



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Zonamiento óptico-composicional de granates y secuencia paragenética de un sistema skarn al sur del distrito Antamina, Ancash-Perú

Abraham Arana<sup>1</sup>, Luis Paredes<sup>1</sup>, Gabriel Mayna<sup>1</sup> & Kevin Retamozo<sup>†</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Ingeniería

### RESUMEN

En San Marcos-Ancash, 20km al sur de Antamina, en las cercanías de la Laguna Yanacocha, intrusivos miocénicos cortan la Fm. Jumasha generando un típico skarn zonado. Se ha reconocido que la fase prógrada del endoskarn está conformada por granditas isótropas, posterior a la ebullición incrementan su relación Fe/Al hasta adquirir una moderada anisotropía. A medida que aumenta el contenido de clinopiroxeno y van cediendo Mg a las granditas, estas aumentan su birrefringencia hasta  $\rho = 0.021$ , en este punto se tiene la relación Mg/Fe: 0.8 - 1.2 con Fe/Al: 0.28-0.3. Tras la transición a un contexto frágil, los fluidos retrógrados calientes retiran Mg de las granditas, quitándole zonamiento de cristal y anisotropía, al enfriarse los fluidos, empiezan a destruir mineralogía prógrada desarrollando actinolita-epidoto-clorita/calcita-cuarzo. Los calcosilicatos no ferromagnesianos más fríos ( $< 300^{\circ}\text{C}$ ) y distales del sistema muestran una relación Mg/Fe: 0.42-0.54 con Fe/Al: 0.1-0.18. Tanto la fase prógrada y retrógrada desarrollan mineralización posterior a su etapa de máxima oxidación, siendo la primera caracterizada por mb-cpy ( $mt > py$ ) y la segunda por cpy-ef ( $py > mt$ ). Entender sobre la petrografía de granates y sus implicancias genéticas es de gran utilidad como criterio de exploración al momento de evaluar el potencial de un depósito skarn, ya que estos registran gran parte de la historia hidrotermal de un sistema, así mismo es necesario manejar una sistemática descriptiva al momento de realizar otros estudios más específicos como química mineral de trazas y REE en granates skarn.

**PALABRAS CLAVE:** *Granditas, granates, clinopiroxenos, endoskarn, exoskarn, prógrada, retrógrada*

### ABSTRACT

In San Marcos-Ancash, 20km south of Antamina, near the Yanacocha Lagoon, Miocene intrusions crosscut the Fm. Jumasha generating a typical zoned skarn. It

has been recognized that the endoskarn prograde phase is formed by isotropic grandites that increase their Fe/Al ratio after boiling until they acquire a moderate anisotropy. As the clinopyroxene content increases and Mg is incorporated to the grandites, they increase their birefringence up to  $\rho = 0.021$ , at this point we have the Mg/Fe ratio: 0.8 - 1.2 with Fe/Al: 0.28-0.3. After the transition to a fragile context, the hot retrograde fluids remove Mg from the grandites, removing crystal zoning and anisotropy, the colder fluids begin to destroy prograde mineralogy developing actinolite-epidote-chlorite/calcite-quartz. The coldest ( $< 300^{\circ}\text{C}$ ) and distal non-ferromagnesian calcosilicates of the system show a Mg/Fe ratio: 0.42-0.54 with Fe/Al: 0.1-0.18. Both the prograde and retrograde phases develop mineralization after their maximum oxidation stage, the first being characterized by mb-cpy ( $mt > py$ ) and the second by cpy-ef ( $py > mt$ ). Understanding about the petrography of garnets and its genetic implications is very useful as an exploration criterion when evaluating the potential of a skarn deposit, since these record a large part of the hydrothermal history of a system, it is also necessary to handle a systematic descriptive when carrying out other more specific studies such as trace-REE mineral chemistry in skarn garnets.

**KEYWORDS:** *Grandites, garnets, clinopyroxenes, endoskarn, exoskarn, prograde, retrograde*

### INTRODUCCIÓN

Los depósitos tipo skarn son uno de los más importantes generadores de elementos polimetálicos (Cu-Zn-Pb-Ag) a nivel mundial, siendo uno de los depósitos que desarrolla mineralizaciones de gran tonelaje, pudiéndose ubicar a lo largo de los andes centrales. Los sistemas skarn de Cu muestran un zonamiento generalizado el cual lo describe Meinert (2005, 2003) y muchos otros autores. En zonas proximales predominan granates sobre clinopiroxenos, desarrollándose granates oxidados ( $\text{Fe}^{+3}$ ) hacia el endoskarn y reducidos hacia la periferia ( $\text{Al}^{+3}$ ), de forma semejante los clinopiroxenos (de  $\text{Mg}^{+2}$

a  $Fe^{+2}$ ), desarrollando un criterio de coloración oscura para los minerales de mayor contenido en Fe. Los diferentes tipos de granates no solo caracterizan las zonas skarn si no también permiten reconocer procesos hidrotermales. Ingerson & Barksdales (1943) muestran que los granates permanecen isótopos a altas temperaturas (prógrada proximal, o reseteo térmico por pulsos tardíos). Huckenholz (1974) demuestra que a condiciones isoquímicas y/o presión constante, las granditas tienden a aumentar en Al con el descenso de la temperatura. (zonamiento prógrado temprano y retrogrado tardío). Asimismo Jamtveit et al (1991) reconoció que el crecimiento temprano controlado por infiltración de fluidos genera granates aluminicos, y la precipitación andradítica se desarrolla a altas  $fO_2$ , y salinidades (Zhu et al, 2015). Peng et al (2015) diferencia tres tipos de granates originados por fluidos pre-boiling (ricos en Al), de ebullición (ricos en Fe, anisotrópicos) y residuales (ricos en Al). Laukamp et al (2021) han reconocido cinco clusters grandíticos en Antamina, con las siguientes asociaciones metálicas:  $Mo \pm Cu (Zn)$ ,  $Mo + Cu-Zn$ ,  $Zn+Cu \pm Mo$ ,  $Cu \pm Zn-Mo$  y  $Zn+Cu$ . Aunque estos criterios pueden variar ampliamente según el protolito, pueden funcionar bien los principios para típicas rocas carbonatadas, debido a esto es necesario manejar una guía petrográfica elemental de granates y considerar la paragénesis acompañante, para poder reconocer rápidamente un sistema pórfido-skarn, ubicarse a lo largo del sistema de forma confiable, o direccionar otros estudios detallados como química mineral en granates u otros. El presente trabajo se basa en la integración de información de campo, estudios desarrollados (descripciones macroscópicas y microscópicas, SEM, DRX) y síntesis bibliográfica, con el objetivo de mostrar un modelo del zonamiento skarn en típicas secuencias carbonatadas y comprender sus implicancias genéticas.

## METODOLOGÍA

El trabajo se basa fundamentalmente en descripciones petrográficas de campo y estudios microscópicos (bajo microscopio óptico Optika B-510POL-I) de muestras ubicadas de zonas próximas y distantes del intrusivo fuente. Se realizó un mapeo regional 1:20 000 enfocado en reconocer la estratigrafía local circundante y uno local 1:2000 centrado en el reconocimiento de las principales alteraciones. Adicionalmente se han hecho algunas observaciones sobre granates distales usando el difractor PANalytical AERIS y Microscopio Electrónico de Barrido EDS Oxford Xmax 20mm del Laboratorio de Escuela de Física en la Facultad de Ciencias - Universidad Nacional de Ingeniería.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de trabajo se encuentra entre los distritos mineros Antamina y Huanzalá, y está comprendida por secuencias sedimentarias depositadas en una cuenca de trasarco durante el Cretácico inferior. El progre-

sivo engrosamiento cortical por magmatismo afectó la configuración trasarco al mismo tiempo se fue desarrollando una vasta plataforma carbonatada durante el Cretácico superior, y a finales de éste, producto de una regresión regional, se presentan capas rojas depositadas en la cuenca de antepaís. Todas estas secuencias sedimentarias del Cretácico fueron deformadas durante el Cenozoico, caracterizados por un magmatismo rico en metales. En la zona de estudio se tiene en contacto fallado el Gpo. Oyón (Js) con la Fm. Jumasha (Ks), estos fallamientos inversos Chonta se encuentran buzando hacia el Oeste. El sistema Chonta ha sufrido múltiples reactivaciones a lo largo de su funcionamiento, y en sectores locales se han desarrollado comportamientos transtensivos, que permitieron las principales intrusiones generadoras de mineralización, es probable que estos pulsos hayan sido Miocénicos.

## ZONAMIENTO MINERALÓGICO

El sistema hidrotermal de la Laguna Yanacocha muestra un típico zonamiento skarn, que se puede caracterizar mineralógicamente desde la parte central-endoskarn hasta la parte distal-exoskarn. En el endoskarn-central se observan granates marrones-verdosos de textura moteada acompañado por cuarzo y localmente por parches de biotita (algunas veces vetillas finas), hacia el borde externo del endoskarn los granates se tornan marrones oscuros de aspecto masivo con presencia de clinopiroxenos y calcita-epidota-anfiboles sobrepuesta, de forma incipiente acompaña mb-cpy en presencia de magnetita > piritita, se reconocen también algunas vetillas sinuosas grandíticas en la transición endo-exoskarn. Ópticamente los granates del endoskarn se muestran isótopos (Fig. 5-A,B,C) y el color se oscurece hacia la parte externa. En el exoskarn transición (Fig. 5-D,E) los granates son euhedrales en una matriz de clinopiroxenos con calcita-anfiboles-epidota. Ópticamente las granditas son anisótropas, y va aumentando el zonamiento del cristal y su birrefringencia de  $\rho =$  de 0.017 a 0.021 hacia el exoskarn externo (Fig. 5-F). La evaluación de estos granates en el microscopio electrónico de barrido muestra la presencia de Mg hacia los bordes del cristal, con cociente Mg/Fe entre 0.8 - 1.2 y Fe/Al entre 0.28-0.31. Hacia sectores de mayor sobreimpresión de epidota-clorita-calcita-sericita, hay ocurrencias mineralizadas de calcopiritita-epidota-esfalerita (magnetita), en este mismo sector se reportan venillas tardías de granate pardo + cuarzo-piritita con halos de clinopiroxenos, las cuales presentan azimuts direccionados al foco central. Hacia el exoskarn distal los cristales de grandita anisótropos pierden fuertemente su birrefringencia (al punto de volverse nuevamente isótopos) siendo destruidos bordes o sectores internos por epidota-calcita, esta misma destrucción de cristales sufren los clinopiroxenos. Los difractogramas (Fig. 4) muestran una estructura atípica de vesuvianita con espacio-grupal (P4nc) la cual es pseudomorfa con cristales de granate mostrando intercrecimientos con

calcita-epidota, estas ocurrencias se desarrollan en el front distal metasomático, esta vesuvianita presenta un cociente Mg/Fe de 0.42 – 0.54 y Fe/Al entre 0.1-0.18. En el halo termal se reconoce vesuvianitas típicas de morfología prismática y wollastonita radial-acicular o masivo-acicular.

## DISCUSIÓN

Posterior al contacto de los intrusivos oxidados con las secuencias de carbonatos Jumasha y el desarrollo del halo termal, se exsuelven fluidos hidrotermales que desarrollan alteración prógrada temprana en forma de biotita, grandita aluminica y clinopiroxenos magnésicos. Tal como interpreta Peng et al (2014) en Hongniu-Hongshan Skarn, estos ensambles se forman a partir de un fluido pre-boiling de intermedia a baja salinidad. Al ocurrir la ebullición los vapores desarrollan alteración ácida sobre las litologías pre-existentes y el fluido hipersalino oxidado genera una alteración prógrada tardía, manifestada en el endoskarn como granates ferro-alumínicos ( $Fe^{+3}$ ) masivo con vetillas sinuosas de granates ferro-alumínicos en la transición endoskarn-exoskarn, hacia las zonas distales a medida que el oxígeno se consume y los clinopiroxenos se tornan férricos ( $Fe^{+2}$ ), se tiene disponible  $Mg^{+2}$  que se incorpora en las granditas haciéndolas anisótropas y zonadas, este estadio se caracteriza por contener molibdenita-calcopirita-magnetita-pirita. Luego de la transición de un régimen ductil a frágil, el sistema se apertura y se desencadena toda la alteración retrógrada, los fluidos calientes de este estadio remobilizan inicialmente el  $Mg^{+2}$  de las granditas, quitántole paulatinamente zonamiento cristalino y anisotropía, posteriormente estos fluidos destruyen mineralogía prógrada, transformando total o parcialmente los granates a epidota y/o hematita/magnetita/pirita + calcita-cuarzo y a los clinopiroxenos a actinolita/clorita/pirita/magnetita + calcita-cuarzo. Tras llegar a un máximo de oxidación por precipitación de óxidos de  $Fe^{+3}$  y presentar condiciones térmicas apropiadas, se desarrolla una reducción que genera calcopirita-esfalerita-pirita-magnetita como mineralización. Existen vetillas rectas de grandita aluminica – cuarzo - pirita con halos de clinopiroxenos cortando gran parte de todo el sistema, estas podrían ser análogas a las vetillas “D” de los pórfidos. Armbruster & Gnos (2000) estudian una vesuvianita metasomática que muestra el mismo arreglo estructural P4nc presente en este sistema, y la definen como vesuvianita “rod” politipo con ordenamiento pronunciado de octaedros de cationes formados a baja temperatura ( $< 300^{\circ}C$ ). Análogamente a los hallazgos de Laukamp et al (2021), se han reconocido al menos seis familias de granates: (1): Granditas isótropas aluminicas (mb-cpy>>ef), (2): Granditas isótropas férricas (cpy-mb>ef), (3): Granditas anisótropas de moderada  $\rho$  (py-cpy>mb), (4): Granditas anisótropas de alta  $\rho$  (cpy-py>bn>>mb), (5): Granditas anisótropas de baja  $\rho$  – corroidas (ep-cac, ef>bn-cpy), (6): Granditas isótropas – vetillas rectas con halos de clinopiroxenos (py>ef).

## REFERENCIAS

Armbruster, T. & Gnos, E. (2000). ‘Rod’ polytypism in vesuvianite: crystal structure of

low-temperature P4nc vesuvianite with pronounced octahedral cation ordering. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitt.* v. 80, p. 109-116.

Jamtveit, B., Wogelius, R. & Fraser, D. (1991). Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. *Geol.* v. 21.2, p.113–116.

Bissig, T., Ullrich, T. D., Tosdal, R. M., Friedman, R., & Ebert, S. (2008). The time space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenetic implications. *Journal of South American Earth Sciences.* v. 26 no.1, p. 16-35.

Huckenholz, H. Lindhuber & Springer, J. (1974). The join  $CaSiO_3-Al_2O_3-Fe_2O_3$  of the  $CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  quaternary system and its bearing on the formation of granditic garnets and fassaitic pyroxenes. *N. Jb. Miner. Abh.*, v. 121, p. 160-207.

Ingerson, E. & Barksdale, J. (1943). Iridescent garnet from the Adelaide mining district, Nevada: *Amerc. Miner.* v.28, p. 303-312.

Mégard, F., (1984). The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *J. Geol. Soc. Lond.* v. 141, p. 893–900.

Laukamp, C., LeGras, M., Montenegro, V., Windle, S. & McFarlane, A. (2021). Grandite-based resource characterization of the skarn-hosted Cu-Zn-Mo deposit of Antamina, Peru. *Mineralium Deposita.*

Meinert, L., Dipple, G., and Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. *Economic Geology*, v. 100, p. 299–336.

Meinert, L., J.Hedenquist (2003). Formation of Anhydrous and Hydrous Skarn in Cu-Au Ore Deposits by Magmatic Fluids. *Economic Geology*, v. 98, p.147-156.

Mrozek, S. (2018). The giant Antamina deposit, Peru: intrusive sequence, skarn formation, and mineralization. PhD Thesis. James Cook University.

Peng, H., Zhang, C., Mao, J., Santosh, M. & Zhou, Y. (2015). Garnets in porphyry-skarn systems: a LA-ICP-MS, fluid inclusion, and stable isotope study of garnets from the Hongniu-Hongshan copper deposits, Zhongdian area, NW Yunnan Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences.* v. 103, p. 229-251.

Xu, J. (2016). Skarn formation and trace elements in garnet and associated minerals from Zhibula copper deposit, Gangdese Belt, southern Tibet. *Journal Lithos* 262 (2016) 213–231.

Zhu, J., Hu, R., Richards, J. Bi, X. & Zhong, H. (2015). Genesis and Magmatic-Hydrothermal Evolution of the Yangla Skarn Cu Deposit, Southwest China. *Society of Economic Geologist.* v. 110, p. 631-652

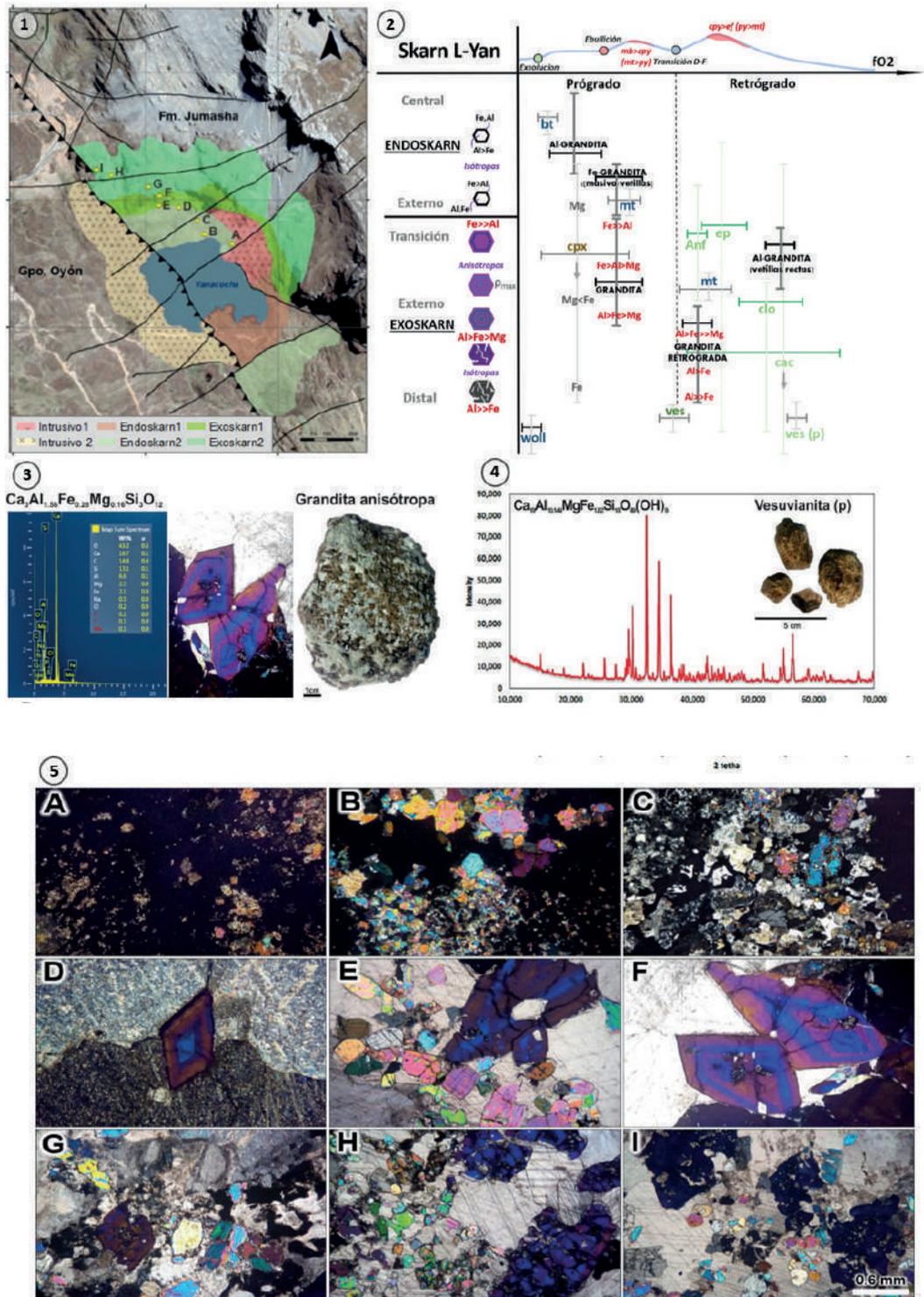


Fig. 1: Mapa de alteración skarn en la Laguna Yanacocha, Grupo Oyón en contacto fallado sobre Formación Jumasha. Fig. 2: Diagrama de secuencia paragenética y zonamiento mineralógico del endoskarn-exoskarn. Fig. 3: Granate birrefringente por presencia de Mg+2 (Microscopía electrónica de barrido). Fig. 4: Vesuvianita (p) pseudomorfa con granate rombododecaedro. (Difractometría de rayos X). Fig. 5: Variaciones ópticas-texturales de granates del sistema skarn Laguna Yanacocha (ver ubicación en Fig. 1)