



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

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

## Estudio preliminar de concentraciones de indio en menas de Sulfuros del Depósito de Huari Huari, Bolivia

Lisard Torró<sup>1</sup>, Diva Mollinedo<sup>2</sup>, Joan Carles Melgarejo<sup>3</sup>, David Artiaga<sup>3</sup>, Belén Torres-Cueva<sup>3</sup>, Álvaro Martínez<sup>4</sup>, Pura Alfonso<sup>5</sup>, Osvaldo Arce Burgoa<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Especialidad Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú

<sup>2</sup>Cumbre del Sajama S.A., Bolivia

<sup>3</sup>Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona

<sup>4</sup>Département des sciences de la Terre, Université de Genève

<sup>5</sup>Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals, Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>6</sup>Colegio de Geólogos de Bolivia

<sup>1</sup>[lisardtorro@hotmail.com](mailto:lisardtorro@hotmail.com)

### RESUMEN

En el depósito de Huari Huari (Potosí, Bolivia) se identifican dos estilos principales de mineralización, filoniana y estratoligada, encajadas en secuencias de cuarcitas y pizarras negras del Paleozoico inferior. La mineralización filoniana se desarrolla sobre fallas de desgarre de dirección dominante NE-SW y corta tanto a las series anteriores como a intrusivos miocenos andesíticos a dacíticos. La secuencia de cristalización empieza con casiterita y sulfuros, dando paso a una asociación con dos generaciones de marmatita y estannita y finalmente a sulfosales. En los estadios tardíos se forma esfalerita acaramelada. El In se concentra especialmente en la esfalerita rica en Fe de los estadios intermedios en vetas apartadas de los intrusivos, lo que sugiere una formación a más baja temperatura.

**Palabras clave:** Cinturón estannífero andino, Bolivia, indio, metales críticos, tecnologías verdes

### ABSTRACT

The sulfide mineralization in the Huari Huari de-

posit (Potosí, Bolivia) occurs both as stratabound (manto)-type and as veins and lodes that are hosted by sedimentary sequences of sandstones and black shales of lower Paleozoic age. The veins and lodes are found along NNE-SSE trending strike-slip faults that cut the sedimentary sequence as well as Miocene intrusive rocks of andesitic to dacitic compositions. The crystallization sequence begins with cassiterite and sulfides, followed by the crystallization of two generations of marmatite and stannite and finally, sulfosalts. In late stages, cherry-red sphalerite crystallizes. Indium values are higher in high-Fe sphalerite crystallized during intermediate stages in distal veins regarding the intrusions suggesting formation at lower temperature.

**Keywords:** Andean tin belt, Bolivia, indium, critical metals, green technologies

### INTRODUCCIÓN

El metal indio (In) está incluido en la lista de las 20 materias primas consideradas estratégicas por la Comisión Europea (2014) atendiendo a su alto valor económico combinado con un importan-

te riesgo en su suministro. El servicio geológico de los Estados Unidos también prevé que el incremento sostenido de la demanda resultará en un déficit en su suministro en los próximos años (Tolcin, 2017). Este metal tiene multitud de usos en la industria electrónica y una amplia aplicación en las llamadas tecnologías verdes, destacándose en la fabricación de paneles fotovoltaicos para la obtención de energía eléctrica (Bleiwias, 2010). Con ello, el indio se encuentra en la base de la economía moderna que dependerá de forma creciente de un suministro seguro que debe cimentarse en una eficiente exploración minera.

El In es obtenido como subproducto durante la extracción de otros metales a partir de sulfuros, principalmente de zinc (Werner et al., 2017), o de óxidos primarios de estaño (Pavlova, 2015), no existiendo depósitos en los que este metal se explote como recurso principal. Una de las mayores concentraciones de In se encuentra en los límites de placa de Nazca y Suramérica a lo largo del conocido como cinturón estannífero andino que se extiende desde el norte de Argentina a través de Bolivia y hasta el sur de Perú (Fig. 1; Schwarz-Scampera y Herzig, 2002). Valores importantes de In han sido descritos en diversos depósitos bolivianos, incluyendo concentraciones de hasta 5740 ppm (análisis de roca total) en el depósito de Potosí. Estudios de geoquímica mineral reportan valores de hasta un 1.27 % en peso de In en Potosí y valores destacables en otros depósitos incluyendo el de Huari Huari (Isihara et al., 2011; Murakami et al., 2013). Los citados artículos, no obstante, están basados en el estudio de un número muy limitado de muestras (sólo una muestra del depósito de Huari Huari fue estudiada por Murakami et al., 2013) que, si bien permiten la identificación de depósitos potenciales, no permiten extraer conclusiones sobre la distribución espacial y temporal de la concentración del In ni de su metalogénia a escala regional.

En este trabajo presentamos datos de geoquímica mineral de sulfuros del depósito de Huari Huari, con especial atención a las concentraciones de In, contextualizándolas según su distribución espacial en el depósito o su distribución temporal a lo largo de la secuencia paragenética. Para conseguir estos objetivos, se han estudiado un total de 54 muestras de mineralización metálica (ver distribución en el mapa de la Fig. 2) mediante microscopía óptica con luz reflejada, microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM-EDS) y



Figura 1. Principales depósitos minerales y marco geológico de los Andes centrales.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

El distrito minero de Huari Huari (coordenadas -65.58277, -19.4476 WGS84, elevación de 3900 m.s.n.m) se encuentra al E del pueblo de Huari Huari, en la provincia de Tomás Frías, en el departamento de Potosí, Bolivia. Geológicamente, se enmarca en la Cordillera Oriental Boliviana. Ésta comprende secuencias sedimentarias metamorfizadas de edad Ordovícico a Cretácico superior compuestas de pizarras negras, areniscas, calizas y cuarcitas que durante la orogenia andina fueron plegadas y falladas formando estructuras con dirección NNW-SSE (McQuarrie y DeCelles, 2001). Discordantemente sobre éstas se disponen estratos de areniscas silíceas mesozoicas. Dicha secuencia fue intruida por cuerpos ígneos de composición ácida de la serie de la ilmenita (tipo S) en forma de stocks y domos de edad Miocena que promovieron la circulación de fluidos hidrotermales asociados a mineralizaciones de sulfuros como la de Huari Huari, datada a 20 Ma (Ludington et al., 1992).

## ESTRUCTURA DEL DEPÓSITO

El depósito de Huari Huari está mayoritariamente encajado en una secuencia turbidítica con pizarras y areniscas silíceas del Paleozoico inferior con buzamiento hacia el NE. Éstas se sitúan en el núcleo del anticlinal de Huari Huari, cuyo rumbo es NNW-SSE. El plegamiento queda cortado por un conjunto de fallas de dirección predominante NNE-SSW a NW-SE que promovieron el ascenso de magmas y la circulación de fluidos hidrotermales durante la formación de las mineraliza-

ciones vetiformes. En la zona de estudio destaca la intrusión de domos de composición dacítica de edad miocena, el más importante de los cuales se encuentra en el cerro de San Salvador, al N de la zona minera.

Se distinguen dos estilos de mineralización: estratoligada tipo manto (poco desarrollada) y vetiforme (mineralización principal); sobre ambas se desarrolla una zona superior de oxidación y enriquecimiento. La mineralización estratoligada se ha observado al sur del Cerro Espíritu, y se encuentra encajada en niveles de arenisca, con buzamiento 020/20 a 020/40. Las menas aparecen reemplazando al cemento original de las areniscas o cierran porosidades intergranulares de las mismas.

Se reconocen cuatro vetas principales (San Salvador, Antón Bravo, Matilde y Buen Suceso) que coinciden con fallas de desgarre. Además, se distinguen multitud de vetas asociadas de menor extensión, asociadas a diaclasas de dirección dominante NE-SW (Fig. 2). La veta San Salvador se encuentra en el cerro del mismo nombre con buzamiento 320/59, y a diferencia de las otras se encuentra encajada en la roca dacítica. La veta Antón Bravo, al este del cerro Vera Cruz, tiene dirección de buzamiento variable entre 290 y 300, y ángulos de buzamiento en el rango 60-75. La veta Matilde, localizada al oeste del Cerro Espíritu, presenta buzamiento 222/70. La veta Buen Suceso se sitúa al oeste del Cerro Manto, y tiene buzamiento 260/75.

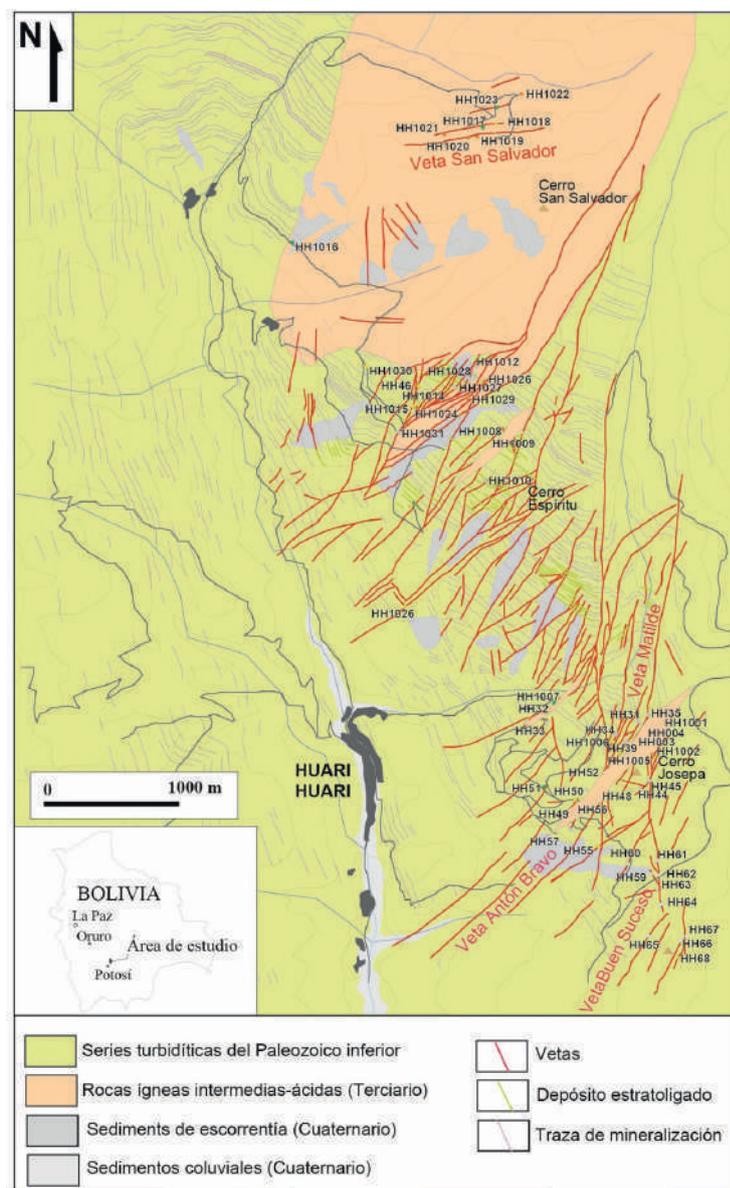


Figura 2. Cartografía del depósito de Huari Huari, mostrando las principales vetas mineralizadas, así como la localización de las muestras utilizadas durante este estudio. Mapa de elaboración propia.

## MINERALOGÍA DE LA MENA DE SULFUROS

La mineralización estratoligada (tipo manto) detectada en el Cerro Espíritu ha sido observada en forma de diseminaciones de sulfuros y casiterita cementando los elementos detríticos de las areniscas. Esta mineralización está asociada a una intensa silicificación y sericitización de la roca. La pirita es, con mucho, el sulfuro más abundante y aparece como granos alotriomórficos de tamaño micrométrico, si bien la esfalerita marmatítica y la casiterita no son raras. En dominios distales a la mineralización vetiforme se observan cristales de pirita de hábito framboidal con recrecimientos sintaxiales también de pirita. Vetillas de marcasita de unos pocos milímetros cortan el conjunto.

En cambio, la mineralización vetiforme consta de secuencias de relleno drúsico, presentando una mineralogía mucho más compleja, con proporciones variables de las fases de mena a lo largo del distrito y a lo largo de la secuencia de cristalización. Las menas principales son pirita, pirrotina, arsenopirita, esfalerita, galena, casiterita, estannita, tetraedrita y sulfosales con Sn, Pb, Bi y Ag; cuarzo y siderita son los principales minerales de ganga. En la veta San Salvador (Fig. 2), la casiterita (needle tin) y la esfalerita están en proporciones mayores que la galena y la pirita, mientras que la miargirita se encuentra como trazas reemplazando a la esfalerita. En la veta Matilde se observan texturas de relleno con bordes enriquecidos en casiterita que gradan a bandas ricas en esfalerita (dos generaciones) alternadas con bandas finas de pirrotina, estannita, así como marcasita y sulfosales tardías. En la veta Antón Bravo, la mineralización aparece en forma de secuencias de relleno pasivo, así como cementación de brechas (textura cockade); una primera generación de esfalerita (marmatita), casiterita y proporciones menores de arsenopirita son seguidas por la cristalización de calcopirita (muy escasa), estannita y sulfosales de Pb y Ag. Una generación tardía de esfalerita ocupa espacios intersticiales entre los cristales aciculares de las sulfosales. En la veta Buen Suceso, una primera mineralización de casiterita (muy escasa), arsenopirita y abundante esfalerita (marmatita) es seguida por la cristalización de calcopirita, estannita y relativamente abundantes sulfosales de Pb, Ag y Bi; se detecta también una generación tardía de casiterita (needle tin) y de casiterita botrioidal pobre en Fe, así como una tercera generación de esfalerita sin Fe.

## GEOQUÍMICA MINERAL

Los primeros datos obtenidos de la geoquímica mineral en sulfuros primarios de Huari Huari indican concentraciones muy dispares de In a lo largo de la secuencia de cristalización y a lo largo del distrito mineralizado (desde valores por debajo del límite de detección hasta un 1,75 % en peso de In). Las concentraciones más elevadas de In se encuentran sistemáticamente en la esfalerita, siendo la primera generación de esfalerita la que suele estar más enriquecida en este metal, muy destacadamente en la Veta Antón Bravo y sobretodo en Buen Suceso (Fig. 2), con valores a menudo alrededor del 1% en peso y asociadas a altos contenidos de Fe. Las concentraciones de In en todas las generaciones de esfalerita en las vetas San Salvador y Matilde, así como en las generaciones tardías de esfalerita en todo el distrito están sistemáticamente por debajo de su límite de detección para la técnica utilizada.

## CONCLUSIONES Y RETOS DE FUTURO

La asociación espacial y la similitud en edad de los intrusivos y las mineralizaciones sugiere un nexo genético entre todos ellos. La distribución del In en las zonas más distales en relación con los intrusivos y su enriquecimiento en la esfalerita de generaciones precoces y su ausencia en las generaciones de esfalerita más tardías sugiere que la precipitación del In puede quedar favorecida por temperaturas intermedias. Por consiguiente, el depósito de Huari Huari es un buen lugar para establecer el comportamiento del In en sistemas hidrotermales asociados a intrusivos ácidos.

## REFERENCIAS

- Bleiwas, D.I., 2010. Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells. U.S. Geological survey Circular 1365, 10p. (disponible en <http://pubs.usgs.gov/circ/1365>).
- Comisión Europea, 2014. [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en) (acceso 05.07.2017).
- Ishihara, S., Murakami, H., Marquez-Zavalia, M.F., 2011. Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits. *Resource Geology* 61, 174-191.
- Ludington, S., Orris, G.J., Cox, D.P., Long, K.R., Asher-Bolinder, S., 1992. Mineral deposit models, en: US Geological Survey and Servicio

Geológico de Bolivia (eds.) *Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia*. U.S. Geological Survey Bulletin 1975, 63-89.

McQuarrie, N., DeCelles, P.G., 2001. Geometry and structural evolution of the central Andean backthrust belt, Bolivia. *Tectonics* 20, 669-692.

Murakami, H., Ishihara, S., 2013. Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin-poly-metallic deposits in Bolivia, China and Japan: a femto-second LA-ICPMS study. *Ore Geology Reviews* 53, 223-243.

Schwarz-Scampera, U., Herzig, P.M., 2002. *Indium: Geology, Mineralogy and Economics*. Springer-Verlag, Heidelberg (257 pp.).

Pavlova, G.G., Palessky, S.V., Borisenko, A.S., Vladimirov, A.G., Seifert, Th., Phan, L.A., 2015. Indium in cassiterite and ores of tin deposits. *Ore Geology Reviews* 66, 99-113.

Tolcin, A.C., 2017. Indium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2017-indiu.pdf>).

Werner, T.T., Mudd, G. M., Jowitt, S.M., 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium. *Ore Geology Reviews* 86, 939-956.