

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/333675900>

Palma, yacimiento de Zn-Pb tipo VMS en una cuenca intra-arco del Cretácico Superior en Perú central: nuevos avances en exploración para un gran potencial

Conference Paper · May 2019

CITATION

1

READS

79

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Magmatic-hydrothermal transition at the world-class San Rafael Sn deposit (Peru) [View project](#)



Mineral Resources [View project](#)



Palma, yacimiento de Zn-Pb tipo VMS en una cuenca intra-arco del Cretácico Superior en Perú central: nuevos avances en exploración para un gran potencial

César Farfán¹, Robert Monge¹, Lluís Fontboté²

¹ Volcan Compañía Minera S.A.A., Manuel Olguin 373, Lima, Perú (CFarfán@volcan.com.pe)

² Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland (lluis.fontbote@unige.ch)

Ongoing exploration at the Palma VMS Zn-Pb deposit, 55 km SE of Lima, yields a resource of 14.5 Mt including 9.6 Mt indicated at 5% Zn, 0.7% Pb, and 22 g Ag/t and 4.9 Mt inferred at 6% Zn, 1% Pb, and 21 g Ag/t, all reported with a cut-off of 3.5% Zn, and revealed a much larger potential for similar mineralization along a distance of 5 km in NS direction. Main host lithology consists of subvolcanic rocks (sills and NNW-SSE trending dikes) of basaltic to andesitic composition, locally with peperitic textures, pelites rich in organic material and with framboidal pyrite, and shallow water limestones. Felsic dykes, also with NNW-SSE orientation crosscut the previously mentioned rocks. This volcano-sedimentary sequence fills a structurally-controlled basin in the Upper Cretaceous plutono-volcanic arc of the coastal region in central Peru. Both, mafic to andesitic subvolcanic rocks and dacitic dykes, show calc-alkaline affinity. The ore occurs principally as roughly bed-parallel massive bodies of pyrite (and pyrrhotite in deep parts), sphalerite, galena and barite replacing of the >250 m thick Palma Unit at the lower part of the volcano-sedimentary sequence. Ore replaces mainly limestone, and subordinately pelitic and mafic to andesitic rocks. Albite, epidote, chlorite and pyrite are the main alteration minerals. Sericitic alteration is restricted to certain deep parts of the deposit, partly enriched in Cu. The felsic dykes are albitized in places but do not show mineralization. Host rock and mineralization are partly overprinted by contact metamorphism caused by arc plutons. The Palma VMS deposit was formed by a hydrothermal system still active after emplacement of the mafic to andesitic dykes, i.e., under several hundred meters of burial. Ore is interpreted to have been formed in a tectonically active extensional setting, as indicated by the geometry of the partly mineralized mafic to andesitic dykes as well as by slumping and brecciation affecting the ore. Mineralization took place at the mixing zone between mineralizing fluids ascending along feeders, that possibly were parallel to the mafic to andesitic dykes, and seawater infiltrating the sequence. Like in the near and similar Perubar deposit, and in contrast to other VMS deposits in the Cretaceous volcanic arc of Central Peru where acidic alteration is widespread, the scarcity of sericitic alteration and Cu mineralization the ore bodies found so far in Palma can be explained by a distal position relative to the source of the hydrothermal fluids and the neutralization potential of the host rock.

Introducción

La exploración realizada por Volcan Cía. Minera desde 2009 en el yacimiento de Zn-Pb tipo VMS de Palma (76°58'W, 12°07'S, 1300 - 2800 msnm, aproximadamente 55 km al SE de Lima, en el margen Sur del valle de Lurín), ha permitido definir un recurso de 14.5 Mt incluyendo 9.6 Mt de indicado a 5% Zn, 0.7% Pb y 22 g Ag/t y 4.9 Mt de inferido a 6% Zn, 1% Pb y 21 g Ag/t y reportado a un cut-off de 3.5% Zn y ha revelado un potencial mucho mayor en base a resultados de perforación diamantina y evidencias en superficie, sobre un corredor de 5 km en dirección NNE-SSW.

La presente contribución resume resultados de exploración y avances en el conocimiento de la

geología y mineralización del yacimiento, emplazado en una cuenca volcano-sedimentaria intra-arco y que es parte del cinturón de yacimientos tipo VMS del arco plutono-volcánico del Cretácico Superior en el centro del Perú (Fontboté, 2019).

Exploración

Los primeros trabajos conocidos sobre Palma son de 1985, cuando Minera Palma S.A., filial de Barmine, denunció la zona debido a indicios de Zn y Ba. Entre 1986 y 1991, CEDIMIN S.A. exploró el área y realizó algunas labores mineras, incluyendo 963 m de perforación diamantina (Ínjoque et al., 2000; Steinmüller et al., 2000). En

los años 1990, SIMSA operó en opción una planta de 90 t/día y realizó más trabajos de exploración, de forma que en 1997 se habían totalizado 4148 m de perforación diamantina y 1700 m de labores subterráneas. SIMSA determinó un recurso de 134,000 t con 9.45% de Zn y 2.38% de Pb (Ínjoque et al., 2000). La propiedad pasó a Volcan Compañía Minera S.A.A. en 2009, la cual, entre 2011 y 2013, a consecuencia de recomendaciones positivas producto de reconocimiento geológico previo, realizó 17,000 m de perforación diamantina definiendo un recurso de 5.2 millones de toneladas con 7.19% de Zn, 1.48% de Pb y 1.45 oz/t de Ag. En 2015, otros 7486 m de perforación, incluyendo sondajes con más de 1,000 m de longitud en Santa Lidia, permitieron reconocer continuidad de la mineralización entre Palma y Santa Lidia (Fig. 1). 7,920 m de perforación en 2017 y 20,000 m en 2018, elevaron el recurso a los 14.5 Mt mencionados más arriba.

Teniendo en cuenta que 1) el recurso se ha definido sólo en Palma y en un área de unos 700 x 300 m (Fig. 1), 2) que la mineralización en Palma está abierta hacia el E, N y S, 3) que sondajes en Santa Lidia, alrededor de 2000 m al SSE de Palma, han sido también positivos y 4) que en la misma unidad litoestratigráfica se conocen indicios 3 km más al S, en Palmerón, y hacia el N, en Kenita (Fig. 1), el potencial para mineralización tipo VMS en el área es mucho mayor que el recurso definido hasta el momento.

Marco Geológico y secuencia volcano-sedimentaria mineralizada

El yacimiento de Palma está hospedado en una secuencia volcano-sedimentaria con rumbo NNE y buzamiento al E (Figs. 1, 2, y 3) emplazada entre rocas intrusivas del Batolito de la Costa. Le atribuimos una edad del Cretácico terminal debido a la similitud litológica y casi continuidad de afloramiento con la secuencia huésped del yacimiento tipo VMS de Perubar, situado 15 km al N, datada entre 67.89 ± 0.18 Ma y

69.71 ± 0.18 Ma (Maestrichtiano, U-Pb en circón, Polliand et al., 2005). Esta edad sería sensiblemente más joven que la albiana propuesta por Ínjoque et al. (2000) y la de Cretácico "medio" (Albiano-Turoniano) por Palacios et al. (1992), autores que sitúan la secuencia en la parte superior del Grupo Casma como "volcánico Quilmaná". Al Sur de Palma, una muestra de basalto mapeada como volcánico Quilmaná por Palacios et al. (1992) en coordenadas 0350000E, 8638000 N (vertiente N del río Mala) fue datada ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sobre roca total) en "aproximadamente 67.6 Ma" (Maestrichtiano) por Noble et al. (2005), lo que apoya una atribución al Cretácico terminal para la secuencia huésped de Palma.

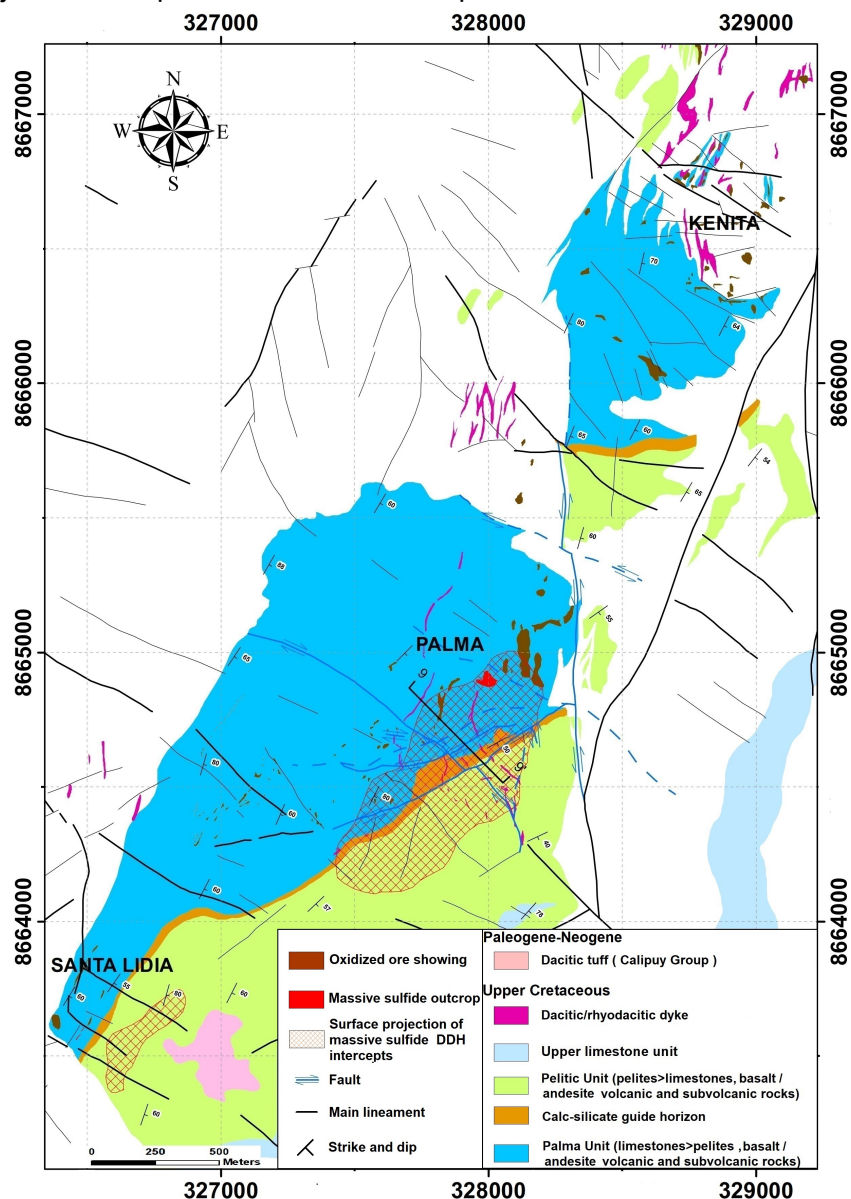


Fig. 1 Mapa general del yacimiento tipo VMS de Palma.

La Fig. 3 presenta una sección tipo de la secuencia volcano-sedimentaria en Palma en la que se distinguen tres unidades, todas compuestas principalmente por rocas pelíticas, calizas, rocas basálticas y andesíticas subvolcánicas, en parte afectadas por metamorfismo de contacto con desarrollo de calcosilicatos causado por actividad intrusiva en el arco magmático. Las unidades se han distinguido en base a las proporciones de estos componentes

y a su situación respecto al "nivel guía" definido más abajo.

La **Unidad Palma** (>250 m de potencia, no se conoce su base) es la inferior y hospeda la mineralización. Está compuesta por calizas, margas y lutitas (en parte ricas en materia orgánica, conteniendo pirita framboidal; Steinmüller y Wauschkuhn, 1990), así como por rocas de composición basáltica a andesítica de grano fino a medio que forman predominantemente sills y diques y que localmente muestran texturas peperíticas en el contacto con las rocas sedimentarias. No se han reconocido rocas extrusivas aunque es probable que también existan ya que en la misma secuencia se han reconocido en Perubar, 15 km al N (Polliand et al., 2005). La proporción de sedimentos, en relación a sills y diques, es del orden del 70%. Las calizas son en parte micríticas y en parte bioclásticas conteniendo ostrácodos, indicando depósito en aguas someras. Calizas son más abundantes en la parte media y superior de la Unidad Palma, mientras que en la base predominan los sills y diques con textura en parte porfírica con fenocristales de plagioclasa de hasta 2-4 mm de tamaño en una matriz afanítica. Los diques tienen un rumbo aproximado NS buzando 60-70° al W. La mineralización (pirita, pirrotina, esfalerita, galena, ± barita, ± calcopirita) forma cuerpos masivos, y en menor medida vetillas, reemplazando preferentemente a las calizas pero también a otras rocas de la unidad, incluyendo sills y diques.

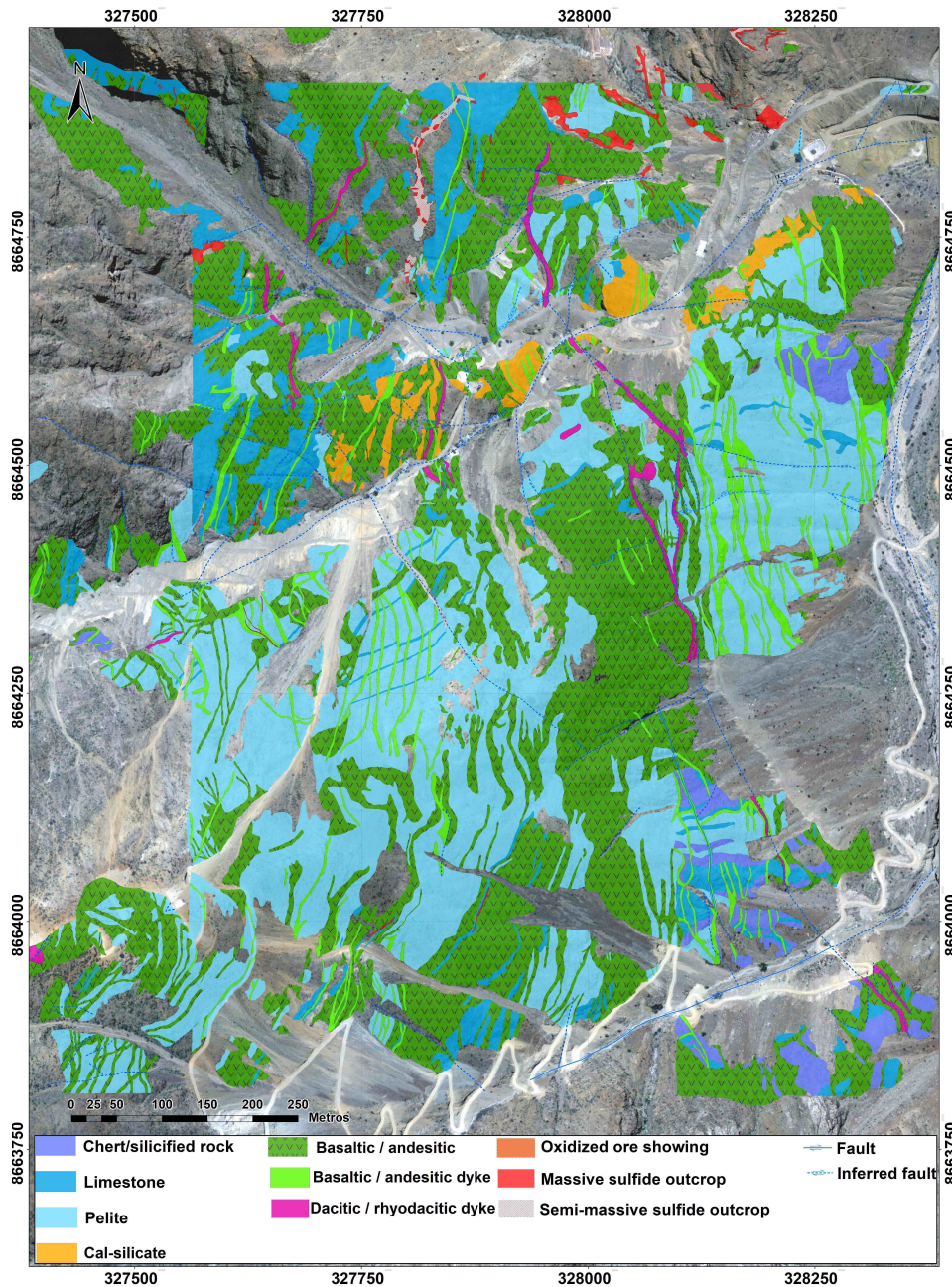


Fig. 2 Mapa de afloramientos en el sector central de Palma. 9-9': Sección geológica de la Fig. 3

Sobre la unidad Palma se encuentra el "**Nivel Guía de**

Calcosilicatos" (40-50 m de espesor) caracterizado por la presencia, intercalados entre rocas máficas a andesíticas, de varios horizontes de potencia decimétrica a métrica, fácilmente reconocidos en el terreno por su resistencia a la erosión, constituidos principalmente por actinolita ± calcita, epidota, biotita y pirrotina. El ensamble mineralógico se interpreta como resultado de metamorfismo de contacto sobre un protolito esencialmente sedimentario rico en carbonatos. El reconocimiento de este nivel guía ha sido fundamental para interpretar correctamente la geología de Palma.

Sobreyace la **"Unidad Pelítica"** (~500 m de potencia), constituida predominante por lutitas y en menor medida por rocas máficas y andesíticas. La **Unidad Calcárea Superior**, constituida por calizas en capas gruesas de color gris claro, en parte marmolizadas aflorando al E del yacimiento (Fig. 1), es la más joven de las atribuidas al Cretácico en el área. Estas dos últimas unidades

también están cortadas por los diques basálticos a andesíticos y contienen vetillas de pirita y pirrotina, aunque en general sin superar abundancias de 1 a 2%, siendo por lo tanto menos abundantes que en el Nivel Guía de Calcosilicatos y que en la Unidad Palma. Algunas muestras de la Unidad Pelítica tienen valores levemente anómalos en Zn y Cu. Las tres unidades inferiores están cortadas por diques félsicos con rumbo NS a N160E buzando ~70°W. En la Unidad Calcárea Superior, que se ha mapeado con menor detalle, no se han reconocido estos diques. Sobre una discordancia angular se observan tobas cenozoicas del Grupo Calipuy.

Puesto que las rocas de la secuencia volcano-sedimentaria han sufrido alteración hidrotermal, para la clasificación de las rocas magmáticas se ha utilizado el diagrama Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (Fig. 4), complementado por el contenido de SiO_2 de rocas menos alteradas. Los diques y sills máficos son fundamentalmente de composición basáltica y

andesítico-basáltica, y en menor medida, andesítica. Los elementos traza inmóviles sugieren una leve tendencia de fraccionamiento magmático (Fig. 4), siendo las rocas de grano grueso las que tienen más frecuentemente composición andesítica. Los diques félsicos arrojan una composición dacítica a riodacítica (Fig. 4). Todas las rocas analizadas muestran afinidad calco-alcalina típica de arco volcánico en zona de subducción (Fig. 5).

Las estructuras principales tienen rumbo NNE-SSE y NW-SE (Fig. 1). Ínjoque et al. (2000), en base a un mapeo distrital, sugieren que la secuencia volcano-sedimentaria de Palma se habría depositado en un graben de rumbo NNE emplazado entre rocas magmáticas del arco volcánico.

Alteración

De forma parecida a Perubar y en contraste a otros yacimientos tipo

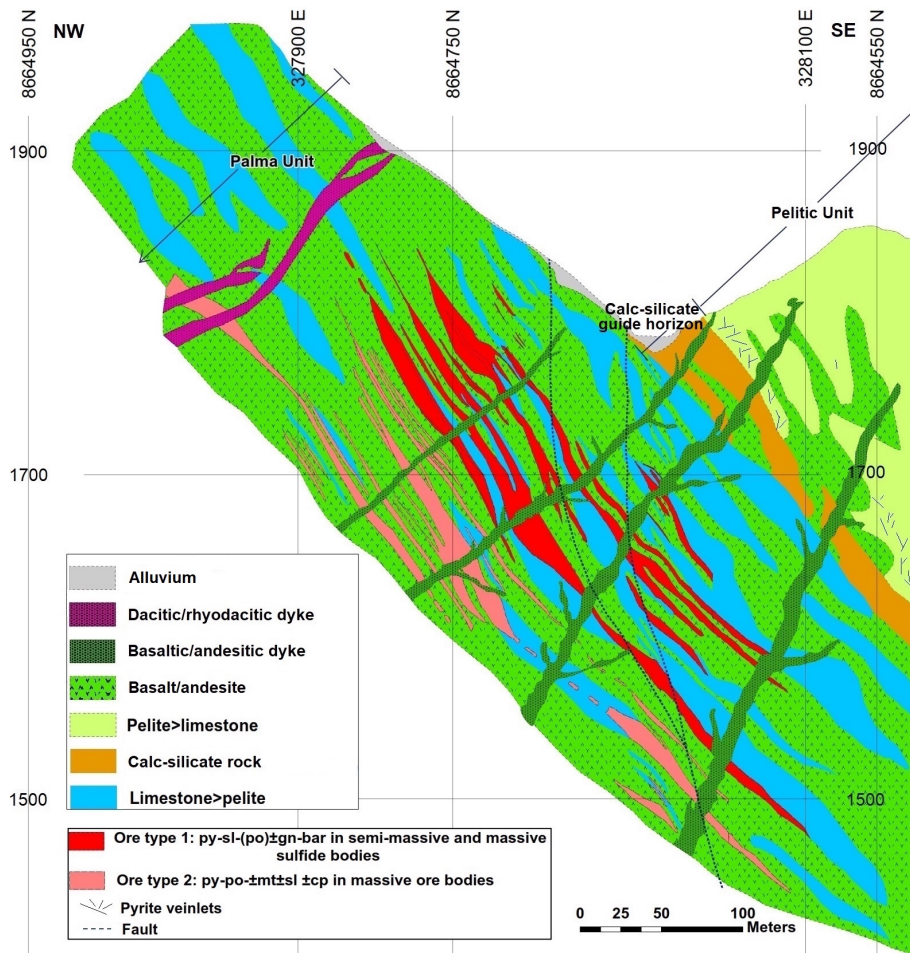


Fig. 3 Sección geológica representativa de Palma. La situación de la sección está indicada en la Fig. 2 (9-9')

VMS de la costa peruana como Cerro Lindo o María Teresa, en donde alteración ácida con sericita es abundante (Fontboté, 2019), en Palma, sericita, en ocasiones acompañada por intensa silicificación solo se reconoce, hasta el momento, en sectores profundos, en el área central oriental del yacimiento. En el resto de las rocas encajonantes, albita, clorita, epidota y pirita son los principales minerales de alteración. Esta última alteración afecta tanto las rocas basálticas a andesitas como a los diques dacíticos-riodacíticos.

Mineralización: zonación y emplazamiento

La mayor parte de la mineralización forma cuerpos de sulfuros masivos sub-paralelos a la estratificación y es producto de reemplazamiento de las rocas sedimentarias -en particular de calizas- y de las rocas de composición basáltica a andesítica. También se reconoce mineralización en "stringer" y "stockwork", en particular en áreas con alteración sericítica (p.e. en coordenadas

328144.44E 8664530.38 N). En el resto de las rocas encajonantes, albita, clorita, epidota y pirita son los principales minerales de alteración. Se distingue la siguiente zonación metálica de piso a techo: Cu en la base, Zn en la parte central y Zn-Pb-Ba hacia el techo de la Unidad Palma, zonación típica para un yacimiento tipo VMS (calcopirita en la base, esfalerita, galena y barita hacia el techo):

- Sulfuros semi-masivos formados por pirita-esfalerita-galena-barita con trazas de pirrotina.
- Sulfuros masivos formados por pirita-pirrotina±esfalerita±galena.
- Cuerpos de sulfuros masivos y vetillas con pirita-pirrotina±magnetita±esfalerita±calcopirita.

Los contenidos de Fe en la esfalerita varían entre 8 y 17%, siendo los valores más altos los de ensamblajes conteniendo pirrotina (Steinmüller y Wauschkuhn, 1990). Estructuras de "slumping" y brechificación indican inestabilidad de la cuenca durante la mineralización.

El hecho que la mineralización se ha emplazado principalmente en rocas sedimentarias con alto potencial de neutralización puede explicar que, hasta el momento, sólo se ha encontrado alteración ácida con sericita y mineralización rica en Cu en las partes profundas y orientales de Palma. Otra explicación complementaria es que la mineralización reconocida esté en posición distal respecto a los "feeders" o canales alimentadores.

La fuerte presencia de pirrotina, en parte como pirrotina hexagonal (Steinmüller y Wauschkuhn, 1990) de alta temperatura, y las trazas de magnetita se interpretan principalmente como efecto de metamorfismo de contacto. Asimismo, el hecho que la esfalerita más rica en Fe se encuentra en ensamblajes con pirrotina puede explicarse como resultado de reequilibración metamórfica, como se

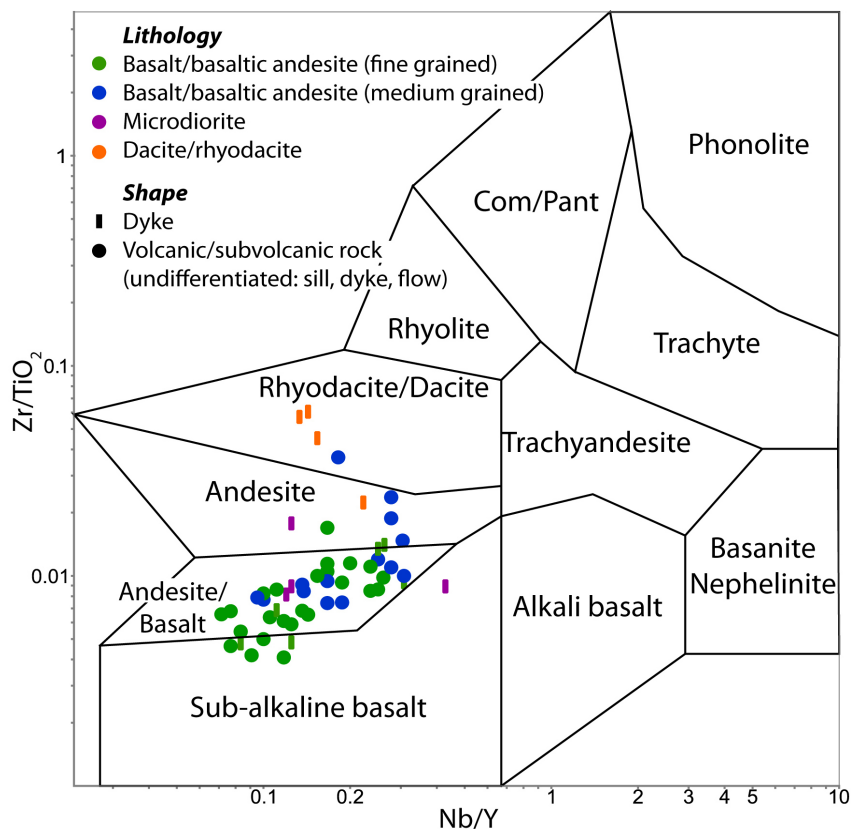


Fig. 4 Rocas mágnicas de la secuencia volcano-sedimentaria del yacimiento Palma, ubicadas en el diagrama de discriminación Zr/TiO₂ vs. Nb/Y de Winchester y Floyd (1977). Análisis ICP/ICP-MS con fusión total (tetraborato). Otros análisis de Steinmüller y Wauschkuhn (1990, no incluidos aquí) proporcionaron también composiciones basálticas a andesíticas para "lavas" de Palma.

ha descrito en Perubar (Polliand et al., 1999). Condiciones reductoras por la presencia de materia orgánica también puede haber propiciado la formación de pirrotina.

Aunque la mineralización económica se emplaza en la Unidad Palma, en el Nivel Guía de Calcosilicatos, también existen partes mineralizadas con contenidos de más de 1% de Zn y Cu. En la Unidad Pelítica y en la Unidad Calcárea Superior existen asimismo vetillas de pirita y pirrotina. Además, la mineralización afecta también, aunque débilmente, los diques basálticos a andesíticos que cortan toda la secuencia incluyendo la Unidad Calcárea Superior. Se puede sugerir por lo tanto, que la mineralización en la Unidad Palma fue generada por un sistema hidrotermal aún en actividad cuando una columna volcano-sedimentaria de cómo mínimo 700 m de espesor sobreyaciendo la Unidad Palma, ya había sido cortada por los diques basálticos a andesíticos. Las texturas de reemplazamiento observadas en el yacimiento son consistentes con esta hipótesis. En otras palabras, el yacimiento tipo VMS de Palma no se formó en el fondo marino, sino por reemplazamiento debajo de él en el seno de una cuenca volcano-sedimentaria dentro del arco magmático plutono-volcánico.

La litología de la Unidad Palma, conteniendo

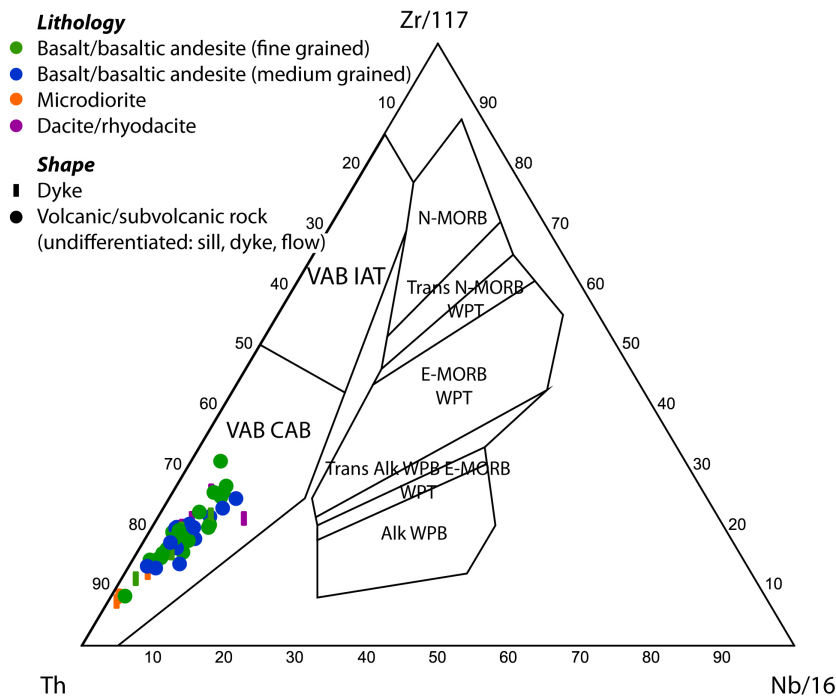


Fig. 5 Rocas magmáticas de la secuencia volcano-sedimentaria del yacimiento Palma, ubicadas en el diagrama de discriminación Th-Zr/117-Nb/16 de Wood (1980). Todas las muestras analizadas caen en el campo de rocas de afinidad calco-alkalina de arco volcánico. Análisis ICP/ICP-MS con fusión con tetraborato de litio

niveles potentes de calizas, rocas típicamente de alta permeabilidad, pudo proporcionar el ambiente adecuado para una zona de mezcla entre fluidos mineralizantes ascendentes y aguas más frías de origen marino, causando el gradiente térmico adecuado para la precipitación de sulfuros; el agua marina aportando además, sulfato para la precipitación de barita. La pirita framboidal presente puede también haber sido una fuente de azufre reducido que favoreció la precipitación de sulfuros. Fluidos hidrotermales también llegaron al Nivel Guía de Calcosilicatos, a la Unidad Pelítica y a la Unidad Calcárea Superior, pero cada vez con menor intensidad. Las leyes bajas en Cu excepto en partes profundas del yacimiento pueden ser debidas a que los fluidos no tenían la temperatura suficiente para transportar cobre de forma efectiva (e.g. Fontboté et al., 2017). Del mismo modo, el hecho que la mineralización se ha emplazado en sedimentos con alto potencial de neutralización puede explicar que, hasta el momento, sólo se ha encontrado alteración ácida con sericita y mineralización rica en Cu en las partes profundas y orientales de Palma. Otra explicación complementaria es que la mineralización reconocida esté en posición distal respecto a los "feeders" o canales alimentadores.

Posición de los "feeders" mineralizantes

Las consistentes orientaciones NNW-SSE de los enjambres de diques basálticos a andesíticos mostradas por el mapeo de detalle (Fig. 2) indican condiciones tensionales y es de utilidad al rastrear la orientación de los "feeders" de la mineralización. El hecho que estos diques también están reemplazados por sulfuros es compatible con las hipótesis de que la mineralización fue, a rasgos generales, coetánea con su emplazamiento (como se demostró por geocronología en el yacimiento vecino de Perubar; Polliand et al., 2005). Esto sugiere que los canales alimentadores de la mineralización se emplazaron en un enjambre de fracturas con la misma dirección que los diques de rumbo

NNW-SSE. Una coincidencia entre la dirección de diques de composición basáltica a andesítica y "feeders" de la mineralización se observa en el yacimiento de María Teresa (Pichardo et al., 2019). Estructuras tensionales dentro de cuencas "pull-apart" originadas por fallas de rumbo NNW-SSE como se ha propuesto para Perubar (Polliand et al., 2005), pueden explicar la orientación de los diques máficos y félsicos y también el "graben de Palma" sugerido por Ínjoque et al., (2000). Si esta hipótesis es correcta, la elongación principal del depósito de Palma sería NS a NW-SE y no NNE-SSW como se supuso anteriormente y por lo tanto los sectores al S y SE de la mineralización principal de Palma serían altamente prospectivos.

Conclusión

El yacimiento de Zn-Pb de Palma reemplaza rocas ígneas y sedimentarias de una cuenca volcano-sedimentaria de edad Cretácico terminal situada dentro del arco plutono-volcánico (y no en posición de tras arco). Tiene las características típicas de un yacimiento de tipo VMS, incluyendo ensambles mineralógicos, zonación y geometría y, como en el depósito vecino de Perubar, la mineralización es principalmente distal respecto a la fuente de los fluidos hidrotermales. En sectores profundos del depósito, se distingue alteración sericitica y contenidos altos de Cu, sugiriendo un carácter más proximal. Sugerimos que la mineralización no tuvo lugar en el fondo marino, sino debajo de éste, posiblemente a varios cientos de metros de profundidad. Proponemos que los "feeders" mineralizantes eran paralelos a enjambres de diques basálticos a andesíticos de orientación NNW-SSE. Un sistema de cuencas "pull-apart" puede explicar la orientación de diques y la creación de una cuenca volcano-sedimentaria poco profunda dentro del arco volcánico. El potencial para identificar un recurso significativamente superior al de 14.5 Mt definido hasta el momento es alto.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado de los trabajos de exploración realizados por un amplio equipo entre 2010 al presente. Agradecemos sus contribuciones, así como a la Gerencia de Volcan Cía Minera la autorización para publicarlo, y a S. Rosas y L. Torró revisiones detalladas.

Referencias

- Fontboté, L. (2019) Volcanogenic Zn-Pb±Cu massive sulfide deposits in the Upper Cretaceous plutono-volcanic arc in central Peru. Proexplo 2019, resúmenes extendidos.
- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia, M. y Pokrovski, G.S. (2017) Sulfide minerals in hydrothermal deposits: Elements, v. 13, p. 97-103.
- Ínjoque, J., Ríos, A., Torres, J. y Vargas, J. (2000) Palma, yacimiento de tipo VMS distal formado en un ambiente sedimentario intravolcánico del Grupo Casma, Cretáceo Medio, Cuenca Huarmey, Lima. Resúmenes Extendidos del Congreso Peruano de Geología 13 p.
- Noble, D., Ríos, A., Vidal, C., Spell, T., Zanetti, K., Ángeles, C., Ochoa, J. y Cruz, S. (2005) Late Cretaceous basalt in the rio Mala valley, central Peru: Evidence for extension and mafic amigmatism prior to Latest Cretaceous-Paleocene plutonism and silicic volcanism. Sociedad Geológica del Perú, volumen Jubilar Alberto Giesecke Matto, 141-148.
- Palacios O., Caldas V. y Vela, C. (1992) Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica, Bol. N°43, Serie A, Carta Geológica Nacional.
- Pichardo, E., Fontboté, L., Mena, T. Chirinos, O. y Halter, W. (2019) El yacimiento de Zn-Pb-Cu-Ag tipo VMS María Teresa, Perú: geología y exploración. Proexplo 2019, resúmenes extendidos
- Polliand, M., Schaltegger, U., Frank, M. y Fontboté, L. (2005) Formation of intra-arc volcanosedimentary basins in the western flank of the central Peruvian Andes during Late Cretaceous oblique subduction: field evidence and constraints from U-Pb ages and Hf isotopes. International Journal of Earth Sciences, v. 94, 231-242
- Polliand, M., Fontboté, L., y Spangenberg, J. (1999) Tracing back sulfur isotope reequilibration due to contact metamorphism: A case study from the Perubar VMS deposit, Central Peru. In: C.J. Stanley et al. (eds.), Mineral deposits: processes to processing, 5th biennial SGA meeting, London, England, 22-25 August 1999, Balkema, Rotterdam, p. 967-970.
- Steinmüller, K., Chacón Abad, N. y Grant, B. (2000) Volcanogenic massive sulfides in Peru. In: Sherlock R.L. and Logan M.A.V. VMS Deposits of Latin America: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. 2, p. 423-437.
- Steinmüller, K., y Wauschkuhn, A. (1990) Palma: A nonmetamorphic stratabound massive Zn-Ba Occurrence in the Eastern Casma Group of Central Peru. In: Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E. & Frutos, J. (Eds.). Stratabound Ore Deposits in the Andes. Springer, Berlin, p. 413-420.
- Winchester, J.A. y Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, Chemical Geology, 1977, v. 20, p. 325-343.
- Wood, D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province: Earth and Planetary Science Letters, v. 50, p. 11-30.