Artículos: Ingeniería Geológica

# Las alteraciones hidrotermales en las exploraciones geológicas por yacimientos tipo Skarn de Cobre-Zinc

## Hydrothermal alterations in geological exploration by Skarn Copper-Zinc deposits

#### Mario Dominico Rodríguez Delgado<sup>1,a</sup>, Jaime Cesar Mayorga Rojas<sup>1,b</sup>, Jesús Alberto Torres Guerra<sup>1,c</sup>

Recibido: 16/02/2022 - Aprobado: 15/08/2022 - Publicado: 31/12/2022

#### RESUMEN

Los depósitos tipo skarn muestran complejas relaciones mineralógicas y texturales como resultado de la variedad de procesos geológicos involucrados en su desarrollo. Las asociaciones minerales pueden complicarse aún más por la lixiviación y oxidación supergena. Consecuentemente las alteraciones hidrotermales constituyen complejas firmas geoquímicas a analizar bajo una serie de factores en estos sistemas mineralizados, los cuales son concluyentes a la hora de vectorizar este tipo de depósitos. Se propone este estudio a fin de comprender estas alteraciones y plantear su utilidad en la exploración de depósitos skarn de Cu-Zn. Se utilizó la metodología de investigación bibliográfica y estudio de casos, de tres fuentes principales de datos: información de la franja sedimentaria mesozoica de la cordillera interandina y el domo de Yauli, estudio de casos de diferentes partes del mundo y análisis de las condiciones geológicas, magmáticas y petrológicas de su formación. El análisis de los datos en concordancia al diseño de la investigación permite establecer resultados como: la caracterización de un Skarn Cu-Zn, definición de su ambiente geológico y tectónico, ubicación espacial y zonación mineral, los cuales resaltan la importancia y utilidad de las alteraciones hidrotermales en la ubicación de estos importantes depósitos minerales.

Palabras claves: alteraciones hidrotermales; firmas geoquímicas; zonación mineral; skarn Cu-Zn; exploraciones geológicas.

#### ABSTRACT

Skarn-type deposits show complex mineralogical and textural relationships because of the variety of geological processes involved in their development. Mineral associations can be further complicated by supergene leaching and oxidation. Consequently, hydrothermal alterations constitute complex geochemical signatures to be analysed under a number of factors in these mineralised systems, which are conclusive in vectoring these types of deposits. This study is proposed in order to understand these alterations and to propose their usefulness in the exploration of Cu-Zn skarn deposits. The methodology of bibliographic research and case studies was used, from three main sources of data: information from the Mesozoic sedimentary belt of the Inter-Andean Cordillera and the Yauli dome, case studies from different parts of the world and analysis of the geological, magmatic and petrological conditions of their formation. The analysis of the data in accordance with the research design, allows to establish results such as: the characterization of a Cu-Zn skarn, definition of its geological and tectonic environment, spatial location and mineral zoning defined by geochemical halos, which highlight the importance and usefulness of hydrothermal alterations in the location of these mineral deposits.

Keywords: hydrothermal alterations; geochemical signatures; mineral zonation; Cu-Zn skarn; geological explorations.

- a Autor para correspondencia: mario.rodriguez8@unmsm.edu.pe ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7621-4214
- b E-mail: jaime.mayorga@unmsm.edu.pe ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8423-3343
- b E-mail: jtorresgu@unmsm.edu.pe ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8186-5249

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original. Para mas información, por favor póngase en contacto con iigeo@unmsm.edu.pe

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú.

#### I. INTRODUCCIÓN

La formación de depósitos minerales, es la consecuencia de múltiples eventos que se extienden a lo largo del tiempo geológico (Stein, 2014), y en condiciones geológicas apropiadas, los depósitos skarn ocurren en todos los continentes en rocas que datan del Precámbrico al Plioceno, promovidos por fluidos acuosos que emanan de intrusiones graníticas que se emplaza en rocas sedimentarias siliciclásticas ricas en carbonatos que experimentan metamorfismo de contacto (Lefebvre, et al., 2019). Las variaciones en las composiciones magmáticas y la fugacidad de oxígeno de las intrusiones causan varios tipos de mineralización skarn, el índice promedio de fugacidad de oxígeno indica que las intrusiones de skarn de Au y Sn son más reducidas, mientras que las intrusiones de skarn de Cu, Zn y Mo son más oxidadas (Xie, et al., 2022), El tipo de roca huésped y de mineralización controlan la composición de granates y piroxenos (Goryachev, et al., 2018), aunque los skarns no pueden caracterizarse únicamente por sus composiciones de granate o piroxeno, la consideración de ambos produce una huella única, que sirve para definir sus entornos de formación (Zuo, et al., 2015). Einaudi et al. (1981) resumió cinco tipos principales de skarns: hierrooro (Fe-Au), Cobre-Molibdeno (Cu-Mo), Wolframio-Cobre (W-Cu), Plomo-Zinc-Plata (Pb-Zn-Ag) y Estaño-Wolframio (Sn-W), que se distinguen por asociaciones intrusivas y de metales específicos. En este contexto, los diagramas de fases (Figura 1) ayudan a entender por qué los conjuntos minerales son estables, y por qué la sustitución del piroxeno por la actinolita y el granate por la epidota representan un camino retrógrado en el espacio geoquímico de un skarn (Meinert L. D., 2020). Este estudio subraya, la importancia de la exploración acompañada de una amplia investigación científica y aplicación de nuevas tecnologías, que permiten aumentar los recursos metálicos rápidamente en los yacimientos tal como ocurrió en Beiya, en el oeste de Yunnan, China (Mao, et al., 2017).

#### II. MÉTODOS

El método es no experimental de tipo bibliográfico. La técnica utilizada fue la revisión e investigación de información relacionada a los skarn de Cu-Zn, realizando intercambio de ideas con el equipo de trabajo; lo cual nos ha permitido conocer metodología de reconocimiento de la mineralogía y elementos asociados con el zonamiento en el endoskarn y exoskarn que provocan las alteraciones hidrotermales y zonaciones a partir de la intrusión de un plutón, que define la mineralización en el skarn.

#### **III. RESULTADOS**

#### 3.1. Conceptos asociados a un Skarn

Según Haldar (2020), los skarns o tactites son rocas metamórficas duras de grano grueso alteradas por fluidos químicamente activos en procesos metasomatismos. Pirajno (2009), explica que los skarns son rocas córneanas calco-silicáticas formadas por sustitución en litologías carbonatadas de casi todas las edades (Xing, et al., 2022), bien durante metamorfismo regional o en procesos metasomáticos de contacto, que pueden afectar la intrusión resultando áreas de endoskarn (skarnificación de rocas ígneas o aluminosas) y zonas de exoskarn (skarnificación de rocas carbonatadas o dolomíticas), (Figura 2).

#### 3.2. Mineralogía skarn

Al respecto Meinert (2020), indica que la mineralogía no solo define un skarn, sino es la clave para entender su génesis y zonificación, siendo esta última esencial en su



**Figura 1.** Diagrama de fases que ilustra los conjuntos minerales estables en un skarn (modificado de Einaudi, 1982). Abreviaturas: Act = actinolita, Ad = andradita, Cc = calcita, Diop = diópsido, Fa = fayalita, Hd = hedenbergita, Hm = hematita, Ksp = feldespato alcalino, Mt = magnetita, Qz = cuarzo, Sid = siderita, Wo = wollastonita.

exploración. Los skarn Exhiben cientos de minerales; los más importantes, abundantes y variables son el granate y el piroxeno que pueden ser representados en diagramas Triplot (figura 3), teniendo cada mineral una fórmula general y varios grupos (Tabla 1). Alguno minerales ocurren en ciertos tipos de skarn: la johannsenita solo se encuentra en skarn de Zn de manera distal a la fuente magmática, comúnmente a lo largo de contactos estratigráficos o fallas. Por lo tanto, la presencia y abundancia del componente johannsenita en el piroxeno dice mucho sobre la naturaleza del skarn.

Goryachev et al. (2018), sostiene que los depósitos skarn de Fe, W, Mo, Pb-Zn y Au (Co) muestran el mismo tipo de mineralogía.(Shanks, 2014), afirma que los skarns son ensamblajes de silicato de Ca. Maksaev et al. (2001), indica que los skarn se caracterizan por contener minerales calcosilicatados; granates (andradita, grosularia, almandino), diópsido, wollastonita, tremolita-actinolita, esmectita, clorita, epidota, talco, entre otros. (Neukirchen & Ries, 2020), hacen una distincion entre skarns calcáreos, con granates (serie andradita-grosularita), clinopiroxenos (serie diópsido-hedenbergita), wollastonita, escafolita,



**Figura 2.** E Sección geológica de la zona de skarn del depósito Longgen skarn Pb-Zn evolución y manifestación de la mineralización en el Endoskarn y Exoskarn. Tomado de (Jiang, et al., 2020)



**Figura 3.** Diagramas Triplot de las composiciones de granate y piroxeno de los principales tipos de skarn. Miembro final Ad = andradita; Gr = grosularia; Al = almandino; Sp = espesartina; Hd = hedenbergita; Di = diópsido; Jo = johannsenita. Datos tomados de (Einaudi et al., 1981)y (Meinert, 1997, 2020).

Minerales skarn	Formulas Químicas
Granates	A <sub>3</sub> <sup>2+</sup> B <sub>2</sub> <sup>3+</sup> C <sub>3</sub> <sup>4+</sup> O <sub>12</sub>
Grosularia	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Andradita	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> <sup>3+</sup> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Espesartina	Mn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Piroxenos	A <sub>1</sub> <sup>2+</sup> B <sub>1</sub> <sup>2+</sup> C <sub>2</sub> <sup>4+</sup> O <sub>6</sub>
Diópsido	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Hedenbergita	CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
anfíboles	
Tremolita	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$
Ferro-actinolita	$Ca_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$
Hornblenda	(Na,K) <sub>0-1</sub> Ca <sub>2</sub> (Fe,Mg) <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>7</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>
Wollastonita	CaSiO <sub>3</sub>
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH)
Vesubianita	Ca <sub>10</sub> (Mg,Fe,Mn) <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>9</sub> O <sub>34</sub> (OH) <sub>4</sub>
Ilvanita	CaFe <sub>2</sub> <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (OH)

Datos tomados de (Neukirchen & Ries, 2020)

epidota y magnetita y skarns magnesianos tipificados por minerales como diópsido, forsterita, serpentina, magnetita, exhibiendo un patrón general de granate proximal y piroxeno distal que se enriquecen en Tierras raras (REEs) y Uranio (U). La vesuvianita en granates tiene el potencial para la datación U-Pb, debido a sus altas concentraciones de U y una concentración de Pb relativamente baja, así como sus características macroscópicas de grano grueso facilitan el muestreo y la realización del análisis LA-ICPMS (Xing, et al., 2022).

#### 3.3. Clasificación de los skarn

Los skarns han sido clasificados tipológicamente al menos de tres maneras diferentes (Arroyo, 2015) siendo la clasificación más generalizada, en base a sus metales asociados con implicaciones geotectónicas (Einaudi et al., 1981, Einaudi & Burt, 1982, Meinert, 1997), de este modo ocurren skarns de Cu, Pb-Zn, W, Fe, Mo y Sn. Según Pirajno (2009), la clasificación de los skarns debe tener en cuenta el tipo de roca y la asociación mineralógica de la litología sustituida, planteando la existencia de skarns de Fe, W, Cu, Zn-Pb, Mo y de Sn. Haldar (2020), indica que los skarns son de dos tipos: skarn cálcico con caliza como roca huésped, y skarn magnésico con dolomita en las paredes litológicas. Las composiciones de los piroxenos para clasificar este tipo de depósitos consideran que la relación Mn/Fe y el contenido de Zn del piroxeno en cada depósito son constantes y tienden a variar regionalmente de acuerdo con el tipo de metal (Nakano, et al., 1994). Debido a las complicaciones al describir los skarns basándose en los minerales de alteración, los skarns mineralizados deben clasificarse en términos de sus componentes de interés (Bustillo, 2018) ya que durante la formación de depósitos de skarn, aumenta el contenido de Fe de los principales minerales skarn (granate y piroxeno) (Goryachev, et al., 2018)

#### 3.4. Proceso de formación de un skarn

Según Meinert (2020), la génesis de un skarn es netamente metasomático y las primeras etapas son en gran parte metamórficas. La figura 4 ilustra estas etapas. La primera etapa es de calentamiento, llamado metamorfismo isoquímico donde las rocas del lado izquierdo de la Figura 4a da como resultado los equivalentes metamórficos del lado derecho.

En la etapa 2 ocurre "skarn de reacción" en contactos de diferentes litologías (Figura 4b), ocurre intercambio de Ca desde la litología de carbonatos hacia las lutitas adyacentes y movimiento de K, Na, Fe, Mg, Si y Al, desde las lutitas hacia la piedra caliza adyacente. Esto da como resultado bandas de minerales calcosilicatados como wollastonita, granate y piroxeno que en conjunto se denominan "skarn de reacción". Esta fase es de importancia diagnóstica. En la etapa 3 los fluidos circulan a través de los estratos (Figura 4c), canalizados por fallas y contactos estratigráficos, favoreciendo metamorfismo isoquímico o skarn de reacción, generando "skarnoides", controlados por la composición de la roca huésped. La etapa 4 ilustra la superposición del skarn asociado a un plutón sobre las rocas previamente metamorfoseadas con una zona proximal de granate> piroxeno, una zona más distal de piroxeno> granate y wollastonita en el contacto skarn-mármol, aquí el fluido hidrotermal controla la mineralogía skarn (Figura 4d).

Estos procesos están íntimamente vinculados al grado metamórfico y el desarrollo de un skarn ocurre en la escala metamórfica 1 es decir, en rocas metamórficas de grado medio a alto caracterizado por un rápido aumento de temperatura (400-700 °C) a relativa escasa profundidad (0-15 Km) y baja presión (0-4kbar), formándose desde silicatos de Ca como cloritas, pasando por epidotas,



Figura 4. Etapas de formación de un skarn. (a) Metamorfismo isoquímico, sin transferencia de masa. (b) Skarn de reacción; metamorfismo de litologías intercaladas, con transferencia de masa. (c) Skarnoide; metamorfismo de litologías impuras con cierta transferencia de masa. (d) Skarn metasomático (modificado de Meinert, 1997).

anfibolitas hasta granates, piroxenos, mármoles y hornfels (Zuo, et al., 2015).

Los estudios de inclusiones fluidas demuestran que los skarn se forman cerca al contacto ígneo a temperaturas de (500-700 °C). Los skarns de Pb-Zn se forman a temperaturas más bajas (150–400 °C) y que existe una separación de fases por la presencia de salmueras de muy alta salinidad (> 40 % en peso de NaCl) y vapores conjugados de baja salinidad en zonas metasomáticas (Shanks, 2014). (Figura 5).

#### 3.5. Aspectos tectónicos de los depósitos skarn

Los depósitos tipo skarn se presentan en ambientes geológicos que van desde el Precámbrico hasta el Terciario Tardío, los depósitos de importancia económica son relativamente jóvenes y se encuentran en entornos tectónicos donde hay magmatismo y desarrollo de litologías carbonatadas, en particular los asociados a pórfidos, en los límites de placas convergentes, arcos de islas oceánicas y márgenes continentales. Los rift tienden a producir skarns de Sn-W. Los arcos insulares oceánicos producen skarns ricos en magnetita, los de Cu, Zn-Pb y W se forman en arcos magmáticos maduros sobre corteza continental y se asocian a stocks de granodiorita, cuarzo-monzonita, o a plutones de diorita y granodiorita (Pirajno, 2009) su ambiente ideal sería los márgenes de placas convergentes que exhiben hacia el continente una profunda fosa, la cuña de acreción, el arco magmático y un cinturón de extensión de trasarco. Estos entornos son propicios para pórfidos y skarn (Deng, et al., 2020). (Figura 6).

#### 3.6. Skarn de Cu

Los skarn de Cu ocurren en ambientes de márgenes continentales afines a magmas calco alcalinos de tipo "I", específicamente stocks y pórfidos granodioríticos/ dacíticos y cuarzos monzoníticos, en contacto con el cuerpo intrusivo. Tienen altos contenidos de granates y alta razón granate/piroxeno, así como un alto contenido de magnetita-hematita, revelando un ambiente oxidante y un moderado grado de sulfuración con sulfuros típicos como pirita, calcopirita y en menor proporción bornita y esfalerita. Pueden estar asociados a pórfidos cupríferos o a pórfidos estériles. Los skarn de Cu relacionados a pórfidos de Cu, pueden alcanzar grandes volúmenes (50 a 500 Mt) existiendo una relación de la alteración prograda y la alteración potásica zonada con respecto al núcleo potásico. Los skarn de Cu asociados a pórfidos estériles, tienden a ser de pequeño volumen (1 a 50 Mt), con granates más andradíticos a más grosularíticos desde el contacto hacia



**Figura 5.** Patrones de flujo en un skarn. Dedos de skarn marcan regiones de flujo de fluido concentrado. Se muestran dos frentes de reacción: zona de agotamiento de <sup>18</sup>O distal y un frente de reacción metasomático donde se forma el skarn a partir del mármol. La formación de skarn puede verse favorecida por la porosidad durante el progreso de la reacción (patrón de burbujas). Tomado de (Shanks, 2014)



Figura 6. Entornos tectónicos y génesis de un skarn. A. Entorno de subducción oceánica B. Entorno de subducción continental con corteza oceánica acrecionada. C. Entorno de subducción transicional de bajo ángulo. D. Entorno de post-subducción o rifting continental. (Meinert, 1997, 2020)

afuera. Los piroxenos y la razón granate/piroxeno tienden a disminuir del contacto hacia afuera. En etapas avanzadas del sistema, ocurre la alteración fílica en el pórfido y alteración retrograda en el skarn la cual se superpone a la alteración prograda, caracterizándose por tremolitaactinolita, esmectita, siderita, calcita, talco, epidota, clorita, con óxidos y/o Sulfuros de Fe. (Figura 7a)

#### 3.7. Skarn de Zn

Los skarn de Zn ocurren en entornos continentales asociados con subducción o rifting. Se exploran por Zn,

Pb y Ag, son de alta ley (10-20% Zn + Pb, 30-300 g/ton de Ag); se relacionan con rocas ígneas que van desde diorita hasta granito con alto contenido de sílice. El halo común de la mayoría de estos skarn es su presencia distal a las rocas ígneas asociadas. La presencia de granates, piroxenos y contenidos de Zn-Pb-Ag dentro del sistema, indican un entorno geoquímico único pudiéndose distinguir por su mineralogía distintiva rica en Mn y Fe y su ocurrencia a lo largo de estructuras y contactos litológicos. En algunos depósitos, la razón piroxeno/granate y el contenido de Mn en el piroxeno aumentan sistemáticamente a lo largo de la trayectoria del flujo del fluido (Meinert L., 1997). Esta función se ha utilizado para identificar skarns proximal y distal y zonas proximales y distales dentro de depósitos de skarn individuales. La aparición de skarns de Zn en sistemas magmáticos/hidrotermales genera pequeños depósitos potencialmente útiles como guías de exploración en distritos poco expuestos. (Figura 7b)

## 3.8. Las alteraciones hidrotermales en los sistemas skarn.

### 3.8.1. Tienen influencia en la caracterización de un depósito mineral.

Las alteraciones hidrotermales son fundamentales en la exploración minera. En el depósito de clase mundial skarn Antamina, se usa la proporción de metales y elementos inmóviles (La,  $Al_2 O_3$ ) para diferenciar alteraciones genuinas y falsas en calizas y mármoles que rodean el depósito y las calizas inalteradas se utilizan para definir los valores umbral de las proporciones metal-elemento inmóvil (Escalante, et al., 2010). En mina Raura, el contacto de los stocks con las rocas sedimentarias calcáreas

produjo metamorfismo de contacto al Este del sinclinal de Caballococha, generando granates (grosularia, andradita) en las calizas y diópsido en las dolomitas, esto define el deposito como un skarn (Cruz, 1998). En el pórfido-skarn de Tepeoba, en Turquía, las paredes de roca alteradas muestran variaciones en las composiciones mineralógicas y las observaciones de campo y el blanqueamiento de rocas, han permitido distinguir tres zonas de alteración diferentes desde el centro hasta la periferia de la mineralización (Abdelnasser, et al., 2022). (Figura 8).

#### 3.8.2. El granate como herramienta geocronológica en la exploración de depósitos skarn Pb-Zn.

Jiang et al. (2021), señala que se han descubierto abundantes depósitos skarn Pb-Zn empleando la andradita con Ti (Ti-Grt) que se encuentran, en rocas ígneas insaturadas de Si, rocas metamórficas de alta temperatura y skarns metasomatizados por contacto. Este tipo de granate se mantiene estable en una amplia gama de condiciones de presión y temperatura y sometidos a estudios, petrográficos, geoquímicos y de geocronología U-Pb in situ de Ti-Grt junto con la geocronología Re-Os de la molibdenita nos indican que este mineral alterado (granate) es uno de los minerales



Figura 7a. Patrón de zonación típico de los skarns de Cu (según Atkinson & Einaudi, 1978).



Figura 7b. Patrón de zonación típico de los skarns de Zn (modificado de Meinert, 1997)

marcadores más frecuentes en los depósitos de skarn, sus elementos mayoritarios y de traza guardan un registro del crecimiento de su red cristalina y de la evolución de las condiciones fisicoquímicas (P, T,  $fO_2$  y pH) (Jiang, et al., 2020). Su isótopo U–Pb restringe directamente el tiempo y la historia del emplazamiento magmático, así como los procesos metamórficos e hidrotermales. Los datos de datación U-Pb de la granita son los más ampliamente reportados entre los granates, lo que puede deberse a la sustitución de Al<sup>3+</sup> por Fe<sup>3+</sup> (carga iónica idéntica) en el octaedro de los granates, y la sustitución de Ca<sup>2+</sup> (0,99 Å) por U<sup>4+</sup> (0.97 Å) (radio iónico más cercano) en el dodecaedro (Deng, et al., 2017). Destacando la fiabilidad y precisión de la datación U-Pb de Ti-Grt y se enfatiza que los granates que contienen Ti pueden convertirse en una herramienta geocronológica invaluable para los conjuntos de minerales magmáticos, metamórficos e hidrotermales. (Figura 9)

#### 3.8.3. Proporcionan una ubicación espacial o zonación en un yacimiento mineral

Los skarn, muestran alteraciones hidrotermales que siguen patrones definidos, con modificaciones mineralógicas y texturales que revelan una relación espacial íntima con las intrusiones magmáticas (skarn proximal), y con los fluidos hidrotermales migrados a distancias considerables para producir skarns sin un vínculo espacial claro con las intrusiones (skarn distal) (Einaudi et al., 1981; Chang & Meinert, 2004)



Figura 8. Pórfido-skarn Tepeoba y diferentes zonas de alteración. Alteración 1 sillimanita rodeada de sílice en los hornfels cortados por una vena aplítica. Alteración 2 microgranito porfídico con biotita-hornfels. Alteración 3 englobada en hornfels de biotita de color marrón. Tomado de (Abdelnasser, et al., 2022)



Figura 9. Diagramas de concordia Tera-Wasserburg U-Pb (a-b) e intensidad de señal resuelta en el tiempo representativa (c-d) de las andraditas con Ti Grt1 y Grt2 del depósito Mengya'a Pb-Zn. Tomado de (Jiang, et al., 2021)

#### 3.9. Geofísica de los depósitos skarn

Prospección gravimétrica y magnética, los skarns son significativamente más densos que la roca circundante y, por tanto, pueden formar una anomalía gravitatoria o una discontinuidad sísmica, brindando una fuerte respuesta geofísica (Chapman & Thompson, 1984). Esto es particularmente evidente en grandes skarns de hierro, debido a ingentes concentraciones de magnetita u otros minerales magnéticos como la pirrotita de alta temperatura. Los plutones relativamente oxidados suelen contener suficiente magnetita primaria como para formar picos magnéticos, mientras que los plutones reducidos suelen contener ilmenita, en lugar de magnetita que generan mínimos magnéticos. Dado que el metasomatismo de las rocas dolomíticas tiende a formar abundante magnetita, en los depósitos de skarn de magnesio puede ser posible distinguir el protolito original, así como la presencia del skarn, como una fuerte anomalía magnética.

**Prospección eléctrica**; los minerales diseminados y los sulfuros masivos pueden dar fuertes respuestas IP, EM o magnetotelúricas en el skarn (Emerson & Welsh, 1988). Sin embargo, estudios eléctricos en skarns deben ser interpretados cuidadosamente porque el metasomatismo de la roca carbonatada implica necesariamente la redistribución del carbono. La presencia de materia carbonosa (grafito), puede afectar fuertemente a los estudios eléctricos. Estas anomalías inducidas por el carbono pueden estar alejadas de los yacimientos skarn o no estar relacionadas con ellos.

**Prospección radiométrica**; algunos skarns contienen suficiente uranio y torio como para ser detectados por estudios radiométricos aéreos o terrestres (Kwak & Abeysinghe, 1987) Los estudios detallados de estos depósitos demuestran que se pueden detectar skarns relativamente pequeños y que se pueden distinguir diferentes tipos de skarns (Lentz, 1991).

Aunque se han aplicado métodos de gravedad, magnéticos, eléctricos y radiométricos a los depósitos de skarn, su uso no se ha generalizado. Debido a la variabilidad de los depósitos de skarn, probablemente sea necesario adaptar métodos geofísicos específicos a los depósitos o tipos de skarn individuales.

#### IV. DISCUSIÓN

Tres enfoques clave son importantes para una exploración mineral exitosa. El primero es una comprensión de la formación del depósito y sus características de control del mineral. El segundo enfoque se basa en análisis de datos geoquímicos de roca total. El tercer enfoque es la metodología de procesamiento de datos para levantamientos magnéticos de alta precisión. Combinando estos tres enfoques, sugerimos una metodología para la exploración skarn (Zheng, et al., 2022).

Identificar la geocronología de los depósitos de Pb-Zn es extremadamente difícil en las Geociencias Internacionales. Debido al sistema relativamente abierto y la compleja interacción fluido-roca en los depósitos de Pb-Zn, métodos Rb-Sr en esfaleritas, Re-Os en pirita, calcopirita y Pirrotita están sujetan a limitaciones; la datación de molibdenita Re-Os es relativamente madura y precisa. Sin embargo, la molibdenita no solo es rara en los depósitos de Pb-Zn, sino que rara vez coexiste con la esfalerita y la galena, lo que restringe aún más la identificación de la geocronología de los depósitos de Pb-Zn (Jiang, et al., 2021).

Los skarns que tienen altas cantidades de Zn y baja presencia de Cu en el endoskarn con proporciones altas de Zn/Cu en zonas proximales no se conocen bien y necesitan más estudios. El deposito Antamina (Escalante, et al., 2010) y el Empire en Idaho, USA (Chang & Meinert, 2004) son ejemplos representativos de estos fenómenos

Tres etapas de procesos metamórfico-metasomáticos son responsables de la formación de un depsoito skarn; (1) metamorfismo isoquímico, (2) reacciones metasomáticas progradas y (3) reacciones metasomáticas retrógradas, estudios corroborados recientemente por las investigaciones de Abdelnasser et al. (2022) en el depósito pórfido-skarn de Tepeoba.

La clasificación general de un skarn es válida, la clasificación geotectónica es controversial; su desarrollo en áreas circumpacíficas, con dominios tectónicos de tipo hercinico, o a escala local hace que esta clasificación no sea tan preciso (Arroyo, 2015).

La johannsenita es típica en depósitos de skarn Pb-Zn, y su presencia lejos de las intrusiones es definitivo para evidenciar los skarn de zinc (Zuo, et al., 2015). En general, los fluidos magmáticos son fuente de Si, Al, Fe, W, Na, K, F y Cl, mientras que las rocas carbonatadas circundantes son fuente de Ca, Mn y Mg (Xie, et al., 2022). Resultados coincidentes con (Wang Ma et al., 2017) en su investigacion realizada para el Instituto de Geología, de la Academia China de Ciencias.

Los skarn de granate con mineralización de Fe-Cu-Mo ocurren cerca de la intrusión, mientras que los skarn de granate-hedenbergita y de hedenbergita-ferroactinolita tienen un desarrollo distal (Wang, et al., 2017). Las proporciones granate/clinopiroxeno brindan pistas importantes sobre las variables geneticas fundamentales de un skarn y son indicadores del estado de oxidación general del sistema, en conjunto se emplean para clasificar y explorar estos depositos (Zuo, et al., 2015).

#### V. CONCLUSIONES

La tipificación de arcillas y elementos nocivos en las zonas del exoskarn en mina Antamina y Milpo, permiten optimizar su proceso productivo y establecer una estratigrafía confiable a escala de mina, dado que los parámetros metalúrgicos, como leyes, eficiencia de molienda, minerales y elementos nocivos y recuperaciones de metales, están relacionados y controlados por la litología primaria y las características estratigráficas (Ordóñez, et al., 2017).

Los skarn se forman en diferentes etapas; el depósito pórfido-skarn de Tepeoba, en Turquía, se desarrolló en 3 etapas, la mineralización del skarn polimetálico de Hämmerlein en Erzgebirge, Alemania es el resultado de un enriquecimiento en 2 etapas, en el distrito de Kalatag, East Tianshan, China la mineralización se desarrolló en 4 episodios. Conocer estos aspectos son decisivos para entender si se trata de un deposito skarn completamente maduro con una mineralogía y parámetros geológicos fundamentales definidos.

La mineralogía skarn se caracterizan por una textura granoblástica a porfiroblástica y suelen contener hedenbergita (CaFeSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), grosularia (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> (SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), diópsido (FeCaSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) o wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>) como ingrediente esencial. Los mármoles y cuarcitas se forman a partir de calizas y dolomitas y sedimentos de areniscas cuarzosas y silíceas, respectivamente (Haldar, 2020)

El método de componentes principales, análisis factorial y de conglomerados jerárquicos, con perspectivas hiperespectrales se usan para identificar asociaciones geoquímicas, y para explorar las relaciones entre las variables y reducir su dimensionalidad, metodologías de aplicación emergente que han brindado excelentes resultados (Jansson, et al., 2022) en casos como el skarn de Kolyma en Rusia (Glujov, 2019), en el skarn Cu-Mo-Ag Rosemont en Tucson Arizona (Ordóñez, et al., 2017) en Sala, Suecia (Jansson, et al., 2022) y en el depósito skarn de Weondong, Corea del Sur (Jeong, et al., 2016).

#### **VI. REFERENCIAS**

- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., & Yilmaz, H. (2022). Evolution of the Tepeoba porphyry-skarn Cu-Mo-Au deposit, NW Turkey: New mineralogical and geochemical findings. *Ore Geology Reviews*, 147, 104967. https://doi. org/10.1016/J.OREGEOREV.2022.104967
- Atkinson, W. W., & Einaudi, M. T. (1978). Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. *Economic Geology* | *GeoScienceWorld*, 73(7), 1326–1365. https://doi.org/https://doi.org/10.2113/ gsecongeo.73.7.1326
- Chang, Z., & Meinert, L. D. (2004). The magmatic–hydrothermal transition—evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu–Zn skarns at the Empire Mine, Idaho, USA. *Chemical Geology*, 210(1–4), 149–171. https:// doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.018
- Chapman, B. H., & Thompson, D. T. (1984). Applications Of Geophysical Logging Within Skarntype Deposits. *Petrophysics*, 25(2). https://onepetro.org/petrophysics/ article-abstract/171815/Applications-Of-Geophysical-Logging-Within
- Einaudi, M. T., & Burt, D. M. (1982). Introduction; terminology, classification, and composition of skarn deposits. *Economic Geology* | *GeoScienceWorld*, 77(4), 745–754. https://doi. org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.4.745
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., & Newberry, R. J. (1981). Skarn Deposits. GeoScienceWorld Books (Seventy-Fifth Anniversary Volume). https://doi.org/https://doi. org/10.5382/AV75.11
- Emerson, D. W., & Welsh, H. K. (1988). Low-frequency permittivities of skarns and associated rocks. *GEOPHYSICS*, 53(9). https://doi.org/10.1190/1.1442564

- Goryachev, N. A., Shpikerman, I., V., Church, E., S., & Gvozdev, I., v. (2018). Calcic skarn ore deposits of the North-East Russia. Ore Geology Reviews, 103, 3–20. https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.024
- Haldar, S. K. (2020). Metamorphic rocks (Chapter 7). Introduction to Mineralogy and Petrology (Second Edition), 269–289. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820585-3.00007-7
- Jiang, X., Zheng, Y., Gao, S., Yan, J., Kang, Y., Jiang, G., Liu, J., Zhang, Z., & Chen, X. (2021). In-situ U–Pb geochronology of Ti-bearing andradite as a practical tool for linking skarn alteration and Pb–Zn mineralization: A case study of the Mengya'a deposit, tibet. Ore Geology Reviews, 139, 104565. https://doi.org/10.1016/J. OREGEOREV.2021.104565
- Kwak, T. A. P., & Abeysinghe, P. B. (1987). Rare earth and uranium minerals present as daughter crystals in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE skarn, Queensland, Australia. *Mineralogical Magazine*, 51(363), 665–670. https://doi.org/ https://doi.org/10.1180/minmag.1987.051.363.05
- Lentz, D. (1991). Radioelement distribution in U, Th, Mo, and rare-earth-element pegmatites, skarns, and veins in a portion of the Grenville Province, Ontario and Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences, 29*(1). https://doi.org/https://doi. org/10.1139/e91-001
- Maksaev, V., Munizaga, F., Mcwilliams, M., Arévalo, A., Zúñiga, P., & Floody, R. (2001). 40Ar/39Ar geochronology of the El Teniente porphyry copper deposit. Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, 1–4. https:// www.miningdataonline.com/reports/El%20Teniente\_ Geochronology\_2001.pdf
- Meinert, L. D. (1997). Application of Skarn Deposit Zonation Models to Mineral Exploration. 6(2), 185–208. https://www. infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-36db9c2fb2b7-373f-8e61-3ec4a5cfc4af
- Meinert, L. D. (2020). Geology, Policy and Wine The Intersection of Science and Life. *Geochemical Perspectives*, 9(1), 1–133. https://doi.org/doi: 10.7185/geochempersp.9.1
- Neukirchen, F., & Ries, G. (2020). The World of Mineral Deposits. A Beginner's Guide to Economic Geology. In SpringerLink. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-34346-0
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal Processes and Mineral Systems. University of Western Australia. https://doi. org/10.1007/978-1-4020-8613-7 10
- Shanks, W. C. P. I. (2014). Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 13, 59–85. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01103-7
- Wang Ma, Yingchao Liu, Zhusen Yang, Zhenqing Li, Xiaoyan Zhao, & Fan Fei. (2017). Alteration, mineralization, and genesis of the Lietinggang–Leqingla Pb–Zn–Fe–Cu–Mo skarn deposit, Tibet, China. Ore Geology Reviews, 90, 897–912. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j. oregeorev.2017.04.034

#### Contribución de autoría

Describimos las contribuciones al artículo de investigación de la siguiente manera:

- 1. Conceptualización: M.R.
- 2. Curación de datos: M.R.
- 3. Análisis formal: J.T. y J.M.
- 4. Adquisición de fondos: M.R.
- 5. Investigación: M.R.
- 6. Metodología: J.M.
- 7. Administración del proyecto: J.M.
- 8. Recursos: M.R. y J.T.
- 9. Software: M.R.
- 10. Supervisión: J.T.
- 11. Validación: J.M.
- 12. Visualización: M.R.
- 13. Redacción borrador original: M.R.
- 14. Redacción revisión y edición: J.T. y J.M.

#### Siendo autores del artículo:

Mario Dominico Rodríguez Delgado: M.R.

Jaime Cesar Mayorga Rojas: J.M.

Jesús Alberto Torres Guerra: J.T.