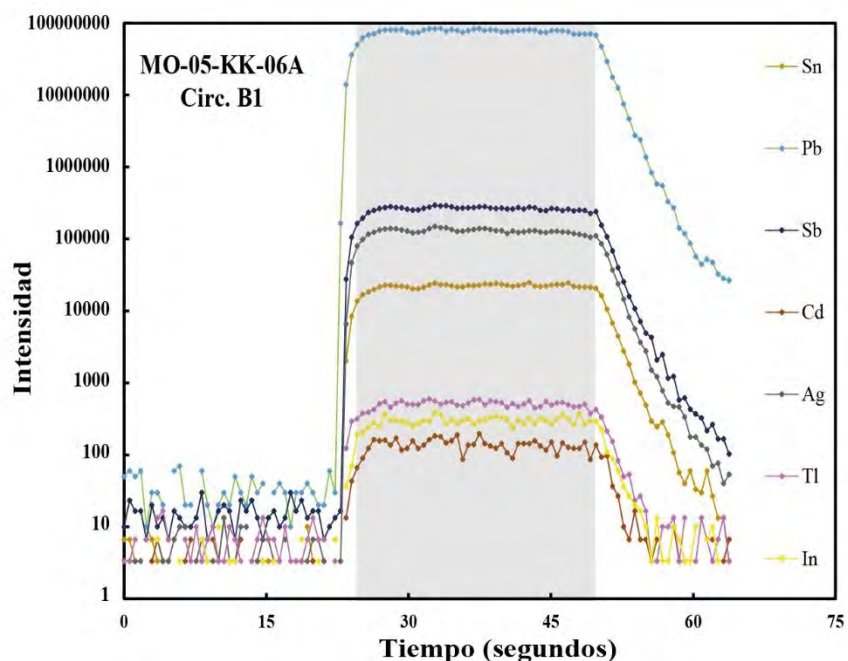


Figura 14: Perfil de ablación multi elemental representativo de los granos de galena analizados. El intervalo de integración de los espectros está denotado por el recuadro gris.

5. DISCUSIÓN

5.1. Enriquecimiento de metales tecnológicos en el distrito de Morococha y su distribución

No se han detectado fases propias de In, Ge y Ga (p. ej. roquesita, argidorita o gallita, respectivamente) en las mineralizaciones polimetálicas estudiadas en esta tesis. Estos elementos aparecen en concentraciones variables en los minerales de mena estudiados (i.e., esfalerita, calcopirita y galena). Con respecto al In, se identificó que este metal se encuentra concentrado principalmente en esfalerita (RIC 209 – 49 ppm, hasta 459 ppm). Diversos autores han identificado a la esfalerita como el principal hospedador de este metal en diversas tipologías de depósitos minerales en los que este sulfuro es abundante (Cook et al. 2009, 2011a, b; Torró et al. 2019a, b; Benites et al. 2019; Xu et al. 2020; Valverde 2020). En mineralizaciones tipo skarn, los valores máximos de In en esfaerita reportados en este estudio están muy por debajo de los obtenidos por Bauer et al. (2019), de hasta 20 wt.%, y por Xu et

al. (2020), de hasta 4572 ppm. Si bien la calcopirita también puede alojar concentraciones destacables de In (Gaspar 2002; George et al. 2018; Bauer et al. 2019; Xu et al. 2020), la concentración de este metal en los granos de calcopirita analizados es por lo general menor que en esfalerita (RIC 27 – 2.4 ppm, hasta 31 ppm). La concentración máxima de In en calcopirita obtenida en esta tesis es considerablemente inferior a las reportadas por Bauer et al. (2019) y Xu et al. (2020), de hasta 0.42wt.% y 1399 ppm, respectivamente, en mineralizaciones tipo skarn. Cabe tener en cuenta que algunos minerales de estaño también pueden albergar concentraciones significativas de In (Cook et al. 2011a, Jovic et al. 2011; Jiménez-Franco et al. 2018; Benites et al. 2019; Quispe 2020). Si bien en Manto Italia se describe la presencia de estannita como fase minoritaria, ésta no ha sido analizada. Con respecto al Ga, se detectó que la esfalerita contiene concentraciones más elevadas de este metal (RIC 5.49 – 0.19, hasta 169 ppm) en contraste con las otras fases analizadas. Concentraciones elevadas de Ga en esfalerita han sido descritas por otros autores alrededor del mundo en diferentes estilos de mineralización (p. ej. Melcher et al. 2006; Seifert y Sandmann 2006; Cook et al. 2009). El Ge presenta concentraciones muy bajas en todas las fases estudiadas (hasta 1.9 ppm en calcopirita) y mayormente por debajo de su límite de detección, por lo que se concluye que las mineralizaciones polimetálicas encajadas en cuerpos de skarn de Morococha no representan potencial para el beneficio de este metal. Por lo tanto, se concluye que en los cuerpos mineralizados estudiados en esta tesis, la esfalerita representa el principal hospedador de In y Ga ya que presenta las mayores concentraciones de éstos y es el mineral con mayor abundancia modal.

De acuerdo a la secuencia paragenética elaborada para el skarn de Ombla Inferior (Fig. 7), la incorporación de In se dio preferencialmente drante la etapa de mineralización polimetálica con la cristalización de una segunda generación de esfalerita (hasta 77 ppm) y una tercera generación de calcopirita (hasta 31 ppm). Además, en el skarn de Ombla Inferior se

observó que las concentraciones de In muestran una tendencia a aumentar con la profundidad (hasta 45 ppm entre 425.30–425.40 m en DDH-MOR-16-212, muestra 2019-MOR-41; hasta 77 ppm entre 429.12–429.22 m DDH-MOR-16-2012, muestra 2019-MOR-44). Comportamientos similares han sido descritos en Ánimas-Chocaya-Siete Suyos (Bolivia) por Torró et al. (2019b) y en el proyecto Ayawilca (Perú) por Benites et al. (2019) y Quispe (2020). Este patrón podría estar relacionado a una mayor disponibilidad de Cu en los fluidos profundos (mayor temperatura) en relación con los más superficiales, favoreciendo la incorporación de In en la estructura cristalina de la esfalerita. En Manto Italia, la secuencia paragenética (Fig. 9) muestra que la sub-etapa con abundante cristalización de esfalerita, galena y calcopirita (estadio skarn hidratado/reemplazamiento de carbonatos) presenta una incorporación preferencial del In en una segunda generación de esfalerita con hasta 459 ppm. Por el contrario, el Ga (hasta 169 ppm) se incorpora predominantemente en una generación temprana de esfalerita en Manto Italia.

Los patrones de ablación suaves y constantes para In, Ge y Ga en esfalerita (Figs. 11A-B) sugieren que estos elementos están incorporados en la estructura cristalina de este mineral y no aparecen en forma de microinclusiones minerales. La existencia de una correlación positiva entre In y Cu a proporciones moleculares $\sim 1:1$ sugiere que un importante mecanismo de incorporación de In pudo haber sido una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$; ampliamente descrita en la literatura (p.ej., Schwarz-Schampera y Herzig 2002; Cook et al. 2009, 2011a, b; Torró et al. 2019a, b; Bauer et al. 2019; Xu et al. 2020). Este mecanismo de incorporación aparentemente funciona independientemente de las concentraciones de Fe y otros elementos. La inexistencia de correlación entre las proporciones molares de Ag y Sn, así como entre (Sn+In) y Ag indica que una sustitución del tipo $3\text{Zn}^{2+} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{Sn}^{2+} + \text{In}^{3+}$, descrita por Xu et al. (2020), no aplicaría a la esfalerita de los cuerpos estudiados. Con relación al Ge y Ga, Cook et al. (2009) describen mecanismos complejos de sustitución acoplada en

esfalerita que resulta en el enriquecimiento de cationes monovalentes (Cu^+ y Ag^+) con los respectivos enriquecimientos de cationes tri- y tetravalentes (Ge^{4+} , Ga^{3+} , Sn^{4+} e In^{3+}). Una fuerte correlación positiva entre estos elementos se observa en la Figura 12D sugiriendo que el Cu podría proporcionar equilibrio de carga en todo el amplio conjunto de mecanismos de sustitución acopladas y, por ende, ser responsable también de la incorporación del Ge y Ga en la estructura cristalina de la esfalerita armonizando con lo descrito por Cook et al. (2009) y Belissont et al. (2014). Los espectros de ablación para calcopirita y galena también sugieren incorporación de In, Ge y Ga en sus estructuras cristalinas. No obstante, la inexistencia de correlaciones de dichos metales con otros elementos analizados y, en general, las bajas concentraciones de éstos impiden constreñir mecanismos de incorporación para el In, Ge y Ga en calcopirita y galena.

Valverde (2020) presenta un estudio de la geoquímica mineral en vetas polimetálicas y cuerpos de reemplazamiento del distrito minero de Morococha con énfasis en In, Ge y Ga. Mediante análisis EPMA, el autor identifica un enriquecimiento de In en esfalerita de la Veta Morro Solar (hasta 0.53 wt.%) y Manto Ivette (hasta 0.39 wt.%), mientras que en Cuerpo Rosita/Veta Rubí y Ramal Alianza identifica concentraciones más bajas de In con hasta 0.18 y 0.27 wt.%, respectivamente; en cambio, el Ge y Ga estarían de forma mayoritaria por debajo de sus respectivos límites de detección (ver Tabla 1 en Valverde 2020). Este autor indica que la esfalerita en vetas polimetálicas y cuerpos de reemplazamiento ubicados en las zonas de Cu y Zn-Cu presentan concentraciones más elevadas de In en comparación con esfalerita de vetas ubicadas en las zonas de Zn-Pb-Ag de acuerdo con la zonación metalífera distrital descrita por Catchpole et al. (2011; $\text{Cu} \rightarrow \text{Zn-Cu} \rightarrow \text{Zn-Pb-Ag} \rightarrow \text{Ag-Pb}$). En tal sentido, en base al estudio de Valverde (2020) y esta tesis, es importante enfatizar que la disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes a partir de los cuales precipitó la esfalerita en Morococha jugó un papel relevante para la incorporación del In dentro de la estructura cristalina de este mineral y por lo

tanto, en la distribución de las concentraciones de este elemento a escala de distrito y a lo largo de la secuencia paragenética. De este modo, las mineralizaciones polimetálicas en cuerpos de skarn y en sistemas cordilleranos con evidencias de alta disponibilidad de Cu (es decir, proximales) durante la cristalización de la esfalerita representan las zonas más prospectivas para In y Ga.

5.2. Temperatura de formación de la esfalerita

Usando el geotermómetro GGIMFis de Frenzel et al. (2016) se obtuvieron temperaturas de cristalización para las diferentes generaciones de esfalerita en las mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn estudiados en esta tesis (Tabla 8; el Anexo F recoge las temperaturas calculadas para cada análisis LA-ICP-MS). Los resultados indican $T_{GGIMFis}$ de 337 ± 29 °C (2σ) y de 324 ± 24 °C para la primera y segunda generaciones de esfalerita de Ombla Inferior, respectivamente. En Porvenir, la $T_{GGIMFis}$ es de 407 ± 8 °C. En Manto Italia se obtuvo una $T_{GGIMFis}$ de 328 °C y 360 ± 25 °C para la primera y segunda generaciones de esfalerita, respectivamente. Las temperaturas obtenidas son congruentes con temperaturas típicas en mineralizaciones tipo skarn (300 – 550 °C; Takeno et al. 1999; Meinert et al. 2003, 2005) y CRD (200-550 °C; Megaw et al. 1988). En el distrito de Morococha, los estudios microtermométricos realizados por Catchpole et al. (2015a) en inclusiones fluidas alojadas en cuarzo en una veta de cuarzo lechoso emplazada previamente a la mineralización polimetálica cordillerana reflejan temperaturas de homogenización en el rango de ~420 a 410 °C, siendo superiores a las temperaturas calculadas en este estudio para la esfalerita de Porvenir y Ombla Inferior. En asociaciones polimetálicas de tipo cordillerano precoces, Catchpole et al. (2011, 2015) reportaron T_h de 380 – 340 °C, y en asociaciones polimetálicas cordilleranas emplazadas durante estadios tardíos, T_h de 300 – 235 °C. De este modo, se desprende que las $T_{GGIMFis}$

calculadas para esfalerita de Manto Italia son similares con las T_h de inclusiones fluidas en fases precipitadas tempranamente en mineralizaciones cordilleranas del distrito de Morococha.

Tabla 8: Temperaturas GGIMFis calculadas mediante el geotermómetro GGIMFis para las diversas generaciones de esfalerita de los cuerpos estudiados.

Cuerpo Mineralizado	Generación	n	Promedio	e	σ	2σ
Skarn Ombla Inferior	ef1	6	337	30	15	29
	ef2	11	324	36	12	24
Skarn Porvenir	ef	35	407	28	4	8
Manto Italia	ef1	1	328	6	-	-
	ef2	11	360	31	13	25

n: número de análisis; e: error absoluto; σ : desviación estándar

5.3. Recomendaciones para la exploración de In en sistemas tipo pórfido en márgenes continentales

- Schwarz-Schampera y Herzig (2002) mencionan que un importante número de depósitos minerales con enriquecimiento significativo de In se encuentran genéticamente relacionados a geodinámicas de subducción, principalmente porque los márgenes continentales y los sistemas hidrotermales favorecen al transporte del metal mediante complejos clorurados a temperaturas relativamente altas (~300 °C). En tal sentido, los depósitos magmático-hidrotermales del Perú (incluyéndose las tipologías de yacimientos en sistemas de pórfidos cupríferos) representan un blanco atractivo para la exploración por In.
- En estos sistemas minerales, el In se encuentra principalmente alojado en diferentes minerales metálicos de Cu, Zn y Sn, mientras que es raro encontrar fases propias del metal debido a que éstas (p. ej. roquesita) cristalizan en sistemas con bajo o nulo contenido de Zn de acuerdo con Cook et al. (2011b). En consecuencia, mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn ricas en esfalerita, calcopirita y/o minerales de Sn son especialmente interesantes para la exploración de In.

- La exploración del In debe estar direccionada hacia una esfalerita (principal hospedador) con evidencias texturales y químicas de cristalización durante estadios de alta disponibilidad de Cu en los fluidos. Por lo tanto, los niveles más profundos en los depósitos minerales (altas temperaturas) representan las zonas más prospectivas por In debido a una mayor disponibilidad de Cu. En el caso de distritos mineros que presentan zonación metalífera (p. ej. Morococha – Perú), la esfalerita que cristaliza en zonas enriquecidas en Cu tenderá a incorporar mayores concentraciones de In en relación con la esfalerita que cristaliza en zonas enriquecidas en Pb o Ag.
- De manera sistemática el Ga y, principalmente, el Ge se presentan en concentraciones inferiores respecto al In en depósitos magmático-hidrotermales. Respecto al Ge, no representa en principio un metal prospectivo en mineralizaciones polimetálicas encajadas en cuerpos de skarn. Sin embargo, algunos granos de esfalerita pueden tener un enriquecimiento importante de Ga, lo que le convierte en un metal atractivo para su exploración junto con el In en sistemas tipo pórfido en márgenes continentales.

6. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de investigación se estudiaron mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn del distrito minero de Morococha. En Ombla Inferior, la mineralización describe dos estadios de evolución: 1) skarn hidratado (serpentina y magnetita) y 2) mineralización polimetálica (pirrotina, pirita, esfalerita, calcopirita y trazas de marcasita, bornita, tennantita, wittichenita, bismutinita, tsumoíta y covelina). Porvenir se caracteriza por abundante serpentina, magnetita y esfalerita. En Manto Italia el estadio estudiado (skarn hidratado/reemplazamiento de carbonatos) presenta una primera sub-etapa dominada por magnetita, pirrotina, arsenopirita y pirita, mientras que la segunda sub-etapa comprende esfalerita, galena y calcopirita.

- Se obtuvieron concentraciones de hasta 459 ppm de In y hasta 169 ppm de Ga en esfalerita de las mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn en Morococha. La calcopirita contiene hasta 31 ppm de In. El Ge presenta concentraciones muy bajas en todas las fases estudiadas (<2 ppm). Se concluye que la esfalerita representa el principal hospedador de In y Ga en las mineralizaciones estudiadas.
- Las secuencias paragenéticas de los cuerpos polimetálicos estudiados reflejan que las concentraciones más elevadas de In aparecen en una segunda generación de esfalerita, mientras que el Ga se incorpora predominantemente en una generación temprana de este sulfuro de zinc.
- El principal mecanismo de incorporación de In en esfalerita es una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. En tal sentido, la disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes del distrito de Morococha a partir de los cuales cristalizó la esfalerita jugó un papel importante en la distribución del In a lo largo de la secuencia paragenética y del distrito.
- Las elevadas concentraciones encontradas de In, y hasta cierto punto de Ga, identifican a las asociaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de skarn como prospectivas para estos metales tecnológicos, especialmente aquéllas en que la esfalerita es un mineral abundante. Se debe incluir el análisis de estos elementos durante campañas de caracterización geoquímica de este tipo de menas.

7. REFERENCIAS

- Agneau M (2008) Genesis of Ag-rich mineralisation in the Buenaventura and Galera veins, Yacumina zone, SW part of the Morococha district, central Peru. Université de Genève, 123 p
- Bauer ME, Seifert T, Burisch M, Krause J, Richter N, Gutzmer J (2019) Indium-bearing sulfides from the Hämmerlein skarn deposit, Erzgebirge, Germany: evidence for late-stage diffusion of indium into sphalerite. *Mineralium Deposita* 54:175-192
- Baumgartner RJ, Van Kranendonk MJ, Pagès Anais, Fiorentini ML, Wacey D, Ryan C (2020) Accumulation of transition metals and metalloids in sulfidized stromatolites of the 3.48 billion-year-old Dresser Formation, Pilbara Craton. *Precambrian Research* 337, 105534
- Belissant R, Boiron MC, Luais B, Cathelineau M (2014) LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Ge-rich sphalerites from the Noailhac – Saint-Salvy deposit (France): Insights into incorporation mechanisms and ore deposition processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 126:548-540
- Benavides-Cáceres V (1999) Orogenic evolution of the Peruvian Andes: the Andean Cycle. In: Skinner BJ (Ed) *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Economic Geology Special Publication 7:61-107
- Bendezú A (2007) Mineralización tipo pórfido de Cu-Mo asociadas a venas cordilleranas de metales base: Toromocho-Morococha, distrito de Morococha, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería, 132 p
- Bendezú A, Catchpole H, Kouzmanov K, Fontboté L, Astorga C (2008) Miocene magmatism and related porphyry and polymetallic mineralization in the Morococha district, Central Peru. In: XIII Geological Congress of Peru, Lima, 2008. 6 p
- Bendezú A, Kouzmanov K, Ovtcharova M, Spikings R, Fontboté L (2012) Timing of porphyry emplacement in the Miocene Morococha district, central Peru: U-Pb and Ar-Ar geochronological record. In: 34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, 2012. 1 p
- Benites D, Torró L, Vallance J, Quispe P, Sáez J, Rosas S, Fernández-Baca A, Gamarra J, Camprubí A, Fontboté L (2019) Ore mineralogy of the In-bearing Ayawilca Zn-Ag-Sn-Cu Project, Pasco, Peru. In: 15th SGA Biennial Meeting, Glasgow, Escocia, 2019. 4 p
- Beuchat S (2003) Geochronological, structural, isotopes and fluid inclusion constraints of the polymetallic Domo de Yauli District, Peru. *Terre Environment* 41:130 p
- Bissig T, Clark AH, Rainbow A, Montgomery A (2015) Physiographic and tectonic settings of high-sulfidation epithermal gold-silver deposits of the Andes and their control on mineralizing processes. *Ore Geology Review* 62:327-364

- Bleiwas D (2010) Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. U.S. Geological Survey Circular. Reston, Virginia, number 1365, pp.1-6
<http://pubs.usgs.gov/circ/1365/>
- Briskey J (2005) Indium in zinc-lead and other mineral deposits-a reconnaissance survey of 1118 indium analyses published before 195. U.S. Geological Survey, 8 p
- Cacho A, Melgarejo J, Camprubí A, Torró L, Castillo-Oliver M, Torres B, Artiaga D, Tauler E, Martínez A, Campeny M, Alfondo P, Arce-Burgoa O (2019) Mineralogy and Distribution of Critical Elements in the Sn-W-Pb-Ag-Zn Huanuni Deposit, Bolivia. *Minerals* 9:1-26
- Carlotto V, Quispe J, Acosta H, Rodríguez R, Romero D, Cerpa L, Mamani M, Díaz E, Navarro P, Jaimes F, Velarde T, Lu S, Cueva E (2009) Dominios geotectónicos y Metalogénesis del Perú. *Sociedad Geológica del Perú. Boletín* 103:1-90
- Catchpole (2011) Porphyry-related polymetallic mineralisation in the Morococha district, central Peru: mineralisation styles, timing and fluid evolution. *Université de Genève*, 288 p
- Catchpole H, Bendezú A, Vallance J, Kouzmanov K, Astorga C, Fotboté L (2016) Relaciones espacio-temporales entre pórfidos, skarns estériles y mineralización polimetálica en skarn, cuerpos de reemplazamiento en rocas carbonatadas y vetas en el Distrito de Morococha, Perú. XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, 5 p
- Catchpole H, Kouzmanov K, Putlitz B, Seo J, Fontboté L (2015a) Zoned Base Metal Mineralization in a Porphyry System: Origin and Evolution of Mineralizing Fluids in the Morococha District, Peru. *Economic Geology* 110:39-71
- Catchpole H, Kouzmanov K, Bendezú A, Ovtcharova M, Spikings R, Stein H, Fontboté L (2015b) Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system – Morococha district, Peru. *Mineralium Deposita* 50:895-922
- Catchpole H, Kouzmanov K, Fontboté L (2012) Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned cordilleran base metal district, Morococha, central Peru. *The Canadian Mineralogist* 50:719-743
- Catchpole H, Kouzmanov K, Fontboté L, Guillong M, Heinrich CA (2011) Fluid evolution in zoned Cordilleran polymetallic veins – Insights from microthermometry and LA-ICP-MS of fluid inclusions. *Chemical Geology* 281:293-304
- Cerro de Pasco Copper Corp. Geological Staff (1965) Morococha Ore Inventory. Geological Office I, 505 p

- Chevalier A (2010) Hydrothermal alteration patterns of the Ticlio porphyry Cu-Au prospect, Miocene Morococha district, central Peru: spatial distribution, mineralogy and geochemistry. Université de Genève
- Cloos M (2001) Bubbling Magma Chambers, Cupolas, and Porphyry Copper Deposits. *International Geology Review* 43: 285-311.
<https://doi.org/10.1080/00206810109465015>
- Cook NJ, Ciobanu CL, Pring A, Skinner W, Danyushevsky L, Shimizu M, Saini-Eidukat B, Melcher F (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICP-MS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73:4761-4791
- Cook NJ, Ciobanu CJ y Williams T (2011a) The mineralogy and mineral chemistry of indium in sulphide deposits and implications for mineral processing. *Hydrometallurgy* 108:226-228
- Cook NJ, Sundblad K, Valkama M, Nygård R, Ciobanu CL, Danyushevsky L (2011b) Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: Insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals. *Chemical Geology* 284:62-73
- Carten RB (1996) Sodium-Calcium metasomatism: chemical, temporal, and spatial relationships at the Yerington, Nevada, porphyry copper deposit. *Economic Geology* 81:1495-1519
- Dilles J (1987) Petrology of the Yerington Batholith, Nevada: Evidence for Evolution of Porphyry Copper Ore Fluids. *Economic Geology* 82:1750-1789
- Dilles J y Einaudi MT (1992) Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada – a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology* 87:1963-2001
- Einaudi MT (1982) Description of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America. In: Titley SR (eds) *Advances in geology of the porphyry copper deposits, south western North America*. University of Arizona Press, Tucson. pp. 185-209
- Einaudi MT, Meinert L y Newberry R (1981) Skarn deposits. *Economic Geology* 75th Anniversary:317-391
- Ellison RA, Klinck BA y Hawkins MP (1989) Deformation events in the Andean orogenic cycle in the Altiplano and Western Cordillera, southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 2(3):263-276
- European Commission (2020) Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Available online: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf

- Fletcher AR (1929) Mexico's lead-silver manto deposits and their origin. *Engineering and Mining Journal* 127:509-513
- Foley N, Jaskula B, Kimball B, Schulte R (2017) Gallium, chap H. In: Schulz KJ, DeYoung JH, Jr Seal, RR II Bradley DC (eds) *Critical mineral resources of the United States Economic and environmental geology and prospects for future supply*: U.S. Geological Survey. Professional Paper 1802, pp H1 – H26, <http://dx.doi.org/10.3133/pp1802I>
- Fontboté L (2018) Ore deposits of the Central Andes. *Elements* 14:257-261
- Fontboté L (2019) Cordilleran Polymetallic Deposits as a Class in Porphyry Systems: Exploration implications. In: SEG-SGA-UNESCO Latino American Metallogeny Course, May 2019 [Presentación de Power Point]
- Fontboté L (2020) Systematic trends in the evolution of porphyry-related Zn-Pb-Ag deposits. In: *Swiss Geoscience Meeting, Zurich, 2020*. 2 p
- Fontboté L y Bendezú R (2009) Cordilleran or Butte-type veins and replacement bodies as a deposit class in porphyry systems. In: 10th SGA Biennial Meeting, Townsville, Australia, 2009, *Proceedings*, p. 521–523
- Frenzel M, Hirsch T y Gutzmer J (2016) Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews* 76:52-78
- Gallard-Esquivel M, Cepedal A, Fuertes-Fuente M, Martín-Izard A (2018) Enrichment in critical metals (In-Ge) and Te-Se in epithermal deposits of 'La Carolina' district, San Luis, Argentina. *Mineralogical Magazine* 82(S1):S61-S87
- Gaspar OC (2002) Mineralogy and sulfide mineral chemistry of the Neves Corvo ores, Portugal: insight into their genesis. *The Canadian Mineralogist* 40:611-636
- George L, Cook NJ, Crowe BBP, Ciobanu CL (2018) Trace elements in hydrothermal chalcopyrite. *Mineralogical Magazine* 82:59-88
- Guillong M, Hametner K, Reusser E, Wilson SA, Günther D (2005) Preliminary Characterisation of New Glass Reference Materials (GSA-1G, GSC-1G, GSD-1G and GSE-1G) by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry Using 193 nm, 213 nm and 266 nm Wavelengths. *Geostandards and Geoanalytical Research* 29:315-331
- Guillong M, Meier D, Allan M, Hinrich C, Yardley B (2008) SILLS: A MATLAB-based program for the reduction of laser ablation ICP-MS data of homogeneous materials and inclusions, in *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*, P. Sylvester, Editor. 2008, Mineralogical Association of Canada: Vancouver, BC. p. 328-333

- Guillong M, Wotzlaw JF, Looser N, Laurent O (2020) New analytical and data evaluation protocols to improve the reliability of U-Pb LA-ICP-MS carbonate dating. *Geochronology*. DOI: 10.5194/gchron-2019-20
- Gustafson L (1978) Some Major Factors of Porphyry Copper Genesis. *Economic Geology* 73:600-607
- Harrison J (1943) Geología de los Andes Centrales en parte del departamento de Junín. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 16:55-97
- Harvey B, Myers S y Klein T (1999) Yanacocha gold district, northern Peru. In: Pacrim 99 Congress, Bali, Indonesia, p. 445-459
- Hedenquist J, Arribas A y Gonzales-Urien E (2000) Exploration for Epithermal Gold Deposits. *SEG Reviews* 13:245-277
- Ishihara S, Murakami H y Marquez M (2011) Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits. *Resource Geology* 61:174-191
- Jenks W (1951) Triassic to Tertiary Stratigraphy near Cerro de Pasco, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 62:203-209
- Jiménez-Franco A, Alfonso P, Canet C, Trujillo J (2018) Mineral chemistry of In-bearing minerals in the Santa Fe mining district, Bolivia. *Andean Geology* 45:410-432
- Jochum KP, Weis U, Stoll B, Kuzmin D, Yang Q, Raczek I, Jacob DE, Stracke A, Birbaum K, Frick DA, Günther D, Enzweiler J (2011) Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research* 35:397-429
- John D y Taylor R (2016) By-Products of Porphyry Copper and Molybdenum Deposits. *Economic Geology* 18:137-164
- Jovic S, Guido D, Melgarejo J, Páez G, Ruiz R, Schalamuk I (2011) The indium-bearing minerals of the Pingüino polymetallic vein system, Deseado Massif, Patagonia, Argentina. *The Canadian Mineralogist* 49:931-946
- Knight Piésold Consultores S.A. (2009) Estudio de Impacto Ambiental. Proyecto Toromocho. Minera Chinalco Perú S.A. Lima, Perú
- Kobe HW (1990) Stratabound sulfide occurrences in the Paleozoic of the Yauli Dome, Central Peru. In: Fontboté L, Amsutz GC, Cardozo M, Cedillo E, Frutos J (eds) *Stratabound Ore Deposits in the Andes*, Berlin, Springer-Verlag, pp 113-122
- Kontak DJ, Clark AH, Farrar E, Strong DF (1985) The rift associated Permo-Triassic magmatism of the Eastern Cordillera: a precursor to the Andean orogeny. In: Pitcher WS,

- Atherton MP, Cobbing J, Beckinsale RD (eds) *Magmatism at a plate Edge: The Peruvian Andes*, Blackie, Glasgow, and Halsted Press, New York, pp 36-44
- Kouzmanov K, Ovtcharova M, Von A, Guillong M, Spikings R, Schaltegger U, Fontboté L, Rivera L (2008) U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints for the timing of magmatism and mineralization in the giant Toromocho porphyry Cu-Mo deposit, Central Peru. In: XIII Geological Congress of Peru, Lima, 2008. 6 p
- Lepry L (1981) *The structural geology of the Yauli Dome region, Cordillera Occidental, Peru*. Department of Geoscience, University of Arizona, Arizona, United States of America, 122 p
- Liu J, Rong Y, Gu X, Shao Y, Lai J (2018) Indium Mineralization in the Yeiwei Sn-Polymetallic Deposit of the Sizhuyuan Orefield, Southern Hunan, China. *Resource Geology* 68:22-36
- Liu J, Rong Y, Zhang S, Liu Z, Chen W (2017) Indium Mineralization in the Xianghualing Sn-Polymetallic Orefield in Southern Hunan, Southern China. *Minerals* 7:1-26
- Lowell J y Guilbert J (1970) Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology* 65:373-408
- Mégarid F (1968) Geología del cuadrángulo de Huancayo. *Servicio de Geología y Minería* 18:1-123
- Mégarid F (1984) The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *Journal of the Geological Society* 141:893-900
- Megaw PKM (1998) Carbonate-hosted Pb-Zn-Ag-Cu-Au replacement deposits: An exploration perspective. *Mineralogical Association of Canada* 26:337-357
- Meinert L (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada* 19:145-162
- Meinert L, Dipple G y Nicolescu S (2005) World skarn deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary:299-336
- Meinert L, Hedenquist J, Satoh H, Matsuhisa Y (2003) Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids. *Economic Geology* 98:147-156
- Melcher F, Oberthür T y Rammlmair D (2006) Geochemical and mineralogical distribution of germanium in the Khusib Springs Cu-Zn-Pb-Ag sulfide deposit, Otavi Mountain Land, Namibia. *Ore Geology Reviews* 28:32-56
- Murakami H e Ishihara S (2013) Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: a femto-second LA-ICPMS study. *Ore Geology Reviews* 53: 223-243

- Nagell R (1957) Anhydrite complex of the Morococha district, Peru: *Economic Geology* 52:632-644
- Nagell R (1960) Ore Controls in the Morococha District, Peru: *Economic Geology* 55:962-984
- Noble DC y McKee EH (1999) The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. In: Skinner BJ (Ed) *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. *Economic Geology Special Publication* 7:155-193
- Ossandón G, Fréaut R, Gustafson L, Lindsay D, Zentilli M (2011) *Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report*. *Economic Geology* 96:249-270
- Pan American Silver Corp (2019) Pan American Silver Corporation Measured and Indicated Mineral Resources as of June, 2019. Available online: <https://www.panamericansilver.com/assets/Reserves-Resources/d4fcb44997/Pan-American-Silver-resources-and-reserves-end-June-2019.pdf>
- Panca F, Bahlburg H y Berndt J (2018) Provenance, Chronostratigraphic Framework and Volcanosedimentary facies architecture of the Permian-Triassic Mitu Group in Southern Peru, Central Andes. XIX Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, 4 p
- Paredes J (1972) Etude géologique de la feuille de Jauja au 1:100,000 (Andes du Pérou Central). Tesis 3° cycle, University of Science and Technology of Languedoc, Montpellier 1 mapa h-t, 79 p
- Petersen U (1965) Regional geology and major ore deposits of Central Perú. *Economic Geology* 60:407-476
- Pirajno F (1992) *Porphyry Systems and Skarns*. In: *Hydrothermal Mineral Deposits*. Springer, Berlin
- Pirajno F (2009) *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Netherlands. pp 355-516
- Quispe P (2020) *Geología, geoquímica y mineralogía del yacimiento portador de indio de Ayawilca, Pasco, Perú*. Pontificia Universidad Católica del Perú, 259 p
- Richards JP (2005) Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits, in Porter TM (eds) *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective: Porter Geoscience Consulting Publishing, Linden Park, South Australia* 1:259-274
- Richards JP (2018) A Shake-up in the porphyry world?. *Economic Geology* 113:1225-1233
- Ridley J (2013) *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>

- Ritterbush KA, Bottjer D, Corsetti FA, Rosas S (2014) New evidence on the role of siliceous sponges in ecology and sedimentary facies development in eastern panthalassa following the Triassic-Jurassic mass extinction. *Palaios* 29:652-668
- Ritterbush KA, Rosas S, Corsetti FA, Bottjer D, West AJ (2015) Andean sponges reveal long-term benthic ecosystem shifts following the end-Triassic mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 420:193-209
- Rivera N y Kobe H (1983) Evolución Geológica del Domo de Yauli. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 72:177-195
- Rosas S (2016) Profundización sedimentaria solo en parte de la cuenca Pucará (Perú Central) durante el Hetangiano-Sinemuriano. XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú 4 p
- Rosas S y Fontboté L (1995) Evolución sedimentológica del Grupo Pucará (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en un perfil SW-NE en el centro del Perú. *Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar Alberto Benavides*, 279
- Rosas S, Fontboté L, Tankard A (2007) Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Science* 24:1-24
- Rosas S, Ritterbush KA, Botjjer D (2014) La Formación Aramachay del Jurásico Inferior en el Centro del Perú: Distribución de Facies, Paleoecología y su Relación con la Formación de Cuerpos Minerales. XVII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, 4 p
- Rosenbaum G, Giles D, Saxon M, Betts PG, Weinberg RF, Duboz C (2005) Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru. *Earth and Planetary Science Letters* 239(1-2):18-32
- Rottier B, Kouzmanov K, Wälle M, Bendezú R, Fontboté L (2016) Sulfide Replacement Processes Revealed by Textural and LA-ICP-MS Trace Element Analyses: Example from the Early Mineralization Stages at Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology* 111:1347-1367
- Sahlström F, Arribas A, Dirks P, Corral I, Chan Z (2017) Mineralogical Distribution of Germanium, Gallium and Indium at the Mt Carlton High-Sulfidation Epithermal Deposit, NE Australia, and Comparison with Similar Deposits Worldwide. *Minerals* 7:1-28
- Salazar H (1983) Geología de los cuadrángulos de Matucana y Huarochiri, hojas 24-k y 25-k. *Boletín* 36. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú, 79 p
- Savard, D (unpublished data) UQAC (Université du Québec à Chicoutimi) FeS-1 data (2018). Available from: <https://sulfideslasericpms.wordpress.com/rm-available/>

- Scherrenberg AF, Holcombe RJ, Rosenbaum G (2014) The persistence and role of basin structures on the 3D architecture of the Marañón Fold-Trust Belt, Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 51:45-58
- Scherrenberg AF, Jacay J, Holcombe RJ, Rosenbaum G (2012) Stratigraphic variations across the Marañón Fold-Trust Belt, Peru: Implications for the basin architecture of the West Peruvian Trough. *Journal of South American Earth Sciences* 38:147-158
- Scherrenberg AF, Kohn BP, Holcombe RJ, Rosenbaum G (2016) Thermotectonic history of the Marañón Fold-Trust Belt, Peru: Insights into mineralisation in an evolving orogen. *Tectonophysics* 667:16-36
- Schwarz-Schampera U y Herzig P (2002) Indium: Geology, Mineralogy, and Economics. Springer, pp 33-34-167-168-169-170
- Seedorff E, Dilles J, Proffett J, Einaudi M, Zurcher L, Stavast W, Johnson D, Barton M (2005) Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *Economic Geology 100th Anniversary*:251-298
- Seifert T y Sandmann D (2006) Mineralogy and geochemistry of indium-bearing polymetallic vein-type deposits: implications for host minerals from the Freiberg district, Eastern Erzgebirge, Germany. *Ore Geology Reviews* 28:1-31
- Shanks W, Kimball B, Tolcin A, Guberman D (2017) Germanium and Indium, chap I. In: Schulz KJ, DeYoung JH, Jr Seal, RR II Bradley DC (eds) *Critical mineral resources of the United States Economic and environmental geology and prospects for future supply*: U.S. Geological Survey. Professional Paper 1802, pp 11 – 126, <http://dx.doi.org/10.3133/pp1802I>
- Sillitoe R (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology* 105:3-41
- Sillitoe R (2015) Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita* 50:767-793. doi: 10.1007/s00126-015-0614-z
- Soler P (1987) Variations des teneurs en éléments mineurs (Cd, In, Ge, Ga, Ag, Bi, Se, Hg, Sn) des minerais de Pb-Zn de la province polymétallique des Andes du Pérou Central. *Mineralium Deposita* 22:135-143
- Spikings R, Reitsma MJ, Boekhout F, Mišković A, Ulianov A, Chiaradia M, Gerdes A, Schaltegger U (2016) Characterization of Triassic Rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea. *Gondwana Research* 35:124-143
- Steinmann G (1929) *Geologie von Peru*. Karl Winter University, Heidelberg
- Takeo N, Sawaki T, Murakami H, Miyake K (1999) Fluid inclusion study of skarns in the Maruyama deposit, the Kamioka mine, central Japan. *Resource Geology* 49:233-242

- Terrones A (1949) La estratigrafía del distrito minero de Morococha. Sociedad Geológica del Perú. Volumen. Jub., parte 2, fasc. 8, 15 p
- Torres B, Melgarejo J, Torró L, Camprubi A, Castillo-Oliver M, Artiaga D, Campeny M, Tauler E, Jiménez-Franco A, Alfonso P, Arce-Burgoa O (2019) The Poopó Polymetallic Epithermal Deposit, Bolivia: Mineralogy, Genetic Constraints, and Distribution of Critical Elements. *Minerals* 9:1-25
- Torró L, Camprubí A, Proenza JA, León P, Stein HJ, Lewis JF, Nelson CE, Chavez C, Melgarejo J (2017) Re-Os and U-Pb geochronology of the Doña Amanda and Cerro Kiosko deposits, Bayaguana district, Dominican Republic: looking down for the porphyry Cu-Mo roots of the Pueblo Viejo-type mineralization in the island-arc tholeiitic series of the Caribbean. *Economic Geology* 112:829-853
- Torró L, Melgarejo J, Gemmrich L, Mollinedo D, Cazorla M, Martínez Á, Pujol-Solà N, Farré-de-Pablo J, Camprubí A, Artiaga D, Torres B, Alfonso P, Arce O (2019a) Spatial and Temporal Controls on the Distribution of Indium in Xenothermal Vein-Deposits: The Huari Huari District, Potosí, Bolivia. *Minerals* 9:1-35
- Torró L, Cazorla M, Melgarejo J, Camprubi A, Terrés M, Gemmrich L, Campeny M, Artiaga D, Torres B, Martínez A, Mollinedo D, Alfonso P, Arce-Burgoa O (2019b) Indium Mineralization in the Volcanic Dome-Hosted Ánimas-Chocaya-Siete Suyos Polymetallic Deposit, Potosí, Bolivia. *Minerals* 9:1-42
- Valverde P (2020) Distribución de metales estratégicos (In, Ge y Ga) en vetas y cuerpos de reemplazamiento polimetálicos del distrito de Morococha, Junín, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, 156 p
- Wafforn M, Steinmann M y Delgado A (2014) Technical Report for the Morococha Property, Yauli, Peru. Pan American Silver Corp
- Wilson SA, Ridley WI, Koenig AE (2002) Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 17:406-409
- Xu J, Cook N, Ciobanu C, Li X, Kontonikas-Charos A, Gilbert S, Lv Y (2020) Indium distribution in sphalerite from sulfide-oxide-silicate skarn assemblages: a case study of the Dulong Zn-Sn-In deposit, Southwest China. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-00972-y>

8. ANEXOS

Anexo A

Lista de muestras recolectadas y sus respectivas descripciones macroscópicas.

DISTRITO DE MOROCOCHA						
Muestra	Drill core	Profundidad	Grupo	Vena, zona	Minerales	Textura, secuencia
2019-MOR-41	DDH-MOR-16-212	425.30-425.40	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	anh, py, cpy, ef, serp, talco?	Zona de skarn, contacto con zona de anhidrita. Serpentina verdosa (talco?), abundante esfalerita oscura impregnada por calcopirita y pirita fina. Pirita y calcopirita también en vetas que han cortado la esfalerita.
2019-MOR-42	DDH-MOR-16-212	428.90-429.12	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	anh, po, ef, py, cpy, talco?	Zona de pirrotina casi masiva que grada lateralmente hacia esfalerita negra. Sobre ambos se observa superposición de pirita con calcopirita (?). Además, presencia de talco (?) y anhidrita intersticial
2019-MOR-43	DDH-MOR-16-212	429.12-429.22	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	po, ef, py, cpy	Pirrotina con esfalerita negra intersticial. Pirita en parches como reemplazo y relleno de vetillas. Pirita asociada con calcopirita y esfalerita. Posiblemente dos generaciones de esfalerita.

DISTRITO DE MOROCOCHA						
Muestra	Drill core	Profundidad	Grupo	Vena, zona	Minerales	Textura, secuencia
2019-MOR-44	DDH-MOR-16-212	429.30-429.40	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	serp, mt, ef, py, cpy, po, talco	Skarn de serpentina y magnetita con posterior pirrotina que reemplaza acompañada de esfalerita. Además, parches de pirita con calcopirita. Todo lo descrito cortado por vetillas de talco.
2019-MOR-45	DDH-MOR-16-212	433.95-434.15	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	anh, serp, talc, py, cpy	Cuerpo de anhidrita (roca de caja). Zona de reemplazo por un mineral verde (serpentina + talco) atravesado por venillas de pirita y calcopirita. Pirita como impregnación en los minerales de skarn. La venilla de pirita-calcopirita viene acompañada de talco (alteración retrógrada). Talco: estadio de alteración filica (fase B).
2019-MOR-46	DDH-MOR-16-212	460.50-460.60	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	serp, talco, epi, anh, cpy, py	Skarn de serpentina-talco, eventualmente con epidota, cortada por una veta de 15 a 40mm de potencia con relleno de anhidrita gruesa color lila, abundante calcopirita intersticial y menor presencia de pirita.
2019-MOR-47	DDH-MOR-16-212	470.10-470.20	Chambará	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	po, ef, cpy, mt	Mejor descripción una vez cortada (muy oxidada)

DISTRITO DE MOROCOCHA						
Muestra	Drill core	Profundidad	Unidad estratigráfica	Vena, zona	Minerales	Textura, secuencia
2019-MOR-48	DDH-MOR-16-212	479.75-479.80	Volcánico Catalina (Mitu)	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	py, cpy, cz, ser	Roca con intensa alteración fílica (granos aparentemente finos; volcánico?). Atravesada por vetillas de pirita y calcopirita, cortada posteriormente por vetillas de cuarzo.
2019-MOR-49	DDH-MOR-16-212	493.55-493.70	Volcánico Catalina (Mitu)	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	cz, py, ser	Contacto entre volcánico e intrusivo, cortado por vetas de cuarzo y pirita. En el volcánico, el halo de alteración sericítica es más notorio.
2019-MOR-50	DDH-MOR-16-212	498.20-498.30	Volcánico Catalina (Mitu)	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	cz, py, cpy	Veta de 10cm de espesor, con cuarzo-pirita y menor cantidad de calcopirita.
2019-MOR-51	DDH-MOR-16-212	500.15-500.25	Volcánico Catalina (Mitu)	skarn de Ombla Inferior, asociado a intrusivo de Toromocho	-	Vetilleo tipo D (vetillas rectilíneas). Roca intrusiva de grano medio.
2019-MOR-52	DDH-MOR-12-155	410.10-410.25	Chambará	skarn de Porvenir	serp, mt, ef, py, cpy, CBs	Skarn de serpentina-magnetita con fuerte reemplazo por esfalerita marrón, con menor calcopirita y pirita. Todo cortado por una venilla de carbonato blanco (5 a 10mm de potencia).

DISTRITO DE MOROCOCHA						
Muestra	Drill core / Área	Profundidad	Grupo	Vena, zona	Minerales	Textura, secuencia
2019-MOR-53	DDH-MOR-12-155	410.35-410.40	Chambará	skarn de Porvenir	serp, mt, ef, py, cpy	Similar a la muestra anterior, con pirita y calcopirita más abundante que esfalerita.
2019-MOR-54	DDH-MOR-12-155	420.10-420.20	Chambará	skarn de Porvenir	serp, mt, cpy, ef, CBs	Skarn de serpentina-magnetita con lentes discordantes (entre las vetas y zonas de reemplazo). Calcopirita y esfalerita intersticial a la magnetita. Fase tardía de vetilleo con carbonatos.
KMO-6-245	Manto norte	-	Chambará	Manto Italia, asociado al intursivo de Codiciada	py, po, ef, gn, cz	Pirita idiomórfica con agregados de pirrotina, esfalerita y galena. Posiblemente cuarzo.
KMO-6-246	Pillar 34	-	Chambará	Manto Italia, asociado al intursivo de Codiciada	py, po, ef, gn, cz	Agregados de pirita, pirrotina, esfalerita y galena reemplazando a la roca encajonante a lo largo de la estratificación. Esfalerita también como relleno de vetillas. Posiblemente cuarzo.
KMO-6-293	Tajo 985, Pillar 43	Nivel 375	Chambará	Manto Italia, asociado al intursivo de Codiciada	py, ef, gn, cpy, po	Pirita reemplazada por esfalerita y calcopirita, localmente por galena (?). Posiblemente pirrotina (débil magnetismo en algunas zonas de la muestra).
KMO-6-305	Rampa 034	-	Chambará	Manto Italia, asociado al intursivo de Codiciada	py, po, ef, cpy, gn, cz	Vena rellena por pirita, pirrotina (débil magnetismo), esfalerita, calcopirita y galena. Presencia de cuarzo hacia el núcleo de la vena.

DISTRITO DE MOROCOCHA						
Muestra	Drill core / Área	Profundidad	Grupo	Vena, zona	Minerales	Textura, secuencia
MO-05-KK-06	-	-	-	Manto Italia - contacto	po, ef, gn	Pirrotina reemplazada por esfalerita y galena. Toda la mieneralización ha reemplazado a la roca caja (carbonatos).
MO-05-KK-07	-	-	-	Manto Italia	po, ef, cpy	Pirrotina reemplazada por esfalerita y calcopirita.



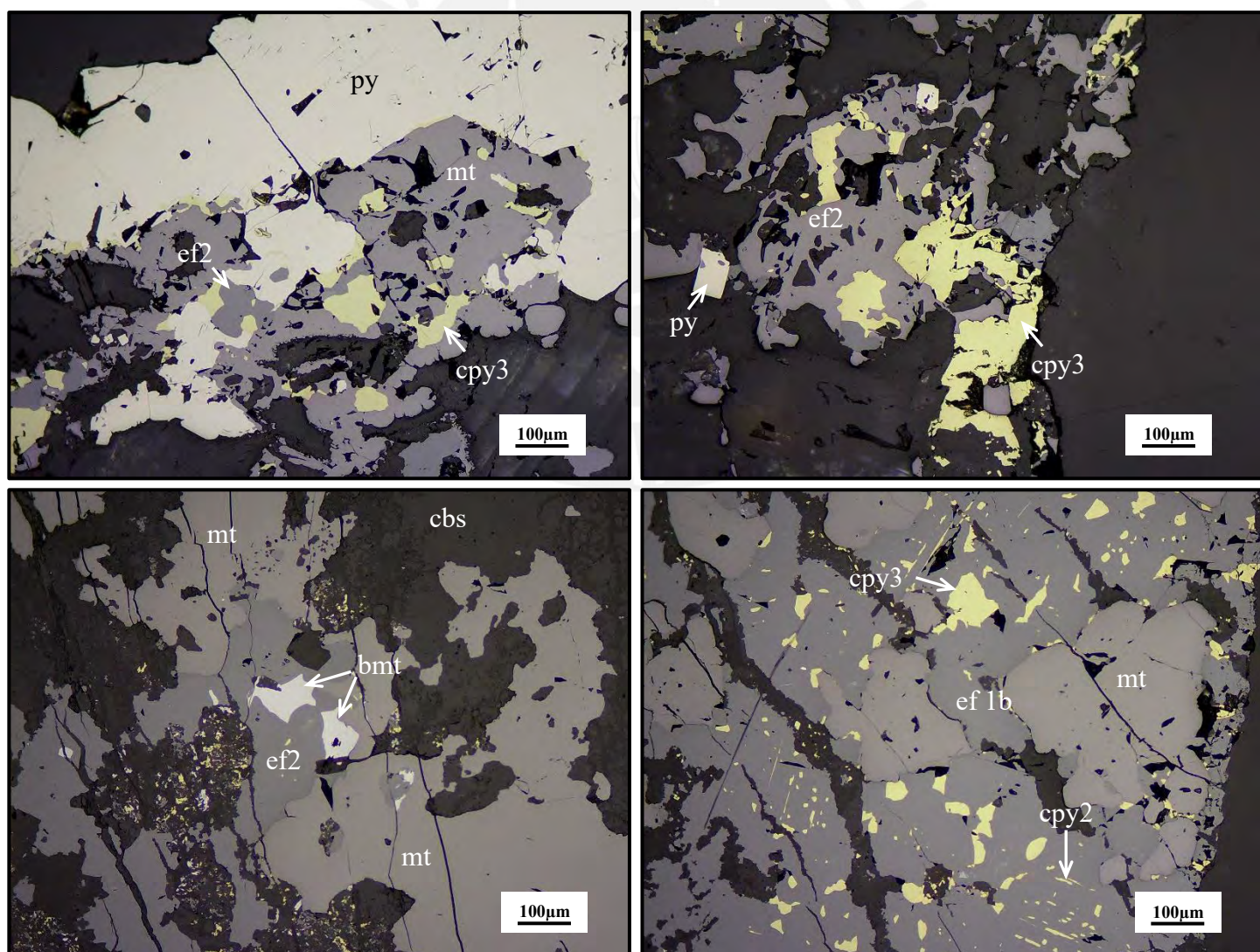
Anexo B

Fichas individuales con la petrografía de cada sección pulida estudiada.

2019-MOR-41

Minerales: magnetita + esfalerita (1b) + esfalerita (2) + calcopirita (3) + pirita + bismutinita ± calcopirita (2)

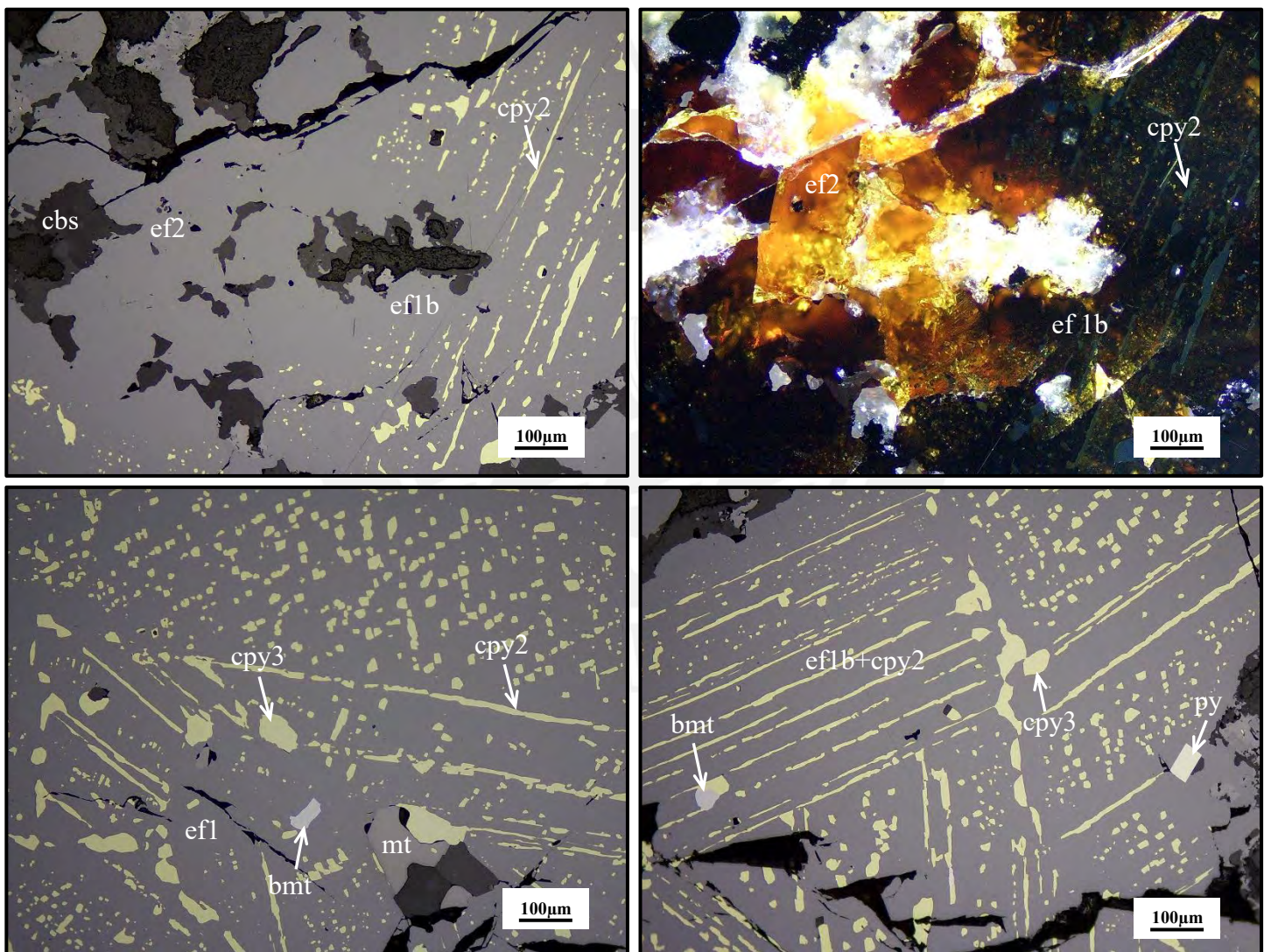
Agregados anhedrales de magnetita en matriz de carbonatos, con bordes y centros reemplazados por pirita subhedral a anhedral, esfalerita (1b), esfalerita (2) y, en menor proporción, calcopirita (3). Además, la esfalerita (1b) presenta finas diseminaciones orientadas de calcopirita (2) con reemplazamiento por calcopirita (3) y bismutinita.



2019-MOR-42

Minerales: esfalerita (1b) + calcopirita (2) + esfalerita (2) + calcopirita (3) ± bismutinita ± pirita
± magnetita

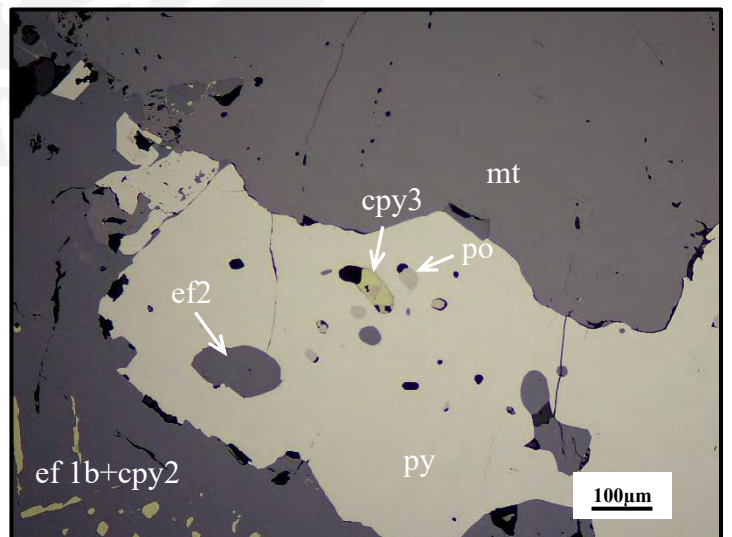
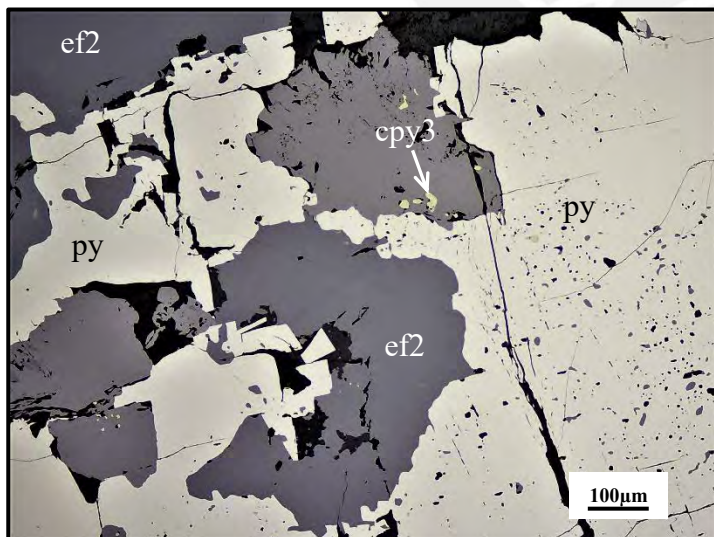
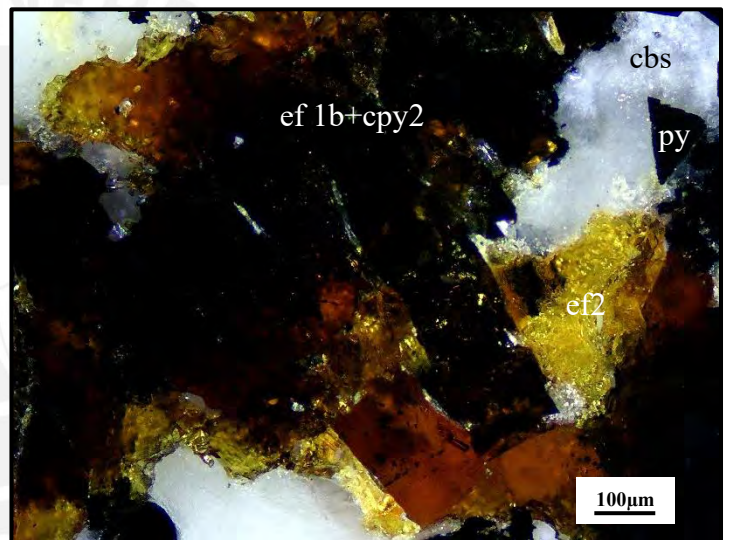
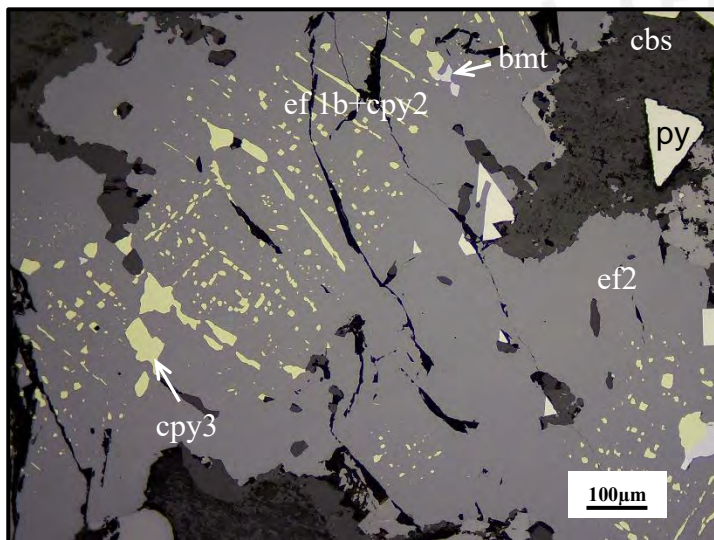
Agregados anhedrales de esfalerita (1b) con finas diseminaciones orientadas de calcopirita (2)
con relictos de magnetita y pirita; y reemplazados por esfalerita (2), bismutinita, calcopirita (3)
y carbonatos.



2019-MOR-43

Minerales: esfalerita (1b) + calcopirita (2) + pirita + magnetita + esfalerita (2) + calcopirita (3)
± bismutinita ± pirrotina

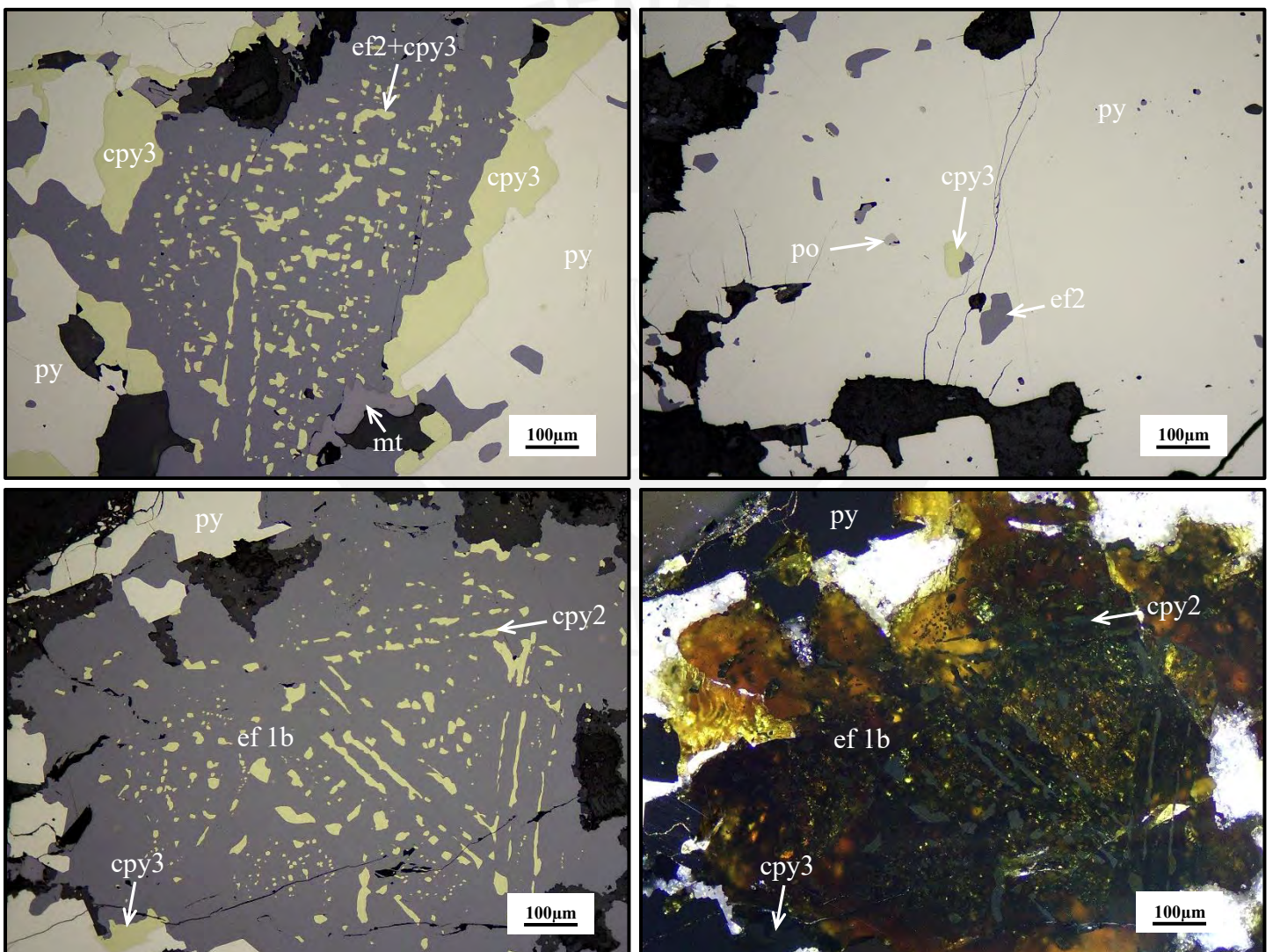
Cristales de pirita y magnetita reemplazados por agregados de esfalerita (1b) y esfalerita (2).
Algunas piritas presentan relictos de pirrotina y posidades rellenas por esfalerita (2). Además,
la esfalerita (1b) presenta finas diseminaciones orientadas de calcopirita (2) con
reemplazamiento por calcopirita (3) y bismutinita.



2019-MOR-44

Minerales: esfalerita (1b) + calcopirita (2) + pirita + calcopirita (3) + magnetita + esfalerita (2)
± pirrotina

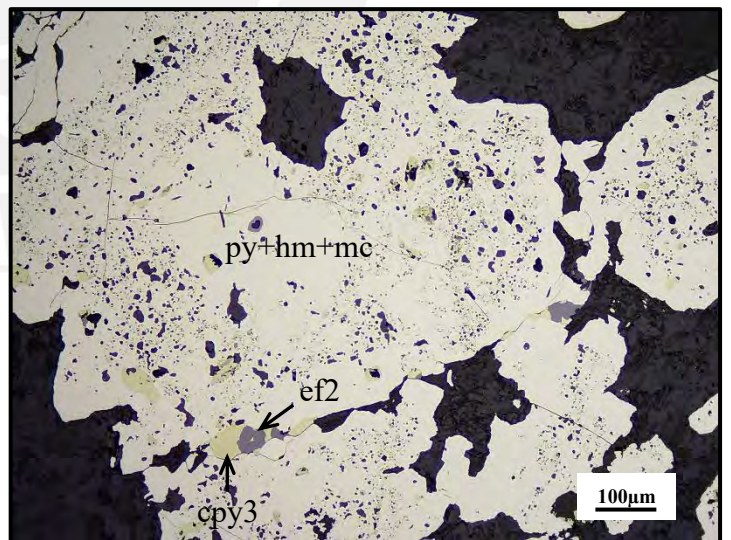
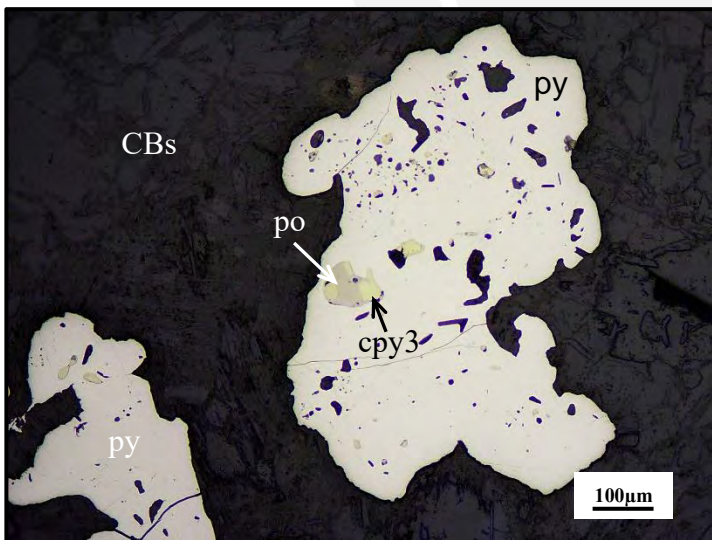
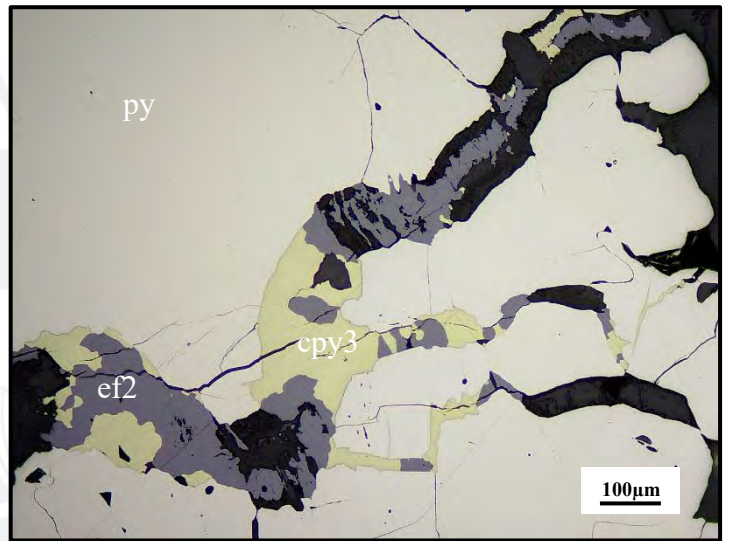
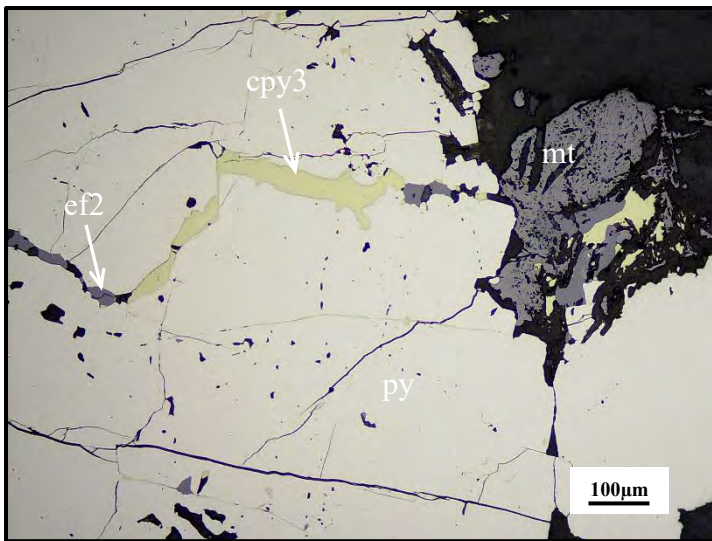
Cristales anhedrales de magnetita reemplazados por pirita, esfalerita (1b) y esfalerita (2). Algunos cristales de pirita presentan relictos de pirrotina y posidades rellenas por esfalerita (2) y calcopirita (3). La esfalerita (1b) presenta finas disseminaciones orientadas de calcopirita (2) con reemplazamiento por calcopirita (3).



2019-MOR-45

Minerales: pirita + esfalerita (2) + calcopirita (3) ± magnetita ± pirrotina ± hematita ± marcasita

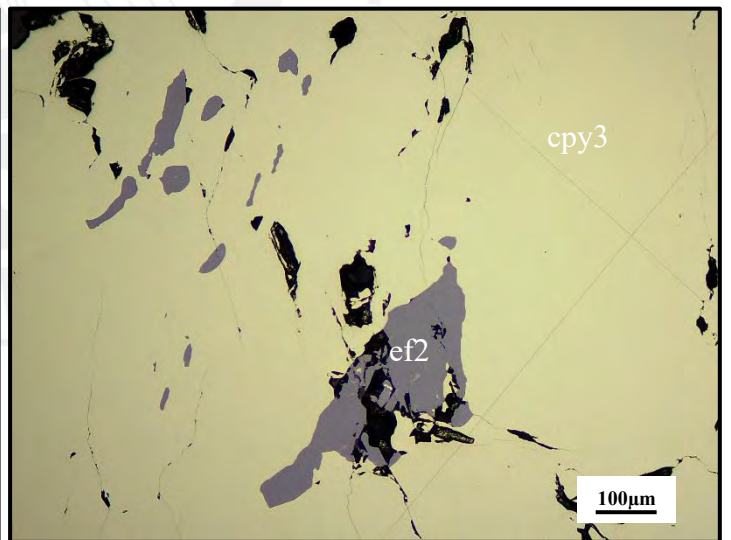
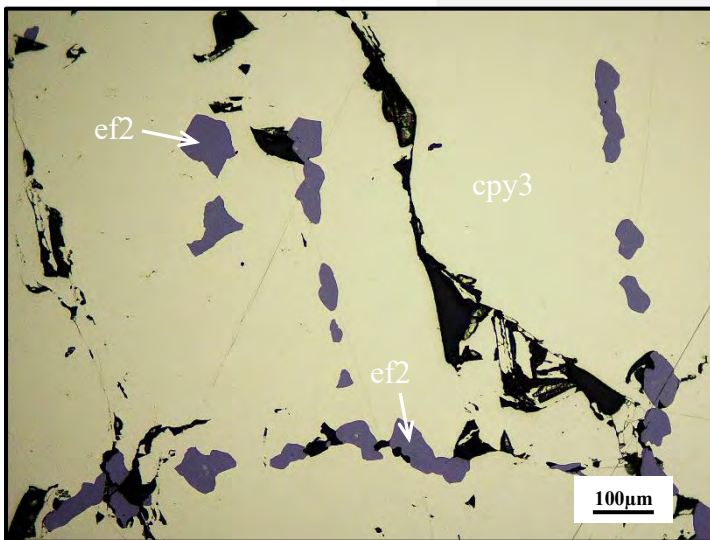
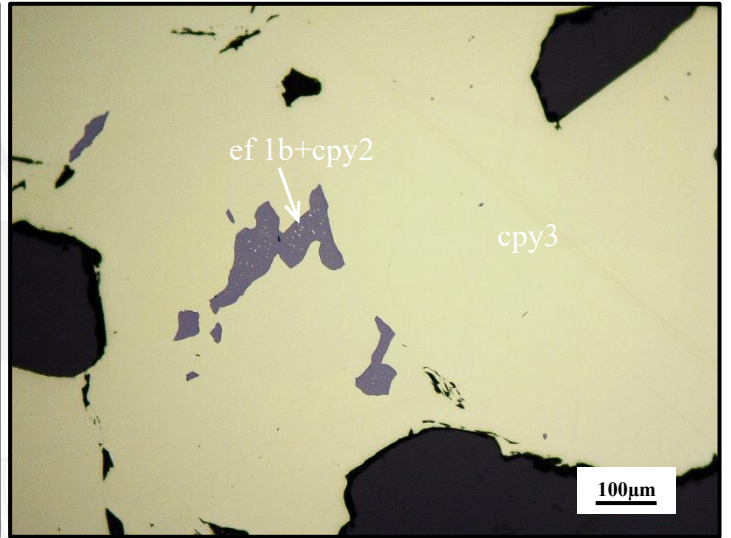
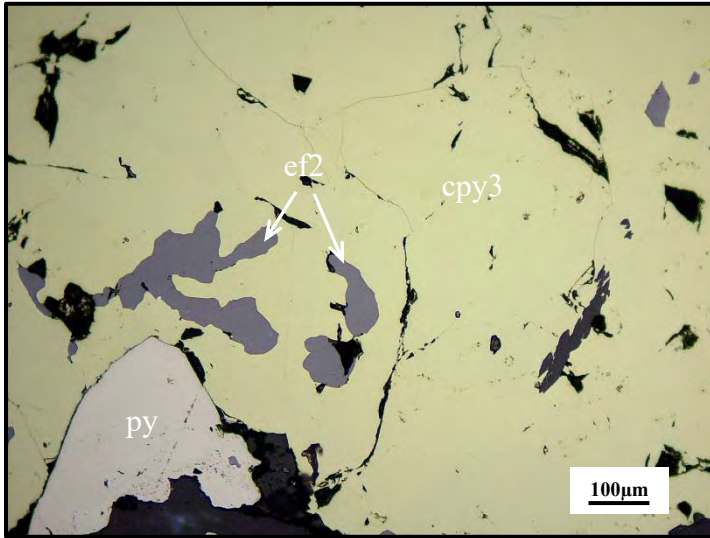
Cristales anhedrales de pirita con relictos de magnetita y pirrotina, y microfracturas y porosidades rellenas por esfalerita (2) y calcopirita (3). Por sectores la pirita se presenta con hematita y marcasita.



2019-MOR-46

Minerales: calcopirita (3) + esfalerita (2) ± pirita ± esfalerita (1b) ± calcopirita (2)

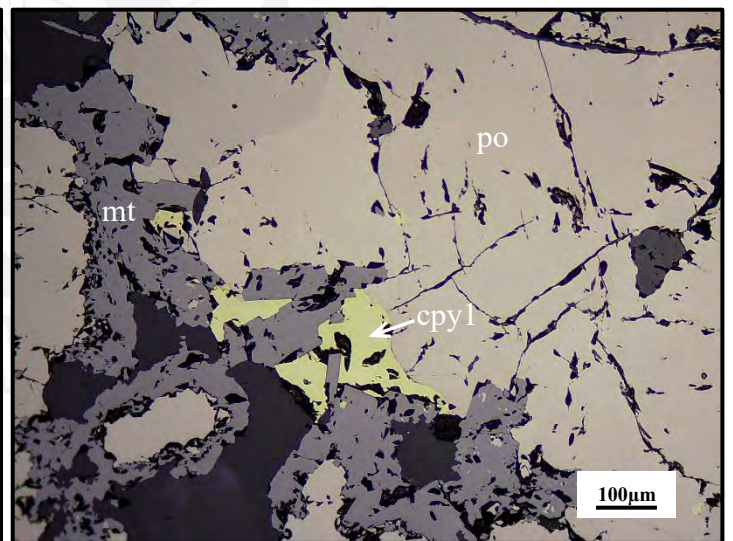
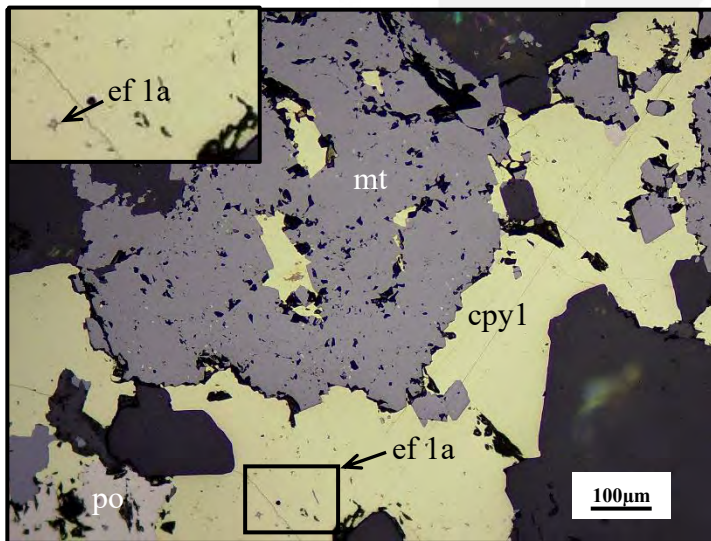
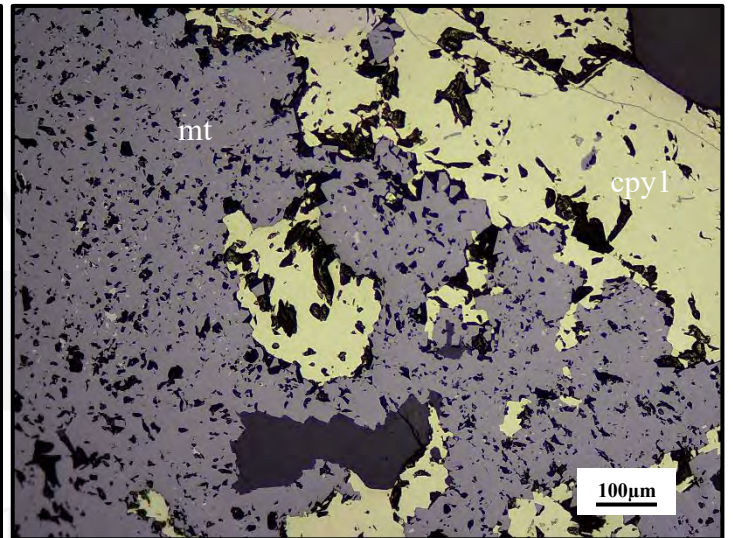
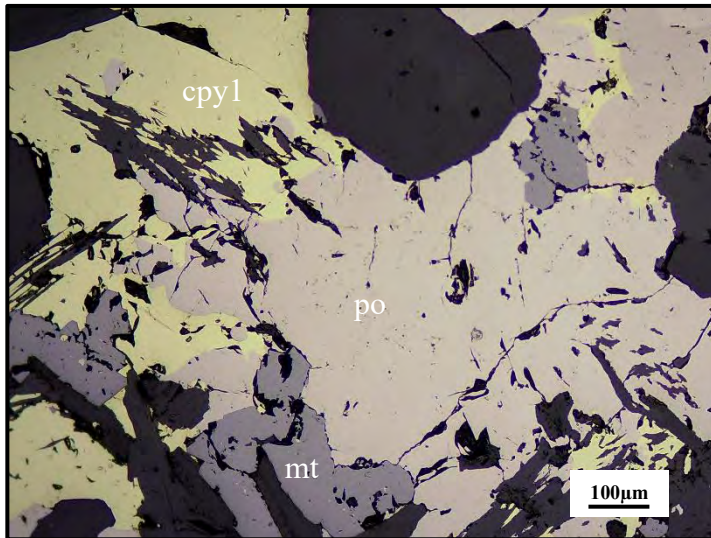
Calcopirita (3) masiva con relictos de pirita, esfalerita (1b) y esfalerita (2), esta última con finas diseminaciones orientadas de calcopirita (2).



2019-MOR-47

Minerales: calcopirita (1) + magnetita + pirrotina ± esfalerita (1a)

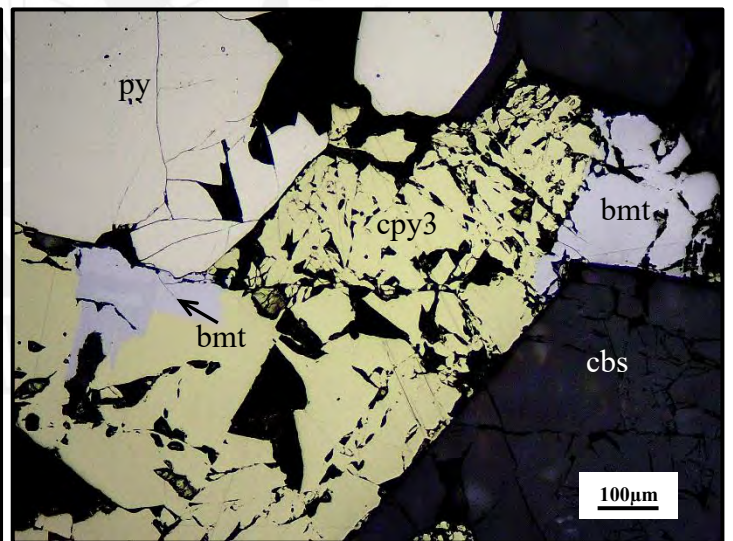
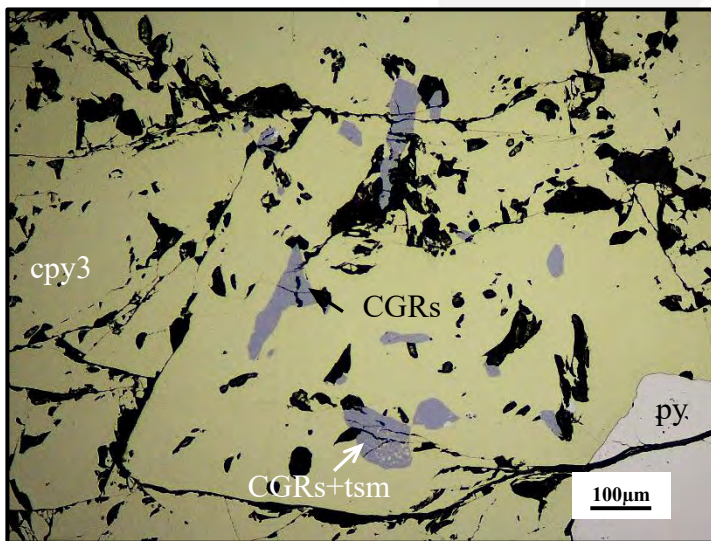
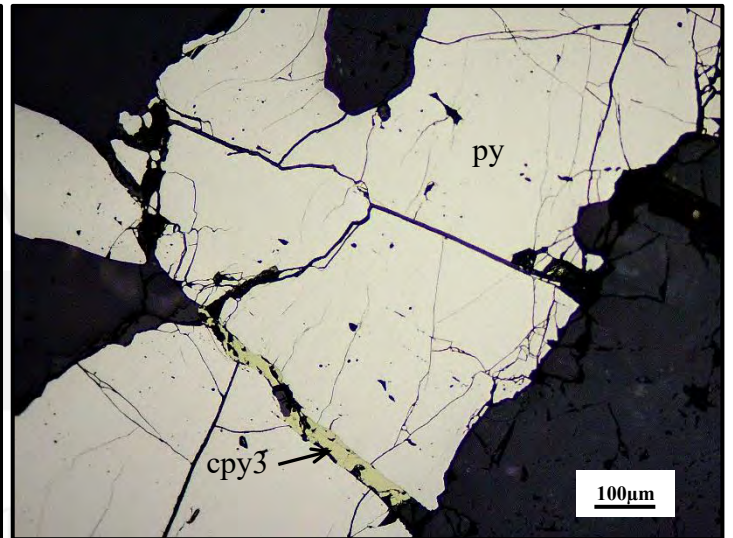
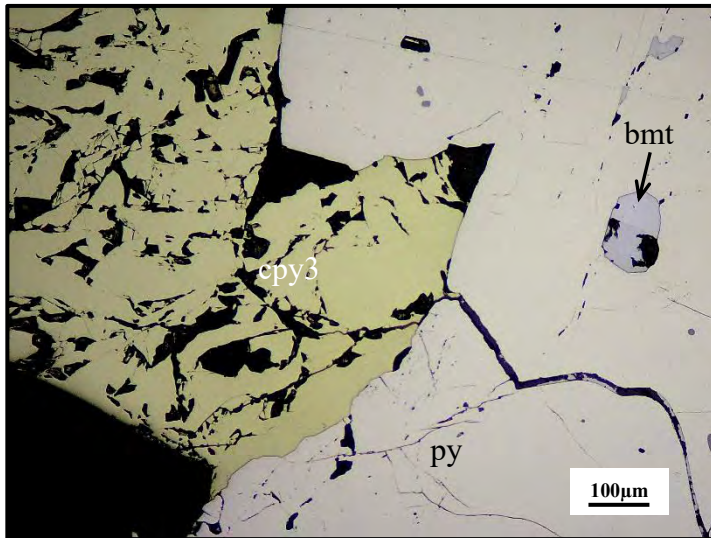
Agregados de magnetita reemplazados por pirrotina y calcopirita (1). Por sectores, la calcopirita (1) presenta micro inclusiones de esfalerita (1a) con forma de estrellas.



2019-MOR-48

Minerales: calcopirita (3) + pirita \pm bismutinita \pm cobres grises \pm tsumoíta

Cristales anhedrales y microfracturados de pirita, a manera de vetillas, reemplazados por calcopirita (3) y, ésta a su vez reemplazada por cobres grises, tsumoíta y bismutinita.

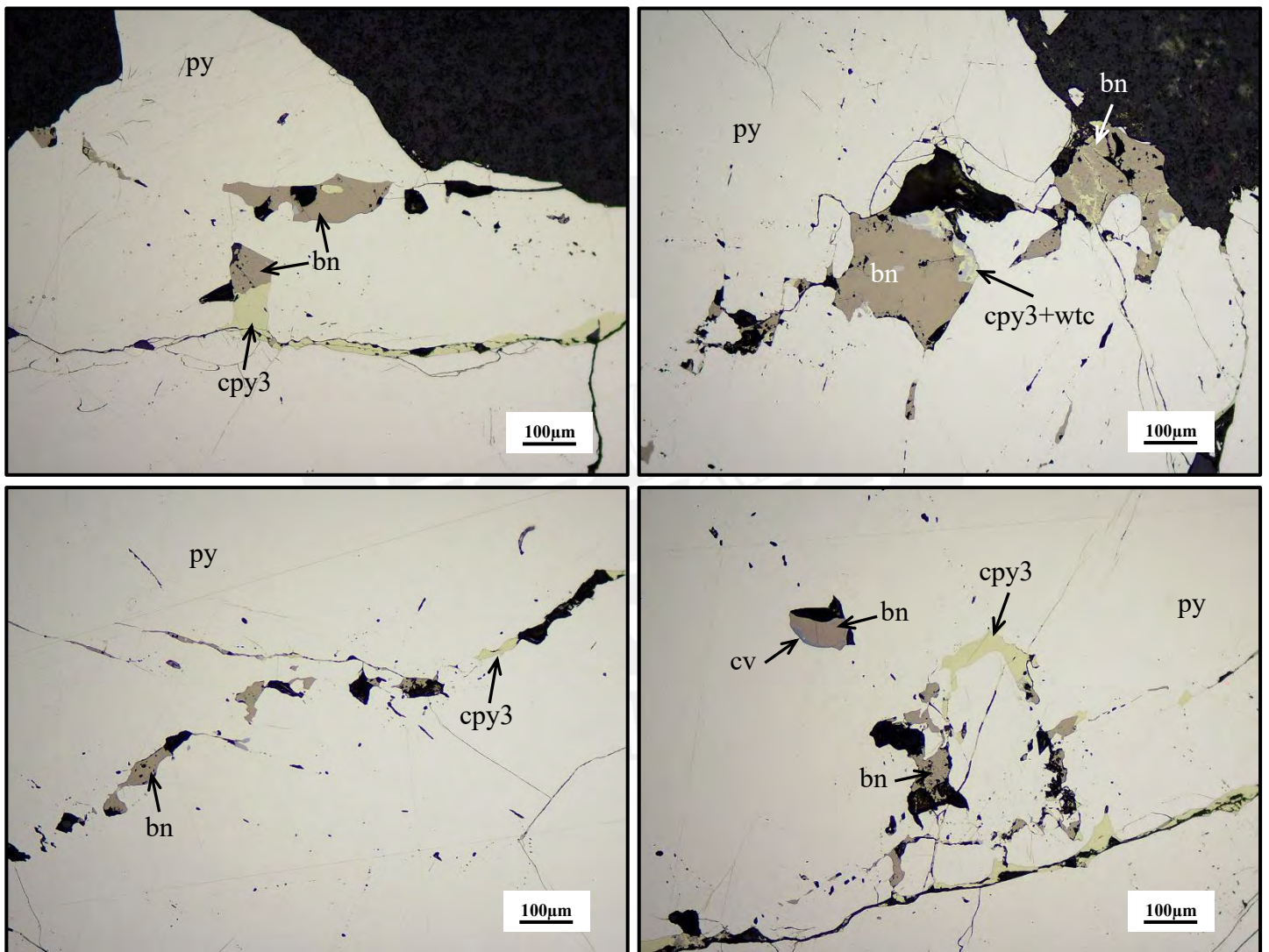


2019-MOR-50

Minerales: pirita + calcopirita (3) + bornita ± wittichenita ± covelina

Cristales anhedrales y microfracturados de pirita reemplazados por bornita y calcopirita (3).

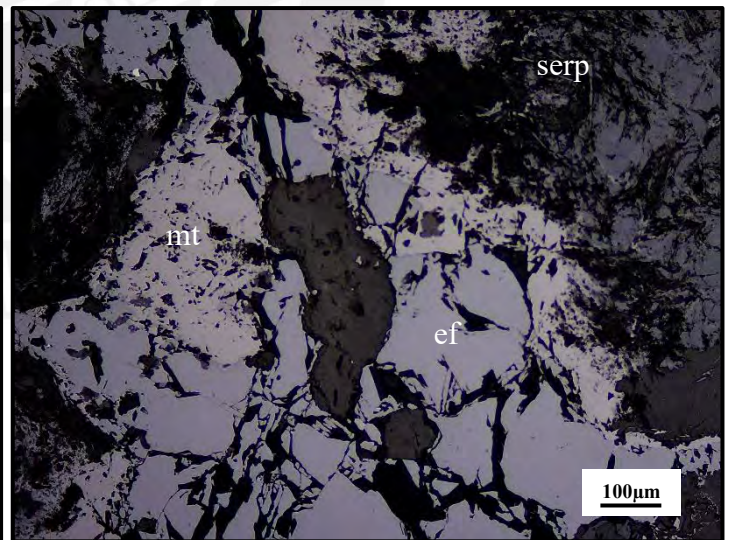
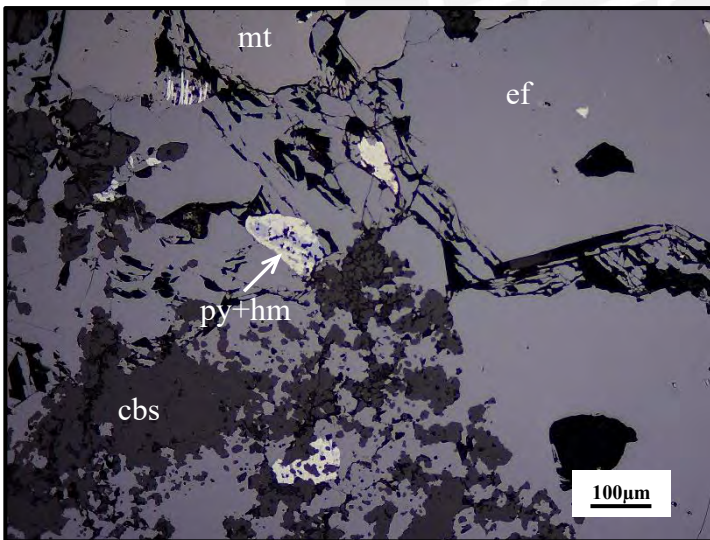
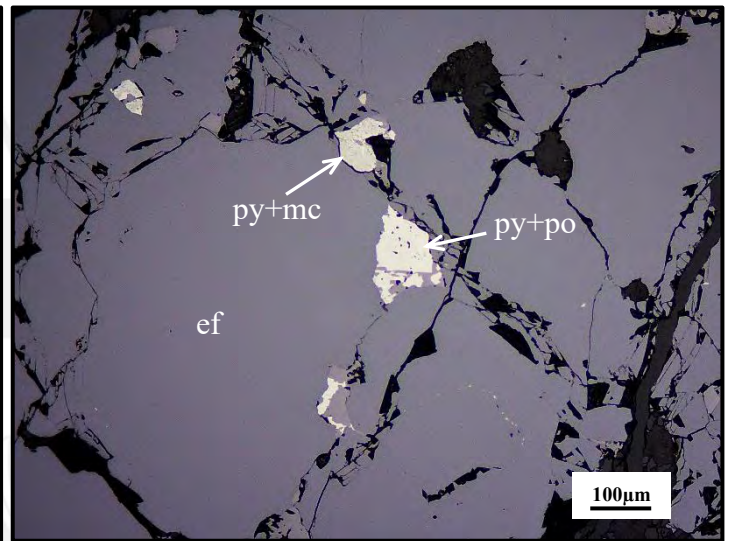
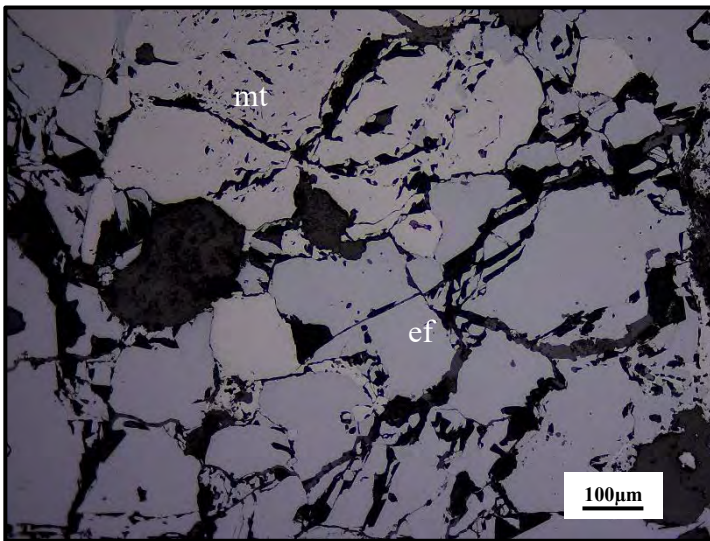
Algunos cristales de bornita muestran reemplazamiento por wittichenita e incipiente alteración a covelina.



2019-MOR-52

Minerales: esfalerita + magnetita ± pirita ± hematita ± marcasita

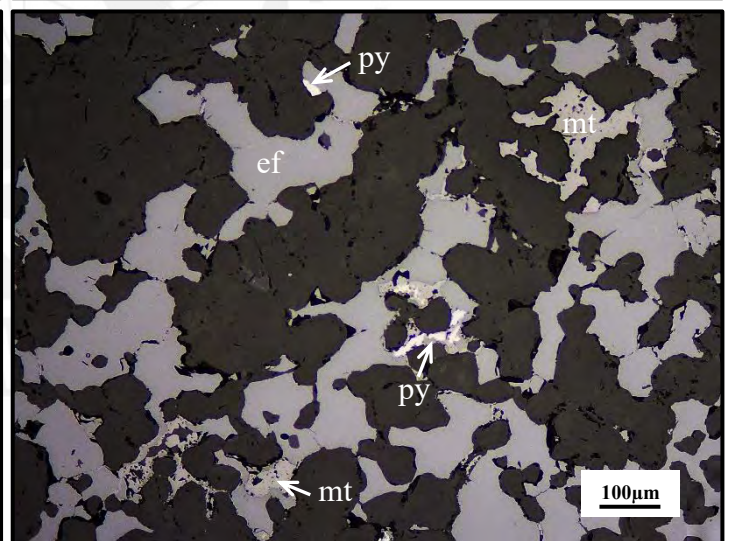
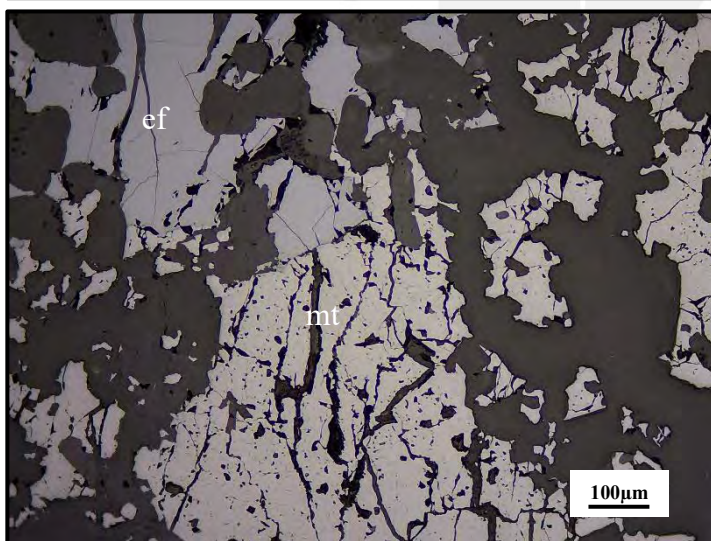
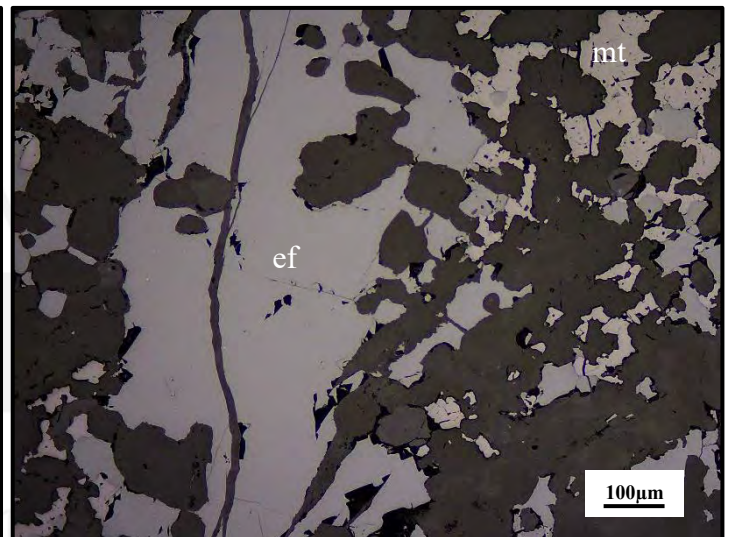
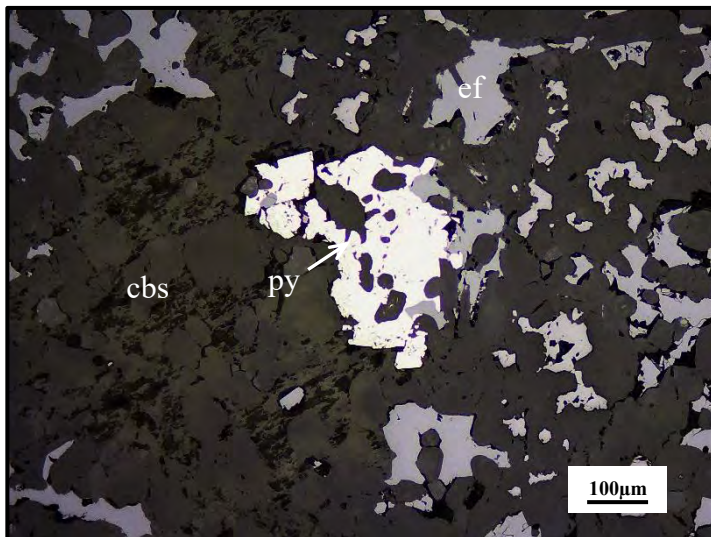
Agregados anhedrales de magnetita, en matriz de serpentina y carbonatos, reemplazados por esfalerita. Por sectores se observa inclusiones de pirita, con relictos de pirrotina, reemplazados por marcasita y hematita.



2019-MOR-54

Minerales: esfalerita + magnetita + pirita

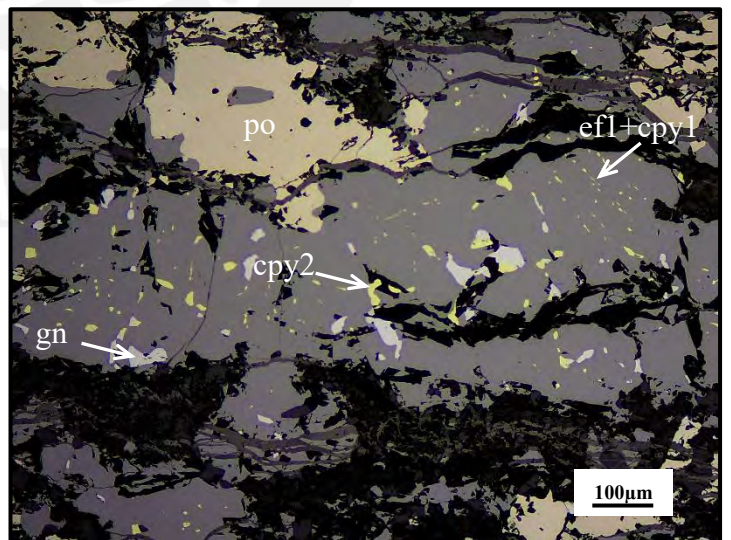
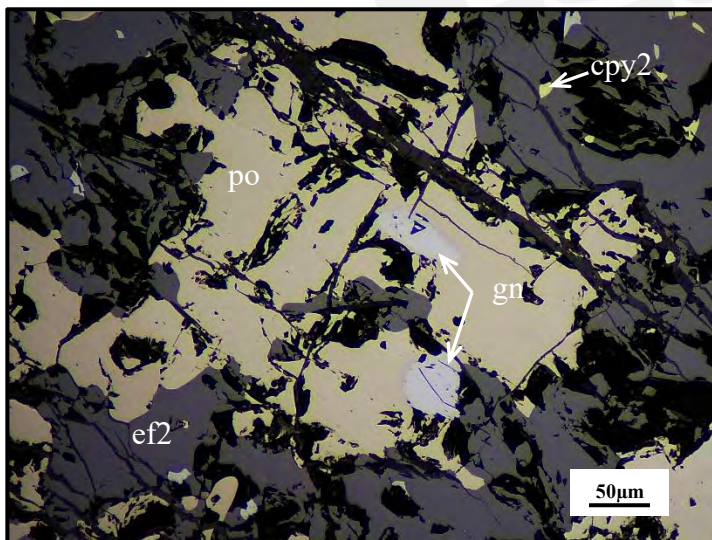
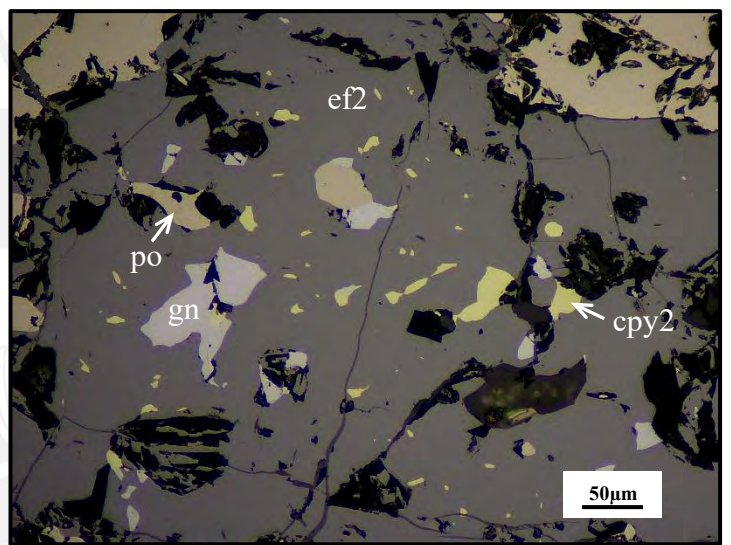
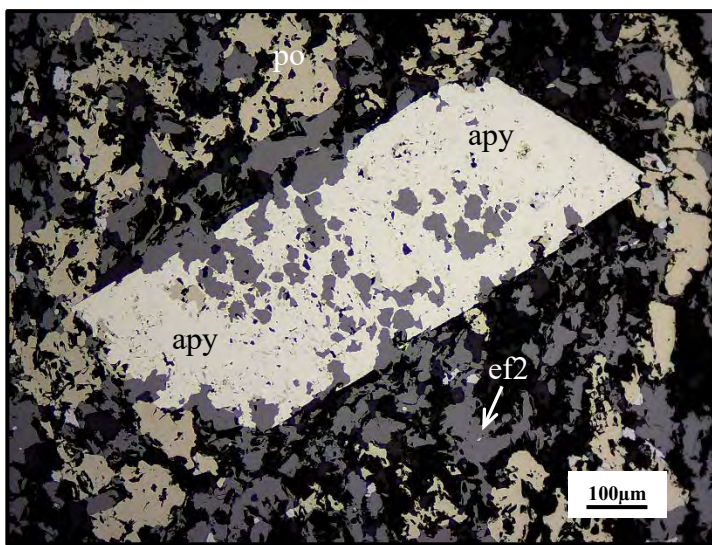
Agregados anhedrales de magnetita, entre intersticios de serpentina y carbonatos, reemplazados por esfalerita y escasa pirita.



KMO-06-245-A

Minerales: pirrotina + esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) + arsenopirita ± calcopirita (1) ± esfalerita (1)

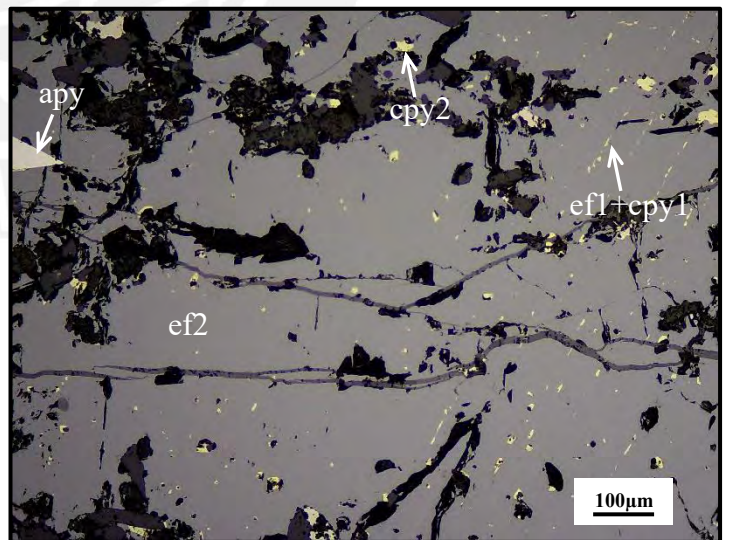
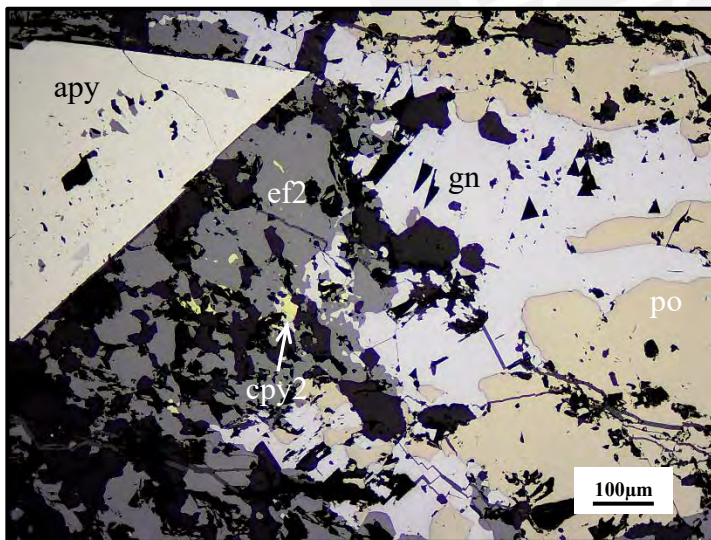
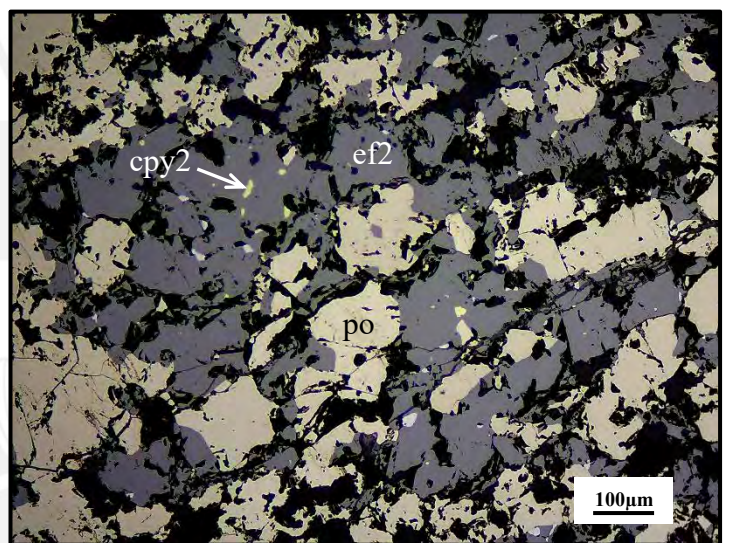
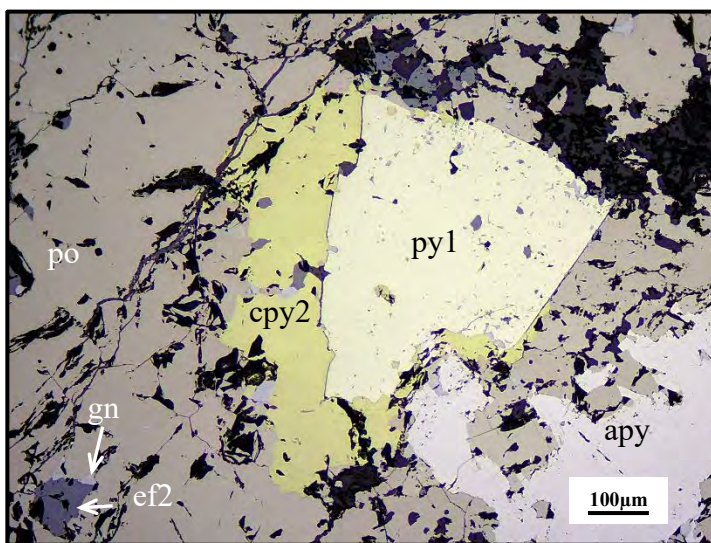
Cristales de arsenopirita y pirrotina reemplazados por esfalerita (1), esfalerita (2), calcopirita (2) y galena. Además, la esfalerita (1) presenta finas diseminaciones orientadas de calcopirita (1).



KMO-06-245-B

Minerales: pirrotina + esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) + arsenopirita ± pirita (1) ± calcopirita (1) ± esfalerita (1)

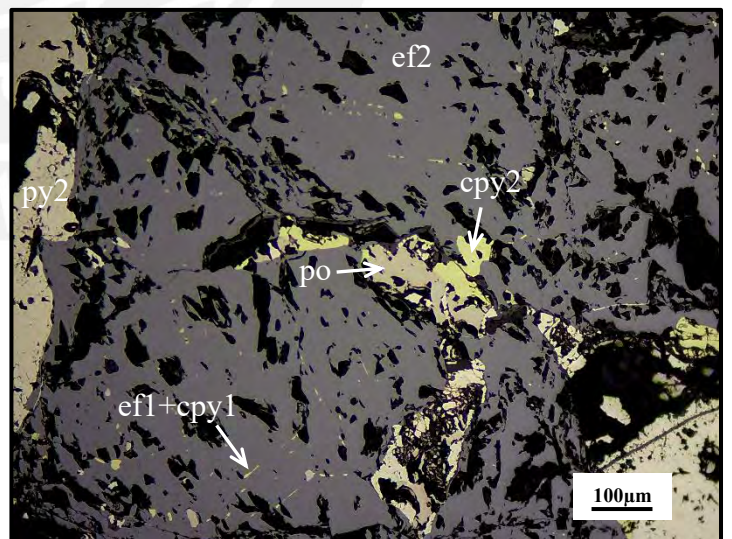
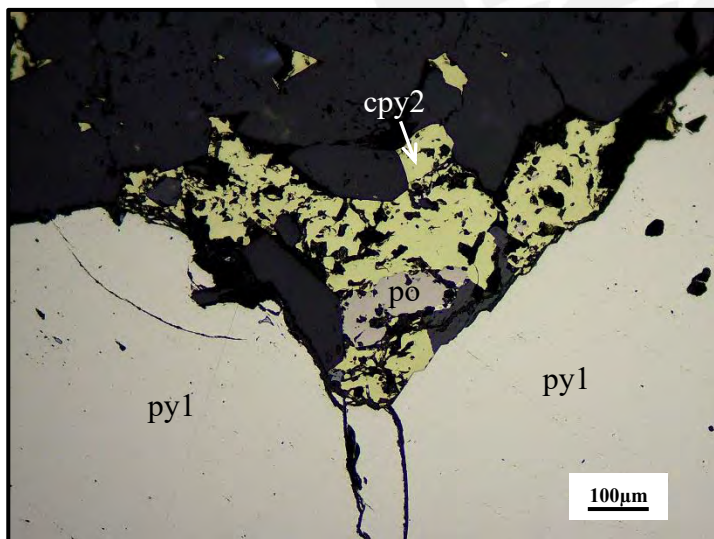
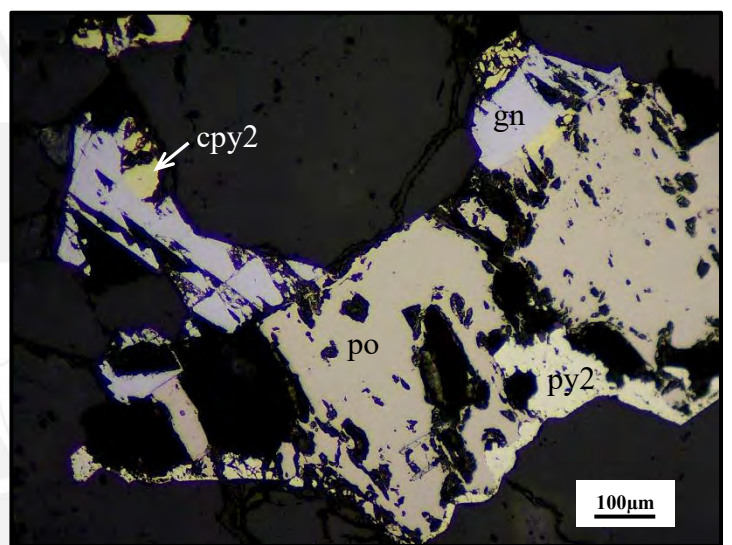
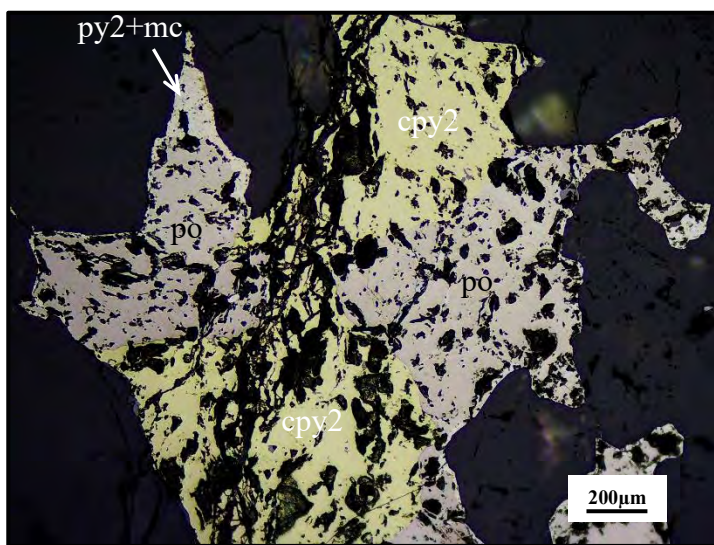
Cristales de arsenopirita y pirrotina reemplazados por pirita (1), esfalerita (1), esfalerita (2), calcopirita (2) y galena. Además, la esfalerita (1) presenta finas diseminaciones orientadas de calcopirita (1).



KMO-06-246-A

Minerales: pirrotina + esfalerita (2) + pirita (1) + pirita (2) + calcopirita (2) + galena ± esfalerita (1) ± calcopirita (1) ± marcasita

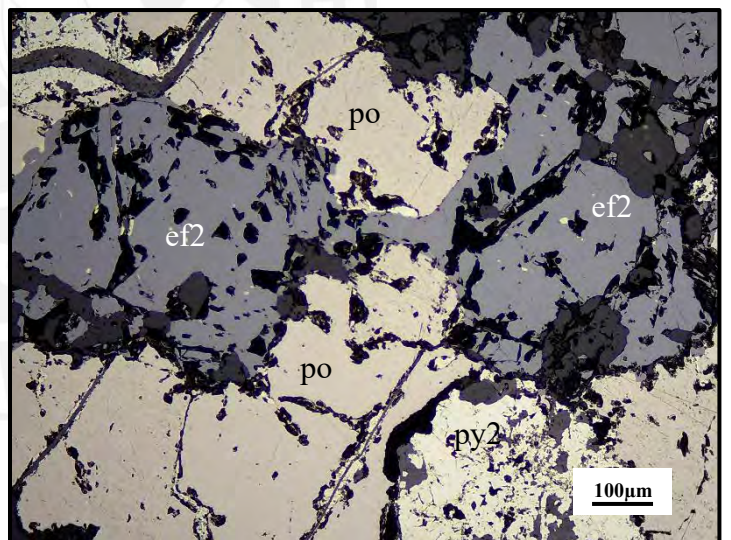
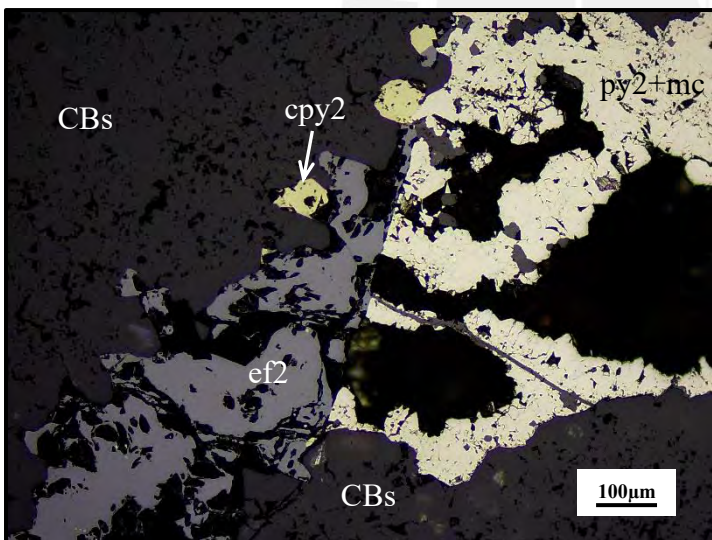
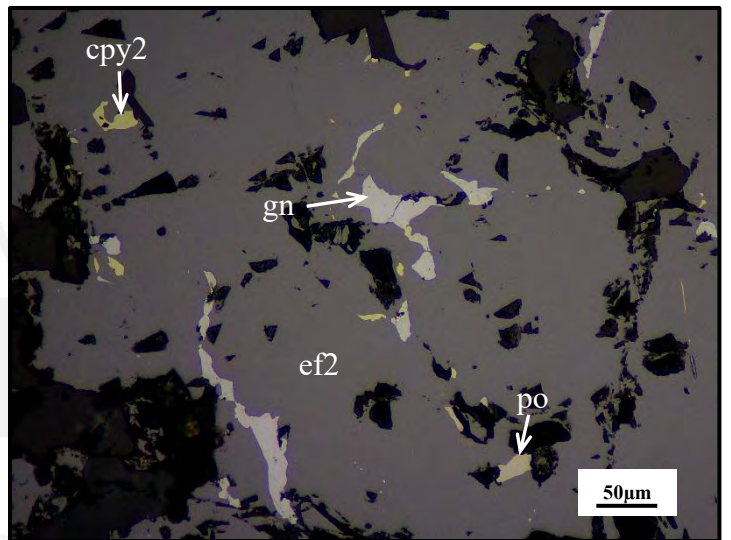
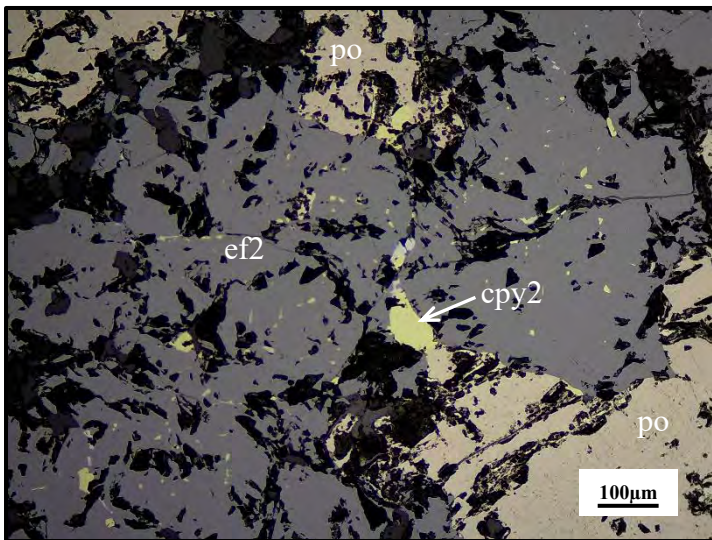
Agregados de pirrotina reemplazados por pirita (1), pirita (2) con marcasita, esfalerita (1), esfalerita (2), calcopirita (2) y galena. Además, la esfalerita (1) presenta finas disseminaciones orientadas de calcopirita (1).



KMO-06-246-B

Minerales: pirrotina + pirita (2) + esfalerita (2) + calcopirita (2) + galena ± marcasita

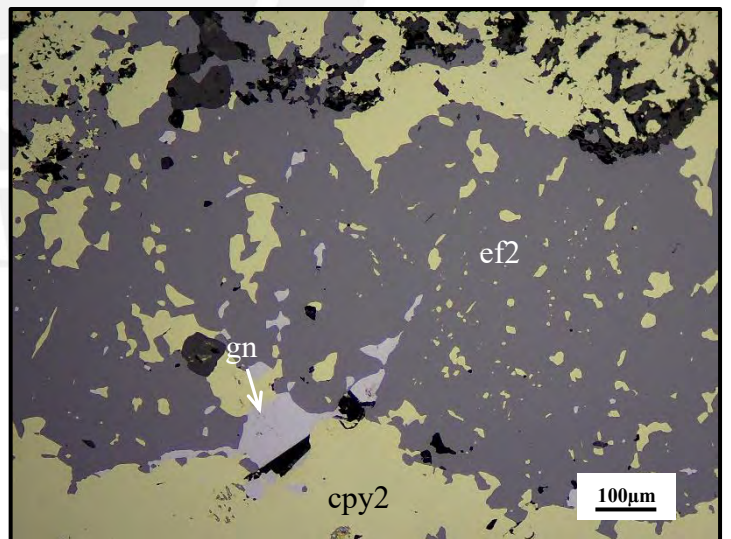
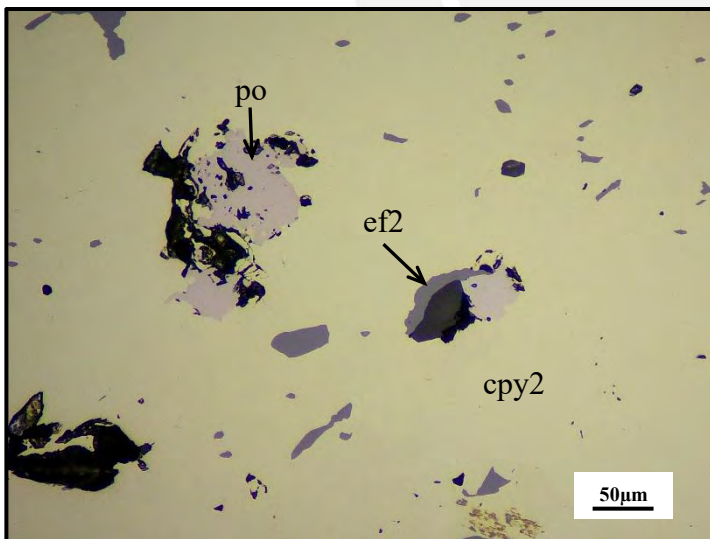
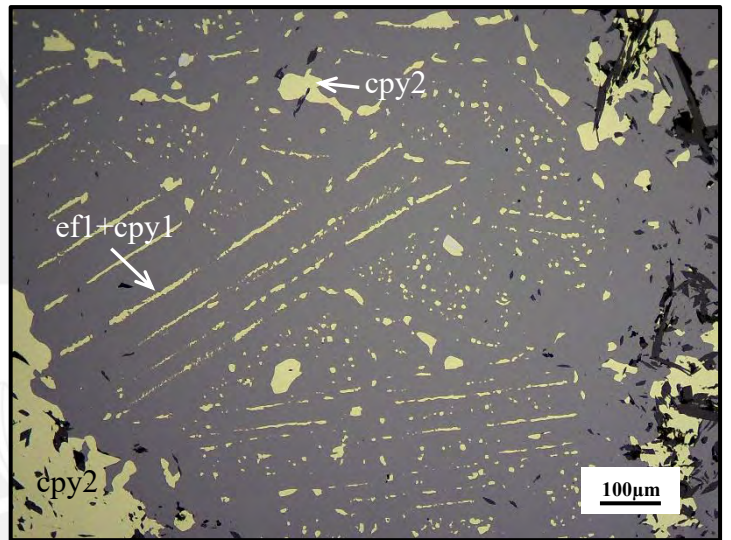
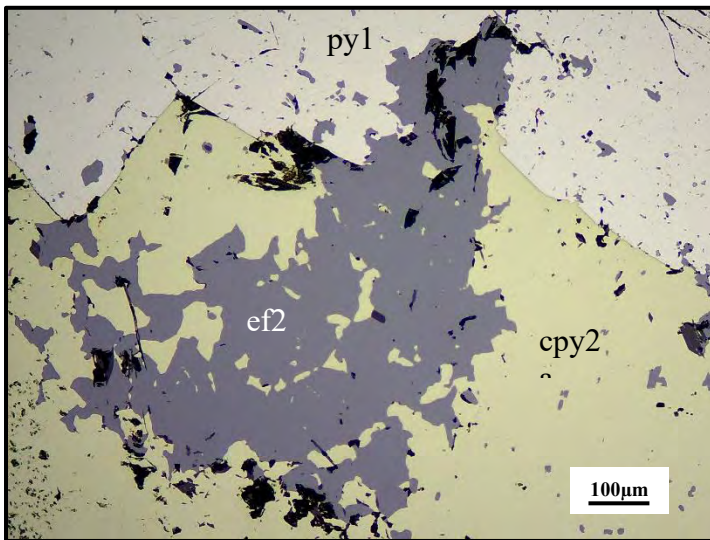
Agregados de pirrotina reemplazados pirita (2), esfalerita (2), calcopirita (2) y galena. Además, la esfalerita (2) presenta reemplazo por pirita (2) con marcasita.



KMO-06-293

Minerales: pirita (1) + esfalerita (1) + calcopirita (2) + calcopirita (1) + esfalerita (2) ± pirrotina
± galena

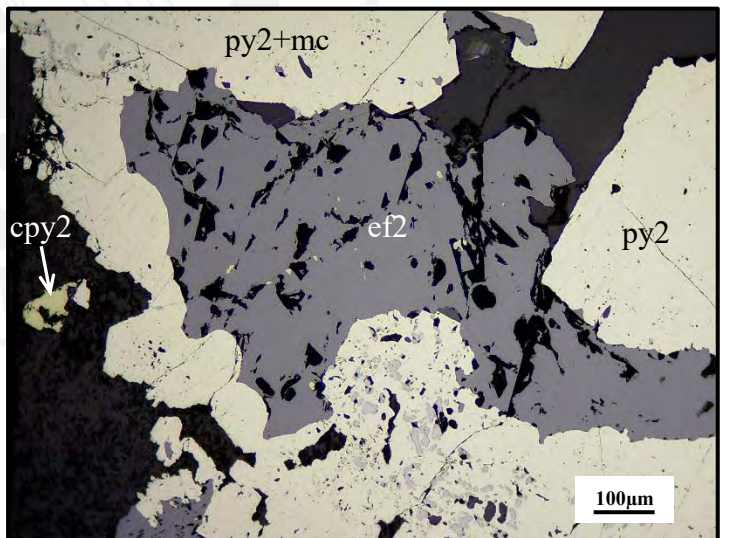
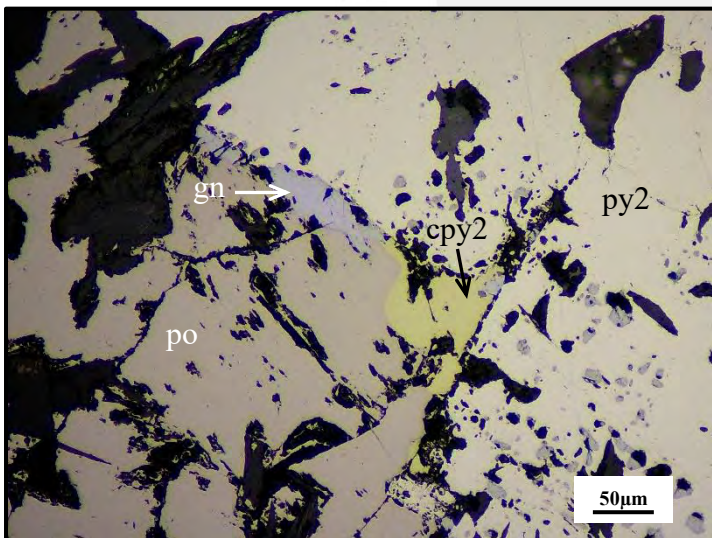
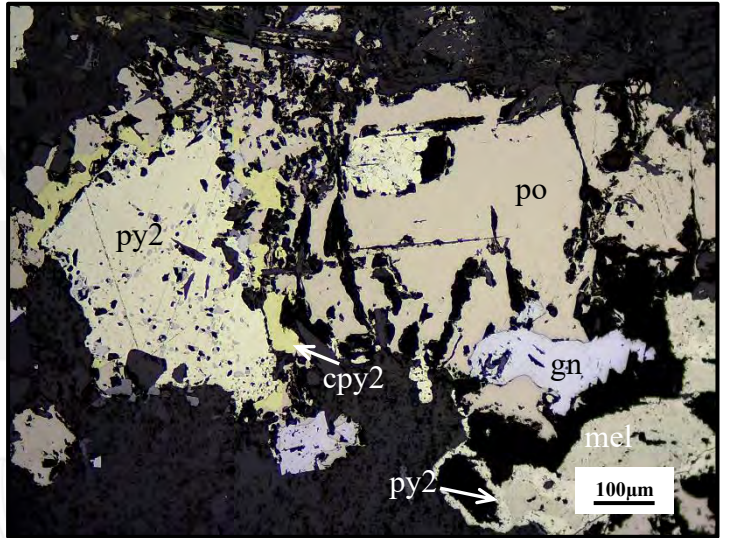
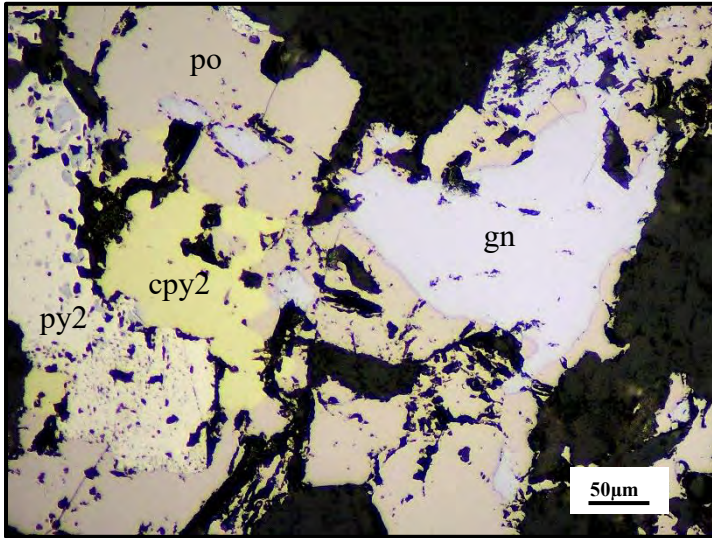
Calcopirita (2) masiva, con relictos de pirrotina, que ha reemplazado a pirita (1), esfalerita (1)
y esfalerita (2) y ha sido reemplazada por galena. Además, la esfalerita (1) presenta finas
diseminaciones orientadas de calcopirita (1).



KMO-06-305-A

Minerales: pirrotina + pirita (2) + calcopirita (2) + esfalerita (2) + galena ± marcasita ± melnikovita

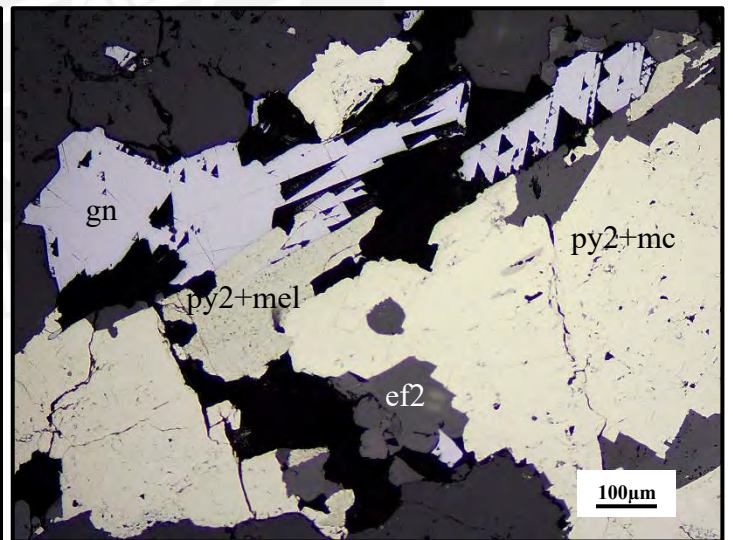
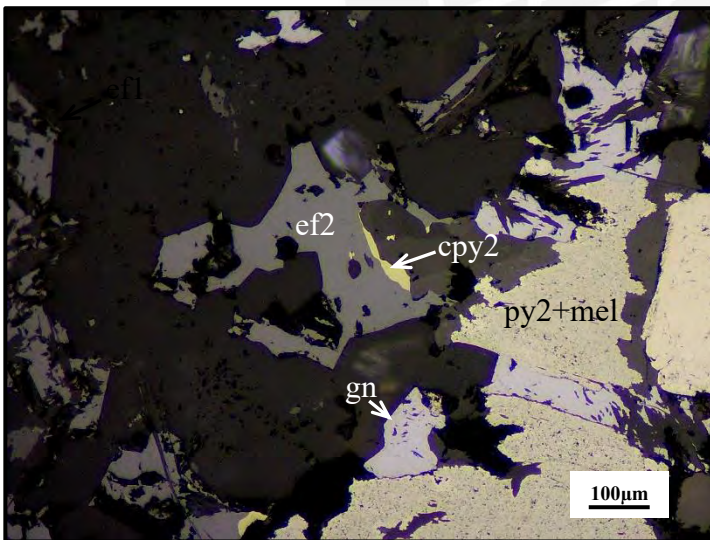
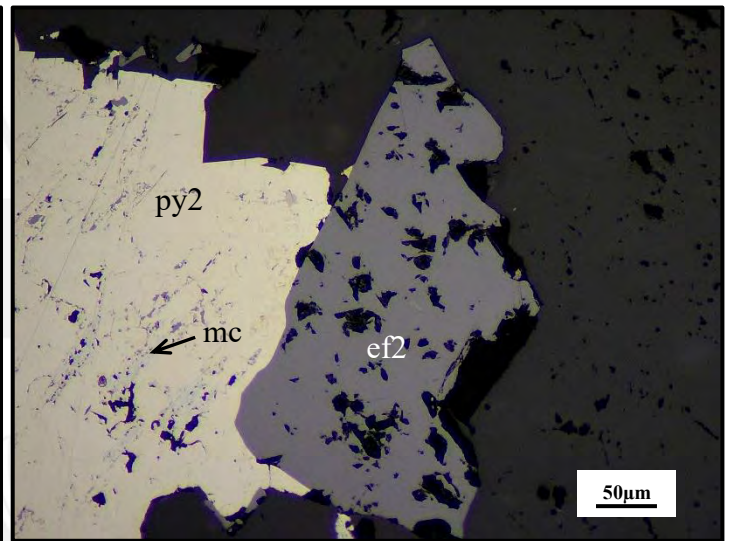
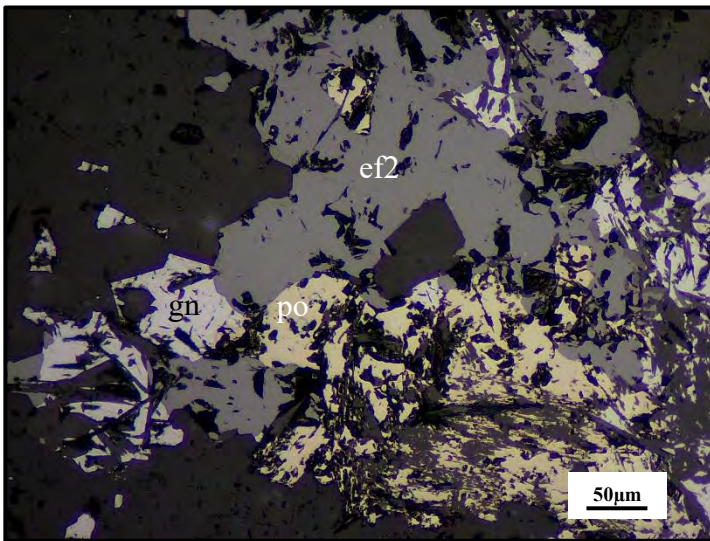
Agregados de pirrotina reemplazados por pirita, calcopirita (2), esfalerita (2) y galena . Por sectores, la pirita (2) ha sido reemplazada por marcasita y melnikovita



KMO-06-305-B

Minerales: pirrotina + pirita (2) + calcopirita (2) + esfalerita (2) + galena ± marcasita ± melnikovita

Agregados de pirrotina reemplazados por pirita (2), calcopirita (2), esfalerita (2) y galena . Por sectores, la pirita (2) ha sido reemplazada por marcasita y melnikovita.

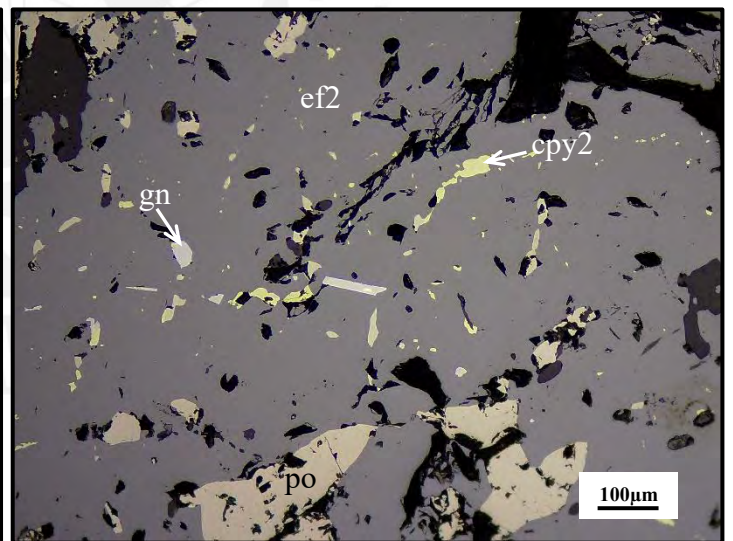
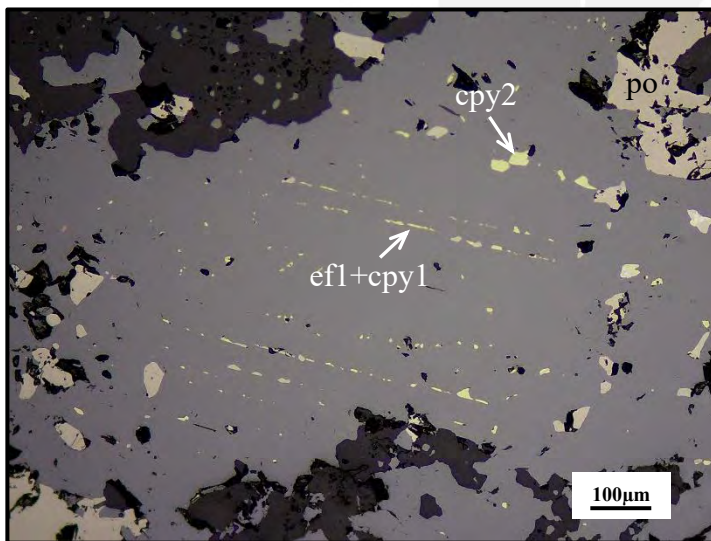
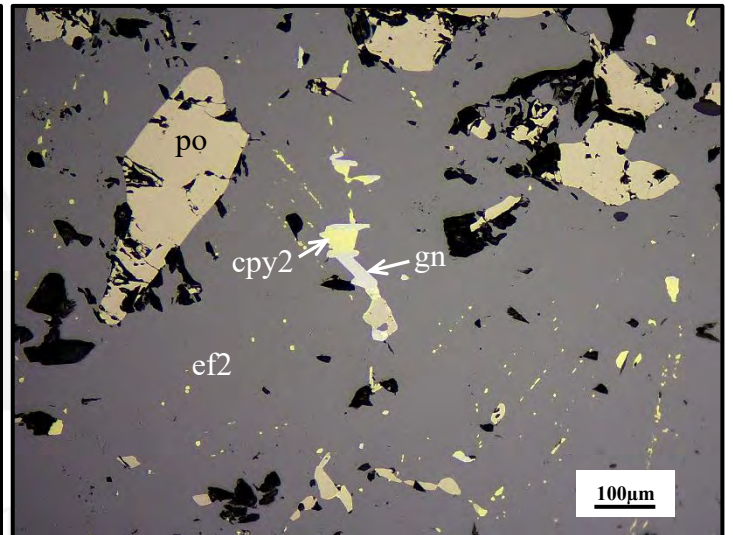
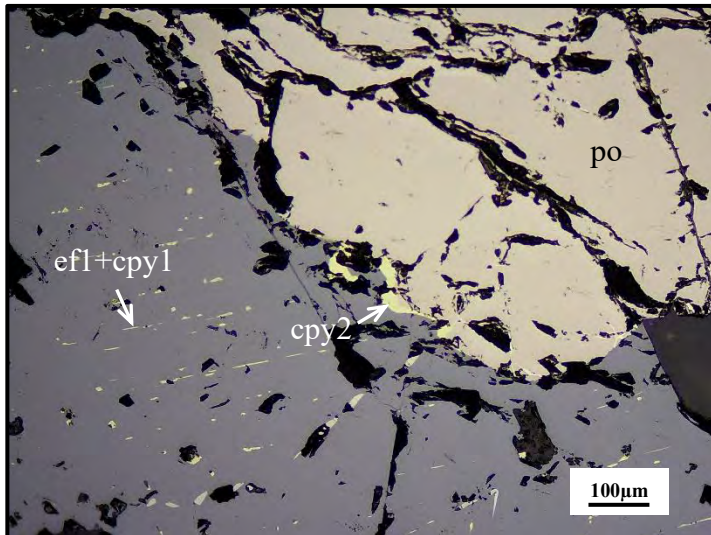


KMO-06-310

Minerales: esfalerita (2) + pirrotina ± calcopirita (2) ± esfalerita (1) ± calcopirita (1) ± galena

Agregados de pirrotina reemplazados por esfalerita (1), calcopirita (2), esfalerita (2) y galena.

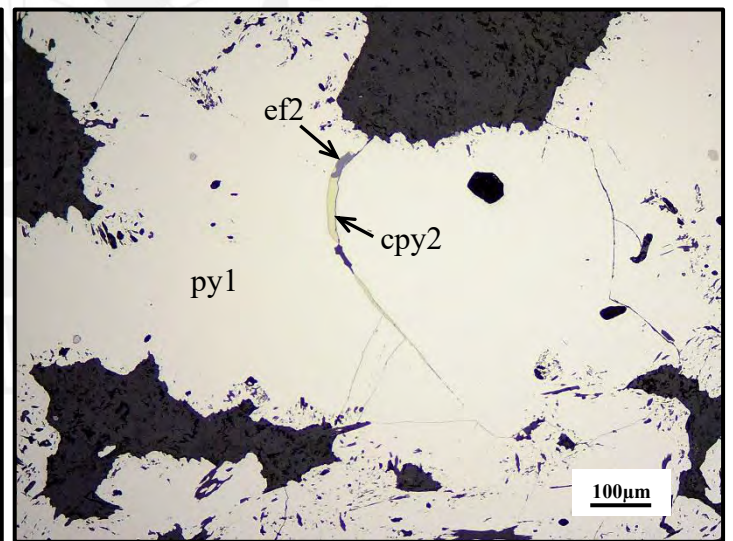
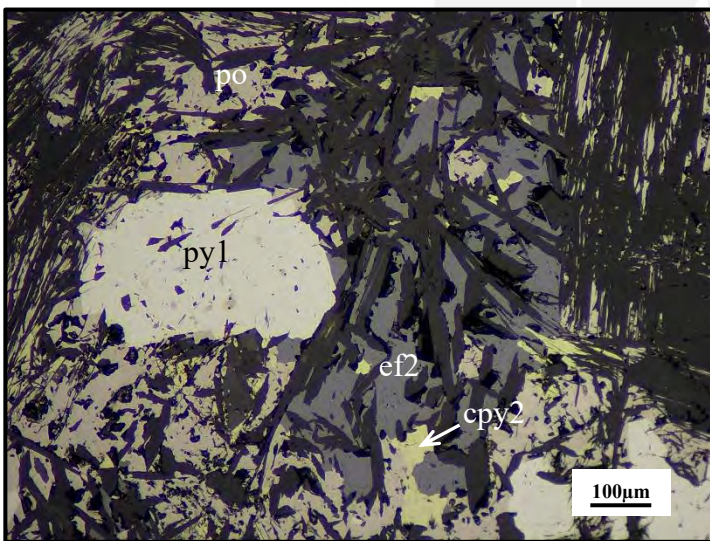
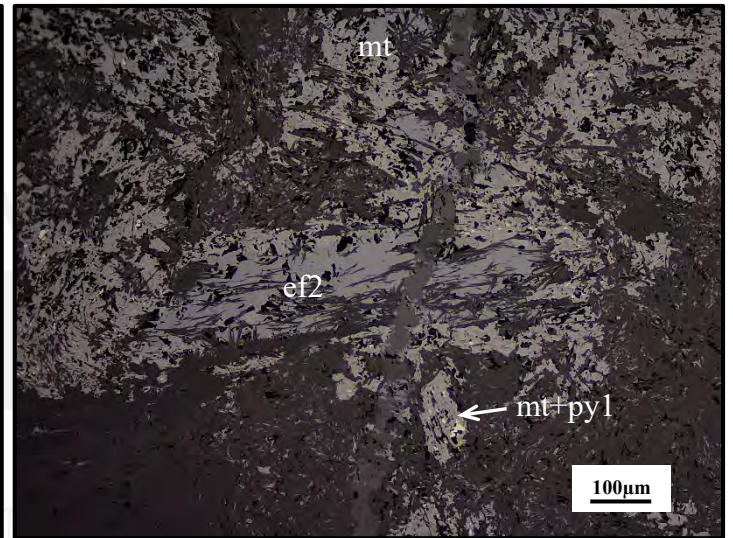
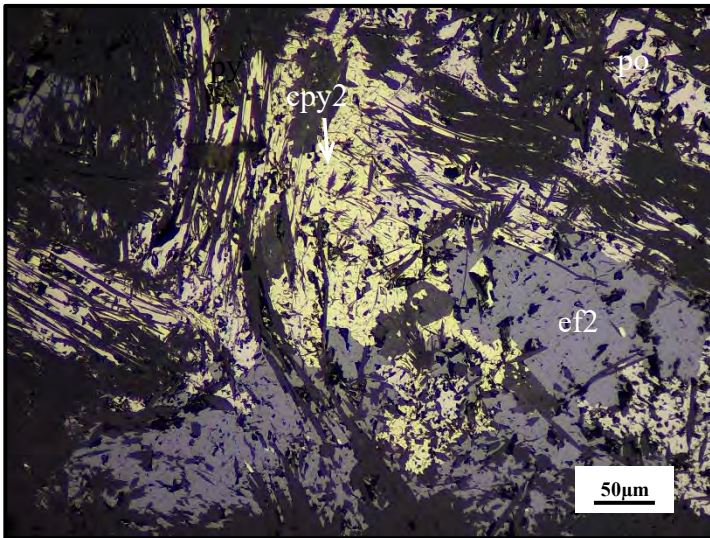
Además, la esfalerita (1) presenta finas diseminaciones orientadas de calcopirita (1).



KMO-07-263

Minerales: magnetita + pirita (1) + pirrotina + calcopirita (2) + esfalerita (2)

Agregados de pirrotina reemplazados por pirita (1), calcopirita (2) y esfalerita (2). Además, la magnetita ha sido reemplazada por esfalerita (2).

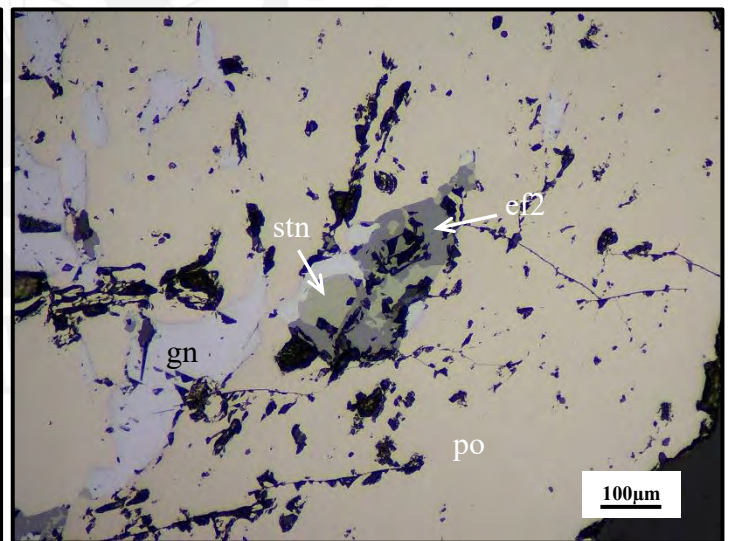
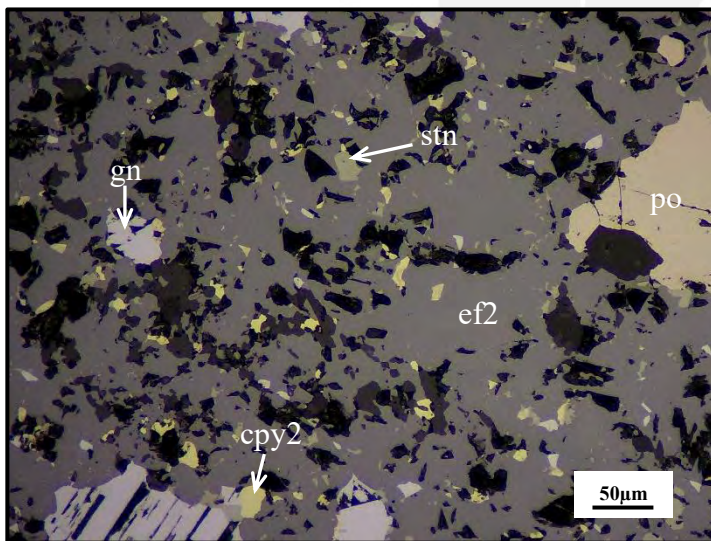
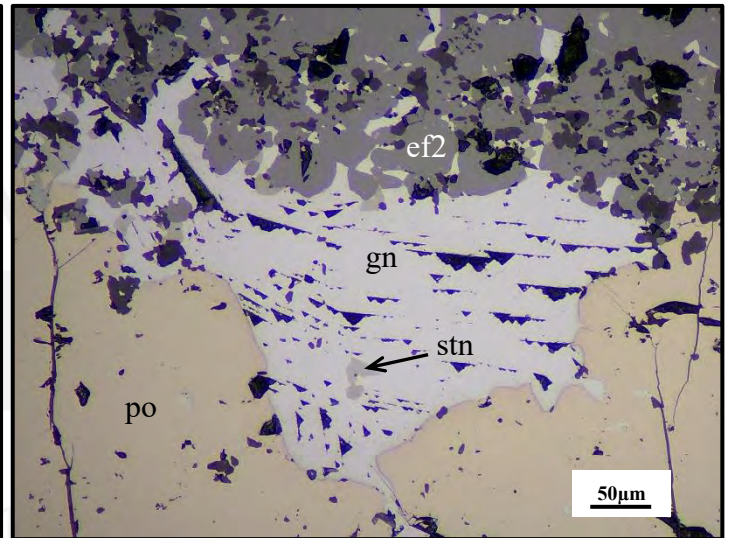
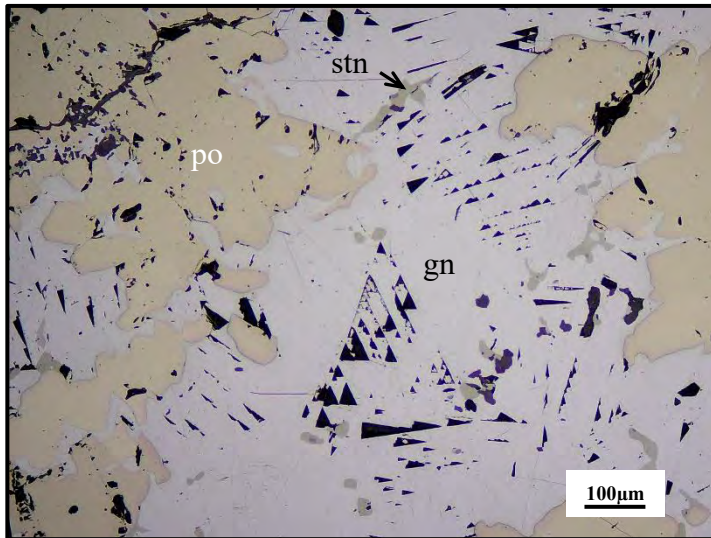


MO-05-KK-06A

Minerales: pirrotina + esfalerita (2) + galena ± estannita ± calcopirita (2)

Agregados de pirrotina reemplazados por esfalerita (2), galena, calcopirita (2) y estannita.

Además, la galena presente relictos de estannita.

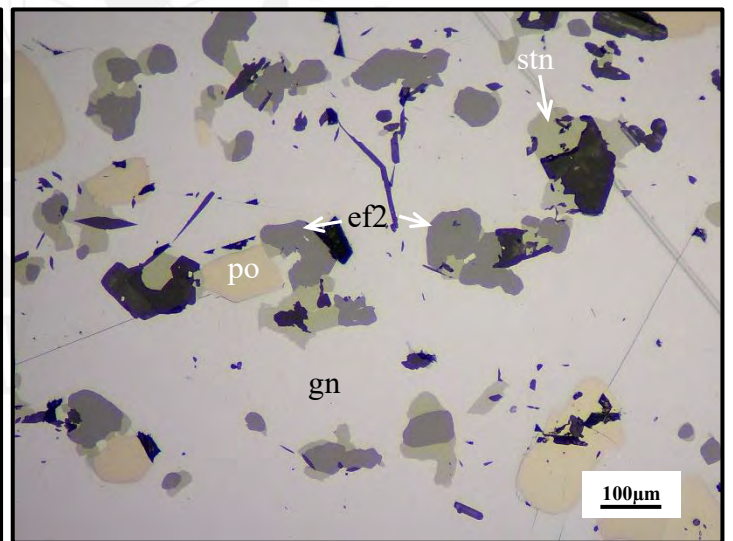
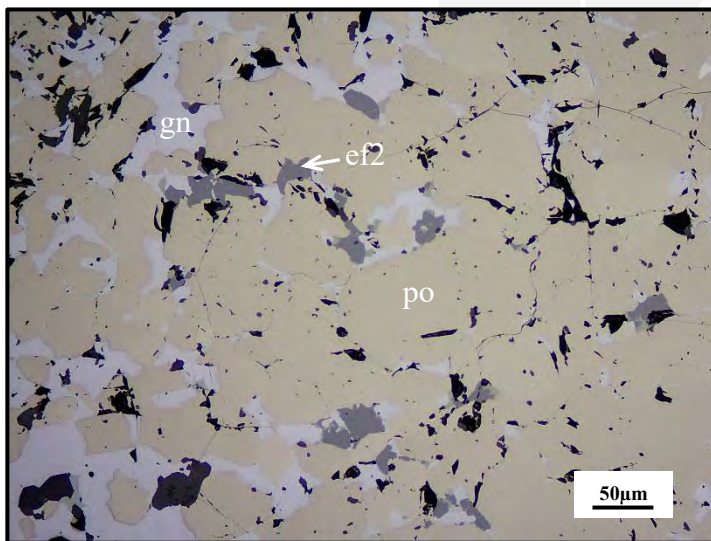
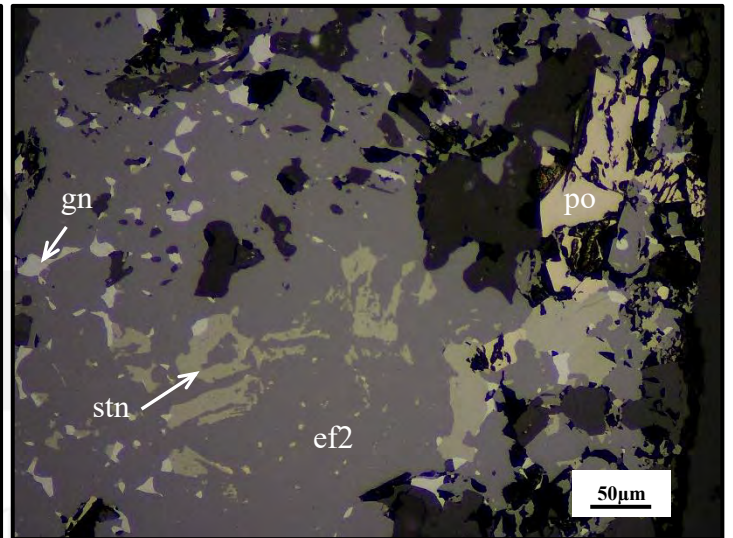
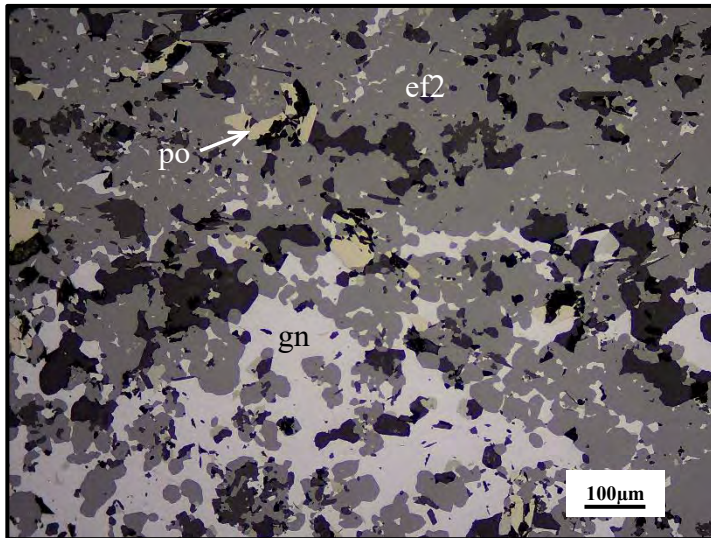


MO-05-KK-06B

Minerales: pirrotina + esfalerita (2) + galena ± estannita ± calcopirita (2)

Agregados de pirrotina reemplazados por esfalerita (2), galena, calcopirita (2) y estannita.

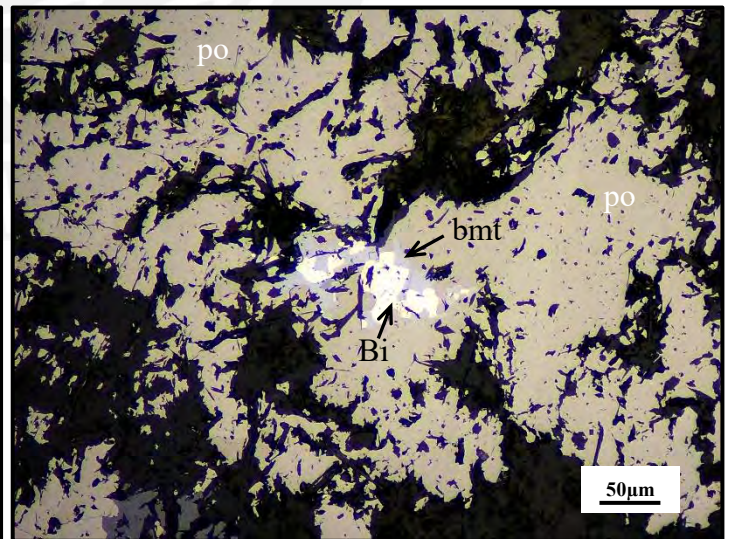
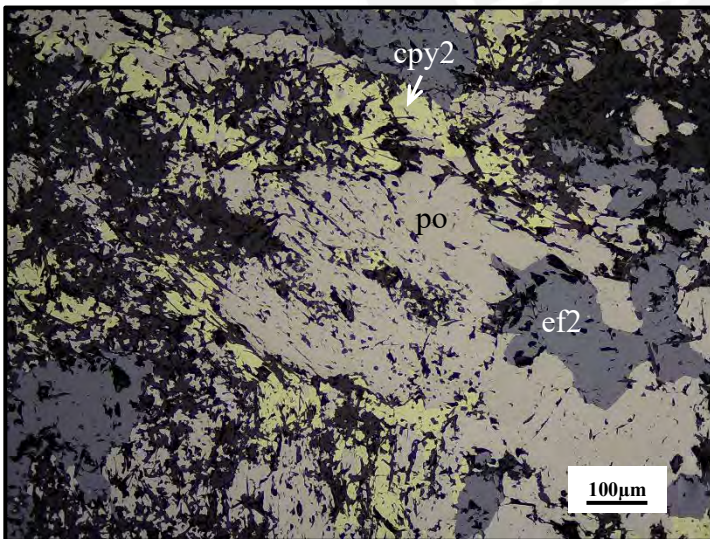
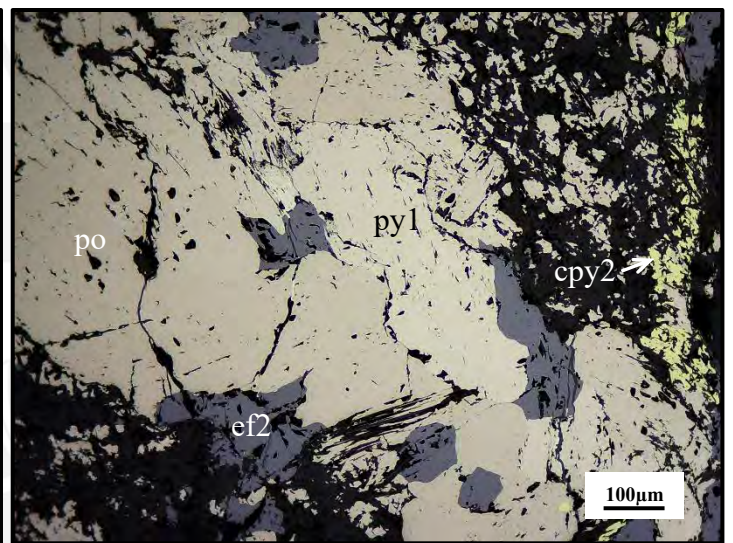
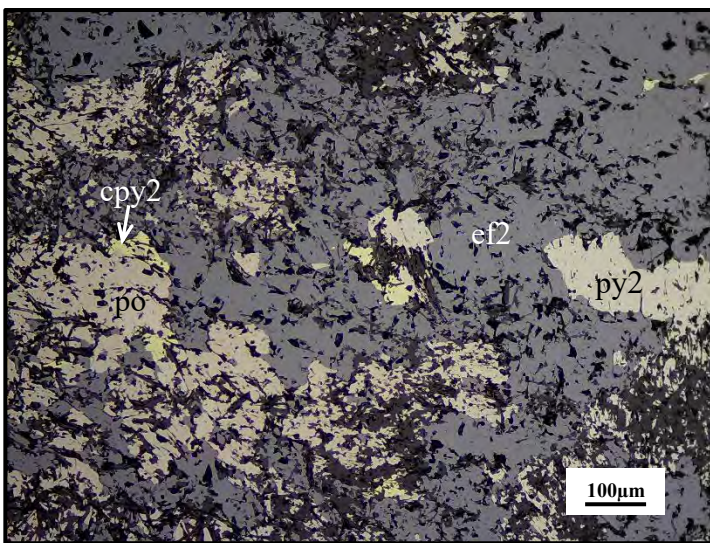
Además, la galena presenta relictos de estannita.



MO-05-KK-07

Minerales: esfalerita (2) + pirrotina + calcopirita (2) + pirita (1) + pirita (2) ± bismutinita ± bismuto nativo

Agregados de pirrotina reemplazados por pirita (1), calcopirita (2), esfalerita (2) y, de manera puntual, por bismutinita y bismuto nativo. Además, la esfalerita (2) presenta reemplazo de pirita (2).



Anexo C

Resultados de EPMA

Esfalerita

L.D.	Análisis	2019- MOR-52- circulo A- ef-001	2019- MOR-52- circulo A- ef-002	2019- MOR-52- circulo B- ef-001	2019- MOR-52- circulo B- ef-002	2019- MOR-52- circulo C- ef-001	2019- MOR-52- circulo C- ef-002	2019- MOR-54- circulo A- sl-001
0.12	Sb	0.1578	0.013	0	0.0314	0.0114	0	0
0.15	In	0	0	0	0	0	0.0465	0.0487
0.07	S	32.89	32.91	32.6	32.11	32.43	32.7	33.66
0.18	Pb	0.0668	0.3301	0.1421	0	0.1726	0.0078	0.0916
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0	0	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	56.26	55.92	55.94	56.56	56.09	56.09	55.01
0.06	Cu	0.0328	0.0603	0.0495	0.0197	0.0634	0.0549	0.0382
0.05	Fe	10.25	10.12	10.33	9.91	9.94	10.13	7.94
0.06	Cd	0	0	0	0	0	0	0.0451
0.05	Ag	0	0.0035	0.0137	0.0015	0	0	0
0.05	Sn	0.0205	0	0	0	0.0079	0	0
	Total	99.68	99.36	99.08	98.63	98.72	99.03	96.83

APFU	Sb	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.839	0.833	0.841	0.864	0.848	0.841	0.801
	Cu	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	Fe	0.179	0.177	0.182	0.177	0.176	0.178	0.135
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-54-circulo A-sl-002	2019-MOR-54-circulo A-sl-003	2019-MOR-54-circulo B-sl-001	2019-MOR-54-circulo B-sl-002	2019-MOR-54-circulo B-sl-003	2019-MOR-54-circulo C-sl-001	2019-MOR-54-circulo C-sl-002
0.12	Sb	0.0226	0	0	0	0	0.0111	0
0.15	In	0.1018	0.1134	0.0228	0.1073	0.1312	0	0.0991
0.07	S	33.61	33.94	33.86	33.96	33.58	33.93	34.38
0.18	Pb	0	0.1536	0.0934	0.1298	0.0316	0	0.0906
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0	0	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	54.76	55.04	54.91	55.83	55.54	54.75	54.39
0.06	Cu	0	0.0312	0	0.0304	0.0162	0.0565	0.0463
0.05	Fe	9.77	9.88	10.3	7.86	10.08	10.83	11.05
0.06	Cd	0	0	0.0229	0.0322	0	0.0354	0
0.05	Ag	0.0346	0.0314	0.0025	0	0.0017	0.0046	0
0.05	Sn	0	0	0	0.0097	0	0.0228	0
	Total	98.30	99.19	99.21	97.96	99.38	99.64	100.06

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.799	0.795	0.795	0.806	0.811	0.791	0.776
	Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Fe	0.167	0.167	0.175	0.133	0.172	0.183	0.185
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-54-circulo C-sl-003	2019-MOR-54-circulo D-sl-001	2019-MOR-54-circulo D-sl-002	2019-MOR-54-circulo D-sl-003	2019-MOR-41-circulo A-ef-001	2019-MOR-41-circulo A-ef-002	2019-MOR-41-circulo A-ef-003
0.12	Sb	0	0.0329	0	0.0261	0.029	0.0032	0
0.15	In	0.0216	0.0327	0	0.0126	0.0413	0.0556	0
0.07	S	33.9	33.96	33.54	33.8	33.06	33.2	33.27
0.18	Pb	0.1476	0.1163	0.0434	0.0602	0	0.122	0.0921
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0	0.0237	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	55.33	55.64	55.45	55.15	64.47	64.86	64.22
0.06	Cu	0.0295	0.0967	0.0695	0.0249	0.144	0.0077	0.0108
0.05	Fe	10.03	8.68	10.32	10.41	1.98	1.96	2.91
0.06	Cd	0	0.0199	0	0	0.118	0.1283	0.149
0.05	Ag	0	0	0	0	0	0	0
0.05	Sn	0.0005	0	0	0	0	0	0
	Total	99.46	98.58	99.42	99.48	99.84	100.36	100.65

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.800	0.803	0.811	0.800	0.956	0.958	0.947
	Cu	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000
	Fe	0.170	0.147	0.177	0.177	0.034	0.034	0.050
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-41-circulo B-ef-001	2019-MOR-41-circulo B-ef-002	2019-MOR-41-circulo C-ef-001	2019-MOR-41-circulo C-ef-002	2019-MOR-41-circulo D-sl-001	2019-MOR-41-circulo D-sl-002	2019-MOR-42-circulo A-sl-001
0.12	Sb	0	0.0265	0	0.0327	0.1236	0	0
0.15	In	0.0523	0.012	0	0	0	0.0492	0.093
0.07	S	33.12	33.27	33.56	33.29	33.49	33.1	33.32
0.18	Pb	0.1269	0.2658	0.195	0	0.0001	0.0835	0.0145
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0	0.024	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0.0084	0
0.07	Zn	65.39	65.13	65.11	65.26	65.16	64.86	64.24
0.06	Cu	0.0135	0.0217	0.1772	0	0.0276	0.0183	0.039
0.05	Fe	1.86	2.06	1.91	1.89	1.85	1.68	2.72
0.06	Cd	0.1084	0.16	0.1172	0.1093	0.1259	0.1414	0.1551
0.05	Ag	0	0	0	0	0.0096	0	0.0228
0.05	Sn	0	0	0	0.0062	0	0.0229	0.0287
	Total	100.67	100.95	101.07	100.59	100.79	99.99	100.63

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.968	0.960	0.951	0.961	0.954	0.961	0.945
	Cu	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
	Fe	0.032	0.036	0.033	0.033	0.032	0.029	0.047
	Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019- MOR-42- circulo A- sl-002	2019- MOR-42- circulo B- sl-001	2019- MOR-42- circulo B- sl-002	2019- MOR-42- circulo C- sl-001	2019- MOR-42- circulo C- sl-002	2019- MOR-42- circulo C- sl-003	2019- MOR-42- circulo E- sl-001
0.12	Sb	0.0566	0	0	0.056	0.0041	0.0111	0
0.15	In	0	0.0524	0.0928	0	0	0	0
0.07	S	32.75	33.26	33	32.84	33.19	33.22	33.39
0.18	Pb	0.0955	0.1256	0.2287	0	0	0.0059	0.1391
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0	0	0
0.1	Ge	0	0	0	0.0034	0.0048	0	0
0.07	Zn	64.03	62.95	63.06	63.59	63.4	63.32	63.44
0.06	Cu	0.0066	0.0445	0.0199	0.0129	0.0102	0.0207	0.0332
0.05	Fe	2.58	3.59	3.34	2.94	3.26	3.02	3.38
0.06	Cd	0.0799	0.1166	0.1239	0.1069	0.0912	0.1077	0.0734
0.05	Ag	0.0153	0	0.0284	0	0	0	0.0194
0.05	Sn	0.0137	0	0	0	0	0.0063	0.0359
	Total	99.63	100.14	99.89	99.55	99.96	99.71	100.51

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.959	0.928	0.937	0.950	0.937	0.935	0.932
	Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Fe	0.045	0.062	0.058	0.051	0.056	0.052	0.058
	Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-42-circulo E-sl-002	2019-MOR-42-circulo D-sl-001	2019-MOR-42-circulo D-sl-002	2019-MOR-44-circulo A-sl-001	2019-MOR-44-circulo A-sl-002	2019-MOR-44-circulo B-sl-001	2019-MOR-44-circulo B-sl-002
0.12	Sb	0.0481	0.085	0.0336	0	0.0981	0	0.0968
0.15	In	0.0135	0	0	0.0528	0.013	0.0441	0.0621
0.07	S	32.98	33.28	33.19	31.98	32.09	32.34	32.33
0.18	Pb	0	0	0.101	0.0728	0.0525	0.0713	0.2131
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0.016	0.0097	0	0	0	0.0017	0.0083
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	63.6	63.46	63.41	64.86	64.33	65.14	65.23
0.06	Cu	0.0168	0.018	0	0.0192	0.0746	0.0808	0.0558
0.05	Fe	2.96	3.2	3.24	1.95	2.32	2.63	2.51
0.06	Cd	0.0658	0.1029	0.0706	0.1168	0.1433	0.1505	0.1255
0.05	Ag	0	0.014	0	0	0	0	0
0.05	Sn	0	0.0071	0	0.0012	0	0.037	0
	Total	99.70	100.18	100.05	99.05	99.12	100.50	100.63

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.946	0.935	0.937	0.995	0.983	0.988	0.989
	Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
	Fe	0.052	0.055	0.056	0.035	0.042	0.047	0.045
	Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-44-circulo C-sl-001	2019-MOR-44-circulo C-sl-002	KMO-6-246A-circulo A-ef-002	KMO-6-246A-circulo A-ef-001	KMO-6-246A-circulo B-ef-001	KMO-6-246A-circulo B-ef-002	KMO-6-246A-circulo C-ef-001
0.12	Sb	0	0	0.0349	0.083	0.1756	0.024	0.0506
0.15	In	0	0	0.0995	0.0085	0	0.2301	0
0.07	S	32.34	32.5	34.34	34.7	34.19	34.15	34.04
0.18	Pb	0.0456	0.216	0.011	0.0287	0.3715	0.1062	0.0091
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0.0058	0	0	0.0123	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	65.1	65.27	54.73	55.16	54.8	54.35	54.66
0.06	Cu	0.143	0	0.0365	0.0625	0.1012	0.1245	0.0256
0.05	Fe	2.24	2.37	10.83	10.84	10.82	11	10.9
0.06	Cd	0.1568	0.1092	0	0	0	0.0289	0
0.05	Ag	0.0015	0.0403	0.0132	0	0	0	0.002
0.05	Sn	0	0	0	0.0025	0	0	0.0039
	Total	100.03	100.51	100.10	100.89	100.46	100.03	99.69

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.987	0.985	0.782	0.779	0.786	0.780	0.787
	Cu	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000
	Fe	0.040	0.042	0.181	0.179	0.182	0.185	0.184
	Cd	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	KMO-6-246A-circulo C-ef-002	MO-05-KK-07-circulo A-ef-001	MO-05-KK-07-circulo A-ef-002	MO-05-KK-07-circulo B-ef-001	MO-05-KK-07-circulo B-ef-002	MO-05-KK-07-circulo C-ef-001	MO-05-KK-07-circulo C-ef-002
0.12	Sb	0.0221	0.0519	0.0517	0	0	0.0697	0
0.15	In	0.0848	0.0526	0.0669	0.0409	0.2464	0.0017	0.1496
0.07	S	33.98	33.84	34.16	34.04	34.05	34.02	34.31
0.18	Pb	0.2493	0	0.0759	0	0.1556	0.1821	0
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0	0.0002	0	0.0019
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	54.72	55.32	55.73	55.51	55.35	55.49	55.32
0.06	Cu	0.0097	0.0274	0.0329	0.0379	0.0752	0.0426	0.0357
0.05	Fe	10.8	10	9.8	10.13	10.19	10.33	10.05
0.06	Cd	0.0289	0.0026	0.0484	0.0342	0	0	0
0.05	Ag	0	0.0177	0	0	0.0227	0	0
0.05	Sn	0.0112	0	0	0	0.0136	0	0
	Total	99.91	99.31	99.97	99.79	100.10	100.14	99.87

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.790	0.802	0.800	0.800	0.797	0.800	0.791
	Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	Fe	0.182	0.170	0.165	0.171	0.172	0.174	0.168
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	MO-05-KK-06A-circulo D-ef-001	MO-05-KK-06A-circulo D-ef-002	MO-05-KK-06A-circulo C-ef-001	MO-05-KK-06A-circulo C-ef-002	KMO-6-293-circulo A-ef-001	KMO-6-293-circulo A-ef-002	KMO-6-293-circulo B-ef-001
0.12	Sb	0	0	0	0	0.0647	0	0.0315
0.15	In	0	0.0362	0	0	0	0	0
0.07	S	34.25	33.98	33.9	33.88	33.8	33.77	33.75
0.18	Pb	0.1707	0	0.1972	0.0545	0	0	0.333
0.44	As	0	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0.0061	0.0084	0.0168	0	0	0.0019	0
0.1	Ge	0	0	0	0	0	0	0
0.07	Zn	54.32	54.69	53.52	52.23	58.26	58.25	57.35
0.06	Cu	0.1772	0.057	0.6866	1.33	0.0275	0	0.0063
0.05	Fe	10.84	10.67	10.8	10.96	7.56	8	8.42
0.06	Cd	0.006	0	0	0	0	0.0278	0
0.05	Ag	0	0.0035	0.0403	0.0314	0.0304	0	0
0.05	Sn	0.105	0	0.6187	1.21	0	0	0.0095
	Total	99.88	99.45	99.78	99.70	99.74	100.05	99.90

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.778	0.789	0.774	0.756	0.845	0.846	0.833
	Cu	0.003	0.000	0.010	0.020	0.000	0.000	0.000
	Fe	0.182	0.180	0.183	0.186	0.128	0.136	0.143
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.001	0.000	0.005	0.010	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	KMO-6-293-circulo B-ef-002	KMO-6-293-circulo C-ef-001	KMO-6-293-circulo C-ef-002	KMO-6-293-circulo D-ef
0.12	Sb	0.0034	0.0441	0	0
0.15	In	0.1096	0.0008	0	0
0.07	S	33.93	34.03	34.26	34.17
0.18	Pb	0	0.0564	0.0054	0.2764
0.44	As	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0	0
0.1	Ge	0	0	0	0
0.07	Zn	57.43	57.64	57.77	57.28
0.06	Cu	0.026	0.0528	0.0915	0.0197
0.05	Fe	8.52	8.39	8.4	8.66
0.06	Cd	0	0.0556	0.0069	0
0.05	Ag	0.002	0	0	0
0.05	Sn	0.0115	0	0.024	0
	Total	100.03	100.27	100.56	100.41

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	1.000	1.000	1.000	1.000
	Pb	0.000	0.000	0.000	0.001
	As	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.830	0.831	0.827	0.822
	Cu	0.000	0.000	0.001	0.000
	Fe	0.144	0.142	0.141	0.145
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000

Calcopirita

L.D.	Análisis	2019- MOR-41- circulo C- cpy	2019- MOR-42- circulo E- cpy	2019- MOR-44- circulo A- cpy	2019- MOR-44- circulo B- cpy	2019- MOR-44- circulo C- cpy	2019- MOR-47- circulo A- cpy
0.12	Sb	0.0513	0.0584	0.0006	0.019	0.0714	0.0186
0.15	In	0	0.0783	0	0.0875	0.0853	0
0.07	S	35.47	34.62	34.29	33.98	34.33	34.66
0.18	Pb	0.2522	0	0.3093	0.21	0.2265	0.0143
0.44	As	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0.0072	0.0165	0	0.0264	0	0.0474
0.1	Ge	0	0.0236	0.0061	0.0343	0.0123	0.0295
0.07	Zn	1.37	0.511	0.337	0.4889	0.139	0.1767
0.06	Cu	34.33	34.64	34.68	34.5	34.73	34.58
0.05	Fe	29.58	29.66	29.66	29.73	29.85	29.93
0.06	Cd	0	0	0	0	0	0
0.05	Ag	0	0.0233	0.0221	0	0.0168	0.0112
0.05	Sn	0.0077	0	0	0	0	0
	Total	101.07	99.63	99.31	99.08	99.46	99.47

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Pb	0.002	0.000	0.003	0.002	0.002	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.038	0.014	0.010	0.014	0.004	0.005
	Cu	0.977	1.010	1.020	1.024	1.021	1.007
	Fe	0.957	0.984	0.993	1.004	0.998	0.991
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

L.D.	Análisis	2019-MOR-47-circulo B-cpy	2019-MOR-47-circulo C-cpy	KMO-6-293-circulo A-cpy	KMO-6-293-circulo B-cpy	KMO-6-293-circulo C-cpy	KMO-6-293-circulo D-cpy
0.12	Sb	0	0.0193	0	0	0	0.0291
0.15	In	0.0758	0.0356	0	0	0.0766	0.0525
0.07	S	34.9	34.54	35.05	35.25	35.27	35.12
0.18	Pb	0.0055	0.1681	0	0.1468	0.044	0.1476
0.44	As	0	0	0	0	0	0
0.23	Ga	0	0	0.0088	0.041	0	0.0332
0.1	Ge	0	0.0105	0	0	0.0033	0.0569
0.07	Zn	0.097	0.4333	0.0837	0.2113	0.0751	0.1247
0.06	Cu	34.22	33.95	34.28	34.32	34.15	33.94
0.05	Fe	30.13	30.15	29.88	30	30.28	30.2
0.06	Cd	0	0	0	0	0	0
0.05	Ag	0.0301	0.0356	0.1974	0.2201	0.1159	0.1847
0.05	Sn	0.001	0	0	0	0	0
	Total	99.46	99.34	99.50	100.19	100.01	99.89

APFU	Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Zn	0.003	0.012	0.002	0.006	0.002	0.003
	Cu	0.989	0.992	0.987	0.982	0.977	0.975
	Fe	0.991	1.002	0.979	0.977	0.986	0.987
	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ag	0.000	0.000	0.003	0.004	0.002	0.003
	Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Galena

L.D.	Análisis	MO-05-KK-06A-circulo A-gn	MO-05-KK-06A-circulo B-gn
0.12	Sb	6.58	0.5214
0.15	In	0	0
0.07	S	14.36	13.51
0.18	Pb	71.93	84.81
0.44	As	0	0
0.23	Ga	0.0139	0.0058
0.1	Ge	0	0.1173
0.07	Zn	0	0
0.06	Cu	0	0
0.05	Fe	0	0
0.06	Cd	0.0225	0.0333
0.05	Ag	6.15	0.3709
0.05	Sn	0	0.0387
	Total	99.06	99.41

APFU	Sb	0.121	0.010
	In	0.000	0.000
	S	1.000	1.000
	Pb	0.775	0.971
	As	0.000	0.000
	Ga	0.000	0.000
	Ge	0.000	0.004
	Zn	0.000	0.000
	Cu	0.000	0.000
	Fe	0.000	0.000
	Cd	0.000	0.000
	Ag	0.127	0.008
	Sn	0.000	0.000

Anexo D

Metadata del análisis de LA-ICP-MS de elementos traza en sulfuros pobres en Pb/As

Laboratorio y Preparación de Muestras	
Nombre del Laboratorio	Departamento de Ciencias de la Tierra, Instituto de Geoquímica y Petrología-ETH Zurich
Tipo de muestra/mineral	Sulfuro natural
Preparación de muestra	Fragmentos de muestra en soportes epoxi de 1 pulgada
Imagen	Microscopía óptica convencional + SEM-EDS
Sistema de ablación láser	
Marca, modelo y tipo	ASI (Resonetics) RESOolution S-155
Celda de ablación y volumen	Laurin Technic, celda de ablación S-155 de doble volumen, volumen efectivo de aprox. 1 cm ³
Longitud de onda del láser (nm)	193 nm
Ancho de pulso (ns)	25 ns
Fluencia (J cm ⁻²)	aprox. 2.5 J cm ⁻²
Tasa de repetición (Hz)	3 Hz
Duración de ablación	25 s
Diámetro de spot (mm)	19 mm
Modo de muestreo/patrón	Ablación puntual estática
Gas portador	100% He en la celda, gas de reposición de Ar combinado en embudo de ablación
Flujo de gas portador de la celda (L.min ⁻¹)	0.5 L.min ⁻¹
Instrumento ICP-MS	
Marca, modelo y tipo	Thermo Element XR, Conector único de campo magnético ICP-MS
Introducción de la muestra	Directa
RF poder (W)	1275 to 1455 W (calibrado diariamente)
Gas de reposición (L.min ⁻¹)	aprox. 0.89 to 0.92 L.min ⁻¹ Ar (calibrado diariamente) + 0.002 L.min ⁻¹ N ₂
Sistema de detección	Triple (conteo de pulsos, analógico, Faraday), calibración cruzada diariamente
Medición de masas (amu)	33, 34, 53, 55, 57, 59, 62, 65, 66, 71, 74, 75, 77, 95, 107, 111, 115, 118, 121, 125, 182, 197, 202, 205, 208, 209
Tiempo de integración por pico/tiempo de permanencia	25 ms excepto para amu 33, 34, 53, 55, 59, 62, 65 y 66 (11 ms)
Tiempo total de integración por punto de datos de salida (s)	0.719 s
Dead time (ns)	22
Relación típica de óxidos (²⁴⁸ ThO ⁺ / ²³² Th ⁺)	0.15%
Relación típica de doble carga (Ba ⁺⁺ /Ba ⁺)	3.50%

Procesamiento de data	
Gas en blanco	25 s
Estrategia de calibración	Mass-1 se utilizó como material de referencia primario para la cuantificación de elementos traza; pellet de sulfuro UQAC-FeS-1 y vidrio de silicato GSD-1G y NIST SRM610 como secundarios/validacion.
Información del Material de Referecia	Mass-1 (Wilson et al. 2002) UQAC-FeS-1 (data no publicada por D. Savard, UQAC, 2018; ver también en Baumgartner et al. 2020) GSD-1G (Guillong et al. 2005) NIST SRM610 (Jochum et al. 2011)
Programa de procesamiento de datos utilizado/Corrección para LIEF	SILLS standalone v. 1.3.2 (Guillong et al. 2008)
Estándares internos para la cuantificación de elementos traza	Concentraciones medidas mediante EPMA de Zn (esfalerita), Cu (calcopirita)



Anexo E

Resultados de LA-ICP-SF-MS

Esfalerita

Análisis	2019-MOR-54-círculo a-ef - 2	2019-MOR-54-círculo a-ef - 3	2019-MOR-54-círculo b-ef - 1	2019-MOR-54-círculo b-ef - 2	2019-MOR-54-círculo b-ef - 3	2019-MOR-54-círculo c-ef - 1	2019-MOR-54-círculo c-ef - 2	2019-MOR-54-círculo c-ef - 3	2019-MOR-54-círculo d-ef - 1	2019-MOR-54-círculo d-ef - 2
S33	483270	482865	473954	488784	485988	483531	483107	492322	490240	494926
S34	462583	458256	460898	469861	468858	467366	465017	473738	480487	477023
Mn55	11098.0	12323.6	8759.1	10629.4	9668.7	8378.7	8172.5	10552.5	15568.8	8920.9
Fe57	71422	69767	73533	71296	72328	77244	79055	73377	63577	77230
Co59	160.57	162.15	162.59	128.91	118.37	168.68	170.06	159.38	167.46	177.63
Cu65	153.4	347.3	170.3	164.8	161.3	166.9	139.2	153.3	161.7	162.1
Zn66	548000	550000	549000	558000	555000	548000	544000	553000	556000	555000
Ga71	0.26	0.24	0.27	0.23	0.26	0.27	0.27	0.25	0.25	0.25
Ge74	0.27	0.40	0.38	0.31	0.30	0.34	0.44	0.43	0.44	0.49
As75	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.1	0.5
Se77	34.6	43.4	35.3	36.9	38.5	38.1	41.4	39.0	36.1	39.7
Mo95	1.085	1.150	0.848	1.053	1.020	0.867	0.824	1.057	1.552	0.899
Ag107	3.6	5.6	3.3	4.4	5.1	4.2	3.5	5.1	6.3	5.2
Cd111	2003	1992	2063	2057	2081	2073	2075	2082	2085	2097
In115	166.5	167.5	166.2	171.4	169.7	164.4	162.9	172.8	168.0	168.6
Sn118	0.99	1.02	2.77	1.55	0.65	1.47	3.16	1.71	0.20	2.22
Sb121	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.03	<0.03	0.04	0.02	<0.03
Au197	<0.014	<0.015	<0.013	<0.012	0.012	<0.014	<0.011	0.036	0.015	0.018
Hg202	2.4	2.2	2.2	2.4	2.3	2.4	2.2	2.6	2.6	2.3
Tl205	<0.004	0.033	<0.004	<0.004	0.009	<0.004	<0.004	0.034	0.015	<0.004
Pb208	0.05	3.60	0.40	0.06	1.86	0.42	0.07	1.80	3.61	0.09
Bi209	0.06	0.74	0.47	0.06	0.95	0.25	0.09	0.43	0.74	0.09

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019- MOR- 54- circulo d -ef - 3	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 1	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 2	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 3	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 4	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 5	2019- MOR- 052- Circulo A-ef - 6	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 1	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 2	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 3
S33	485964	466281	471703	465758	475490	477517	482448	482231	492257	482237
S34	478408	462978	472260	466103	469345	469832	475702	469406	480207	475149
Mn55	9428.9	3295.6	3534.2	3765.4	3711.5	3654.9	4593.4	3140.7	4572.0	3488.6
Fe57	74791	74806	73863	72790	72939	73677	72704	75381	72705	73337
Co59	172.15	272.66	261.72	266.03	262.25	269.34	263.17	267.89	286.54	273.41
Cu65	173.1	150.3	148.1	159.1	156.1	150.2	191.5	155.0	156.0	416.1
Zn66	552000	562600	559200	562600	559200	562600	559200	559400	565600	559400
Ga71	0.25	0.11	0.12	0.12	0.11	0.09	0.14	0.13	0.17	0.15
Ge74	0.40	0.37	0.45	0.20	0.18	0.34	0.37	0.51	0.48	0.27
As75	0.5	37.1	35.2	36.0	34.7	34.6	34.6	34.4	33.8	32.5
Se77	39.2	33.8	47.7	23.2	23.1	46.4	47.6	46.5	48.0	37.1
Mo95	0.943	0.255	0.267	0.232	0.259	0.250	0.355	0.232	0.297	0.249
Ag107	6.9	3.1	3.2	3.7	3.0	2.9	2.9	2.9	3.3	5.2
Cd111	2112	1686	1699	1669	1723	1733	1703	1765	1738	1758
In115	170.7	212.3	209.0	215.3	216.3	209.7	210.5	202.5	203.5	204.0
Sn118	2.00	0.17	0.26	0.19	0.23	0.22	0.15	0.26	0.20	0.15
Sb121	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Au197	0.018	<0.015	<0.011	<0.014	<0.012	<0.013	<0.012	<0.012	<0.013	0.020
Hg202	2.2	1.2	1.5	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4
Tl205	0.004	<0.005	0.004	0.024	<0.004	<0.003	0.004	<0.003	<0.003	0.049
Pb208	0.49	0.94	0.18	2.24	0.35	0.19	0.36	0.26	0.12	4.44
Bi209	0.19	0.65	0.21	2.34	0.26	0.18	0.39	0.22	0.12	2.86

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 4	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 5	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 6	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 7	2019- MOR- 052- Circulo B-ef - 8	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 1	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 2	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 3	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 4	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 5
S33	489263	492333	493233	495113	491717	494018	493633	487095	496420	498298
S34	478159	474869	478614	471765	477678	478518	482633	472827	481645	480801
Mn55	3753.5	4209.4	3817.9	4103.9	3700.4	4609.3	4602.5	4286.2	4766.7	6319.8
Fe57	73500	73956	75293	74382	74890	75812	74564	73589	75962	72111
Co59	283.57	279.34	274.09	279.92	275.42	279.98	273.28	279.09	286.31	277.10
Cu65	145.7	277.2	158.6	196.9	155.2	157.2	156.2	150.9	163.3	215.4
Zn66	565600	559400	565600	559400	565600	560900	560900	560900	560900	560900
Ga71	0.18	0.14	0.14	0.10	0.15	0.19	0.18	0.22	0.21	0.13
Ge74	0.33	0.43	0.39	0.42	0.47	0.18	0.57	0.39	0.21	0.52
As75	33.2	32.9	33.3	34.0	32.9	33.5	31.1	32.5	32.6	32.6
Se77	43.8	40.6	48.4	45.4	50.6	17.3	51.8	33.4	20.4	49.4
Mo95	0.276	0.342	0.249	0.345	0.230	0.345	0.324	0.336	0.414	0.415
Ag107	2.9	4.8	3.1	8.8	3.1	3.0	2.5	2.9	2.7	4.2
Cd111	1760	1774	1767	1780	1774	1810	1782	1745	1783	1846
In115	205.4	206.5	205.0	217.2	203.6	210.2	203.9	207.0	207.2	210.2
Sn118	0.21	0.19	0.26	0.19	0.16	0.21	0.18	0.96	0.22	0.16
Sb121	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.29	<0.03	<0.03
Au197	<0.013	0.051	<0.014	<0.015	<0.013	<0.012	<0.016	0.014	<0.013	0.026
Hg202	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.7	1.3	1.3	1.7
Tl205	<0.003	0.065	0.007	0.042	<0.004	<0.003	<0.004	0.019	<0.004	0.037
Pb208	0.39	4.92	0.96	11.92	0.54	0.14	0.35	1.02	0.15	4.58
Bi209	0.34	3.39	0.73	8.52	0.46	0.17	0.43	0.35	0.15	4.13

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 6	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 7	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 8	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 9	2019- MOR- 052- Circulo C-ef - 10	2019- MOR- 44- circulo A -sl - 1	2019- MOR- 44- circulo A -sl - 2	2019- MOR- 44- circulo b -ef - 1	2019- MOR- 44- circulo b -ef - 2	2019- MOR- 44- circulo c -ef - 1
S33	503433	503079	503754	511638	511607	495397	493188	495067	488489	490879
S34	481001	477897	475256	481891	479095	468873	467452	473850	470683	473083
Mn55	4357.3	4105.8	4697.2	4497.2	4713.3	1585.9	1500.9	1622.1	1564.1	1599.3
Fe57	74420	75706	75592	77336	76613	18151	16971	20466	17617	18420
Co59	282.78	281.08	292.24	292.27	289.23	<0.06	<0.07	<0.05	<0.05	<0.05
Cu65	159.8	163.4	224.1	162.1	167.0	110.1	77.4	96.5	103.9	152.0
Zn66	560900	560900	560900	560900	560900	649000	643000	651000	652000	651000
Ga71	0.21	0.17	0.17	0.19	0.15	0.33	0.41	1.01	0.78	1.52
Ge74	0.24	0.34	0.34	0.33	0.30	0.23	0.22	<0.15	0.15	0.31
As75	32.0	33.5	32.4	32.7	32.8	<0.3	<0.3	0.2	0.2	0.3
Se77	22.6	24.8	47.7	50.0	48.0	7.2	5.3	6.8	5.3	6.6
Mo95	0.298	0.294	0.272	0.347	0.314	0.179	0.202	0.220	0.171	0.259
Ag107	2.8	3.0	2.5	2.7	2.7	2.0	1.7	2.0	2.2	2.4
Cd111	1766	1806	1800	1828	1806	1954	1915	1955	1905	1943
In115	207.2	208.4	208.2	213.3	208.8	75.2	72.7	70.1	72.5	74.9
Sn118	0.25	0.23	0.18	0.26	0.19	0.20	0.20	0.93	0.42	0.64
Sb121	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.04	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03
Au197	<0.013	0.016	<0.013	<0.014	<0.015	<0.014	<0.016	<0.013	0.014	<0.015
Hg202	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	7.5	8.4	6.7	6.4	7.1
Tl205	<0.004	<0.005	0.006	<0.003	<0.003	<0.005	<0.005	0.005	<0.004	0.005
Pb208	0.13	0.15	0.68	0.19	0.41	0.60	0.21	0.52	0.76	1.13
Bi209	0.15	0.16	0.49	0.16	0.33	1.35	0.94	1.09	2.14	2.04

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019-MOR-44-círculo c-ef - 2	2019-MOR-41--Círculo a-ef - 1	2019-MOR-41--Círculo a-ef - 2	2019-MOR-41--Círculo a-ef - 3	2019-MOR-41--Círculo b-ef - 1	2019-MOR-41--Círculo b-ef - 2	2019-MOR-41--Círculo c-ef - 1	2019-MOR-41--Círculo c-ef - 2	2019-MOR-41--Círculo d-ef - 1	2019-MOR-41--Círculo d-ef - 2
S33	486251	503731	495748	473008	478882	502831	480970	488328	487717	491683
S34	470778	498746	495105	477211	490651	502390	482989	487633	491551	490616
Mn55	1652.9	535.6	520.0	530.3	563.7	561.2	532.2	543.0	549.8	527.7
Fe57	19504	14544	12984	12446	13541	14215	13361	13503	12972	12083
Co59	<0.06	8.07	5.00	6.52	6.33	12.79	12.70	7.08	6.41	4.18
Cu65	217.3	93.9	60.7	120.5	90.2	71.2	68.9	59.5	119.8	76.3
Zn66	653000	645000	649000	642000	654000	651000	651000	653000	652000	649000
Ga71	0.92	1.18	1.23	0.93	1.21	1.20	1.13	1.13	1.00	1.00
Ge74	<0.17	<0.21	0.25	0.47	0.37	0.36	0.23	0.15	0.27	<0.20
As75	0.3	<5.6	<1.9	<1.2	<1.0	<1.3	<0.7	<0.6	<0.6	<0.7
Se77	6.4	10.3	8.2	10.0	9.6	10.1	9.0	7.2	10.4	10.5
Mo95	0.196	0.099	0.098	0.101	0.097	0.108	0.091	0.102	0.094	0.090
Ag107	2.3	2.4	2.2	3.2	3.2	3.1	2.5	2.5	2.5	2.3
Cd111	1983	2034	2040	1968	2085	2060	1990	1986	2075	2070
In115	76.8	48.5	47.0	46.1	48.7	50.3	49.4	48.3	46.6	44.8
Sn118	0.43	0.45	0.46	3.12	2.48	0.41	0.23	0.45	0.20	0.49
Sb121	<0.03	<0.26	<0.13	<0.09	<0.08	<0.12	<0.07	<0.06	<0.07	<0.08
Au197	<0.016	0.023	<0.017	<0.016	<0.016	<0.023	<0.016	<0.013	<0.017	<0.020
Hg202	6.5	6.3	6.5	5.1	4.5	7.9	5.6	5.6	6.4	6.3
Tl205	<0.005	<0.005	<0.005	0.007	0.006	0.013	<0.003	<0.004	0.034	<0.005
Pb208	0.19	0.20	0.10	0.63	0.57	0.67	0.68	0.19	0.69	0.32
Bi209	0.52	0.97	0.61	2.81	3.05	2.30	1.90	1.15	3.27	1.59

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019-MOR-41-- Circulo d-ef - 3	2019-MOR-42- circulo a-ef - 1	2019-MOR-42- circulo a-ef - 2	2019-MOR-42- circulo a-ef - 3	2019-MOR-42- circulo b-ef - 2	2019-MOR-42- circulo c-ef - 1	2019-MOR-42- circulo c-ef - 2	2019-MOR-42- circulo c-ef - 3	2019-MOR-42- circulo d-ef - 1	2019-MOR-42- circulo d-ef - 2
S33	482133	467596	461480	466287	455598	458302	462970	470595	461737	453856
S34	470289	474313	469818	474575	462562	467166	467963	472280	466022	467596
Mn55	499.2	1610.0	1628.7	1948.8	1809.0	1610.3	1771.8	1714.1	1677.2	1579.5
Fe57	10800	19586	20238	29092	27003	21514	25985	20813	23340	22487
Co59	3.61	0.10	0.16	5.55	3.90	0.24	2.65	1.10	1.67	0.76
Cu65	81.6	50.9	56.4	79.2	82.4	77.2	167.9	74.3	89.1	67.3
Zn66	649000	642000	640000	640000	631000	636000	634000	633000	635000	634000
Ga71	0.95	6.28	5.96	3.16	3.96	6.45	7.32	3.96	5.49	6.43
Ge74	0.41	0.34	0.15	<0.30	0.19	<0.15	<0.20	<0.19	<0.14	<0.14
As75	<0.8	0.8	0.4	0.8	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5
Se77	10.6	7.1	7.7	7.0	8.8	7.9	9.2	6.2	8.2	7.9
Mo95	0.104	0.223	0.247	0.135	0.209	0.210	0.219	0.247	0.229	0.187
Ag107	2.3	2.4	2.7	4.1	3.2	2.9	3.6	12.9	4.0	2.2
Cd111	1944	1909	1908	2048	1997	1872	2034	2094	1966	1888
In115	47.8	49.4	49.5	46.5	45.4	47.5	49.5	54.9	48.0	45.4
Sn118	2.12	0.95	0.64	1.33	3.21	0.71	1.11	0.41	0.59	3.47
Sb121	<0.09	<0.04	<0.04	<0.08	<0.04	<0.04	<0.05	<0.05	<0.04	<0.04
Au197	<0.024	<0.015	<0.013	<0.027	0.014	<0.013	<0.019	0.053	<0.013	<0.012
Hg202	8.2	5.0	4.2	4.9	4.0	4.4	4.4	5.8	4.5	4.4
Tl205	<0.005	<0.004	<0.003	<0.008	<0.003	0.010	<0.005	0.029	0.006	<0.004
Pb208	0.51	1.13	0.82	0.31	0.24	1.07	0.85	15.36	2.99	0.11
Bi209	2.03	3.20	1.77	0.53	1.10	1.90	1.46	29.78	5.48	0.40

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	2019-MOR-42-circulo e-ef - 1	2019-MOR-42-circulo e-ef - 2	MO-05-KK-06A circulo D-ef - 1	MO-05-KK-06A circulo D-ef - 2	KMO-6-246-A circulo A-ef - 2	KMO-6-246-A circulo B-ef - 1	KMO-6-246-A circulo B-ef - 2	KMO-6-246-A circulo C-ef - 1	KMO-6-246-A circulo C-ef - 2	KMO-06-293-circulo a-ef - 2
S33	459161	458611	492720	494211	486872	489272	487290	488800	486307	464088
S34	468901	474538	486433	492464	482450	479052	478731	472430	472853	464841
Mn55	1878.4	1573.0	5710.9	5630.8	2560.6	2555.4	2432.6	2569.9	2500.5	2655.7
Fe57	27668	22169	79759.7	76090.1	75885	79411	78562	76823	76403	56281
Co59	2.41	0.32	0.13	0.08	0.62	0.70	0.65	0.66	0.43	1.67
Cu65	88.2	49.9	554.5	323.5	245.4	505.7	405.3	293.3	371.6	49.6
Zn66	634000	636000	543000	547000	547000	548000	544000	547000	547000	583000
Ga71	4.35	6.32	169.13	156.62	13.68	20.62	3.30	4.12	12.16	10.83
Ge74	0.25	0.15	<0.23	0.19	0.17	0.20	0.16	0.15	<0.14	0.18
As75	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
Se77	7.8	8.1	<1.8	<1.4	<1.1	2.3	8.2	11.8	1.7	<0.9
Mo95	0.249	0.197	0.604	0.504	0.229	0.209	0.267	0.283	0.261	0.227
Ag107	4.2	2.3	12.2	9.1	4.7	10.5	4.0	3.4	5.2	2.8
Cd111	1926	1893	2258	2232	2157	2074	2080	2101	2041	1937
In115	48.1	49.4	72.2	68.6	261.2	458.9	404.7	322.6	353.8	38.8
Sn118	4.43	0.31	308.98	463.65	1.81	4.20	13.12	8.57	15.86	0.42
Sb121	<0.04	<0.04	0.52	0.88	0.15	0.68	0.04	<0.03	1.40	0.06
Au197	<0.012	<0.012	<0.021	<0.017	<0.013	<0.015	<0.013	<0.014	<0.014	0.017
Hg202	4.2	4.7	4.8	4.0	3.9	4.0	3.8	3.8	4.3	3.4
Tl205	0.004	0.004	<0.008	<0.006	<0.004	<0.006	<0.004	<0.005	<0.005	0.004
Pb208	1.53	0.43	1.87	0.65	1.11	3.65	0.26	0.10	0.70	0.72
Bi209	4.21	0.97	<0.01	<0.00	0.70	3.64	0.26	0.09	0.35	0.16

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Análisis	KMO-06-293-circulo b-ef - 1	KMO-06-293-circulo b-ef - 2	KMO-06-293-circulo c-ef - 1	KMO-06-293-circulo c-ef - 2	MO-05-KK-07-circulo a -ef - 2	MO-05-KK-07-circulo b -ef - 1	MO-05-KK-07-circulo b -ef - 2	MO-05-KK-07-circulo c -ef - 1	MO-05-KK-07-circulo c -ef - 2
S33	457064	458402	447779	456883	451852	438682	447026	449585	451299
S34	451553	452596	448875	456059	451574	446720	450915	445147	457085
Mn55	2862.0	3068.2	2885.1	2752.7	3146.4	3312.3	3156.1	3116.5	3290.8
Fe57	58740	58411	59654	60401	67245	72835	71127	67949	75298
Co59	0.39	0.09	0.28	0.25	0.25	0.25	0.33	0.19	0.39
Cu65	27.9	46.6	27.9	46.0	277.2	271.2	249.4	251.8	255.2
Zn66	574000	574000	576000	578000	557000	555000	554000	555000	553000
Ga71	6.23	25.96	5.74	3.98	7.10	9.69	10.60	7.66	4.93
Ge74	<0.14	<0.14	<0.16	0.50	0.89	0.23	0.17	0.23	0.16
As75	0.5	0.6	0.7	0.5	0.8	0.8	0.5	0.6	0.6
Se77	<0.8	<0.8	<1.0	<1.0	<1.2	1.9	1.2	1.7	1.1
Mo95	0.309	0.305	0.318	0.267	0.308	0.335	0.379	0.349	0.337
Ag107	3.7	3.0	3.5	14.6	11.6	6.2	5.2	8.7	6.2
Cd111	1864	1872	1730	1765	1751	1809	1922	1877	1978
In115	24.3	19.2	24.7	27.5	324.0	312.8	302.5	316.4	307.1
Sn118	0.18	0.26	0.61	4.07	38.16	7.06	11.87	19.33	14.86
Sb121	0.11	<0.04	0.23	2.20	2.45	0.59	0.15	0.91	<0.04
Au197	<0.012	<0.013	<0.014	0.020	<0.019	<0.013	<0.012	<0.017	<0.013
Hg202	2.1	2.5	2.5	3.3	4.2	2.6	2.9	4.3	3.3
Tl205	<0.003	0.004	0.006	0.086	0.008	0.050	0.010	0.031	<0.003
Pb208	1.52	0.93	1.38	12.73	29.08	2.11	0.62	5.87	0.26
Bi209	0.48	0.17	0.57	4.72	9.90	1.44	0.54	1.66	0.15

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Calcopirita

Análisis	2019-MOR-47-circulo-A-cpy - 1	2019-MOR-47-circulo-B-cpy - 1	2019-MOR-47-circulo-C-cpy - 1	2019-MOR-47-circulo-C-cpy BIS - 1	2019-MOR-44-circulo A -cpy - 1	2019-MOR-44-circulo b -cpy - 1	2019-MOR-44-circulo c -cpy - 1	2019-MOR-42-circulo e -cpy - 1	KMO-06-293-circulo a-cpy - 1	KMO-06-293-circulo b-cpy - 1	KMO-06-293-circulo c-cpy - 1
S33	737630	730383	707428	736242	731718	760827	670087	646048	629513	711868	644738
S34	695419	651371	751821	665545	682121	739163	693743	692555	626151	684047	641180
Mn55	3.2	<1.1	<1.2	<1.2	2.2	3.0	6.1	7.0	112.5	295.5	3.9
Fe57	330683	311941	320611	312445	326156	354846	316537	309568	292958	339553	337439
Co59	18.01	12.80	13.27	12.03	0.04	0.08	<0.05	0.36	0.31	0.10	0.06
Cu65	346000.0	342000.0	340000.0	340000.0	347000.0	345000.0	347000.0	346000.0	343000.0	343000.0	342000.0
Zn66	1021	961	1017	1736	340	341	550	473	816	621	1001
Ga71	0.18	0.25	0.33	0.35	0.30	0.28	0.57	0.52	1.31	1.21	0.69
Ge74	0.71	0.76	0.81	0.83	0.19	<0.17	<0.15	0.19	0.53	1.91	0.22
As75	0.1	0.1	0.1	0.1	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	1.8	1.3	0.5
Se77	112.1	105.9	110.2	110.8	18.4	18.3	18.4	14.2	6.4	7.3	6.8
Mo95	0.085	0.056	0.040	0.060	0.064	0.317	0.262	0.043	0.094	0.066	0.049
Ag107	225.0	197.3	237.0	220.5	12.6	16.4	13.5	68.8	1719.3	2648.5	1724.6
Cd111	6	6	6	9	1	1	2	2	4	1	4
In115	2.0	1.9	2.4	2.4	29.5	31.1	27.3	18.7	11.1	7.2	7.4
Sn118	13.24	11.88	16.21	14.79	24.28	23.06	29.00	31.20	45.90	36.62	26.86
Sb121	0.04	0.08	0.07	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	3.02	2.18	0.82
Au197	<0.016	<0.012	0.015	0.024	0.013	0.017	0.017	0.014	<0.013	<0.019	<0.013
Hg202	<0.1	<0.1	0.2	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tl205	<0.005	0.007	<0.004	<0.004	0.006	0.013	0.005	0.008	0.451	0.360	0.126
Pb208	1.74	2.32	2.19	2.03	2.12	2.62	1.80	2.46	18.17	8.82	6.12
Bi209	0.98	1.42	1.50	1.42	8.26	8.20	6.35	4.49	6.26	5.82	1.27

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

Galena

Análisis	MO-05-KK-06A-círculo a-gn - 1	MO-05-KK-06A-círculo a-gn - 2	MO-05-KK-06A-círculo b-gn - 1	MO-05-KK-06A-círculo b-gn - 2
S33	111091	109207	108069	102397
S34	112526	110697	109427	104454
Mn55	8.1	7.5	7.7	6.7
Fe57	<7	<7	<8	12
Co59	<0.23	<0.25	<0.26	<0.27
Cu65	4.8	7.4	3.0	6.8
Zn66	<1	<2	<2	<1
Ga71	<0.05	<0.05	<0.05	<0.07
Ge74	<0.31	<0.31	<0.33	<0.32
As75	<0.4	<0.4	<0.5	<0.4
Se77	<1.4	<1.6	<1.6	<1.4
Mo95	<0.321	<0.274	<0.395	<0.301
Ag107	5351.6	5711.6	5014.3	4883.1
Cd111	33	36	26	28
In115	1.9	2.0	1.9	1.9
Sn118	572.74	572.09	545.58	532.97
Sb121	4765.88	5123.76	4476.91	4326.02
Au197	<0.036	<0.046	<0.036	1.124
Hg202	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tl205	3.789	3.773	3.903	3.820
Pb208	848000.00	848000.00	848000.00	848000.00
Bi209	0.02	0.03	0.02	0.03

* Los valores en color rojo se han descartado en las gráficas y el texto ya que representan valores falsos (tiempo de ablación vs. señal de intensidad y micro-inclusiones).

ANEXO F

Resultados de la aplicación del geotermómetro GGIMFis

Mineral-Cuerpo	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Mn (ppm)	In (ppm)	Fe (ppm)	Fe (wt.%)	PC1	Tmax	Tmin	Tcen	Err Abs
ef-Porvenir	0.11	0.37	3295.6	212.3	74806	7.4806	-3.6523	423.3491	390.0250	406.6871	16.6621
ef-Porvenir	0.12	0.45	3534.2	209.0	73863	7.3863	-3.6111	420.8019	388.0806	404.4412	16.3607
ef-Porvenir	0.12	0.20	3765.4	215.3	72790	7.2790	-3.7980	432.3342	396.8839	414.6091	17.7251
ef-Porvenir	0.11	0.18	3711.5	216.3	72939	7.2939	-3.8335	434.5279	398.5586	416.5433	17.9847
ef-Porvenir	0.09	0.34	3654.9	209.7	73677	7.3677	-3.7366	428.5509	393.9959	411.2734	17.2775
ef-Porvenir	0.14	0.37	4593.4	210.5	72704	7.2704	-3.6586	423.7372	390.3213	407.0292	16.7080
ef-Porvenir	0.13	0.51	3140.7	202.5	75381	7.5381	-3.5389	416.3472	384.6800	400.5136	15.8336
ef-Porvenir	0.17	0.48	4572.0	203.5	72705	7.2705	-3.5549	417.3346	385.4337	401.3842	15.9505
ef-Porvenir	0.15	0.27	3488.6	204.0	73337	7.3337	-3.6615	423.9117	390.4545	407.1831	16.7286
ef-Porvenir	0.18	0.33	3753.5	205.4	73500	7.3500	-3.5898	419.4918	387.0804	403.2861	16.2057
ef-Porvenir	0.14	0.43	4209.4	206.5	73956	7.3956	-3.6088	420.6617	387.9735	404.3176	16.3441
ef-Porvenir	0.14	0.39	3817.9	205.0	75293	7.5293	-3.6173	421.1843	388.3725	404.7784	16.4059
ef-Porvenir	0.10	0.42	4103.9	217.2	74382	7.4382	-3.6888	425.6000	391.7433	408.6716	16.9284
ef-Porvenir	0.15	0.47	3700.4	203.6	74890	7.4890	-3.5507	417.0757	385.2361	401.1559	15.9198
ef-Porvenir	0.19	0.18	4609.3	210.2	75812	7.5812	-3.7700	430.6084	395.5665	413.0874	17.5209
ef-Porvenir	0.18	0.57	4602.5	203.9	74564	7.4564	-3.5197	415.1630	383.7759	399.4695	15.6935
ef-Porvenir	0.22	0.39	4286.2	207.0	73589	7.3589	-3.5358	416.1604	384.5374	400.3489	15.8115
ef-Porvenir	0.21	0.21	4766.7	207.2	75962	7.5962	-3.7206	427.5586	393.2384	410.3985	17.1601
ef-Porvenir	0.13	0.52	6319.8	210.2	72111	7.2111	-3.6553	423.5348	390.1668	406.8508	16.6840
ef-Porvenir	0.21	0.24	4357.3	207.2	74420	7.4420	-3.6602	423.8366	390.3972	407.1169	16.7197
ef-Porvenir	0.17	0.34	4105.8	208.4	75706	7.5706	-3.6266	421.7621	388.8135	405.2878	16.4743
ef-Porvenir	0.17	0.34	4697.2	208.2	75592	7.5592	-3.6527	423.3709	390.0416	406.7062	16.6646
ef-Porvenir	0.19	0.33	4497.2	213.3	77336	7.7336	-3.6404	422.6138	389.4637	406.0387	16.5751
ef-Porvenir	0.15	0.30	4713.3	208.8	76613	7.6613	-3.7099	426.9023	392.7374	409.8199	17.0824
ef-Porvenir	0.26	0.27	11098.0	166.5	71422	7.1422	-3.7408	428.8058	394.1905	411.4981	17.3077
ef-Porvenir	0.24	0.40	12323.6	167.5	69767	6.9767	-3.6815	425.1493	391.3992	408.2743	16.8750
ef-Porvenir	0.27	0.38	8759.1	166.2	73533	7.3533	-3.6193	421.3088	388.4675	404.8882	16.4207
ef-Porvenir	0.23	0.31	10629.4	171.4	71296	7.1296	-3.7234	427.7337	393.3720	410.5529	17.1808
ef-Porvenir	0.26	0.30	9668.7	169.7	72328	7.2328	-3.6916	425.7706	391.8735	408.8220	16.9485
ef-Porvenir	0.27	0.34	8378.7	164.4	77244	7.7244	-3.6459	422.9499	389.7202	406.3351	16.6148
ef-Porvenir	0.27	0.44	8172.5	162.9	79055	7.9055	-3.5967	419.9160	387.4043	403.6601	16.2559
ef-Porvenir	0.25	0.43	10552.5	172.8	73377	7.3377	-3.6437	422.8193	389.6206	406.2200	16.5994
ef-Porvenir	0.25	0.44	15568.8	168.0	63577	6.3577	-3.6639	424.0621	390.5693	407.3157	16.7464
ef-Porvenir	0.25	0.49	8920.9	168.6	77230	7.7230	-3.5995	420.0918	387.5385	403.8151	16.2767
ef-Porvenir	0.25	0.40	9428.9	170.7	74791	7.4791	-3.6491	423.1503	389.8733	406.5118	16.6385

Mineral-Cuerpo	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Mn (ppm)	In (ppm)	Fe (ppm)	Fe (wt.%)	PC1	Tmax	Tmin	Tcen	Err Abs
ef-1-Ombra Inferior	1.13	0.23	532.2	49.4	13361	1.3361	-2.0904	326.9792	316.4590	321.7191	5.2601
ef-1-Ombra Inferior	1.13	0.15	543.0	48.3	13503	1.3503	-2.1859	332.8725	320.9578	326.9152	5.9574
ef-1-Ombra Inferior	3.96	0.19	1809.0	45.4	27003	2.7003	-2.3454	342.7138	328.4704	335.5921	7.1217
ef-1-Ombra Inferior	6.32	0.15	1573.0	49.4	22169	2.2169	-2.2060	334.1094	321.9020	328.0057	6.1037
ef-1-Ombra Inferior	0.33	0.23	1585.9	75.2	18151	1.8151	-2.7350	366.7518	346.8202	356.7860	9.9658
ef-1-Ombra Inferior	0.41	0.22	1500.9	72.7	16971	1.6971	-2.6614	362.2064	343.3504	352.7784	9.4280
ef-2-Ombra Inferior	1.23	0.25	520.0	47.0	12984	1.2984	-2.0304	323.2731	313.6299	318.4515	4.8216
ef-2-Ombra Inferior	0.93	0.47	530.3	46.1	12446	1.2446	-1.9384	317.5981	309.2978	313.4479	4.1502
ef-2-Ombra Inferior	1.21	0.37	563.7	48.7	13541	1.3541	-1.9848	320.4603	311.4826	315.9714	4.4888
ef-2-Ombra Inferior	1.20	0.36	561.2	50.3	14215	1.4215	-2.0091	321.9626	312.6294	317.2960	4.6666
ef-2-Ombra Inferior	1.00	0.27	549.8	46.6	12972	1.2972	-2.0729	325.8969	315.6328	320.7648	5.1320
ef-2-Ombra Inferior	0.95	0.41	499.2	47.8	10800	1.0800	-1.9046	315.5124	307.7056	311.6090	3.9034
ef-2-Ombra Inferior	6.28	0.34	1610.0	49.4	19586	1.9586	-1.9850	320.4726	311.4921	315.9823	4.4903
ef-2-Ombra Inferior	5.96	0.15	1628.7	49.5	20238	2.0238	-2.1884	333.0268	321.0756	327.0512	5.9756
ef-2-Ombra Inferior	4.35	0.25	1878.4	48.1	27668	2.7668	-2.2948	339.5905	326.0861	332.8383	6.7522
ef-2-Ombra Inferior	0.78	0.15	1564.1	72.5	17617	1.7617	-2.6260	360.0267	341.6865	350.8566	9.1701
ef-2-Ombra Inferior	1.52	0.31	1599.3	74.9	18420	1.8420	-2.3443	342.6425	328.4159	335.5292	7.1133
ef-1-Manto Italia	156.62	0.19	5630.8	68.6	76090.1	7.6090	-2.1991	333.6825	321.5761	327.6293	6.0532
ef-2-Manto Italia	10.83	0.18	2655.7	38.8	56281	5.6281	-2.4714	350.4866	334.4038	342.4452	8.0414
ef-2-Manto Italia	3.98	0.50	2752.7	27.5	60401	6.0401	-2.4644	350.0505	334.0710	342.0608	7.9898
ef-2-Manto Italia	13.68	0.17	2560.6	261.2	75885	7.5885	-2.7522	367.8121	347.6297	357.7209	10.0912
ef-2-Manto Italia	20.62	0.20	2555.4	458.9	79411	7.9411	-2.6977	364.4493	345.0626	354.7559	9.6934
ef-2-Manto Italia	3.30	0.16	2432.6	404.7	78562	7.8562	-3.1262	390.8880	365.2452	378.0666	12.8214
ef-2-Manto Italia	4.12	0.15	2569.9	322.6	76823	7.6823	-3.0679	387.2877	362.4967	374.8922	12.3955
ef-2-Manto Italia	7.10	0.89	3146.4	324.0	67245	6.7245	-2.5459	355.0822	337.9120	346.4971	8.5851
ef-2-Manto Italia	9.69	0.23	3312.3	312.8	72835	7.2835	-2.8120	371.4975	350.4430	360.9703	10.5273
ef-2-Manto Italia	10.60	0.17	3156.1	302.5	71127	7.1127	-2.8374	373.0663	351.6406	362.3535	10.7129
ef-2-Manto Italia	7.66	0.23	3116.5	316.4	67949	6.7949	-2.8285	372.5192	351.2229	361.8711	10.6481
ef-2-Manto Italia	4.93	0.16	3290.8	307.1	75298	7.5298	-3.0456	385.9141	361.4482	373.6811	12.2329