

# MINERALOGÍA DEL DEPÓSITO DE SN DEL DISTRITO DE SANTA FE, BOLIVIA

Abigail Jiménez<sup>1</sup>, Pura Alfonso<sup>1</sup>, Carles Canet<sup>2</sup>, Maite Garcia-Valles<sup>3</sup>, Juan Elvys Trujillo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria Minera, Industrial i TIC, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. De les Bases de Manresa 61-73, 08242 Manresa, Spain  
celenus83@gmail.com; pura@emrn.upc.edu

<sup>2</sup>Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México D.F., Mexico; ccanet@geofisica.unam.mx

<sup>3</sup>Dep. de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès sn. 08028 Barcelona, Spain; maitegarciavalles@ub.edu

<sup>4</sup>Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia, jelvyst20@gmail.com

## Resumen

El depósito de Sn-Zn-Pb-Ag de Japo-Santa Fe-Morococala se encuentra en la provincia metalogenética del cinturón Central Andino. La mineralización se encuentra encajada en una secuencia metasedimentaria paleozoica y rocas ígneas porfídicas del Oligoceno-Mioceno. Las menas se encuentran en vetas y disseminaciones. Se distinguen dos tipos de mineralización: (1) una mineralización temprana de Sn y (2) una mineralización tardía de Sn y Zn-Pb-Ag. La asociación mineral consiste principalmente en cuarzo, pirita, casiterita, sulfuros y sulfosales. La casiterita, hasta 0,25% en peso de In, constituye la mineralización más temprana. La galena y la esfalerita son los principales sulfuros. La esfalerita presenta 0,24% de In. Los minerales del grupo de la estannita están representados por estannoidita, kersterita y sulfuros del sistema Sn-Cu-Zn-Fe-S. Las sulfosales incluyen sakuraiita, potosiita, franckeita, freibergita, tetrahedrita, myargyrita, boulangerita, jamesonita, zinckenita, cilindrita y andorita. En este depósito, después de una etapa magmática epigenética, se produjo un largo evento greisen-hidrotermal con varios episodios de deposición de metales.

Palabras clave: Estaño, sulfosales; Estannita; Indio, Bolivia

## Abstract

The Sn-Zn-Pb-Ag Japo-Santa Fe-Morococala ore deposit is located in the Central Andean Belt province. The ore mineralization is hosted in a Paleozoic metasedimentary sequence and porphyritic Oligocene-Miocene igneous rocks. Ore minerals occur in veins and disseminations. Two types of ore mineralization are distinguished: (1) An early Sn mineralization and (2) a late Sn and Zn-Pb-Ag mineralization. Mineral association consists mainly of quartz, pyrite, cassiterite, sulfides and sulfosalts. Cassiterite, up to 0.25 wt% In, constitutes the earliest mineralization. Galena and sphalerite are the main sulphide minerals. Sphalerite shows up 0.24 wt% In. Stannite group is represented by stannoidite, k sterite, and sulfides of the Sn-Cu-Zn-Fe-S system. Sulfosalts include sakuraiite, potosiite, franckeite, freibergite, tetrahedrite, myargyrite, boulangerite, jamesonite, zinckenite, cylindrite and andorite. In this deposit, after an epigenetic magmatic stage, a long greisen-hydrothermal event took place with several episodes of metal deposition.

**Keywords.** Tin, sulfosalts; stannite; indium, Bolivia

## 1 Introducción

Los depósitos de Santa Fe, Morococala y Japo constituyen el distrito minero de santa

Fe y se encuentran en el departamento de Oruro, en la Cordillera Oriental de los Andes, a más de 4.300 msnm. Forman parte de la faja estannífera de Bolivia. Esta faja se

extiende a lo largo de aproximadamente 900 km en dirección noroeste en la Cordillera Oriental de Bolivia donde la corteza continental alcanza su mayor potencia (Turneure, 1971; Arce-Burgoa, 1990, 2009). Las mineralizaciones estanníferas están espacialmente relacionadas con cuerpos intrusivos, constituidos por granitos peraluminosos e intrusiones de pórfido de diferentes edades, aunque los más comunes son del final del Terciario.

Los yacimientos polimetálicos de estaño bolivianos más conocidos son de estaño y plata y se encuentran en los distritos de Potosí y Oruro y los depósitos de estaño de Llallagua y Huanuni, que han sido clasificados como gigantes de clase mundial, por el potencial económico que representan, sin embargo la génesis y características particulares de algunos de estos yacimientos han sido poco estudiadas.

Geológicamente existen pocos trabajos publicados sobre estos yacimientos, salvo algunos estudios regionales (Sillitoe et al., 1975; Grant et al., 1979; Dietrich et al., 2000; Mlynarczyk y Williams-Jones, 2005). Dichos estudios se han centrado en definir la evolución metalogenética regional, sin definir un modelo particular para este yacimiento. Por su parte, Sugaki et al. (1981) establecieron las características geológicas y mineralógicas generales del distrito de Oruro. Así mismo, existen algunos informes técnicos inéditos realizados por empresas de exploración (AITCOBOL, 2006, 2007), para las cooperativas de Santa Fe y Japo. En ellos se menciona que la mineralización se encuentra emplazada en las unidades sedimentarias de una estructura anticlinal, denominada Anticlinal Japo-Santa Fe.

Además, Ishihara et al., 2011 y Murakami e Ishihara (2013), hicieron un análisis detallado de las concentraciones de Indio en algunos depósitos polimetálicos de estaño similares, como el de Potosí, encontrando que las relaciones de In/Zn en esfalerita y roquesita son muy altas, del orden de 152-292 ppm y la relación 1000 In/Zn varía de 0.16 a 15.0, con un promedio de 4.4 y determinaron que el indio se encuentra principalmente en esfalerita y probablemente en sulfuros de Sn, Ag y en sulfosales, estos autores sugieren otros

estudios geológicos y mineralógicos detallados para determinar el potencial real de explotación de elementos no convencionales, en yacimientos análogos en la Faja Estannífera Boliviana.

En el presente trabajo se presenta una caracterización de los minerales y química mineral del yacimiento de Japo-Santa Fe-Morococala.

## 2 Geología del depósito

En la mayor parte de la superficie en la zona de estudio, aflora una secuencia Paleozoica meta-sedimentaria. La secuencia estratigráfica de la misma está representada por el zócalo de la formación Amutara (Voges, 1962), la cual es una secuencia marina profunda turbidítica de lutitas y areniscas, esta unidad es suprayacida por una secuencia Silúrica, de las formaciones Cacañiri, Llallagua y Uncia. La formación Cacañiri (Díaz, 1997) es la base de esta secuencia, de edad Silúrica Inferior, determinada en la fauna encontrada en la misma. En la zona de estudio es de color grisáceo con tonos muy variados desde gris oscuro hasta tonos claros amarillos, suelen tener clastos de cuarzo cristalino subredondeado y sericita, algunos autores la definen como “diamictita”. Esta secuencia paulatinamente cambia a areniscas y limonitas micáceas de la formación Huanuni (Turneure, 1960). Por encima aparece la formación Llallagua (Koeberling, 1919), que conforma paquetes de cuarcita gris a blanquecina, en su parte superior presenta facies de arenisca, limonita y lutitas de color gris verdoso. La secuencia silúrica culmina con la formación Uncia (Vargas-Córdoba, 1970), que se encuentra rellenando valles sinclinales y consiste de paquetes de pizarras de color gris y está intercalada hacia la cima con estratos delgados de arenisca. Esta secuencia se encuentra cubierta discordantemente por lavas riolíticas y dacíticas e ignimbritas de la formación Morococala (Ahlfeld y Branisa, 1960) del Mioceno.

Esta secuencia ha sido instruida por una serie de diques porfídicos y por un cuerpo cuarzo latítico denominado stock San Pablo, el cual

aflora en las inmediaciones de la mina Japo. Depósitos aluviales culminan la secuencia estratigráfica. La distribución de estas unidades en la zona de estudio se encuentra representada en el mapa geológico presentado en la Figura 1. La mineralización metálica se aloja principalmente en la secuencia sedimentaria, en dos sistemas de

vetas: uno con disposición N20°E y buzamiento subvertical y otro como disposición N20°W con buzamiento subhorizontal, siguiendo planos de estratificación. En la secuencia ígnea la mineralización se aloja principalmente en brechas de falla e hidrotermales y reemplazando fenocristales.

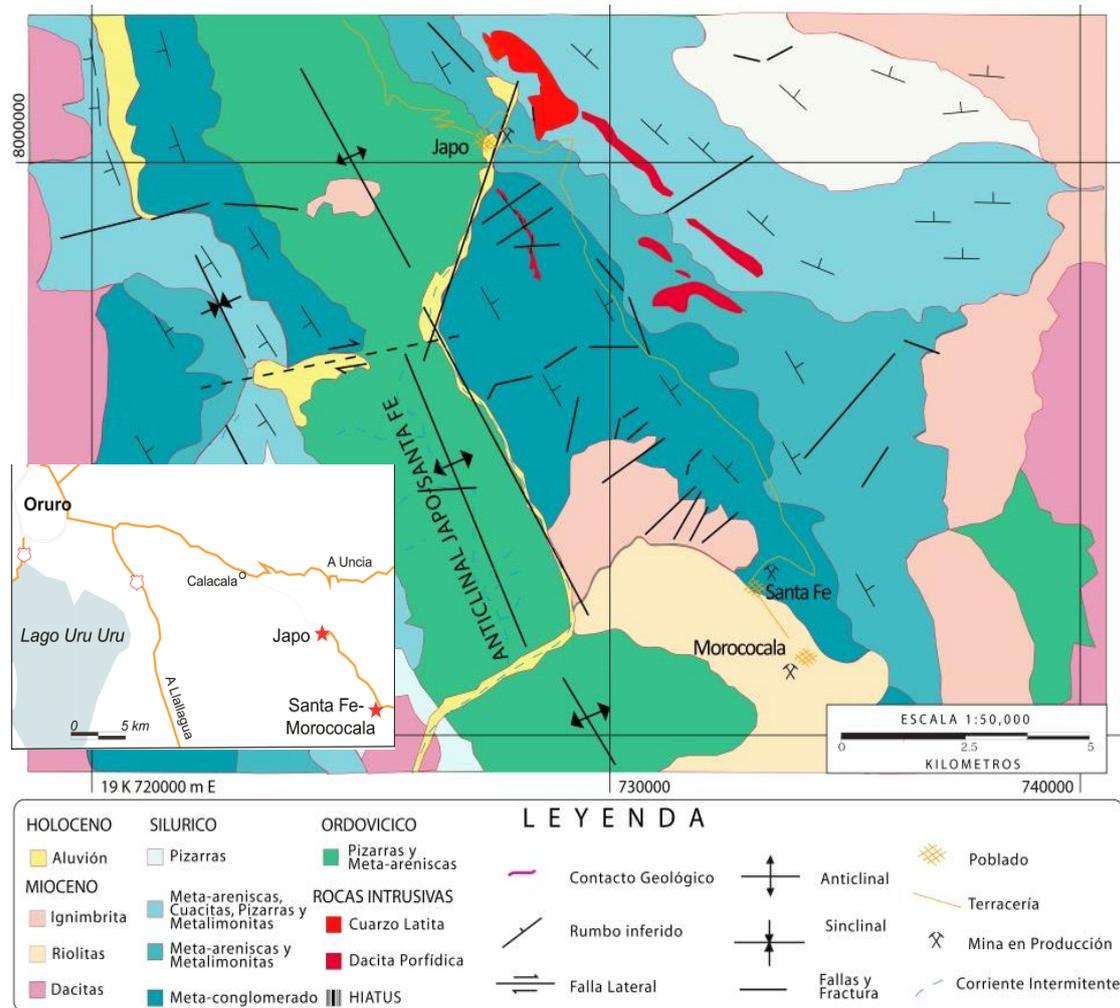


Figura 1. Mapa geol3gico de la zona de estudio.

### 3. Muestreo y t3cnicas analíticas

#### 3.1. Muestreo

Durante los trabajos de campo se realiz3 un reconocimiento superficial con el fin de determinar la ubicaci3n de cada uno de los sondeos de que se disponía, una vez que se localizaba cada sondeo se fotografi3 la ubicaci3n del mismo con el fin de obtener un archivo gráfico.

Asímismo, se recolectaron muestras tanto en

superficie, como en diferentes niveles de las minas de Santa Fe y Japo, sin embargo la mayor parte de muestras fueron obtenidas a partir de los testigos de sondeos. Más de 5000 metros de sondeos fueron descritos (Figura 2). La Tabla 1 muestra un listado de los sondeos descritos, cabe seÑalar que algunos sondeos resultaron inaccesibles. Las muestras más representativas de cada uno de los 15 sondeos, fueron seleccionadas para su posterior análisis, con base en los siguientes criterios: a) Cambios litol3gicos, b) Vetas, c)

Cambios mineralógicos, d) Mayor contenido de metales, e) Minerales de alteración y f)

Estructuras reconocidas, como diques y fallas.

### 3.2. Técnicas analíticas

Para la caracterización mineralógica se realizaron difracciones de polvo de rayos X (DRX) como complemento para identificación de las asociaciones minerales, especialmente en el caso de aquellos minerales que por ser criptocristalinos o por no presentar características diagnósticas, no pueden ser identificadas ópticamente. Los análisis se realizaron en los Serveis Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona (CCiTUB) mediante un difractómetro PANalytical XPert PRO.

El estudio petrográfico y mineralógico de las muestras se llevó a cabo mediante microscopía óptica de luz transmitida y reflejada a partir de láminas delgadas y

probetas, preparadas para su estudio. Para completar la caracterización mineralógica y textural de las muestras, así como para obtener una información cualitativa de la composición de los diferentes minerales se utilizó la microscopía electrónica de barrido (SEM) con analizador de energías dispersivas acoplado (EDS). Para ello, se utilizó un microscopio de sobremesa Hitachi TM-1000.

Finalmente, para la caracterización de la química mineral de las fases más relevantes de la mineralización se empleó la microsonda electrónica (EMPA), que permite analizar los elementos contenidos en volúmenes de muestra a escala micrométrica. El equipo utilizado fue una JEOL JXA-8230 ubicada en los CCiTUB.

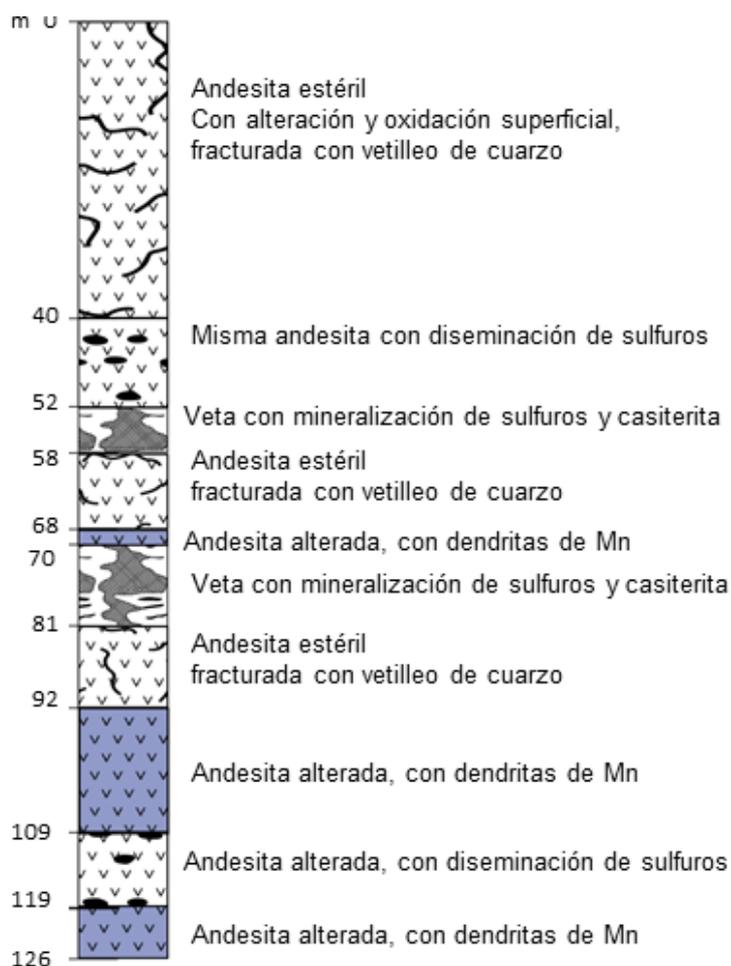


Figura 2. Descripción del sondeo JDC-06-06 de la mineralización de Japo.

## 4 Mineralogía y química mineral

### 4.1. Rocas encajantes

Macroscópicamente se diferencian en su mayoría rocas meta-sedimentarias, de las unidades anteriormente descritas, que litológicamente corresponden con: yeso/anhidrita, pizarra, meta-arenisca, meta-grauwaca de cuarzo y cuarcita. Por otra parte, en esta área también se encuentran rocas magmáticas, descritas como pórfido cuarzo-latítico y diques porfídicos (Sillitoe et al., 1975), así como una serie de rocas volcánicas como la dacita, ignimbrita y riolita como parte de la suite de rocas que alojan al yacimiento. La mineralización se aloja principalmente en la secuencia

metasedimentaria. Se produce preferentemente en los contactos litológicos y estructurales. Los minerales se producen como reemplazamientos y como porosidad y fracturas infiltraciones (Figura 3).

Los cuerpos intrusivos y porfíricos muestran una alteración argílica generalizada. Tienen una textura porfídica, con fenocristales de cuarzo, feldespato, micas y turmalina, muchos de los cuales son reemplazados por sulfuros, clorita y epidota. La alteración es más intensa a lo largo del contacto entre las rocas y las venas del huésped. Los minerales de alteración son principalmente sericita, alunita, plumbojarosita, caolinita, dickita y vermiculita.

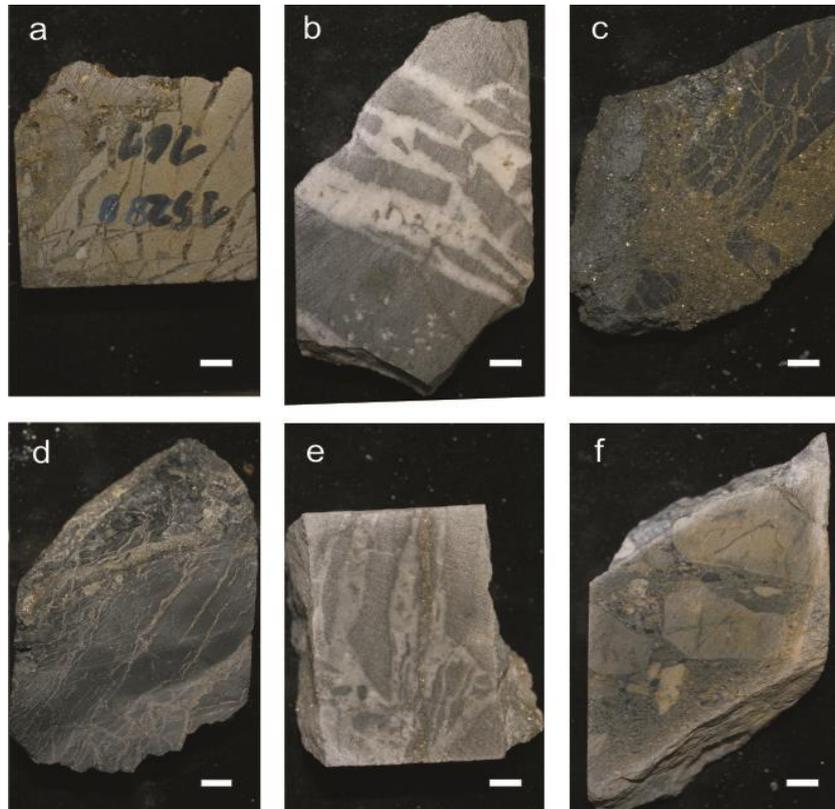


Figura 3. Depósito de Japo; a) encajante meta-sedimentario (Fm. Llallagua). La mineralización metálica se encuentra alojada en fracturas paralelas; b) veta de cuarzo (post-mineralización) en dique; c) mineralización masiva (manto mineralizado) en pizarras; d) micro-fallas mineralizadas en rocas meta-sedimentarias; e) pórfido con veta de cuarzo y sulfuros; f) brecha hidrotermal.

### 4.2. Mineralización

La mineralización se encuentra alojada preferentemente en los contactos litológicos y estructurales. Los minerales aparecen

como reemplazamientos y rellenando porosidad y fracturas. En algunos casos, los sulfuros han reemplazado casi totalmente a la roca original, no sólo la matriz, sino también se forman vetas con cuarzo y

sulfuros principalmente pirita. En las otras rocas sedimentarias, se forma una mineralización alrededor de los fragmentos líticos, aprovechando los cambios texturales, fallas y fracturas.

Las vetas están rellenas de cuarzo y pirita, y una asociación de casiterita, sulfuros y sulfosales.

La casiterita predomina en el yacimiento de Japo, mientras que en Santa Fe y Morococala se encuentran diferentes generaciones de mineralización de Sn y Zn-

Pb-Ag. La casiterita se asocia con pirita, arsenopirita, calcopirita y calcosita.

La galena y la esfalerita son los sulfuros más abundantes. También aparecen arsenopirita y esfalerita (Figura 4). Además abundan la estannita y otros sulfuros con Sn y sulfosales.

Entre los minerales supergénicos se pueden citar yeso, calcita, melanterita y vivianita ( $\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ). El rutilo se asocia con la última casiterita y forma cristales de morfología acicular.

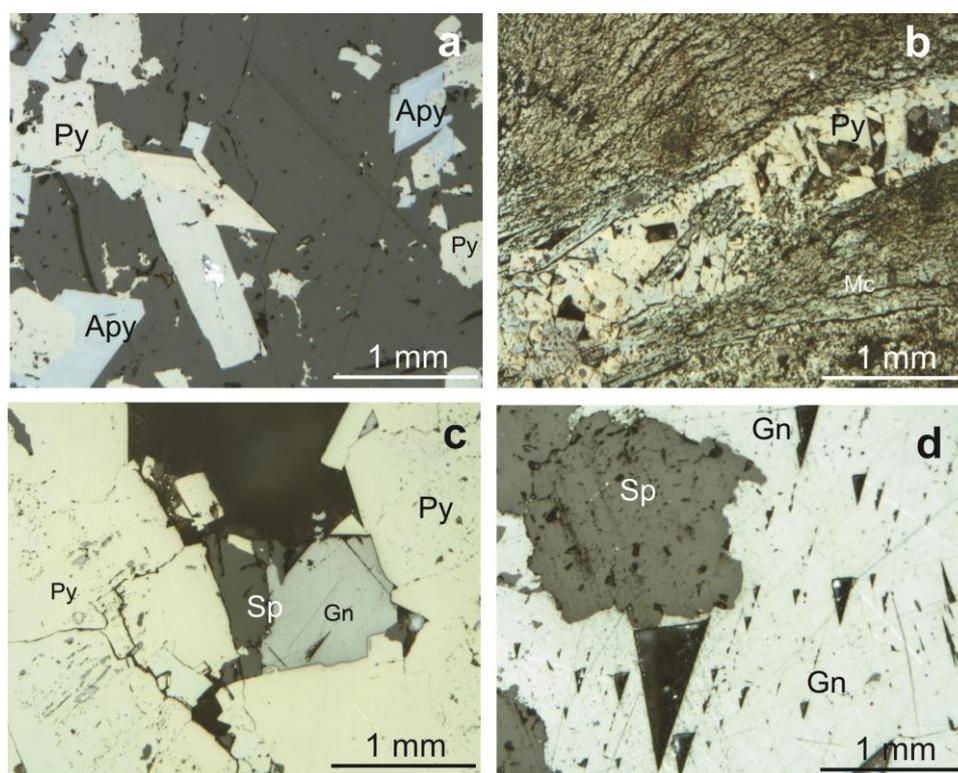


Figura 4. Microfotografías en luz reflejada de las asociaciones minerales de Santa Fe. a) Cristales de pirita (Py) y arsenopirita (Apy) romboédrica con anisotropía anómala; b) veta tardía de pirita (Py) que corta cristales aciculares de marcasita (Mc), lo que indican dos etapas diferentes de mineralización de sulfuros; c) cristales de pirita (Py), galena (Gn) y esfalerita (Sp) en paragénesis; d) asociación de galena (Gn), y esfalerita (Sp).

### 4.3. Química mineral

En el distrito de Santa Fe se distinguen dos etapas de mineralización. La primera está representada por una mineralización temprana, rica en Sn, constituida por casiterita. La segunda es más tardía y de sulfuros, representada por esfalerita, galena y minerales del grupo estannita. La mineralización de casiterita predomina en el yacimiento de Japo, mientras que en Santa

Fe y Morococala se encuentran diferentes generaciones de mineralización de Sn y Zn-Pb-Ag.

Los análisis mediante microsonda (Tabla 1) indican que la casiterita tiene altas concentraciones de In, entre 0,12 y 0,25% en peso, en cambio, los contenidos de Ta y Nb son despreciables.

Tabla 1. Composición química (peso %) de casiterita de Morococala (MC) y Japo (J).

Óxido	MC-1	MC-2	MC-3	J-1
SnO <sub>2</sub>	96.73	95.49	95.42	98.61
FeO	0.09	0.30	0.32	0.49
CuO	0.00	0.03	0.00	0.04
ZnO	0.90	2.80	3.19	0.05
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.16	0.15	0.30
PbO	0.39	0.00	0.16	0.10
Total	98.25	98.77	99.25	99.59

Una gran variedad de minerales, de la clase de los sulfuros y sulfosales, han sido identificados a partir de los análisis realizados con la microsonda (Tabla 2).

La galena se asocia comúnmente con sulfosales. Los análisis de EPMA revelan un promedio de 0,30% en peso de Ag en galena. Además, la esfalerita muestra contenidos de indio hasta 0,24% en peso y una correlación negativa entre Fe + Cd + In y Zn (Jiménez-Franco et al., 2015; Figura 5), lo que indica una sustitución iónica entre estos metales. Valores similares han sido presentados para la esfalerita de los depósitos de Potosí y Huari Huari del cinturón central de los Andes (Murakami e Ishihara 2013).

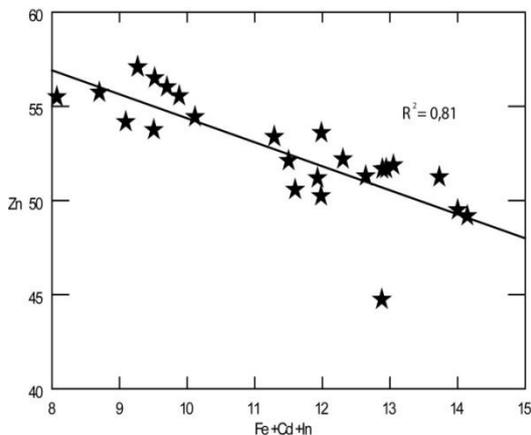


Figura 5. Diagrama Fe+Cd+In vs. Zn de esfaleritas del distrito de Santa Fe (Jiménez-Franco et al., 2015).

El estaño también está presente en sulfuros como estannita, stanoidita, kersterita, sakuraiita y sulfuros del sistema S-Sn-Cu-Zn-Fe. La estannita de Japo y Morococala es rica en In, valores de 0,2% In en peso son frecuentes, mientras que la de Santa Fe es mu pobre en este elemento.

Tabla 2. Fórmula de sulfuros y sulfosales presentes en el distrito de Santa Fe.

Grupo	Mineral	Fórmula
<i>Calcosita</i>	Argentita	Ag <sub>2</sub> S
<i>Cosalita</i>	Cosalita	Pb <sub>2</sub> Bi <sub>2</sub> S <sub>5</sub>
<i>Claudetita</i>	Bismita	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<i>Cylindrita</i>	Cylindrita	FePb <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>14</sub>
<i>Franckeita</i>	Franckeita	Fe <sup>2+</sup> (Pb.Sn <sup>2+</sup> ) <sub>6</sub> Sn <sub>2</sub> <sup>4+</sup> Sb <sub>2</sub> S <sub>14</sub>
	Potosiita	Pb <sub>6</sub> Sn <sub>3</sub> FeSb <sub>3</sub> S <sub>16</sub>
<i>Estannita</i>	Estannita	Cu <sub>2</sub> (Fe.Zn)SnS <sub>4</sub>
	Kesterita	Cu <sub>2</sub> (Zn.Fe)SnS <sub>4</sub>
	Sakuraiita	(Cu.Zn.Fe) <sub>3</sub> (In.Sn)S <sub>4</sub>
	Hocartita	Ag <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub>
	Pirquitasita	Ag <sub>2</sub> ZnSnS <sub>4</sub>
	Petrukita	(Cu.Ag) <sub>2</sub> (Fe.Zn)(Sn.In)S <sub>4</sub>
<i>Estibnita</i>	Estibnita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
	Bismuthinita	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
<i>Lillianita</i>	Gustavita	AgPbBi <sub>3</sub> S <sub>6</sub>
	Ourayita	Ag <sub>3</sub> Pb <sub>4</sub> Bi <sub>5</sub> S <sub>13</sub>
	Andorita	AgPbSb <sub>3</sub> S <sub>6</sub>
<i>Matildita</i>	Matildita	AgBiS <sub>2</sub>
<i>Melanita</i>	Berndtita	SnS <sub>2</sub>
<i>Mwsonita</i>	Stannoidita	Cu <sub>8</sub> (Fe.Zn) <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>12</sub>
<i>Tethraedrita</i>	Tethraedrita	Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
	Freibergita	Ag <sub>6</sub> Cu <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13-x</sub>
	Tennantita	Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
	Teallita	PbSnS <sub>2</sub>
	Miargyrita	AgSbS <sub>2</sub>
Boulangerita	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>	
Jamesonita	FePb <sub>4</sub> Sb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>	
Zinckenita	Pb <sub>9</sub> Sb <sub>22</sub> S <sub>42</sub>	
Viaeneita	(Fe.Pb) <sub>4</sub> S <sub>8</sub> O	
Laitakarita	Bi <sub>4</sub> Se <sub>3</sub>	

La composición química diversos minerales hallados en el distrito de Santa Fe se muestra en la Tabla 3. Entre estos minerales destacan los portadores de Sn e In, como la estannita, kersterita, y sakuraiita. La sakuraiita se encontró en en Japo y Morococala, su fórmula se da como (Cu, Zn, Fe, In, Sn) S (Kissin y Owens, 1986), pero esto parece incierto ya que la estructura sakuraiita Todavía no se ha determinado. También se encuentran abundantes minerales de plata, como la matildida y pirquitasita (Tabla 3).

Las sulfosales incluyen varios miembros ricos en Sn como potosiita y franckeita. Otras sulfosales son ricas en Ag, como

freibergita (hasta 14,95% en peso de Ag), tetraedrita, myargyrita, boulangierita, jamesonita, zinckenita, cilíndrita y andorita.

La bismutoinita y la berndita se encuentran en trazas. Otros sulfuros presentes son pirrotita, stibinita, marcasita y

Tabla 3. Composición química de sulfosales del distrito de Santa Fe (EMPA).

Óxidos (%)	Santa Fe							Morococala		
	Hoc 1	Pir 2	Pot 3	Frei 4	Frak 5	Vía 7	Arg 8	Mat 9	Gus 10	Our 12
S	24.49	24.49	20.36	23.08	20.27	48.18	13.26	18.07	16.60	16.54
Fe	3.79	3.79	4.12	6.06	2.66	40.44	0.20	0.93	0.86	0.74
Cu	0.23	0.23	0.04	25.63	0.07	0.00	0.21	0.22	0.68	0.00
Zn	11.18	11.18	0.14	0.76	0.05	0.04	2.03	6.03	1.14	0.00
As	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.08	0.00	0.01
Se	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.05	0.00	0.53	0.59	1.13
Ag	39.47	39.47	0.53	14.95	0.33	0.05	66.81	11.22	2.33	8.58
Cd	0.00	0.00	0.31	0.12	0.00	0.11	0.07	0.31	0.02	0.00
In	0.00	0	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Sn	22.09	22.09	12.57	1.21	13.11	0.09	0.00	0.00	0.31	0.02
Sb	0.00	0	11.13	26.53	10.94	0.12	17.64	0.02	6.43	3.55
Pb	0.07	0.07	51.58	0.29	52.48	11.23	0.00	6.44	44.29	25.82
Bi	0.00	0	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	57.81	26.66	42.52
Total	101.47	101.63	100.96	98.78	99.91	100.41	100.73	101.68	99.92	98.91

Hoc: hocartita; Pir: piquitasita; Pot: potosiita; Frei: freibergita ; Frak: franckeita; Vía: viaeinita; Arg: argentita, Mat: matildita ; Pot: potosiita; Gus,:gustavita; Our: ourayita

#### 4.4. Fosfatos

Los fosfatos se producen en cavidades y pequeñas fracturas en dos etapas diferentes: a) en primer lugar, durante una fase magmática tardía, se formó monacita  $(Ce,La,Nd,Th)PO_4$  y b) durante una etapa supergénica tardía del depósito mineral. se formaron diversos fosfatos rellenando cavidades, como la plumbogummita  $(PbAl_3(PO_4)_2 \cdot H_2O)$  y la vivianita  $Fe^{3+}(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ . La crandallita,  $CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$ , también se produce en cantidades menores.

#### 4. Discusión

El análisis textural sugiere una deposición mineral epigenética formada por un evento de múltiples etapas. En la secuencia de cristalización de la mineralización pueden inferirse cuatro etapas (Figura 6) paragénicas principales, que, por orden de formación, serían: (1) Etapa magmática e inyección de fluidos hidrotermales ricos en metales, especialmente en Sn; (2) interacción fluido-roca produciendo la alteración de las secuencias metasedimentarias, sincrónica a una fase magmática tardía; (3) etapa hidrotermal

tardía con deposición de sulfuro; y (4) la alteración supergénica que formó una paragénisis compleja y replegada rica en fosfatos (Figura 7).

Las rocas que contienen la mineralización en estos depósitos son rocas intrusivas y metasedimentarias. Las primeras tienen una asociación de cuarzo-feldespatos-micas, acompañados de cantidades variables de rutilo y turmalina. Burt (1981) definió greisens como rocas graníticas alteradas hidrotermalmente consistentes en una asociación de cuarzo y micas con variable contenido en topacio, turmalina, fluorita u otros minerales ricos en F o B. Los Greisens resultan de complejos procesos metasomáticos que afectan y ocurren dentro de una masa casi granítica y las rocas adyacentes (Pirajno, 2009) y se asocian

Comúnmente a la mineralización de Sn. En este depósito, después de la etapa magmática, se produjo un evento de mineralización debido a la interacción entre las rocas metasedimentarias y los fluidos hidrotermales ricos en metales. Esta etapa presentó varios episodios de deposición de metal formando vetas o discontinuidades de llenado como contactos litológicos o zonas de cizallamiento. Esta etapa fue la más importante

para la mineralización del mineral.

Posteriormente, se produjo una etapa posterior de alteración supergénica.

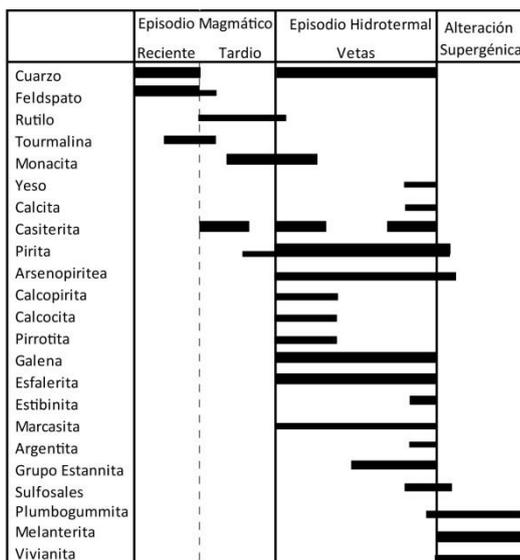


Figura 6. Secuencia paragenética de los principales minerales en las mineralizaciones del distrito de Santa Fe (en Jiménez-Franco et al., 2015)..

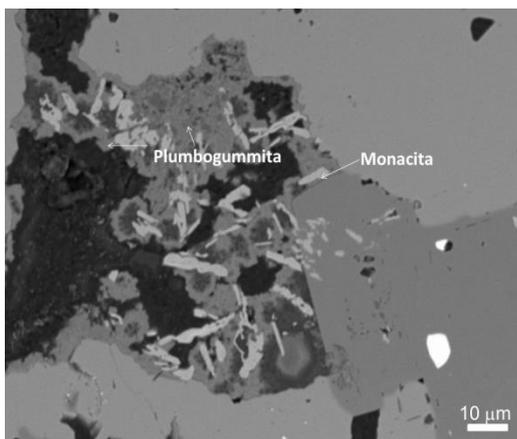


Figura 7. Imagen SEM de fosfatos crecidos en cavidades procedente del depósito de Santa Fe.

### 5. Conclusiones

En el distrito minero de Santa Fe se encuentran dos asociaciones minerales diferenciadas, una, más antigua, dominada por casiterita y otra, más moderna, con sulfuros.

El estaño, además de en la casiterita, se encuentra en cantidades abundantes en sulfuros, principalmente la estannita, hecho que debería ser considerado para la planificación de su beneficio.

Además de Sn, en los depósitos de Japo y Morococala se encuentran minerales con

cantidades significativas de indio (esfalerita, estannita, sakuraiita).

### Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el *Centre de Cooperació al Desenvolupament* of the UPC (CCD 2013UO010, 2014U002) y la SGR 2014 SGR 1661. A. Jiménez cuenta con una beca del Ministerio de Educacin (Secretaría de Educación Pública) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

## Bibliografía

- Ahlfeld, S., 1964. Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia. Departamento Nacional de Geología 5, 388 pp.
- Ahlfeld, S., Branisa, L., 1960. Geología de Bolivia. Ed. Don Bosco, La Paz, 215 pp.
- AITCOBOL S.R.L., 2006. Proyecto Minero Japo. Informe al 30 de septiembre de 2006. Bolivia. Inédito
- AITCOBOL S.R.L., 2007. Estudio de Japo Scoping, Informe. Departamento de Oruro, Bolivia. Inédito.
- Arce-Burgoa, O., 1990. Fundamental study on processing of ore from the Huanuni mine, Bolivia. Tesis Doctoral Inedita, Sendai, Japan, Tohoku University, 168 pp.
- Arce-Burgoa O., Goldfarb R. J., 2009. Metalogenia de Bolivia. Society of Economic Geologists, 79, EE.UU.
- Burt, D., 1981. Acidity-salinity diagrams - Application to greisen and porphyry deposits. *Economic Geology* 76 (4-8): 832-843.
- Canet C., Arana L., González-Partida E., Teresa Pi, Rosa María Prol-Ledesma, Franco S. I., Villanueva-Estrada R.E., Camprubí A., Ramírez-Silva G., López-Hernández A. 2010. A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Aconulco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 105, 1-10.
- Díaz Martínez, E., 1997. Facies y ambientes sedimentarios de la Formación Cacañiri (Silúrico inferior) en La Cumbre de La Paz, norte de la Cordillera Oriental de Bolivia. *Geogaceta*, 22, 55-57.
- Dietrich, A., Lehmann, B., Wallianos, A., 2000. Bulk Rock and Melt Inclusion Geochemistry of Bolivian Tin Porphyry Systems. *Economic Geology*, 95, 313-326.
- Giesemann, A., Jäger, H. J., Norman, A.L., Krouse, H.R., Brand, W.A., 1994. Sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass spectrometer. *Analytical Chemistry*. 66, 2816-2819.
- Grant, J. N., Halls, C., Avila Salinas, W., Snelling, N. J., 1979. K-Ar ages of igneous rocks and mineralization in part of the Bolivian tin belt. *Economic Geology*, 74, 838-851.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM short course, 31 pp.
- Hedenquist, J.W., Lowenstern, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- Ishihara, S., Murakami, H., Marquez-Zavalia, M.F., 2011. Inferred Indium Resources of the Bolivian Tin-Polymetallic Deposits. *Resource Geology*, 61, 174-191.
- Jiménez-Franco, A., Alfonso, P., Canet, C., García-Valles, M., Trujillo, J.E., 2015. Mineralogical characterization of Sn deposits from the Santa Fe district, Bolivia. Proceedings of the 13<sup>th</sup> bienial SGA meeting, pp 777-780.
- Kissin, S.A., Owens, D.A., 1986. The crystallography of sakuraiite. *The Canadian Mineralogist* 24, 679-683.
- Koerberling, F.R., 1919. Informe sobre la geología de las propiedades mineras de la Compañía Estannífera de Llallagua. Informe interno.
- Lowell, J. D., and Guilbert, J. M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 373-408.
- Mlynarczyk, M., Williams-Jones, A., 2005. The role of collisional tectonics in the metallogeny of the Central Andean tin belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 240, 656-667.
- Murakami, H., Ishihara, S., 2013. Trace elements of Indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: A femto-second LA-ICPMS study. *Ore geology Review*. 53, 223-243.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer: 1250 p. Netherlands.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions, in: Ribbe, P.H. (Ed.). *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, 12, 644 pp.
- Sillitoe, R.H., Halls, C., Grant, J.N., 1975. Porphyry tin deposits in Bolivia. *Economic Geology*, 70, 913-927.
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.
- Sugaki A, Ueno H, Shimada N, Kitakaze A, Hayashi K, Shima H, Sanjines O, Saavedra A (1981) Geological Study on Polymetallic Hydrothermal Deposits in the Oruro District, Bolivia. *Sci Rept Tohoku Univ Ser 3*: 1-52
- Sugaki A, Shimada N, Ueno H, Kano S (2003) K-Ar Ages of Tin-Polymetallic Mineralization in the Oruro Mining District, Central Bolivian Tin Belt. *Resource Geology* vol 53 4: 273-282
- Turneure, F.S., 1960. A comparative study of major ore deposits of Central Bolivia Parte I. *Economic Geology*, 55, 217-254.
- Turneure, F.S., 1971. The Bolivian tin-silver province. *Economic Geology*, (66), 215-25.
- Vargas-Córdova, E., 1970. Estudio geológico del área de Llallagua (Hoja 6238). *Boletín del Servicio Geológico de Bolivia* 12, 1-52.