

Mineralogía, texturas y su relación con la evolución del skarn Santa Isabel de Moro

Mineralogy, textures and their relationship with the evolution of the Santa Isabel de Moro skarn

Ángel Carlos Salas Colca¹

Recibido: 10/03/2022- Aprobado: 5/09/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

El skarn Santa Isabel de Moro es un skarn cálcico, localizado en los flancos occidentales de la Cordillera Negra en el norte del Perú, la mineralización se ha originado por el emplazamiento de plutones de granodiorita y cuarzdiorita en las calizas de la Formación Santa. El objetivo de este estudio es caracterizar los minerales y las texturas de las rocas encajantes y estructuras mineralizadas para determinar el origen y la evolución del depósito. La metodología empleada fue la petrografía y difracción de rayos X de muestras de afloramientos y de interior mina, esto integrado con un cartografiado geológico. Las rocas detríticas se encuentran metamorfozadas a hornfels, al igual que los niveles de calizas a mármol, la alteración prógrada consiste en granates y clinopiroxenos y óxidos de hierro, la alteración retrograda consiste venillas de calcita y cuarzo asociado a sulfuros. En el depósito se encuentran tres estilos de mineralización: I) Fe, II) Cu-Zn, y III) Zn-Pb-Cu-Ag(-Mn); cada uno de ellos está asociado a un plutón parental diferente, por otro lado, tanto las rocas encajantes y la mineralización presentan texturas de deformación.

Palabras claves: Andes Centrales; Cordillera Negra; Cordillera Occidental; depósito skarn; difracción de rayos X; petrografía; skarn polimetálico.

ABSTRACT

Santa Isabel de Moro skarn is a calcic skarn located in the western side of Cordillera Negra in northern Peru, this deposit was originated by intrusion of granodiorite and quartzdiorite in limestones from Santa Formation. The aim of this research is characterized minerals and textures of rocks and mineralization, to determine genesis and evolution of deposit. The methodology used was petrography and X-ray diffraction of samples of outcrops and underground mine, this was integrated of a geological cartography. Detrital rocks were metamorphosed to hornfels, as well as limestone to marble, prograde alteration is composed by garnet, clinopiroxenes and iron oxides, retrograde alteration consists of veinlets of calcite and quartz associated to sulfides. Three styles of mineralization are found in the deposit: I) Fe, II) Cu-Zn, and III) Zn-Pb-Cu-Ag(-Mn); each of them is associated with a different parent pluton, on the other hand, both the host rocks and the mineralization present deformation textures.

Keywords: Central Andes; Cordillera Negra; petrography; polymetallic skarn; skarn deposit; X-ray diffraction; Western Cordillera.

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

E-mail: angel.salas@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1101-4390>

I. INTRODUCCIÓN

El término “skarn” define a la asociación de minerales calcosilicatados tales como granates y clinopiroxenos, los “depósitos tipos skarn” se refiere a la mineralización económica asociada al skarn (Pirajno, 2009) en el Perú son el resultado de la interacción de fluidos magmáticos-hidrotermales con calizas o dolomías, en el territorio nacional han sido una fuente importante de Cu, Pb, Zn, Ag, W, Fe y otros metales. Los yacimientos tipo skarn más grandes son los de cobre y están emplazados en grandes espesores de rocas carbonatadas, en su gran mayoría de edad mesozoica tales como el Grupo Pucara, la Formación Jumasha, Formación Santa en el centro y norte del Perú, y en el sur del Perú, la Formación Arcurquina (asociado al batolito Andahuaylas-Yauri), del mismo modo también existen menores ocurrencias de skarn en otras unidades litoestratigráficas, como el yacimiento Cobriza, emplazado en la Formación Copacabana en Huancavelica (Huamán et al., 1990), la antigua mina Ataspaca emplazada en la Formación Pelado en Tacna (Bonelli, 1983), entre otros ejemplos.

Los depósitos tipo skarn se forman en tres etapas: la primera etapa comprende el metamorfismo isoquímico, lo cual implica la recristalización de la mineralogía de las rocas encajantes; la segunda etapa (prógrada), está relacionada al reemplazamiento de las rocas encajantes por minerales calcosilicatados (skarn *sensu stricto*), y la última etapa (retrógrada), consiste en la hidratación de los minerales formados en la etapa prógrada, esto ocurre mediante fracturas y reemplazamientos, los cuales están asociados a la mineralización metálica (Einaudi et al., 1981), (Meinert et al., 2005)

En el skarn Santa Isabel de Moro hasta la actualidad no se han determinado la relación entre las alteraciones hidrotermales y la mineralización económica, así como la naturaleza y clasificación del skarn, el objetivo de este trabajo es dar a conocer la génesis del skarn, clasificar y enlazar las alteraciones hidrotermales y la mineralización económica.

1.1. Geología Regional

El área de estudio las unidades más antiguas son del Cretácico Inferior tales como Formación Santa y el Grupo Casma, dichas unidades se encuentra como remanentes inmersos dentro extensas áreas ocupadas por el Batolito de Costa (Sánchez Fernández et al., 1995), por tal motivo el área de estudio está caracterizada principalmente la minería de vetas de cuarzo relacionada a oro y otros sulfuros (Acosta et al., 2020), mientras otras ocurrencias minerales son subordinadas, las unidades litoestratigráficas en el área de estudio forman parte de la faja plegada y corrida del Maraño (Ver Figura 1).

1.2. Geología Local

El skarn Santa Isabel de Moro, está localizado a 7.5 km al sureste del centro poblado de Moro, en los estribos occidentales de la Cordillera Negra, específicamente en el lado oriental del cerro Tambari. En el área de investigación

se han explotado calizas y hierro aproximadamente durante la década de los sesenta (Sánchez Fernández et al., 1995), el hierro se encuentra como bolsionadas de magnetita y hematita asociados a tácticas (Bellido Bravo, 1974) y las calizas o mármoles alcanzan desde 90 a 95 % en contenido de CaCO_3 (Sánchez Fernández et al., 1995) En un estudio más reciente Arcos Alarcón & Calderón Cossio (2019), reportaron la presencia de alteración argílica además de calcita y óxidos de hierro, los análisis químicos reportaron valores subeconómicos.

Las rocas sedimentarias en el área de estudio consisten de lutitas a limolitas con niveles subordinados de calizas, los cuales se presentan metamorfizados a hornfels y mármol respectivamente, pertenecientes a la Formación Santa del Cretácico Inferior (Sánchez Fernández et al., 1995). El metamorfismo de contacto fue ocasionado por la intrusión de la granodiorita de la Super Unidad Santa Rosa, más tarde fueron intruidas por pequeños plutones de cuarzdiorita rica en anfíbol.

II. MÉTODOS

En el presente estudio se estudiaron quince (15) muestras de afloramientos y tres (03) de mina subterránea.

2.1. Microscopia Óptica

Mediante determinadas propiedades ópticas es posible determinar grupos minerales y/o especies minerales, tales propiedades son: el hábito cristalino, el pleocroísmo, el color de interferencia, el clivaje esto mediante luz transmitida la cual es generalmente utilizada para estudiar los minerales semitransparentes, mientras que la luz reflejada se emplea para la determinación de minerales metálicos como los sulfuros (Barker, 2017).

Las muestras fueron estudiadas en un microscopio petrográfico Olympus BJ51 mediante láminas delgadas (30 μm de espesor) y laminadas delgadas-pulidas donde se observaron: la mineralogía, texturas y microestructuras de las alteraciones y la mineralización

2.2. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que permite la identificación de estructuras cristalinas de diversos materiales entre ellos los minerales, consiste en un haz de electrones que incide sobre un plano cristalino formando un ángulo θ y este es dispersado con el mismo ángulo θ generando así una interferencia constructiva, es decir, un difractograma, el cual permite identificar y cuantificar los materiales presentes (Yoshio Waseda et al., 2011).

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata, y posteriormente analizadas en un equipo de difracción de rayos X Bruker D8 con un ánodo de cobalto, a un voltaje de 38 kV y una corriente de 25 mA, el rango de medición (θ) abarca desde 4° a 70° , los datos obtenidos son comparados con la base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD).

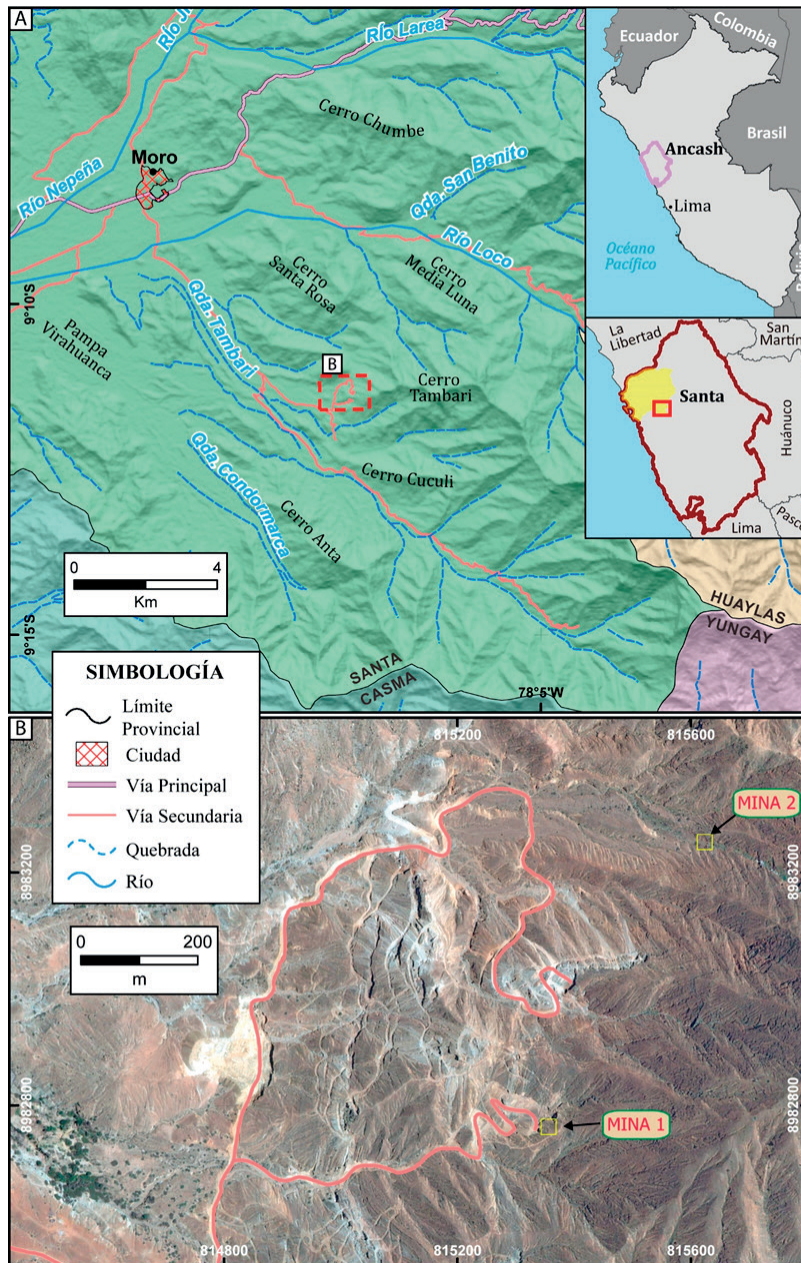


Figura 1. En A: Ubicación y acceso al área de investigación; B: imagen aérea del área de investigación.

III. RESULTADOS

3.1. Rocas mineralizantes y encajantes

3.1.1 Mármol

Son originados por el metamorfismo de las calizas de la Formación Santa, Presenta textura granoblástica, los cristales presenta una leve deformación asimismo lamelas de deformación, esto fue ocasionada por esfuerzos tectónicos, presenta escasas diseminaciones de anfíbol y minerales opacos, afloran principalmente en las quebradas, conforman morfologías escarpadas.

3.1.2 Hornfels

Son parte de los niveles detríticos de la Formación Santa, están compuestos por agregados de sericita-moscovita,

cuarzo y escaso rutilo, algunas veces presentan venillas de anfíboles secundarios y titanita diseminada.

3.1.3 Granodiorita

Pertenece a la Super Unidad Santa Rosa, sus afloramientos se encuentran a escala regional, en el área de estudio consiste de granodiorita, posee texturas fanerítica, perfiticas y ocasionalmente mirmequítica y micrográfica, en las proximidades del contacto, exhiben texturas de deformación, también poseen un incipiente reemplazamiento por feldespato potásico secundario y cloritas, en menores cantidades sericita, calcita y arcillas, en diferentes grados son cortado por venillas de anfíbol o epidota ± clinozoisita, está relacionado a la mineralización de Fe.

3.1.4 Cuarzodiorita

Forma un plutón pequeño de grano fino, tienen texturas glomeroporfírica, contienen plagioclasa, cuarzo, ortosa, abundantes anfíboles, menor biotita, un mineral accesorio abundante es la titanita. Posiblemente está asociado al skarn de Cu-Zn (Ver Figuras 2-4).

3.2. Mineralización económica

3.2.1 Mineralización de Fe

Se encuentra en el contacto entre la granodiorita de la Super Unidad Santa Rosa y la Formación Santa, los cuerpos explotados tienen compuesta por magnetita y hematita las cuales han pseudomorfizado a agregados de granate (del

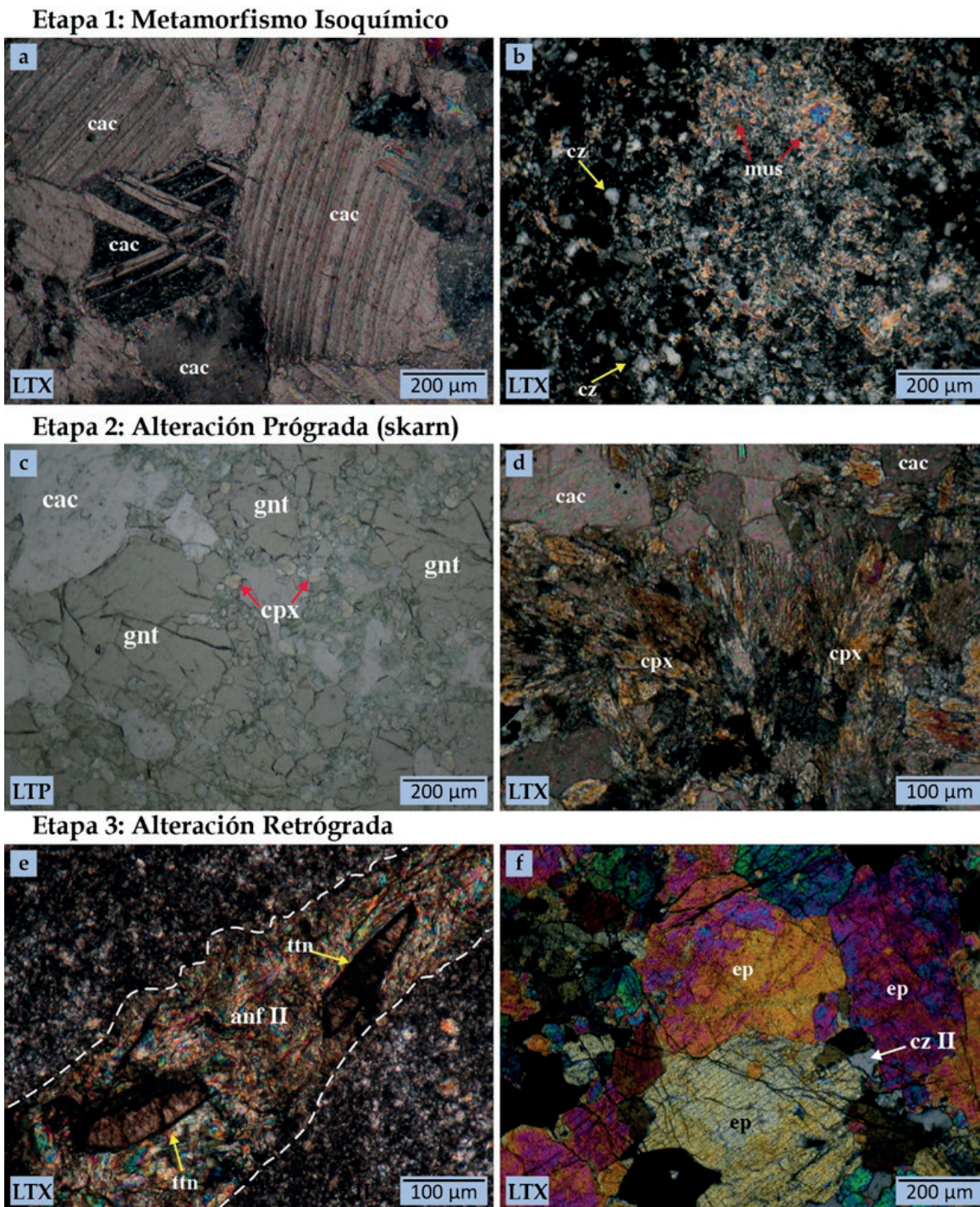


Figura 2. Fotomicrografías del skarn Santa Isabel de Moro en las diferentes etapas de evolución: a) Muestra STM01-01, Mármol: agregados anhedrales de calcita (cac) de bordes irregulares, los cristales presentan una leve deformación; b) Hornfels: constituida por agregados irregulares de cuarzo (cz) y moscovita (mus); c) Granate (gnt) y clinopiroxeno (cpx) de habito granular reemplazando a rocas carbonatadas; d) Clinopiroxeno (cpx) de habito fibroso reemplazando a la rocas carbonatas; e) Venilla de anfíbol secundario (anf II) con diseminaciones de titanita (ttn) cortado a un hornfels; f) Agregados masivos de epidota (ep). LTP: luz transmitida planta; LTX: luz transmitida cruzada.

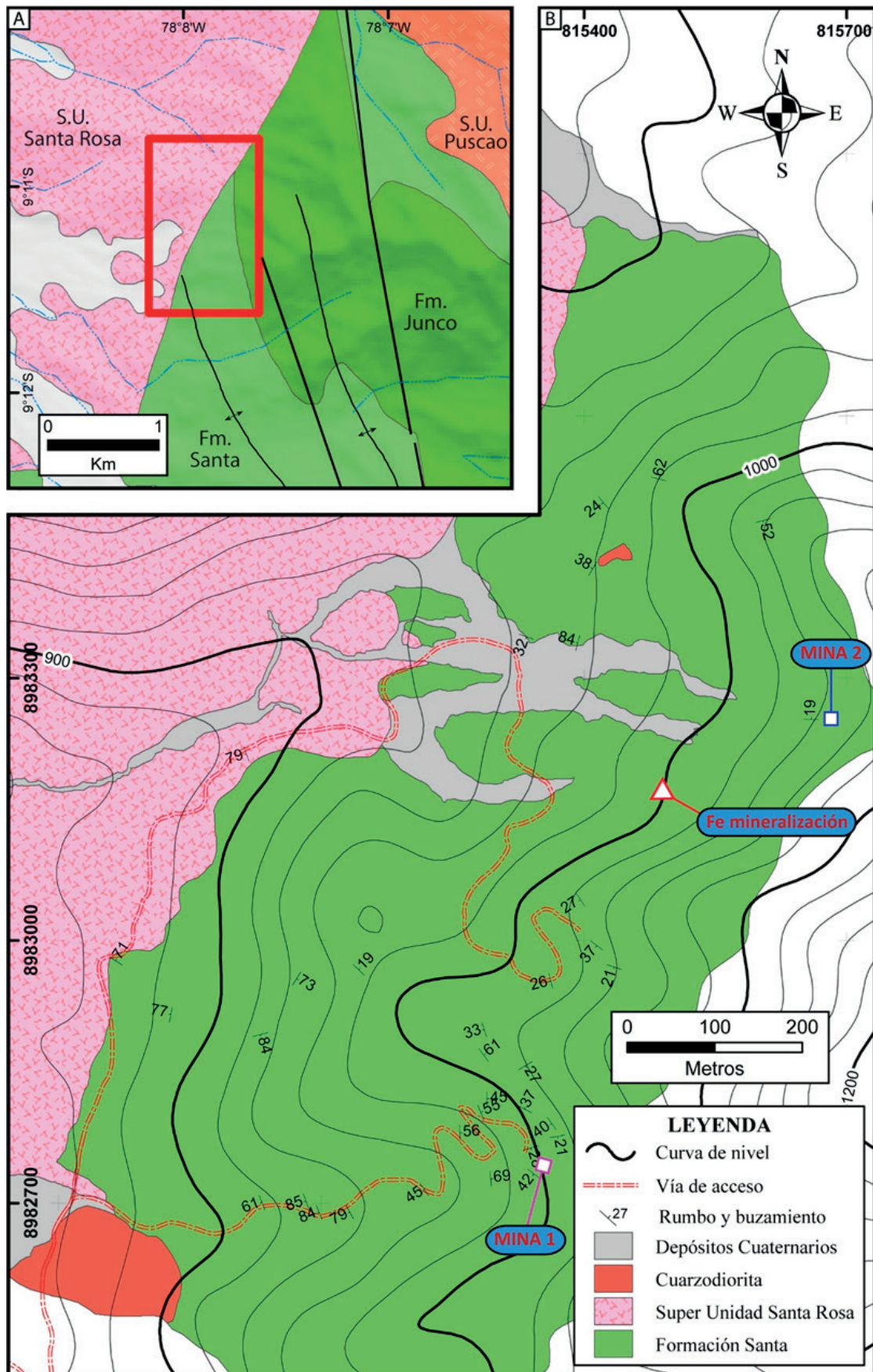


Figura 3. En A: Mapa geológico del cuadrángulo de Casma enfocando el área de estudio (Sánchez Fernández et al., 1995). B: Mapa geológico local.

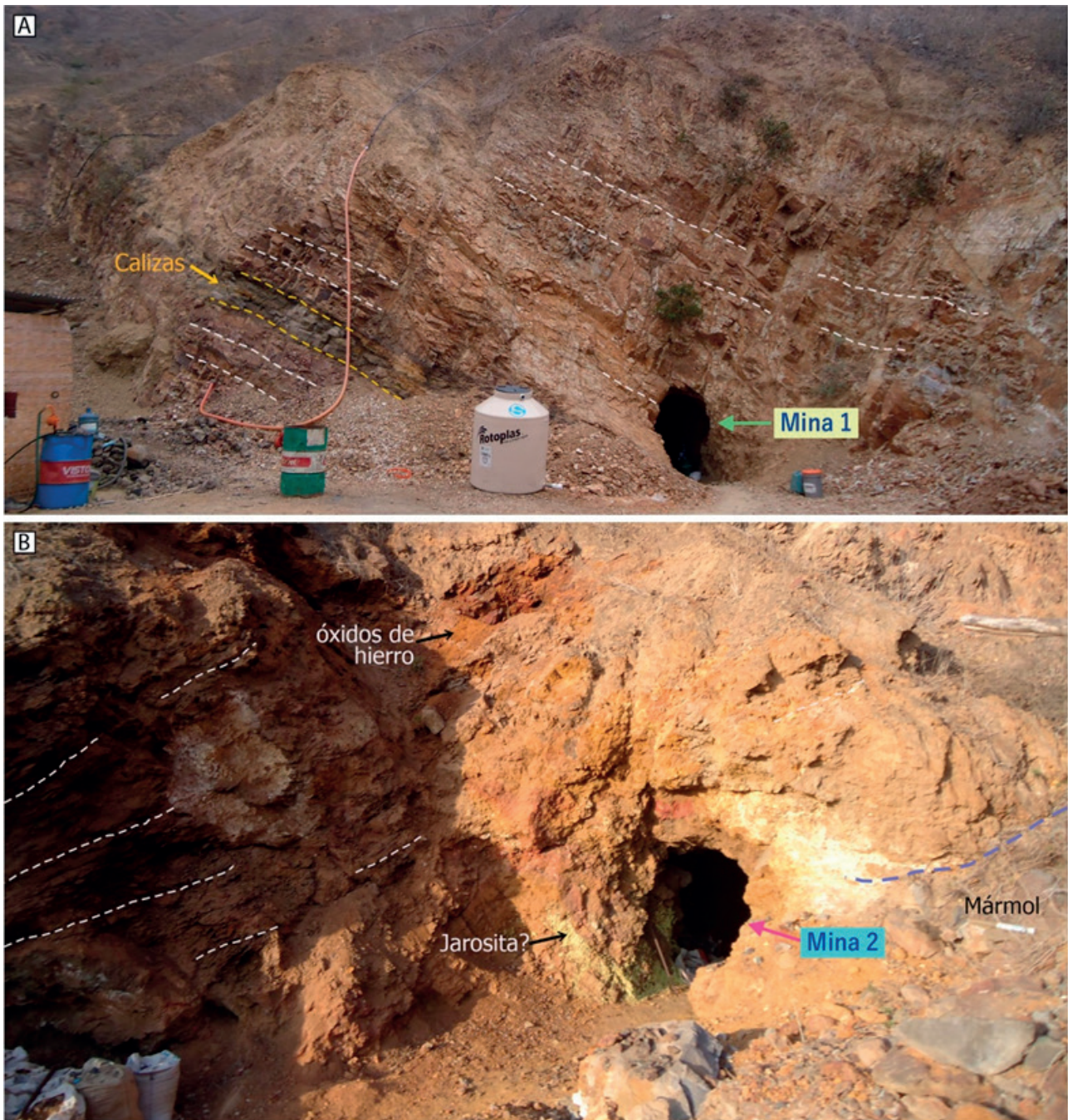


Figura 4. En A: Limolitas con un nivel de calizas y el acceso a la Mina 1, se observa un nivel subordinado de calizas entre niveles de hornfels y B: Socavón de la Mina 2 se encuentra en el contacto entre mármol y rocas pelíticas, se observan óxidos de hierro y jarosita terrosa en la entrada. Las líneas entrecortadas señalan la estratificación.

cual se observan pocos relictos, como relictos se observa la zonación, la cual gradúa hacia una zona de mayor oxidación compuesta mayoritariamente por goethita, relictos de hematita y óxidos de hierro amorfos en el cual aún se observan los moldes del granate, y en sus intersticios se observan agregados de cuarzo y diseminaciones de pirrotita (Ver Figura 5).

3.2.2 Mineralización de Zn-Pb-Cu-(Mn-Ag)

La mineralización en la Mina 1 está conformada por granate dodecaédrico (a veces anisotrópico) y clinopiroxenos

en agregados de hábito prismático, en sus intersticios se encuentran la epidota y óxidos de hierro (goethita), la galena y esfalerita se encuentran en venillas, la galena tienen coronas de reemplazamiento de anglesita \pm hidrocerusita, además tiene inclusiones de esfalerita, calcopirita \pm cubanita, la epidota también se observa en agregados y la calcopirita también ocupa sus intersticios donde presenta coronas de covelita y/o calcocita, finalmente venillas de yeso cortan a la estructura. Cinco metros al norte de la Mina 1, se encuentra labores abandonadas donde se

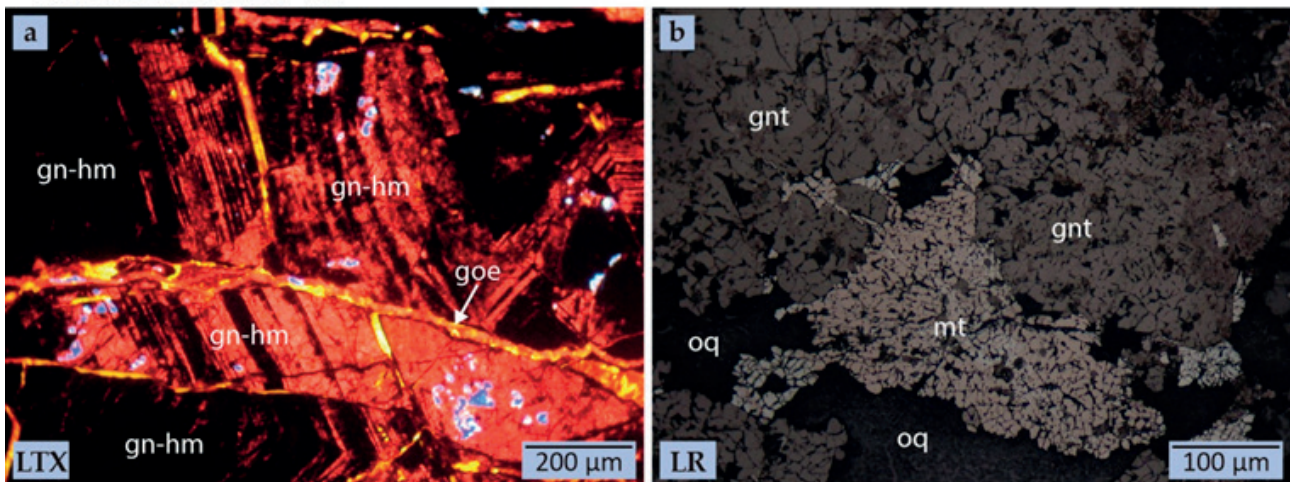
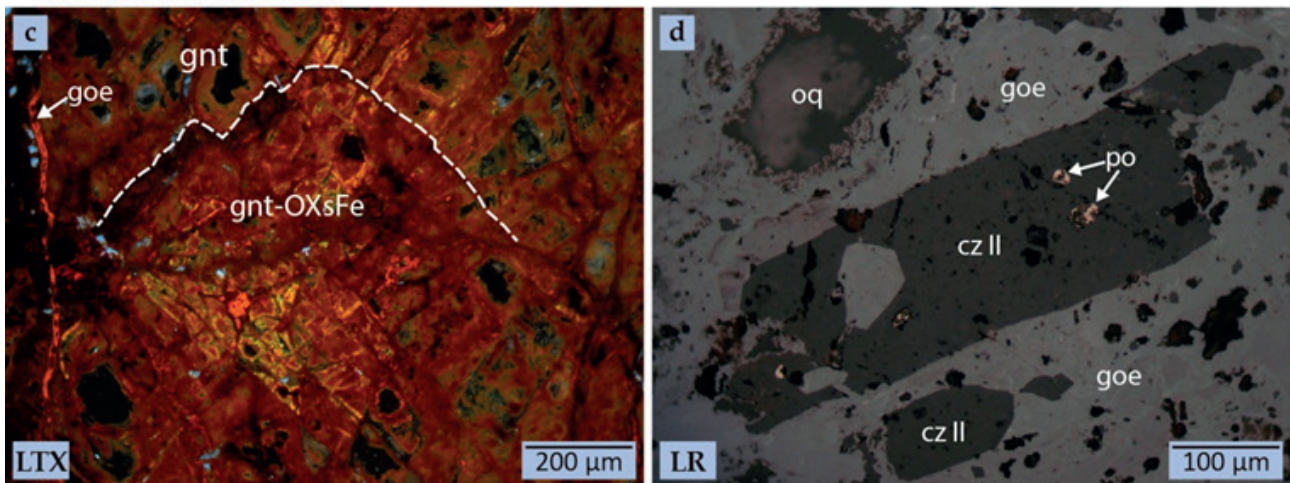
Muestra: STM07-08**Muestra: STM09-03**

Figura 5. Fotomicrografías de la mineralización de hierro. En a) granate después de hematita (gnt-hm), con venillas de goethita (goe); b) magnetita (mt) relleno los intersticios del granate (gnt), c) granate totalmente reemplazado por óxidos de hierro amorfo (gnt-OXsFe); d) cuarzo de relleno (cz II) y diseminaciones de pirrotita (po) en una masa de goethita (goe) y oquedades ovaladas (oq).

LTX: luz transmitida cruzada; LR: luz reflejada

observa malaquita y patinas rojizas de óxidos de hierro y manganeso (Ver Figura 6).

3.2.3 Mineralización Cu-Zn

La mineralización comprende agregados prismáticos a granulares de clinopiroxenos + granate, más tardes son cortados por venillas de cuarzo, seguido de venillas de calcita asociada a pirrotita + calcopirita + esfalerita y trazas de arsenopirita, que rellenan intersticios de los granates granulares y los clinopiroxenos, lamelas de deformación se encuentran en la venilla de calcita y pirrotita. No se observa el desarrollo de minerales secundarios (Ver Figuras 7-8).

IV. DISCUSION

Las rocas sedimentarias en el área de estudio son del Cretácico Inferior, estas se han sometido a los efectos del metamorfismo regional originados por el emplazamiento de rocas plutónicas posiblemente del Cretácico Superior

(Sánchez Fernández et al., 1995), posteriormente a las rocas del área de estudio se le superponen una deformación ocasionada por las diversas etapas de la orogenia Andina.

En el skarn Santa Isabel de Moro se han determinado tres diversos estilos de mineralización, los cuales se diferencian entre sí por el ensamble mineralógico, y los metales, y tienen en común la asociación al skarn, es decir a granates y clinopiroxenos, además de haberse originado por plutones parentales distintos.

La mineralización de Fe fue originada por la granodiorita de la Super Unidad Santa Rosa, sin embargo, los skarn de Fe, presentan afinidad a plutones de composición más básica o ya sea la roca encajante es magnésica (Einaudi et al., 1981), por consiguiente, existe la posibilidad de que el skarn de Fe sea originado por un plutones dioríticos el cual se manifiesta únicamente como xenolitos.

Muestra: STM09-05

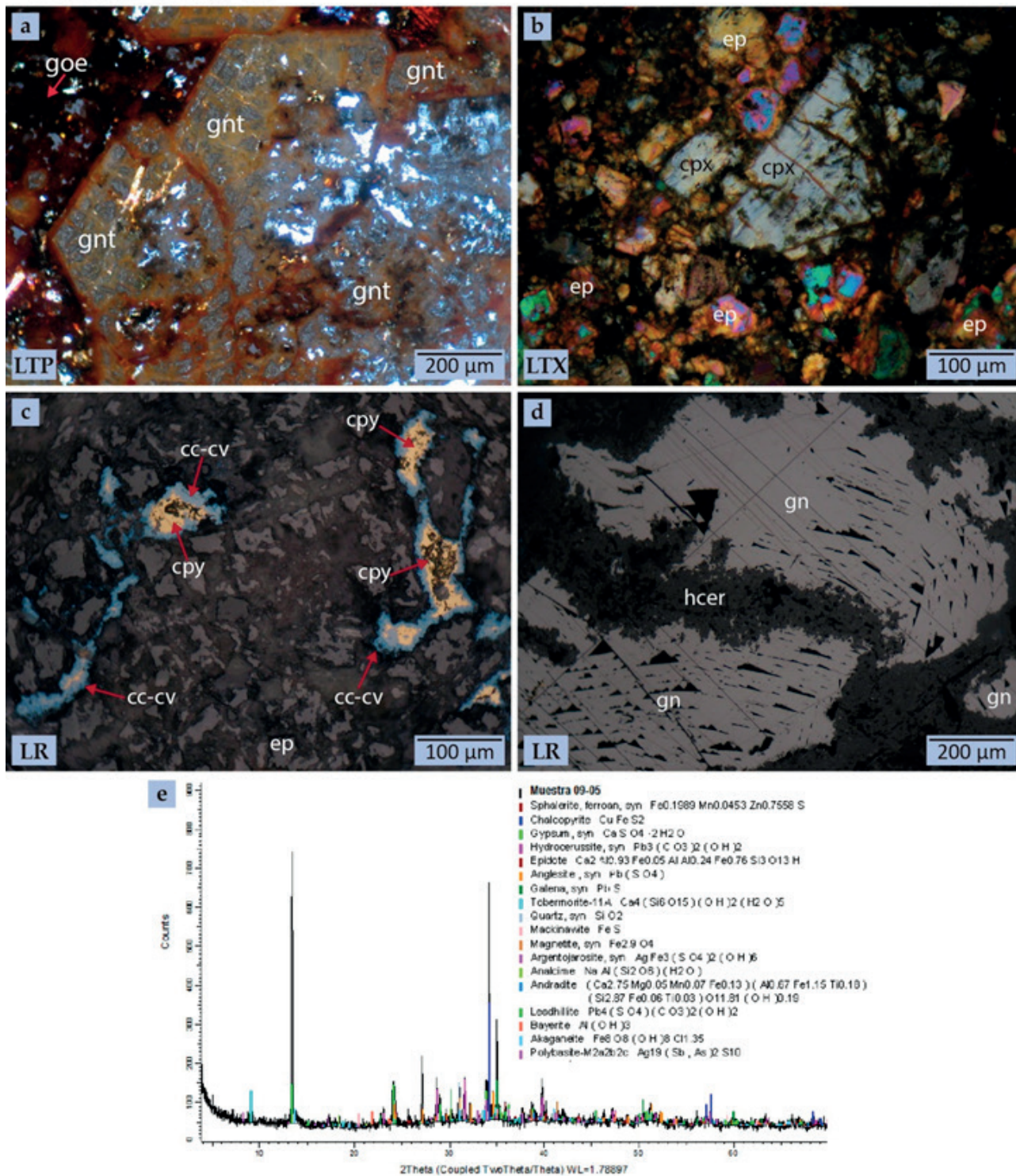
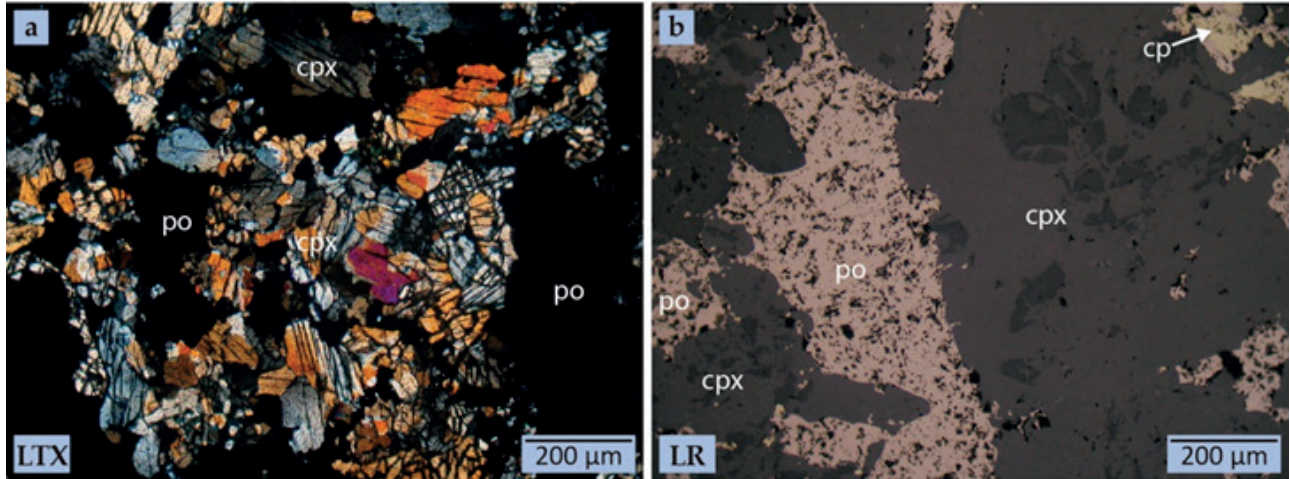


Figura 6. Fotomicrografías de la muestra de la Mina 1. En a) agregados subhedrales de granate (gnt), con sus intersticios rellenos por cuarzo (cz II); b) agregados de clinopiroxenos (cpx) y epidota (ep) c) calcopirita (cpy) con coronas de calcocita y covelita (cc-cv); d) cristales de galena (gn) deformados con coronas de hidrocerusita (hcer); e) difractograma de la muestra STM04-07.

LTX: luz transmitida cruzada; LTP: luz transmitida planta; LR: luz reflejada

Muestra: STM04-09A



Muestra: STM04-09B

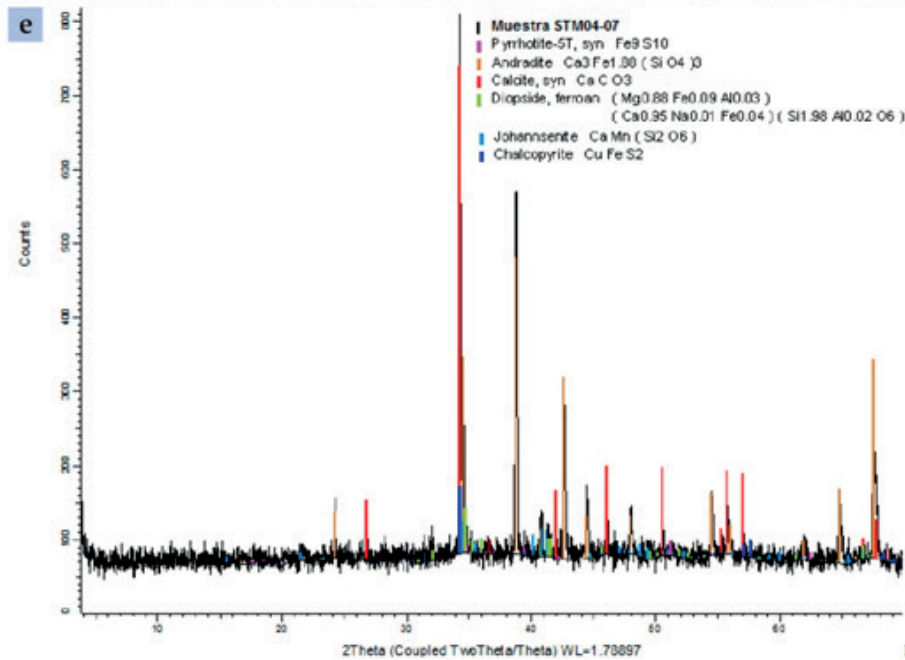
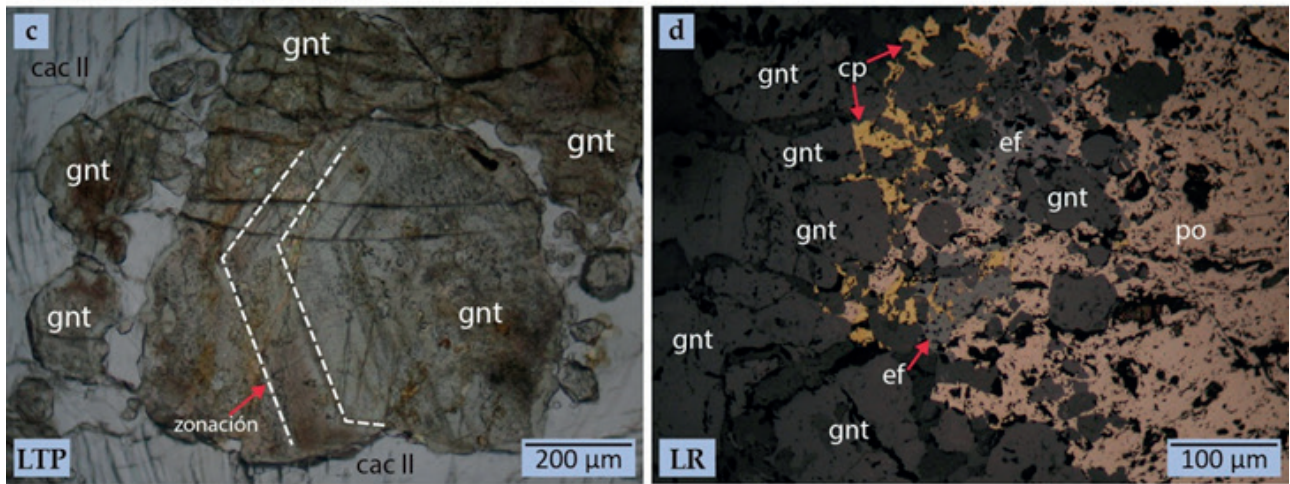


Figura 7. Fotomicrografías de las muestras de la Mina 2. En a) agregados de clinopiroxenos (cpx), en sus intersticios se encuentra la pirrotita (po); b) pirrotita (po) y calcopirita (cp) relleno intersticios; c) granate (gnt) de aspecto granular, entre sus intersticios se encuentra calcita (cac II) de relleno; d) pirrotita (po), calcopirita (cp) y esfalerita (ef) en el intersticio de los granates (gnt); e) difractograma de la muestra STM04-07. LTX: luz transmitida cruzada; LTP: luz transmitida planta; LR: luz reflejada

MINERALES	ETAPAS			
	Prógrada	Retrógrada	Supérgena	
Silicatos	Granate	●		
	Clinopiroxeno	—		
	Anfíbol		—	
	Titanita		—	
	Epidota		●	
	Cloritas		—	
	Cuarzo			—
Sulfuros	Calcopirita			—
	Pirrotita		—	
	Arsenopirita		·	
	Esfalerita		—	
	Galena		—	
	Cubanita		·	
	Covelita			—
Óxidos	Calcocita			—
	Rutilo		—	
	Magnetita	—		
	Goethita			—
Cbs	Hematita		—	—
	Calcita		—	—
	Malaquita			—
	Hidrocerusita			—
	Yeso		—	

Figura 8. Secuencia paragenética generalizada del skarn Santa Isabel de Moro

La mineralización de Cu-Zn (Mina 2) representa el clásico modelo de skarn de Cu descrito por (Meinert et al., 2005) y esta posiblemente asociado al plutón de cuarzodiorita rico en titanita, además de una leve cloritización, este plutón posee similitudes en su composición mineralógica a los plutones porfíricos del skarn Coroccohuayco (Chelle-Michou et al., 2015).

La mineralización de Zn-Pb-Cu-(Mn-Ag) (Mina 1), aun no se ha determinado su relación a un cuerpo plutónico, su mineralogía es conforme modelo de skarn de Zn-Pb (Einaudi et al., 1981), presenta la mayor variedad mineralógica que los otros estilos de mineralización y presenta un importante desarrollo de minerales secundarios.

Hasta la actualidad no existen dataciones radiométricas en el área de estudio, pero dataciones en la Unidad Corralillo (parte de la Super Unidad Santa Rosa) en el área de Culebras (sur del área de estudio) tienen edades entre 74 - 79 Ma en el sistema U-Pb en zircón (INGEMMET, 2021), por lo tanto, tentativamente se sugiere que la edad de mineralización tuvo lugar durante el Cretácico Superior.

V. CONCLUSIONES

- El skarn Santa Isabel de Moro es un skarn polimetálico cálcico, en el cual se han originado

tres diversos estilos de mineralización económica, cada una asociada a un skarn

- Se han determinado tres estilos de mineralización: (1) Fe; (2) Zn-Pb-Cu-(Mn-Ag) y (3) Cu-Zn, cada uno posee una génesis diversa.
- Las rocas encajantes y la mineralización asociada al skarn poseen texturas de deformación, las cuales se sobreimponen a las texturas originadas por metamorfismo de contacto.

VI. AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros José Yparraguirre (MINEMETALLURGY SAC) y Fanny Blas (FAINGENIEROS SAC) por las facilidades en el uso de los laboratorios.

VII. REFERENCIAS

Acosta, J., Quispe, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Paico, D., & Santisteban, A. (2020). *Memoria - Mapa Metalogenético del Perú*. <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/1067355/2019-Memoria-del-Mapa-Metalogenetico-ingles.pdf>

- Arcos Alarcón, F., & Calderón Cossio, C. A. (2019). Actividad minera artesanal en las regiones de Áncash y Cusco - [Boletín E 13]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*, E(13), 1–175. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2240>
- Barker, A. J. (2017). A Key for Identification of Rock-Forming Minerals in Thin-Section. In *A Key for Identification of Rock-Forming Minerals in Thin-Section*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/B17437/KEY-IDENTIFICATION-ROCK-FORMING-MINERALS-THIN-SECTION-ANDREW-BARKER>
- Bellido Bravo, E. (1974). *Depósitos de hierro en el Perú - [Boletín B 3]*. Repositorio Institucional INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/214>
- Bonelli, D. T. (1983). *The geology and skarn mineralization at the Ataspaca prospect, Tacna, Peru*. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/cj82kd25v?locale=en
- Chelle-Michou, C., Chiaradia, M., Béguelin, P., & Ulianov, A. (2015). Petrological Evolution of the Magmatic Suite Associated with the Coroccohuayco Cu(-Au-Fe) Porphyry-Skarn Deposit, Peru. *Journal of Petrology*, 56(9), 1829–1862. <https://doi.org/10.1093/PETROLOGY/EGV056>
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., & Newberry, R. J. (1981). Skarn Deposits. *Society of Economic Geologists*, 75th. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/AV75.11>
- Huamán, M. A., Antúnez de Mayolo, E., & Rivera, A. M. (1990). Geology of the Cu-(Ag, Bi) Stratabound Deposit Cobriza, Central Peru. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*, 129–136. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88282-1_7
- INGEMMET. (2021, November 12). *Nuevos ensambles magmáticos del batolito de la costa y su relación con depósitos minerales, segmento Ancash*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=4sFb5GdQVWY&t=1640s>
- Meinert, L., Dipple, G., & Nicolescu, S. (2005). *World Skarn Deposits: Vol. 1* (Society of Economic Geologists, Ed.; 1). One Hundredth Anniversary GeoScienceWorld Books . <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal Processes and Mineral Systems. *Springer Dordrecht*, 1, XLI–1250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- Sánchez Fernández, A. W., Molina Galdos, O., & Gutiérrez Abanto, R. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Chimbote, Casma y Culebras. Hojas: 19-f, 19-g y 20-g - [Boletín A 59]*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/181>
- Yoshio Waseda, Eiichiro Matsubara, & Kozo Shinoda. (2011). *X-Ray Diffraction Crystallography*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-16635-8>