

# DIÁLOGOS MINEROS

**OSVALDO R. ARCE BURGOA**  
**Ph.D., P.Geo, QP**

El Potencial de las Mineralizaciones en Bolivia:  
Oportunidades para una minería formal y responsable

**Friedrich  
Ebert  
Stiftung**



Cumbre del Sajama S.A.





# DIÁLOGOS MINEROS

**OSVALDO R. ARCE BURGOA**  
**Ph.D., P.Geo, QP**

El Potencial de las Mineralizaciones en Bolivia:  
Oportunidades para una minería formal y responsable

Friedrich  
Ebert  
Stiftung



Cumbre del Sajama S.A.



## **Diálogos Mineros**

Primera edición: noviembre de 2025

200 ejemplares

© Friedrich-Ebert-Stiftung en Bolivia (FES Bolivia)

Av. Hernando Siles 5998, esq. calle 14, Obrajes

Tel: (591 2) 275 0005

<https://bolivia.fes.de/>

La Paz, Bolivia

© Cumbre del Sajama S.A.

Av. Hector Ormachea esq. Calle 7 N° 5298, Zona de Obrajes

Tel: (591 2) 278 7383

<https://www.cumbredelsajama.com>

La Paz, Bolivia

**Autor:** Osvaldo R. Arce Burgoa Ph.D., P.Geo, QP

**Diagramación y estilo:** Oscar A. De la Reza A.

**Depósito legal:** 4-2-5216-2025

**ISBN:** 978-9917-629-16-0

**Impresión:** Escarlata Industria Gráfica

**Cita obligatoria:** Osvaldo R. Arce Burgoa Ph.D., P.Geo, QP (2025).

Diálogos Mineros.

Cumbre del Sajama S.A., Friedrich Ebert Stiftung. La Paz

*Impreso en el Estado Plurinacional de Bolivia*



# CONTENIDO

<b>PRÓLOGO</b> .....	7
<b>1. Introducción</b> .....	9
<b>2. Geología sintetizada de Bolivia</b> .....	9
2.1 El Escudo Precámbrico Boliviano .....	10
2.2 Las Llanuras Chaco-Benianas .....	10
2.3 El Orógeno Andino Boliviano .....	10
<b>3. Principales Yacimientos Metalíferos de Bolivia</b> .....	11
3.1 Yacimientos Polimetálicos de tipo "Boliviano" .....	11
3.2 Yacimientos Vetiformes Polimetálicos Asociados con Plutones Graníticos .....	15
3.3 Yacimientos de Oro Orogénico en la Cordillera Oriental de Los Andes .....	17
3.4 Depósitos de Oro Orogénico relacionados con Formaciones de Hierro Bandeado (BIF) en el Precámbrico Boliviano .....	18
3.5 Yacimientos de Oro Orogénico relacionados con Zonas de Cizalla en el Precámbrico Boliviano .....	21
3.6 Depósitos Epitermales en el Orógeno Andino .....	22
3.7 Depósitos Vetiformes Estratoligados de Cobre en "Estratos Rojos" .....	24
3.8 Depósitos Vetiformes de Zn-Pb (Ag) en Faja de pizarras en la Cordillera Oriental de Los Andes .....	25
3.9 Yacimientos de Óxidos de Hierro, Cobre y Oro (IOCG) en el Precámbrico Boliviano .....	26
3.10 Depósitos de hierro y manganeso en Formaciones de Hierro Bandeado (BIF) en el Precámbrico Boliviano .....	27
3.11 Yacimientos de Sulfuros Masivos de Cu-Zn-Au-(Pb) Volcanogénicos (VMS o VHMS) .....	28
3.12 Yacimientos de Elementos del Grupo del Platino (y Ni) (EGP) en Intrusiones Ultramáficas y Máficas en el Precámbrico Boliviano .....	29
3.13 Yacimientos Aluvionales y Fluvioglaciales de Oro .....	31
3.14 Otros estilos de mineralización .....	33
3.15 Estaño en granitos rapakivi en el Precámbrico .....	33
3.16 Yacimientos y Ocurrencias de tantalio/niobio .....	34

3.17 Tierras Raras en Bolivia .....	34
3.18 Yacimientos de Selenio .....	36
3.19 Yacimientos Evaporíticos .....	37
3.20 Yacimientos de Piedras Semi-preciosas .....	38
3.21 Ocurrencia de diamantes en Bolivia .....	38
3.22 Yacimientos y Ocurrencias de Uranio .....	38
3.23 Yacimientos de hierro oolítico .....	39
4. Recursos Metalíferos de Bolivia .....	39
4.1 Estimación de los Recursos Metalíferos de Bolivia .....	39
4.2 Estimación de los recursos de los principales yacimientos de Bolivia .....	40
4.3 Proyectos mineros avanzados .....	40
5. Conclusiones y cierre del documento .....	41
<b>Bibliografía .....</b>	<b>45</b>

## Prólogo

Bolivia ha construido gran parte de su historia económica, social y política alrededor de la minería. Sin embargo, en pleno siglo XXI, el debate público sobre este sector estratégico sigue atrapado, demasiadas veces, entre visiones parciales: por un lado, la explotación intensiva sin suficiente planificación ni control; por otro, la desconfianza frente a cualquier inversión, incluso aquella que busca operar con estándares formales y responsables.

En este contexto, contar con información geológica y metalogénica rigurosa no es sólo un aporte académico: es una condición para tomar mejores decisiones de política pública, diseñar marcos normativos coherentes, atraer inversiones serias y ordenar el territorio con responsabilidad ambiental y social. El conocimiento técnico es la base silenciosa sobre la que se construyen la seguridad jurídica, la formalización productiva y la sostenibilidad.

El estudio “El Potencial de las Mineralizaciones en Bolivia: Oportunidades para una minería formal y responsable”, elaborado por el Ph.D. Osvaldo Arce Burgoa, ofrece precisamente ese insumo estratégico: una síntesis clara y actualizada de la geología boliviana, sus principales fajas metalogénicas, y los yacimientos que sustentan —y pueden seguir sustentando— el desarrollo del país.

Este documento permite dimensionar a Bolivia como uno de los laboratorios geológicos más completos del mundo y, al mismo tiempo, interpela al Estado, a la empresa privada, a las cooperativas, a la academia y a las comunidades a asumir el desafío de transformar riqueza geológica en desarrollo sostenible. Una minería formal, transparente, tecnificada y ambientalmente responsable no es sólo posible: es necesaria para enfrentar la minería ilegal, el contrabando, la fuga de divisas y la degradación de nuestros ecosistemas.

"Diálogos Mineros" pone a disposición este trabajo con el propósito de contribuir a un debate informado, técnico y plural. Que estas páginas sirvan como herramienta para decisores públicos, inversionistas, profesionales, líderes sociales y estudiantes que buscan comprender, con datos y evidencia, el verdadero potencial mineralógico de Bolivia y las condiciones que se requieren para aprovecharlo responsablemente.

## **El Potencial de las Mineralizaciones en Bolivia: oportunidades para una minería formal y responsable**

### **Oswaldo R. Arce Burgoa** **Ph.D., P.Geo, QP**

#### **1. Introducción**

Bolivia ocupa un territorio de 1.098.581 km<sup>2</sup>, el cual en un 75% está dotado de una extraordinaria riqueza de plata y estaño, y de otros metales como oro, plomo, zinc, bismuto, antimonio, wólfram, paladio, cobre, tantalio, niobio, cromo, litio, indio, níquel, uranio y tierras raras. Esa amplia y diversa gama metalífera se encuentra hospedada principalmente en el Orógeno Andino y en el Precámbrico (parte SO del Escudo Brasileño), que en conjunto representan el 60% del territorio boliviano, además de incluir regiones de las Llanuras Chaco-Benianas donde ocurren importantes recursos metalíferos en yacimientos secundarios.

Lo mencionado demuestra un territorio extraordinaria-mente mineralizado, constituyendo uno de los mayores y más completos laboratorios naturales del mundo, con más de 20 estilos de mineralización metalífera, más de 3.000 yacimientos y ocurrencias minerales en todas sus provincias geológicas y fajas metalíferas. Adicionalmente, hospeda un inmenso territorio no explorado o subexplorado.

No obstante, el territorio nacional requiere de una exploración minera consistente y sistemática, lo que permitirá, con seguridad descubrir nuevos grandes depósitos económica-mente explotables, tales como Llallagua, Cerro Rico, San Cristóbal, Silver Sand, Iska Iska y otros.

#### **2. Geología sintetizada de Bolivia**

El territorio boliviano, está conformado geológicamente por las siguientes unidades

morfo-estructurales (o fisiográficas), que de este a oeste son: el Precámbrico Boliviano, las Llanuras Chaco-Benianas y el Orógeno Andino (compuesto a su vez por el Subandino, la Cordillera Oriental, el Altiplano y la Cordillera Occidental), (Fig.1).

## 2.1 El Escudo Precámbrico Boliviano

El Escudo Precámbrico Boliviano (o Precámbrico Boliviano) es parte del Escudo Brasileño y está localizado en el oriente del país (Fig. 1), cubre una extensión aproximada de 200.000 km<sup>2</sup> (18% del territorio boliviano), y comprende geológicamente rocas cristalinas proterozoicas, sedimentitas y metasedimentitas paleozoicas, lateritas terciarias y cuencas aluvionales cuaternarias. El Precámbrico hospeda más de 120 prospectos de oro, platino, níquel, tantalio, cobre, hierro y otros metales, varios similares a yacimientos que se encuentran en actual explotación en Brasil, Sudáfrica y Canadá. Al presente, el Precámbrico Boliviano se encuentra parcialmente explorado.

## 2.2 Las Llanuras Chaco-Benianas

Las Llanuras Chaco-Benianas, localizadas en la parte central del país (Fig. 1), entre el Orógeno y el Precámbrico, ocupan un 40% del territorio nacional y comprenden extensas planicies fluviales y aluvionales en regiones de Bolivia, Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay. Adicionalmente a su relevancia geológica-metalífera, las mismas son consideradas como una de las mayores reservas forestales, agrícolas, ganaderas, faunísticas y culturales del mundo.

## 2.3 El Orógeno Andino Boliviano

El Orógeno Andino o Cordillera de los Andes es producto de la subducción de la placa oceánica Nazca debajo la placa continental Sudamericana, entre el Jurásico y el Presente. El mismo cubre aproximadamente 42% del territorio nacional y está conformado por cuatro unidades morfo-estructurales, que de este a oeste son: Zona Subandina, Cordillera Oriental, Altiplano y Cordillera Occidental (Fig. 1), comprendiendo en su conjunto, series de cadenas montañosas, serranías y planicies, que atraviesan el país de norte a sud, las cuales presentan una morfología curvada con un ancho máximo de 700 km, y espesor promedio de 75 km. La distancia entre la fosa Perú-Chile y la Cordillera de los Andes es de aproximadamente 250 km. El Orógeno Andino es considerado como la mayor provincia geológica y metalogénica de Bolivia y Sudamérica, y una de las más relevantes del mundo, caracterizado por una gran variedad litológica y estructural, hospedando en el país más de 3.000 ocurrencias y yacimientos de plata, estaño, wólfram, antimonio, plomo, zinc, cobre, bismuto, oro, etc., distribuidos en varios estilos de mineralización.

### 3. Principales Yacimientos Metalíferos de Bolivia

#### 3.1 Yacimientos Polimetálicos de tipo "Boliviano"

Los yacimientos polimetálicos (Sn-W-Bi-Ag-Pb-Zn-Au-Cu) de tipo "boliviano", están localizados al sud de la Faja Estannífera Boliviana (Figs. 2, 3 y 4, Tabla 1), y comprenden sistemas hidrotermales multifásicos sobrepuestos y asociados generalmente con intrusiones subvolcánicas epizonales y mesozonales; extrusiones efusivas (domos volcanogénicos) y/o explosivas (ignimbritas, domos exógenos, lavas de composición félsica a intermedia, riolita a cuarzolita) y hospedados en secuencias siliciclásticas, volcaniclásticas, metasedimentarias y metamórficas.

*Unidades Morfo-estructurales (Fisiográficas) de Bolivia*



Otra característica relevante de estos yacimientos es su emplazamiento en una corteza espesa que alcanza 80 km, lo que implica un alto potencial de preservación de los magmas enriquecidos en Sn en la misma, y una restringida distribución espacial, aunque amplia distribución temporal (Precámbrico-Terciario) durante el período geológico-metalogénico entre 23 y 5 Ma (Mioceno).

Los yacimientos polimetálicos de tipo boliviano hospedan posiblemente los yacimientos más enriquecidos del mundo en metales como: Sn, Ag, Bi, W, Sb e In, en yacimientos como: Llallagua (Sn), Chorolque (Sn), Cerro Rico (Ag-Sn), Tasna (Bi, Au, W), Chojlla (W), Huari Huari (Sn, In, Zn) y otros.

Algunos de los yacimientos de este tipo o estilo corresponden a la "clase gigante" cómo Cerro Rico de Potosí (Ag, Sn), Llallagua (Sn) y Chorolque; y varios a "clase mundial" como Huanuni (Sn) e Iska Iska (Ag, Sn, Zn, Pb), los cuales serán brevemente descritos a continuación:

### **Llallagua**

Llallagua está ubicado en la parte central de la faja estañífera (Figs. 3 y 4, Tabla 1), hospedado en un stock porfídico riódacítico de forma elíptica y dimensión 1600 m x 1200 m y constituyó el mayor depósito estannífero filoniano de Bolivia y del mundo (se estima que en el mismo se produjo más de 1 millón de toneladas finas de estaño). A principios del Siglo XX (auge del estaño) las leyes en Llallagua promediaron 12-15% Sn; las cuales en 1924 disminuyeron a 5% Sn y en 1964 a sólo 0.8% Sn. Este yacimiento, aunque agotado de las vetas de alta ley de Sn luego de su extensiva explotación por casi un siglo (1890-1985), todavía hospeda una mineralización de baja ley (prom. 0.3% Sn) que supera las 400 Mt en forma de diseminaciones, vetillas y stockworks. Adicionalmente, las colas que produjo (Kenko) en Catavi contienen una reserva de 10 Mt con 0,25% Sn.

### **Chorolque**

El depósito estannífero de Chorolque (Figs. 3 y 4, Tabla 1) se encuentra localizado en la parte sud de la faja estañífera y fue descubierto en 1870. Consiste en un stock subvolcánico dacítico resurgente, de forma semicircular y aproximadamente 1 km de diámetro, que incluye en su parte central una gran chimenea de brecha de intrusión de ancho mayor a 600 m. Chorolque conforma un sistema mineralizado de extensión vertical aproximada de 1.000 m, en el cual la zona más enriquecida en estaño se encuentra en la parte intermedia-inferior del depósito (entre los 500 y 800 m). La mineralización de Sn, y cantidades menores de W, Bi, Cu, Ag, Au, se presenta como relleno de fracturas y brechas, formando un sistema de vetas subverticales de

orientación este-oeste, tanto en el stock como en las rocas volcánicas y sedimentarias. La ley promedio es de 1% Sn en volumen aproximado de 200 Mt.

### ***Cerro Rico de Potosí***

El yacimiento de Ag-Sn de Cerro Rico se encuentra localizado en la parte central-sud de la faja estañífera (Figs. 3 y 4, Tabla 1), consiste en un domo riodacítico de morfología cónica se extiende en un área de 1.700 m x 1.200 m y profundidad máxima de 1.150 m. Constituye uno de los depósitos de plata más ricos del mundo (se estima que produjo desde su inicio más de 60,000 toneladas finas de Ag), aunque también alberga Sn, Pb y Zn, y cantidades significativas de Cd, In, Ge, Ga, Se. Berstein en 1989, realizó un cálculo de los recursos del Cerro Rico que totalizan 541.2 millones de toneladas con leyes de 102.6 0 g/t Ag y 0,10-0,17% Sn. Adicionalmente, al presente, y desde 2008, opera la mina San Bartolomé localizada en las laderas del Cerro Rico, que tuvo una reserva inicial de 123 millones de onzas de plata en material coluvial-eluvial, encontrándose al presente en su fase final de extracción/procesamiento.

Otras minas y prospectos en la región son Porco, Chacacomiri, Colavi, Kumurana, Andacaba, San Lorenzo, Colquechaquita, Huari Huari, etc.

### ***Huanuni***

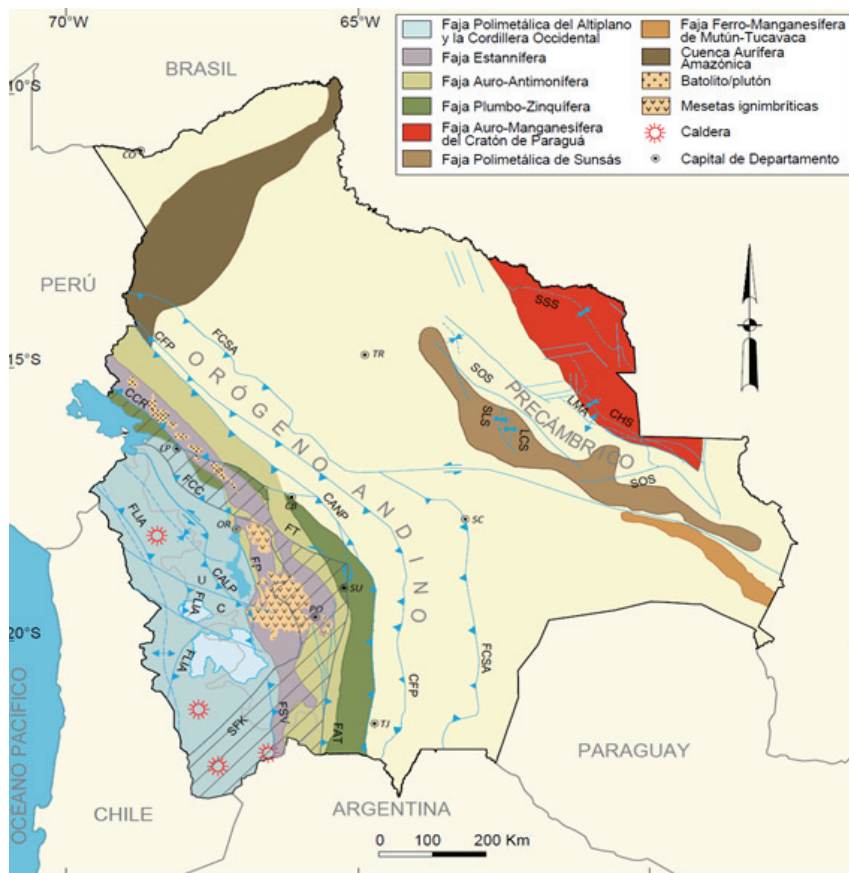
El yacimiento de Huanuni se encuentra localizado en la parte central de la faja estañífera (Figs. 3 y 4, Tabla 1), el cual aunque es mayormente estañífero, contiene también una mineralización polimetálica de W, Pb, Ag y Zn, distribuida en un modelo de zonación tanto lateral como vertical, con minerales de alta temperatura como casiterita en la parte central (Cerro Pozoconi), rodeada por una mineralización predominantemente argentífera (La Suerte, Bonanza); y finalmente por minerales de base (Pb, Zn y Sb) hacia la periferie (Zonas Viscachani, La Suerte, Porvenir, María Francisca, Pepitos y Bonanza). La ley promedio es de 1% Sn en volumen aproximado de 400.000 toneladas. Según el Ministerio de Minería y Metalurgia, Huanuni contendría una reserva de 1,255,000 toneladas de estaño (4.46% Sn).

### ***Iska Iska***

El complejo ígneo mineralizado (Ag-Zn-Pb-Au-Sn) de Iska Iska está ubicado en la parte sud de la faja estañífera (Fig. 3, Tabla 1), y es explorado por la compañía Minera Tupiza SRL (subsidiaria de la canadiense Eoro Resources). Iska Iska puede ser clasificado como un sistema mineralizado polimetálico porfídico masivo y telescopado. Las mayores concentraciones de mineralización polimetálica se presentan en vetas-brecha, brechas hidrotermales, enjambres de vetas, vetillas,

stockworks, y diseminaciones. Aunque el volumen total sobrepasa los 600 Mt, una reciente estimación del recurso mineral inferido insitu alcanza a 298 millones de onzas Ag, 4.09 millones de toneladas Zn, 1.74 millones toneladas Pb y 130,000 toneladas de estaño para la Zona Santa Bárbara. Otras zonas como Huayra Kasa, Brecha Central, Porco, San Juan y Mina 2 se encuentran aún en evaluación.

### Fajas Metalogénicas de Bolivia



### Otros Yacimientos

Con referencia a otros importantes yacimientos de este tipo de mineralización y sus reservas, el Ministerio de Minería y Metalurgia menciona a Bolívar (Fig. 4, Tabla 1) con una reserva de 1,500,000 toneladas de estaño (0.6% Sn), zinc (9,68% Zn), plata (307g/t Ag) y plomo (1,06% Pb).

Asimismo, los distritos de San Vicente (Fig. 4,) y Monserrat (Tabla 1), hospedarían un recurso total de 150 Mt, los que pueden ser idealmente trabajados con tonelajes de 1,000 t/día con tenores entre 15 y 30 oz Ag/t. Otro prospecto interesante es El Asiento (parte central de la faja estañífera) que podría contener un tonelaje aproximado de 50 Mt con una ley de 80 g/t Ag.

En el distrito de Morococala, ubicado en la parte central de la faja estañífera (Figs. 3 y 4, Tabla 1), para el yacimiento de Japo se ha calculado un recurso de 16 Mt con 0.4% Sn y una reserva de 4,073,000 toneladas de estaño (0,59% Sn). La mina San José en Oruro (Figs. 3 y 4, Tabla 1), tendría reservas probables de 100,000 toneladas de estaño (0,44% Sn) y plata (666 g/t Ag); adicionalmente sus desmontes contienen 1,200,000 toneladas de estaño (0,33% Sn) y plata (89 g/t Ag).

### **3.2 Yacimientos Vetiformes Polimetálicos Asociados con Plutones Graníticos**

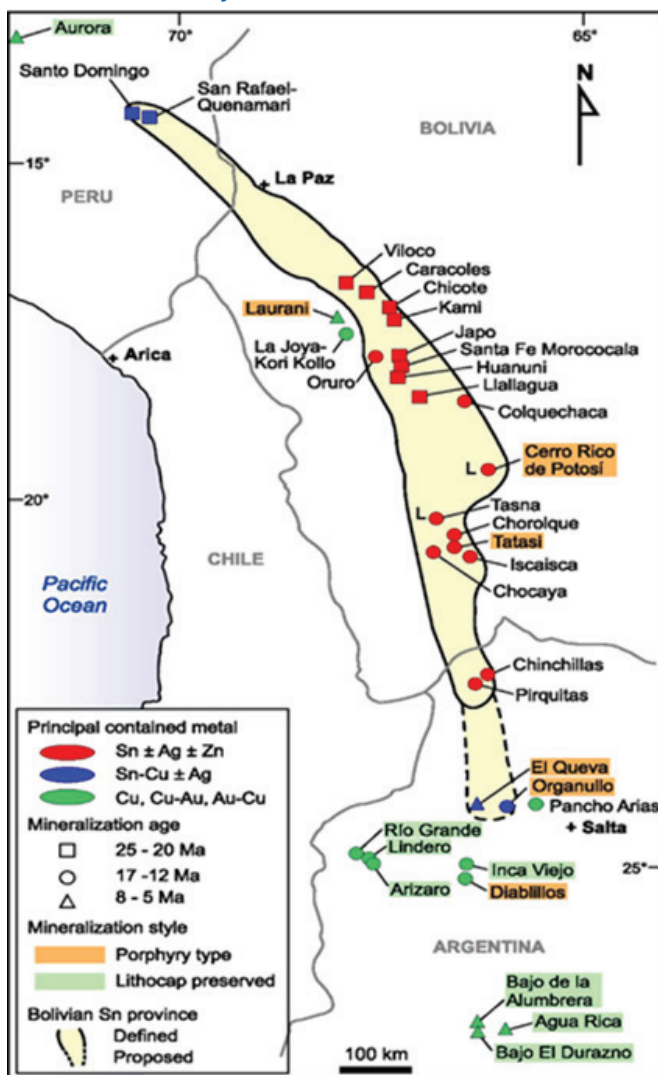
Estos yacimientos forman la parte norte de la Faja Estañífera (Fig. 3 y Tabla 1), y están relacionados temporal y espacialmente con el emplazamiento y enfriamiento de plutones graníticos de edad mesozoica (252 a 66 Ma). La mineralización se encuentra hospedada preferentemente en las partes superiores de los mencionados plutones y en las zonas aledañas de rocas metamorfozadas. Incluyen diferentes asociaciones metalíferas de Sn, W, Bi, Mo, As, Pb, Zn, Ag, Cu, Au, Nb, T, Sb, asimismo elementos accesorios como: U, Th, Be, Sc, Li, Y, Zr, F, Hg, Ga y tierras raras (ETR). Inmediatamente al sudeste, se presentan los intrusivos granitoides de edad oligocena (28-23 Ma), tales como los batolitos y plutones de Illimani, Quimsa Cruz, Santa Vera Cruz y Piragui, los cuales hospedan mineralizaciones de Sn, W, Au, Zn, Pb, Ag-Ta-Nb (ej. yacimientos de Rosario de Araca, Viloco, Caracoles y Colquiri), similares a sus predecesores mesozoicos, aunque con diferencias de carácter geotectónico. Uno de los yacimientos representativos de este estilo de mineralización es Colquiri que será descrito a continuación:

#### **Colquiri**

El yacimiento (Sn-Zn-Ag) de Colquiri está situado en la parte central de la faja estañífera (Fig. 4 y Tabla 1). Históricamente, las leyes en el yacimiento fueron aproximadamente de 0.2 a 2% Sn, 8% Zn, y 60 g/t Ag. Durante la época colonial, se extrajo galena argentífera en las Secciones Inca y Cabeceras, y en 1898 comenzó a producir estaño a pequeña escala. En 1938, la Compañía de Minas de Colquiri de propiedad de Mauricio Hochschild, produjo aproximadamente 3.500 toneladas de Sn, constituyéndose en uno de los principales productores de ese metal en el país. La producción total entre 1939 a 1961 alcanzó a 70,000 toneladas de Sn.

A partir de la nacionalización de las minas en 1952, COMIBOL se hace cargo de su operación, alcanzando en 1983, una producción mensual de 41.000 toneladas con una ley de 0,77% Sn y 4,6% de Zn, y 716 toneladas de concentrado con una ley de 24,4% de Sn. En la actualidad se estima, para este yacimiento, un recurso aproximado de 20 Mt con 1% Sn, 8% Zn y 60 g/t Ag. Las reservas alcanzan aproximadamente a 1,230,000 toneladas de estaño (1,56% Sn) y zinc (7,88% Zn).

### La Faja Estañífera Boliviana



### 3.3 Yacimientos de Oro Orogénico en la Cordillera Oriental de Los Andes

Los yacimientos de oro orogénico se presentan en la actual Cordillera Oriental de Bolivia, y se formaron en ambientes compresivos y transpresivos dentro los márgenes de placa convergentes durante las orogénesis colisionales y acrecionales. Se presentan más de 500 yacimientos y ocurrencias de oro (antimonio) orogénico en una faja de más de 1.000 kilómetros de longitud, que cruza Bolivia desde Perú al norte a Argentina al sud (Fig. 5). La mencionada faja fue sobrepuesta durante el Mioceno por la Provincia Antimonífera de Bolivia, la cual es ampliamente conocida por haber constituido el principal productor mundial de antimonio entre 1975-1980 con los yacimientos de Chilcobija, Candelaria, Churquini, Caracota, Rosa de Oro, Caracota, Churata, Poconota, Palca Khocha, Antofagasta, San Bernardino, Sucre y varios otros localizados especialmente en la parte media y sud de la Cordillera Oriental. Se estima para la misma un recurso inferido de 30 – 50 Mt. de Au y Sb.

Las vetas y mantos auríferos forman parte de una mineralización de estilo oro orogénico, sobrepuesta por plutones graníticos. Un recurso potencial se estimaría en 100-150 Mt con recursos aproximados de 5-10 Moz Au. Los recursos auríferos aluvionales, producto de la erosión de la mencionada mineralización primaria aurífera, alcanzan a más de 32.5 millones de onzas de oro explotadas hasta el presente. Los mismos presentan individualmente volúmenes entre 3 – 5 millones de m<sup>3</sup> con un contenido promedio de 0.73 g/m<sup>3</sup>.

Los tenores de antimonio varían entre 10-20%, mientras que los de oro entre 0-10 g/t, aunque en zonas de bonanza alcanza 100 g/t Au (debido a la continuidad de eventos mineralizantes en zonas de intersección de estructuras y anticlinales (saddle reefs o vetas en albarda), común en las minas de Amayapampa, Capacirca y Antofagasta). Una operación relativamente reciente a "cielo abierto" (2005-2013) en el Altiplano Central, se realizó en el depósito de oro orogénico de Iroco (Kori Chaka), con una reserva en menas oxidadas de aproximadamente 300.000 onzas de oro con un tenor de 0,7 g/t Au, y un recurso total (en óxidos y sulfuros), de aproximadamente un millón de onzas de Au.

Uno de los yacimientos más representativos de este tipo de mineralización es San Bernardino (Achachucani) que será descrito a continuación:

#### **San Bernardino (Achachucani)**

El yacimiento auroantimonífero de San Bernardino (Figs. 4 y 5, Tabla 1) está localizado en el límite entre el Altiplano y la Cordillera Oriental parte central en Bolivia, y se caracteriza por la ocurrencia de vetas, stockworks y diseminaciones, formando cuerpos

estratiformes interconectados entre sí. Las rocas hospedantes de la mineralización aurífera consisten en diamictitas, limolitas filíticas y areniscas silúricas de bajo grado metamórfico, de las formaciones Cancañiri, Huanuni y Llallagua. Estas rocas fueron continuamente plegadas y falladas, producto de las orogénesis hercínica y andina.

La mineralización aurífera se presenta en vetas, stockworks y disseminaciones, formando cuerpos estratiformes interconectados entre sí, los cuales se presentan esencialmente en la intersección de estructuras, charnelas de anticlinales y litologías favorables, con una tendencia norte-sud, que también es la del eje del anticlinal principal, de características asimétricas. La exploración realizada a mediados de 1990 por Orvana-EMUSA incluyó la perforación de pozos mediante circulación reversa (121 pozos con un total de 19.863 m) y de diamantina (10 pozos con un total de 1.753 m), lo que permitió definir un recurso de 51,6 Mt con un tenor de 1,4 g/t Au (equivalente a 2,3 Moz Au). Adicionalmente, se ha calculado un recurso potencial de 25 Mt con un tenor similar (1,1 Moz Au).

Asimismo, una exploración sistemática en el margen oriental del Altiplano, entre Oruro y Challapata, permitió identificar un nuevo distrito aurífero en sedimentitas silúricas, controlado por el sistema de fallas Poopó – Uyuni (parte del sistema Coniri), que separa el Altiplano de la Cordillera Oriental, el cual presenta una longitud aproximada 150 km y 10 km de ancho, e incluye prospectos tales como San Bernardino, Iroco (Kori Chaca), Vinto, Antofagasta, Korimina, Isvaya, Candelaria, Nobel, Chalviri, Golden Snake, Ajata y San Pablo.

### **3.4 Depósitos de Oro Orogénico relacionados con Formaciones de Hierro Bandeado (BIF) en el Precámbrico Boliviano**

#### ***Puquio Norte***

El prospecto aurífero de Puquio Norte está localizado cerca de 200 km al nornoreste de la ciudad de Santa Cruz (Fig. 4). Fue descubierto en 1988 (GBGS-GEOBOL) y explotado por COMSUR entre 1992 y 1996. Una de las principales características del basamento metamórfico es una mineralización aurífera tardicinemática en las fajas de esquistos, la cual se presenta en formaciones de hierro bandeadas

(BIF) del Grupo Naranjal, hospedantes del yacimiento de Puquio Norte (Fig. 4, Tabla 1), que fue la primera operación a cielo abierto en el Precámbrico en 1990, con una reserva inicial de aproximadamente 300.000 onzas de oro y también del yacimiento aurífero La Escarcha. Otra importante secuencia receptora de mineralización es la serie volcano-sedimentaria no diferenciada de Aguas Calientes que alberga el prospecto aurífero de San Javier.

## Principales estilos de mineralización, distritos, yacimientos y ocurrencias metalíferas de Bolivia

Estilo o tipo de Mineralización	Distritos, yacimientos, prospectos	Metalos Principales	Metalos Secundarios
Porfidos de Sn	Llallagua, Chorloque	Sn	W, Sn, Bi, Cu, Ag
Polimetálicos Asociados con domos volcánicos y stocks	Cerro Rico de Potosí, Oruro, Cañadón Antequera, Avicaya, Japo-Santa Fe-Morococalla, Colquechaca, Maragua, Porco, Colavi, Silver Sand, Iska Iska, Tatasí, Animas-Siete Suyos-Chocaya	Sn, Ag, Pb, Zn	Au, Bi, Cu, Cd, In
Asociados con rocas sedimentarias	Matilde, Huamani, San Florencio, Bolívar, Huari Huari, San Vicente, Monserat, Tasna	Sn, Ag, Zn, Pb	Au, W, Sb
Polimetálicos/Vetiformes asociados con plutones graníticos	Illimani, Viloco, Caracoles, Himalaya, Rosario de Araca-Laramcoia, Cascabel-Muñecas, Miluni-Chacaltaya-Huayna Potosí, Kellhuani, La Solución, La Chollita, Chantallaya, Colguiri, Mallku, Khota Yani-Aucapata, Apolobamba, Oruro - San Bernardino (Achacucani), Iroco (Kori Chaca), Vinto, Amayapampa, Cajunata, Los Machos, Cocapata, El Molino-Choqueamata, Carma, Caracota, Copacabana, Chilcobija, Sucre-Candelaria	W, Sn, Au, Zn	Bi, Pb, Ag, Sb
Yacimientos Orgénicos de Oro (antimonio), Zinc-Plomo y Cobre, hospedados en sedimentitas	Medio Monte, Guapuruti, San Simón, La Lupa, El Lente	Au	W, Bi, Fe
Oro Orgénico relacionados con BIF		Au	
Oro Orgénico relacionados con atzaltamiento		Au	
Baja Sulfuración	Orkho Piña, Berenguela, Carangas, Esmeraca-Galán	Ag, Au, Zn, Pb	Cd
Sulfuración Intermedia	Japo-Santa Fe-Morococalla, Cañadón Antequera, María Teresa, Colquechaca, Maragua, Colavi, Huari Huari, Salinas de Garcí Mendoza, Pulacayo, San Cristóbal, Asiento, Ubina, Choroma, Isca Isca, Tatasí, San Antonio de Lipez, Jaquegua	Ag, Zn, Pb	Au
Alta Sulfuración	La Española, Laurani, Oruro-San José, Huanuni, Carguacollo, Cerro Rico, Porco, Tasna, Animas-Siete Suyos-Chocaya, Cachi Laguna.	Au, Cu, Ag	As, Sb
Transicionales	Kori Kollo-La Joya, Lipaña	Au, Ag, Cu	Bi, Sn, Pb
Vetiformes Estratoligados de Cobre hospedados en "estratos rojos"	Corocoro, Chacarilla, San Silvestre, Antaquira (Elena), Chacoma, Cuprita, Chuquicambi, Turco, Sevayuyo, Uyuni, Esmeralda, Avarao, Serranía de las minas	Cu	Pb, U, Ag
Vetiformes de Zn-Pb-(Ag) en faja de pizarras	Matilde, Independencia, Toropalca-Comaca, Tupiza-Sulpachta, Mojo-Villazón, Tolamayu, San Lucas, Huara Huara	Zn, Pb, Ag	Cu, Ba, Mn
Oxidos de Hierro, Cobre y Oro (IOCG)	Don Mario, Cerro Félix, Las Tojas, Don Enrique	Au, Ag, Cu, Ca	Pb, Zn, W, Fe, Mg, Mn
Pb-Zn-Sedimentarios Exhalativos (SEDEX)	Tucavaca, Cordillera Oriental	Zn, Cu, Pb	Ag
Formaciones de Hierro Bandeado (BIF)	El Mutún	Au, Fe, Mn	Zn, Pb, Cu
Sulfuros Masivos de Cu-Zn-Au (Pb) Volcanogénicos (VMS o VHMS)	Miguela, El Porvenir	Cu, Zn, Au	Ag, Pb, Bi, Fe, Mn
Elementos del grupo del platino (y Ni) en Intrusiones Ultramáficas y Máficas	Rincón del Tigre	Pt, Pd, Cu, Ni	Au, Cr, Rh, V, Ti
Mississippi Valley (MVT)	Tucavaca, Cuevo	Pb, Zn	Ag, Cu, Ni, Co, Cd
Yacimientos y ocurrencias de tantalio/niobio y estano	Los Patos, La Bella, Ascension de Guarayos	Ta, Nb	U, Ti, Th, W
Aluvionales y Fluvio-glaciales de Oro	Tijuaná, Río Madre de Dios, Beni, Madera, Mapiri, San Antonio de Lipez, Río San Juan del Oro, San Simón, Araras, Manoa, Ulla Ulla, Suches	Au, Sn, Bi	Pt, Cu, Cr, Fe
Otros estilos de mineralización	Ta-Nb, ETR, In, evaporíticos, complejos alcalinos, pegmatitas, azufre, piedras semipreciosas, diamantes, selenio, uranio	Nb, Ta, ETR, S, Li, K, Bi, Mg	

## Principales yacimientos metalíferos en Bolivia

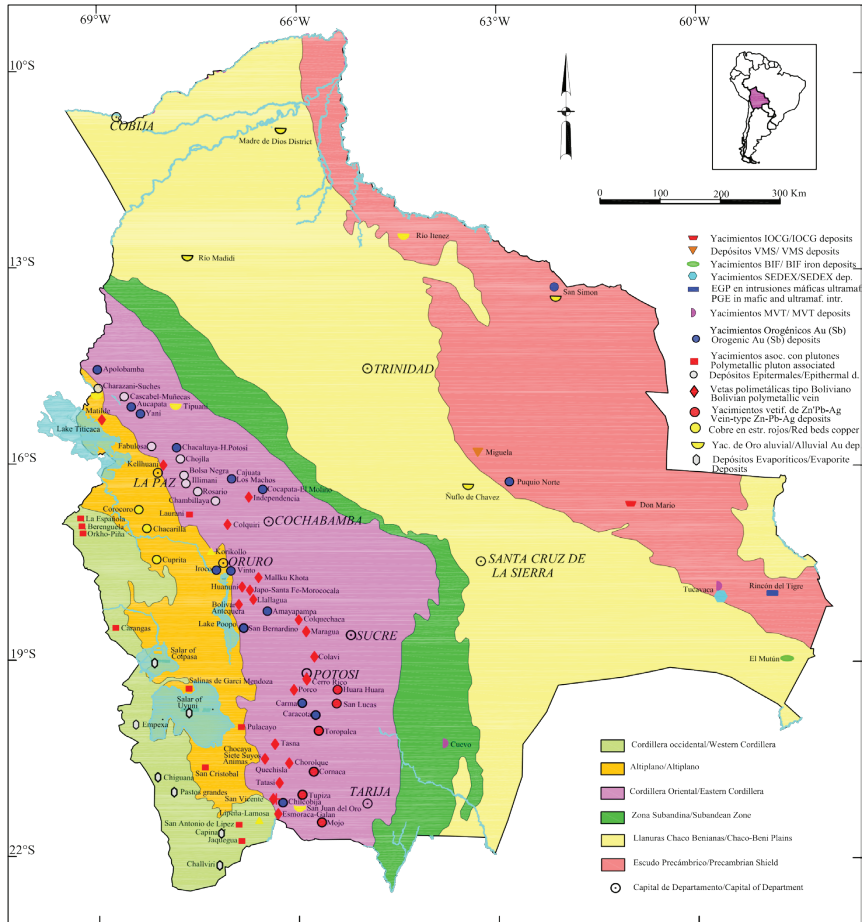


Fig. 2 Principales yacimientos en las provincias fisiográficas de Bolivia.  
 Fig. 2 Major ore deposits on physiographic provinces in Bolivia.

La mineralización está hospedada en una típica Formación de Hierro Bandeado (BIF) de tipo Algoma, formado en fondo marino a partir de efusiones volcánicas, conformada por secuencias intercaladas de sedimentitas y volcanitas, dentro un paquete volcano-sedimentario del Grupo Naranjal que forma parte del Supergrupo de esquistos San Ignacio.

La mineralización está relacionada con un dique de espesor entre 1 y 12 m, emplazado durante la Orogenia Sunsás en la zona de contacto entre las tobas dacíticas con pirita diseminada y las lutitas negras. El prospecto aurífero de Puquiu Norte tuvo una

## Principales yacimientos metalíferos en Bolivia



reserva inicial fue de aproximadamente de 4 millones de toneladas con una ley de 2,4 g/t Au; e incluyó aproximadamente 1,7 millones de toneladas de mena de sulfuro con una ley aproximada de 6 g/t Au. Actualmente, la zona de sulfuros en profundidad se encuentra casi intacta, presentando una ley promedio de 2 g/t Au para un volumen aproximado de 25 Mt (Tabla 4).

Otros prospectos de este tipo de mineralización en el Precámbrico Boliviano, como Guapurutú revelaron intersecciones de 175 a 275 gramos de oro para uno y cinco metros. En el prospecto La Escarcha (Paula Cecilia), en vulcanitas cizalladas se obtuvieron 11,7 gramos en 8 m y 11,3 gramos para 3 m.

### 3.5 Yacimientos de Oro Orogénico relacionados con Zonas de Cizalla en el Precámbrico Boliviano

#### San Simón

El depósito aurífero está localizado al norte del Precámbrico boliviano (Fig. 4, Tabla 1), hospedado en la Formación Bonanza del Grupo metasedimentario de San Simón de

edad proterozoica, compuesto por arenitas, cuarcitas, grauvacas y conglomerados. El oro en la serranía fue descubierto por los misionarios jesuitas a mediados del siglo XVIII, que fue explotado intermitentemente desde ese tiempo hasta nuestros días.

Las vetas de cuarzo aurífero se presentan ocasionalmente en albarda ("saddle reefs"). La veta Trinidad está emplazada en una estructura de dirección este-oeste y buzamiento al sud, y se extiende por más de 3,5 km al oeste. Esta estructura se presenta cizallada y fracturada a lo largo y ancho de sus salbandas, y contiene oro asociado con hematita-especularita y ocasionalmente con arsenopirita y pirita. Se estima un recurso de 4 Mt con 5 g/t Au, 0,6 Moz Au (Tabla 4).

### 3.6 Depósitos Epitermales en el Orógeno Andino

Los yacimientos epitermales se formaron cerca de la superficie, a profundidades generalmente menores a 1 km y a temperaturas entre 200 y 300 °C. Se presentan preferentemente en áreas de vulcanismo activo alrededor de los márgenes de continentes o arcos de islas, y comúnmente con abundantes sulfuros, primariamente pirita y arsenopirita, y minerales de cobre, oro, plomo, plata, zinc y bismuto.

En Bolivia, los yacimientos epitermales se presentan en la Cordillera Occidental, en el Altiplano y en la Cordillera Oriental que hospedan una mineralización de Au-Ag (Cu) y polimetálica de Au-Ag-Zn-Pb-Cu-W-Bi (Figs. 1 y 2, Tabla 1). Durante el auge de la exploración (1990-1995), varias compañías mineras tanto nacionales como extranjeras, exploraron un 40% de los aproximadamente 130 centros volcánicos y calderas, que exhiben evidencias de una intensa alteración hidrotermal (argilización avanzada, sericitización, silicificación, etc.).

Los mismos se encuentran asociados con stocks porfídicos subvolcánicos, plugs de pequeñas dimensiones, domos de flujo, estratovolcanes, diatremas, flujos de lava, capas piroclásticas, brechas, escudos ignimbríticos, calderas volcánicas tipo colapso-resurgencia de edad meso a neomiocena y fracturas a escala continental. La mineralización presenta una morfología variable: vetas, stockworks y diseminaciones. Uno de los principales y más representativos yacimientos epitermales es San Cristóbal, el que será descrito a continuación:

#### **San Cristóbal**

El yacimiento epitermal de San Cristóbal (Zn-Ag-Pb) está localizado en la parte sud de la Cordillera Occidental (Fig. 4, Tabla 1). Este depósito fue explotado intermitentemente por plata desde la colonia hasta principios de la década de 1990 y posteriormente de manera continua desde 2008 al presente. El yacimiento ocupa

la porción central de una depresión central de 4-km de diámetro (margen externo de 12 km de diámetro), la cual está asociada a un vulcanismo de edad miocena. Esta depresión causada por el colapso de una caldera fue rellenada con sedimentos lacustres clásticos, volcánoclasticos, coluviales y otros de grano fino a grueso (lutitas, conglomerados, areniscas, salleríos y taludes) de 300 m de espesor, los que fueron intruidos/extruidos durante el Mioceno por sills porfídicos y domos volcánogénicos de composición dacítica a andesítica, la mayoría de los cuales se encuentran alterados hidrotermalmente. La mineralización zinc-plata-plomo se presenta tanto en los domos y stocks como en los sedimentitas volcánoclasticas lacustres periféricas.

La exploración sistemática realizada por Apex Silver, permitió definir dos cuerpos masivos mineralizados denominados Tesorera y Jayula, los cuales son minados a "cielo abierto" a partir de 2008. Las reservas probadas y probables al inicio de la operación fueron 259 millones de toneladas con leyes de 62 g/t Ag, 1,57 % Zn y 0,55% Pb.

El proyecto prevé producir anualmente un promedio de 14 millones de onzas de plata; 132.700 toneladas de zinc; y 39.500 toneladas de plomo durante una vida de la mina de 11,5 años. El tratamiento metalúrgico, utiliza una tecnología metalúrgica convencional con un ritmo de producción de 52.000 t/día de mineral, produciendo diariamente cerca de 1.500 toneladas métricas de concentrados de zinc-plata y plomo-plata, para lo que moviliza una media diaria de 150.000 toneladas de roca, que son enviadas a la planta de concentración para su tratamiento.

### **Otros prospectos y yacimientos epitermales**

Prospectos tales como Berenguela, La Riviera, Titicayo, Canasita, Orkho Piña, Sonia-Susana, Chullcani, Khoyalita, Cachi Laguna y otros (Tabla 1), revelan numerosas anomalías, someras, algunas de las cuales fueron corroboradas mediante sensores remotos, y trabajo de campo. Estos sistemas podrían constituir la expresión superior de sistemas epitermales y/o de pórfidos cupríferos. Intercepciones de perforaciones a diamantina y/o circulación reversa (RC) revelaron intervalos de 5 y 50 m con tenores aproximados a 1 g/t Au y/o 1% Zn, que incluyeron segmentos mayores a 0.5 g/t Au para 100 m o más (ej. Orkho Piña, Auqui-Canasita). Estos prospectos, consiguientemente, requieren de fases adicionales de exploración, que podrían llevar a definir cuerpos mineralizados continuos, susceptibles de una explotación económica.

Los distritos de Carangas y Salinas de Garci Mendoza (Fig. 4, Tabla 1), constituyen áreas favorables para yacimientos de metales preciosos, principalmente en el flanco norte del Cerro Jankho Willkhi y Cerro Kancha respectivamente. Es-tos distritos se

presentan estructuralmente controlados por fallas de direcciones noroeste y noreste, que podrían constituir conductos de las mineralizaciones de metales preciosos.

En la Cordillera de Lipez (Tabla 1), existen aproximadamente una centena de prospectos de oro, plata, metales de base, bismuto, wolframio y hematita, relacionadas mayormente con sistemas porfídicos. Yacimientos como Mesa de Plata, Escala, Buena Vista, Jaquegua, Esmoraca, Guadalupe, Bolívar, y Santa Isabel fueron trabajados, intermitentemente, desde la Colonia hasta nuestros días; sin embargo, la región incluye importantes territorios inexplorados.

En los últimos veinte años, los prospectos explorados en la región son: Santa Isabel, Lipeña-Lamosa, Jaquegua, Buena Vista, Mesa de Plata, San Antonio de Lipez, Leoplán y otros, que contienen importantes recursos metalíferos, algunos de los cuales serán susceptibles a ser minados a corto o mediano plazo.

En el límite entre el Altiplano y la Cordillera Oriental está localizado el yacimiento epitermal de Pulacayo; que tuvo su auge de producción a fines del siglo XIX. Durante el apogeo de la plata en 1891, la mina Huanchaca (nombre previo del yacimiento) produjo más de 70 toneladas métricas de plata, 1,120 toneladas de cobre, 3,191 toneladas de plomo y 18,652 toneladas de zinc en concentrados.

### **3.7 Depósitos Vetiformes Estratoligados de Cobre en “Estratos Rojos”**

Los depósitos de Cu están asociados a fenómenos diagenéticos, a partir de soluciones mineralizantes que se habrían originado a partir de salmueras de bajo pH, las cuales se mezclaron con los fluidos reductores de la roca encajonante. Las nuevas soluciones fueron subsecuentemente movilizadas convectivamente, a altas temperaturas ejercidas por los diapiros aledaños, hacia las rocas anóxicas o ambientes reductores, donde se depositó el cobre por procesos de diagénesis y compactación de la cuenca.

En el Altiplano boliviano, se observan más de 80 depósitos de cobre de edad miocena a pliocena albergados en sedimentitas tipo “estratos rojos” (areniscas rojizas a marrones, conglomerados y limolitas) y en basaltos. Los principales yacimientos de ese tipo son: Corocoro y Chacarilla (Fig. 4, Tabla 1), que según USGS-GEOBOL, (1992) contuvieron en conjunto más de un millón de toneladas con una ley promedio de 3,5 % Cu. Los otros depósitos menores albergan cada uno aproximadamente 10.000-20.000 t de cobre.

#### **Corocoro**

El yacimiento de Corocoro ubicado en el Altiplano Norte (Fig. 4, Tabla 1), consiste en dos tipos de estructuras: concordantes y transversales. Las primeras que son

dominantes aparecen en lentes estratiformes y en “mantos” de calcosina y cobre nativo. La calcosina fue depositada paralela a los planos de estratificación y también se presenta diseminada en la roca (Formación Caquiaviri, sector “Vetas”). La explotación de este yacimiento se produjo de manera intermitente desde el Incario hasta el presente. Entre 1880 y 1910, la mina fue operada por una compañía chilena; y a partir de 1930 por la compañía American Smelting and Refining Co. (ASARCO), que produjo anualmente cerca de 100.000 t de cobre nativo y una similar cantidad de cobre en sulfuros. En 1951 la producción fue de 4.000 toneladas de cobre.

### **3.8 Depósitos Vetiformes de Zn-Pb (Ag) en Faja de pizarras en la Cordillera Oriental de Los Andes**

Los yacimientos vetiformes de Zn-Pb-(Ag) hospedados en faja de pizarras conforman la Faja Plumbo Zinquífera boliviana (Fig. 2, Tabla 1), la cual consiste en una faja corrida y plegada (“fold-thrust belt”), derivada de eventos tectónicos compresivos de trasarco y de longitud mayor a 1.200 km y posteriores eventos extensionales. La misma, se inicia en el sud del Perú (Sandía) y luego de atravesar territorio boliviano donde alcanza su mayor desarrollo, continúa hasta el norte argentino. En Bolivia se presentan principalmente en la parte sud de Cordillera Oriental, donde se subdividen en dos franjas: la Franja Norte con los distritos de Matilde, San Luis-Esperanza, e Independencia-Laca Laca y la Franja Sud, que incluye los distritos de Toropalca-Cornaca, Tupiza-Suipacha, Mojo-Villazón, Huara Huara y San Lucas.

La mineralización consiste en vetas formales y anastomosadas de esfalerita en sus variedades de coloración negra y amarilla, acompañada por galena y ocasionalmente por sulfuros de plata, calcopirita y malaquita, en una ganga de cuarzo, siderita, baritina, calcita, limonita y gossan.

Las vetas son generalmente de tipo rosario (pinch and swell), bandeadas, brechificadas y drúsicas mostrando su formación en un ambiente extensional, con poca o ninguna deformación en el tiempo de su cristalización y desarrollo de cristales.

#### ***Distrito de Tupiza-Suipacha***

En el distrito se observan más de 70 depósitos y ocurrencias vetiformes de Zn-Pb-(Ag), entre los cuales aproximadamente 50 se encuentran en producción. Asimismo, existen esporádicos yacimientos de Sb, Au y Ag. La mineralización consiste en esencia de vetas, generalmente alojadas en fallas inversas longitudinales y menos frecuentemente en fallas normales de rumbo general este-oeste. Las estructuras presentan anchos promedio de 0,8 m y pueden alcanzar ocasionalmente 3 km de longitud. Estos depósitos contienen un recurso de 40-45 Mt con leyes promedio de

10 % Zn; 5-7 % Pb y ocasionalmente Ag (20-60 g/t).

Están compuestos por esfalerita, baritina, galena, siderita, cuarzo, pirita y calcopirita y en cantidades pequeñas de azurita y malaquita. Localmente se presentan diseminaciones de sulfuros y/o stockworks principalmente en las zonas aledañas a las vetas.

Asimismo, se observan evidencias de mineralización de cobre dentro de los basaltos de la Formación Aroifilla del Cretácico, al noreste de Tupiza, con impregnaciones de azurita y calcopirita. Este tipo de mineralización es clasificado como estrato-ligado orogénico de cobre; sus recursos alcanzan a 5 Mt con una ley promedio de 2% Cu; también existen otras evidencias de cobre asociado con vetas de zinc-plomo, aunque se desconoce su importancia económica.

### **3.9 Yacimientos de Óxidos de Hierro, Cobre y Oro (IOCG) en el Precámbrico Boliviano**

Los depósitos minerales de estilo IOCG (óxidos de hierro, cobre y oro) agrupan una serie de yacimientos que contienen magnetita hidrotermal y/o hematita en su variedad especularita, como acompañantes principales de calcopirita ± bornita. Adicionalmente al cobre y oro, pueden contener importantes cantidades de Co, U, REE, Mo, Zn, Ag y otros elementos.

La alteración hidrotermal dominante es cálcica de posible alta temperatura, la cual está asociada con una mineralización de características IOCG que posiblemente se removilizó y deformó a partir de una originalmente singenética-estratiforme, por cizallamiento, metamorfismo, plutonismo y/o metasomatismo de contacto, durante la Orogenia Sunsás de edad proterozoica media a tardía.

Los mismos se caracterizan por la presencia de minerales calcosilicatados faneríticos de grano grueso, de Ca, Fe, Mg y Mn, tales como diópsido, wollastonita, granate, andradita y actinolita, derivados de un protolito de calizas y dolomitas, en las cuales se introdujeron metasomáticamente grandes cantidades de Si, Al, Fe y Mg. Los neises de biotita-plagioclasa, se presentan mayormente alterados a dolomita y calcita (Isla-Moreno, 2009). Este estilo de mineralización también se presenta en yacimientos/ocurrencias como Don Mario Las Tojas, Michelle, Don Enrique y en otros albergados en las fajas de esquistos.

#### ***Don Mario***

El yacimiento Don Mario se encuentra ubicado a 380 km al este de la ciudad de Santa Cruz (Fig. 4, Tabla 1). Fue primeramente trabajado en el siglo XVIII por las misiones

jesuíticas, cuando se extrajeron más de 200 toneladas de óxido de cobre, las que además fueron fundidas en el sector. La operación comenzó en julio de 2003 con la minería subterránea en la zona inferior LMZ y, en abril de 2011, con la producción de la zona superior (suprayacente) UMZ en una operación a cielo abierto. La reserva inicial fue de 1.5 Mt con 11.13 g/t Au (además de cobre y plata) y una producción anual mayor a 200,000 onzas de oro.

Presenta oro de alta ley asociado con sulfuros de Cu, Bi y Ag, alojado en esquistos de anfíbol-granate-cordierita-bi-otita. Asimismo, contiene horizontes enriquecidos con hierro (magnetita y hematita), relacionados con la mineralización de oro, bismuto y molibdeno, mientras que una mineralización de tipo skarn está asociada con Cu, Au, Ag, Pb y Zn. Las rocas, de litología calco-silicatada, que incluyen mega budines de morfología lenticular, están moderadamente plegadas y cizalladas con una dirección general al noroeste y buzamientos altos, las cuales se presentan en una faja de longitud mayor a 10 km. La zona LMZ contiene 848.000 toneladas de reservas minables con una ley de 15,55 g/t Au (Tabla 4).

El recurso en óxidos fue de aproximadamente 8.8 millones de toneladas con 3,7 g/t Au, 30 g/t Ag y 1,14% Cu, que corresponde a  $\pm$  200.000 onzas de oro de un total de  $\pm$  600.000 onzas de oro, 8 millones de onzas de plata y 200 millones de libras de cobre, que contiene el yacimiento.

La operación Don Mario consiste en la explotación de la Zona UMZ y algunas unidades de LMZ a través de un tajo abierto que produjo 2.500 toneladas por día de mineral con dos tipos de materiales: transicionales y sulfuros. Una planta de procesamiento de flotación por gravedad produjo concentrados de oro, concentrados de cobre, con contenidos de oro y plata y cantidades limitadas de concentrados de plomo. La producción total en 2016 fue de aproximadamente 21.102 oz Au, 10,5 M de libras de Cu y 381.523 oz Ag.

### **3.10 Depósitos de hierro y manganeso en Formaciones de Hierro Bandeado (BIF) en el Precámbrico Boliviano**

Los depósitos de estilo BIF (del inglés "Banded Iron Formation") o Formaciones de Hierro Bandeado (Fig. 6), se presentan como alternancias milimétricas a centimétricas de óxidos de hierro jaspeados, acompañadas por magnetita metamorfozada regionalmente, y óxidos e hidróxidos de hierro (hematita) no metamorfozados. En Bolivia, este estilo de mineralización es observada en el distrito ferro-manganesífero de El Mutún y regiones aledañas, los cuales muestran una geología favorable para albergar considerables recursos de hierro y manganeso de estilo BIF.

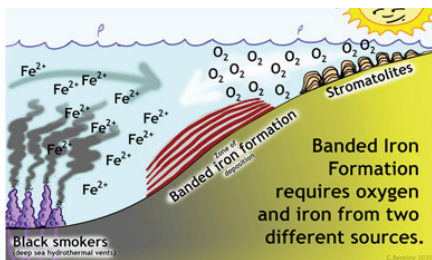
## El Mutún

El Distrito de El Mutún está ubicado en el Precámbrico Boliviano, en el extremo SE del país (Figs. 4 y 6, Tabla 1); ocupa un área de 84 km<sup>2</sup>, y fue descubierto en 1845 por el geólogo francés Francis Castelnau. Constituye uno de los mayores yacimientos de hierro y manganeso de edad neo-proterozoica en el mundo.

La secuencia volcano-sedimentaria que los hospeda, es el Grupo Jacadigo de probable edad de probable edad proterozoica superior (650-600 Ma). La perforación en el sector noroeste de la Serranía de El Mutún, demostró la existencia de tres capas lenticulares de mena de manganeso, con potencias variables entre 3 y 5 m, las cuales están separadas por capas delgadas de arcosa ferruginosa (BIF). La capa estratigráficamente inferior es la más potente y la más enriquecida.

Los recursos indicativos en jaspilitas del Mutún ascienden a 40.205 millones de toneladas de mineral de hierro con tenores de 45-65% Fe en forma de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), poca siderita (CO<sub>3</sub>Fe) y mineral de manganeso (MnO<sub>2</sub>), con leyes de 50% Fe y 42 % Mn (incluyen 175 Mt de reservas probadas + probables con una ley promedio de 50% Fe). Adicionalmente, existen 10 Mt con tenores entre 33 y 55 % Mn, y las reservas denominadas "canga" de 66 Mt con leyes de 46-54% Fe.

### Yacimiento de Fe-Mn de El Mutún en formación de Hierro Bandeado (BIF)



- Formaciones de Fe (Mn) Bandeado en BIF se produce entre 1.9 -0.6 Ga.
- Chert con hierro, de coloración roja o marrón.
- Alternancia entre capas enriquecidas en hierro y manganeso (hematita, magnetita, jaspilita, psilomelano, etc.).
- Aguas oceánicas empobrecidas en oxígeno.

Faja de Fe-Manganeso de Mutún-Tucavaca, de edad 0.6 Ga de extensión aproximada 230 x 30 km (~40.000 Mt recurso). Incluye El Mutún, Cerro Rojo, y Cerro Colorado-Murciélagos



### 3.11 Yacimientos de Sulfuros Masivos de Cu-Zn-Au-(Pb) Volcanogénicos (VMS o VHMS)

Los yacimientos volcanogénicos de sulfuros masivos son de origen submarino y se

caracterizan por su asociación con rocas félsicas en forma de domos riolíticos y/o rocas piroclásticas. En Bolivia, la exploración de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) data de principios de los años 1990 y fue llevada a cabo inicialmente por la compañía ESSEX en el Precámbrico Boliviano, habiendo identificado dos tipos de depósitos exhalativos de sulfuros masivos: proximales y distales.

### **Miguela**

El depósito de estilo VMS de Miguela está localizado en el margen occidental del Precámbrico Boliviano (Fig. 4, Tabla 1). La mineralización VMS está albergada en una secuencia volcánica félsica de espesor 400 m, la cual es de composición dacítica a riolítica, y contiene esquistos de cuarzo y muscovita, y horizontes delgados de rocas básicas. La mineralización proximal se caracteriza por la presencia de lentes masivos y vetillas de piritita, calcopiritita y en menor proporción de esfalerita y galena, generalmente en la parte superior del cuerpo mineralizado. Los depósitos distales consisten principalmente en pirrotina y esfalerita masivas, con formaciones bandeadas de hierro; aparecen concordantes con la estratificación. Una estimación de los recursos para los tres cuerpos mineralizados fue realizada en 2004, en base al muestreo en trincheras y perforaciones a diamantina y circulación inversa, y auger. Los mismos fueron medidos e indicados para las tres zonas A-1, A-2 y A-3. El recurso de la mena oxidada llega a 2,5 millones toneladas con una ley de 1,03 g/t Au, y 2,1 millones toneladas con una ley de 1,71 % Cu. No obstante, una estimación del recurso en el yacimiento alcanzaría a 3 Mt con las leyes mencionadas.

### **3.12 Yacimientos de Elementos del Grupo del Platino (y Ni) (EGP) en Intrusiones Ultramáficas y Máficas en el Precámbrico Boliviano**

Las intrusiones máficas y ultramáficas hospedantes de elementos del grupo del platino, níquel, cromo, vanadio y otros metales, consisten en cúmulos estratificados o segregaciones pegmatoides alteradas hidrotermalmente. Contienen minerales como braggita, cooperita y laurita-platino y están asociados con sulfuros primarios de metales de base tales como piritita, pirrotina, pentlandita y calcopiritita, y con arseniuros tales como esperrilita.

Los minerales se concentraron por procesos gravitacionales y fueron inyectados como un magma mineralizado dentro un plutón previamente solidificado o en la roca encajonante aledaña. Estos depósitos están generalmente alojados en masas cratónicas o en la corteza continental, generalmente afectados por rifting o proto rifting.

Constituyen en una de las mayores fuentes de cromo, níquel, platinoides, titanio, vanadio, estaño, cobre, hierro y subproductos de azufre.

## Rincón del Tigre

En Bolivia, este estilo de mineralización se presenta en el Distrito del Complejo Rincón del Tigre (RdT) en el extremo SE del Precámbrico Boliviano (Fig. 4, Tabla 1). El RdT es uno de los complejos más extensos y mejor desarrollados de Sud América. Geológicamente, consiste en un sill de composición máfica-ultramáfica de potencia 4.6 km y longitud 24 km, emplazado a lo largo de una discontinuidad dentro las sedimentitas clásticas del Proterozoico Medio, la cual fue posteriormente plegada durante el ciclo orogénico de Sunsás (1,280 – 950 Ma).

Un muestreo de suelos en el RdT reveló valores anómalos de Pt 50-180 ppb, Pd 15-300 ppb y Au 5-100 ppb para una longitud aproximada de 30-180 m, aledaña a una anomalía importante de Cu también en suelos de valor máximo de 800 ppm. La geoquímica de suelos resultó efectiva para la exploración de Pt, Pd y Au, así como para la ubicación de un horizonte anómalo denominado Precious Metal Zone

(PMZ) o "Zona de Metales Preciosos", donde se ha reportado una amplia difusión de PGE, aunque con valores relativamente bajos (0,110 ppm Pt y entre 0,012 – 0,049 ppm Pd).

Adicionalmente, un muestreo en el basamento de gabro de magnetita reveló valores de cobre (0.09 - 1.95% Cu) en la unidad máfica, constituyendo los más altos para ese metal en el Rincón del Tigre, aunque con valores bajos de EGP

(0,110 ppm de platino y entre 0,012 – 0,049 ppm de paladio. Las subzonas metalíferas individuales, aunque con leyes bajas de PGE, presentan buenos espesores y una amplia difusión en la zona de metales preciosos.

De la misma forma, el basamento no meteorizado del PMZ, fue investigado mediante una perforación de 7 taladros de diamantina en 1993 por Eemicruz (Riesgo compartido entre RTZ y COMSUR), cuyos resultados preliminares han evidenciado la presencia de varios metales (Rh, Pt, Pd, Au y Cu) y magnetita (V y Ti), en una secuencia mineralizada de espesor 80-185 m. Todos los pozos de perforación (excepto uno, SF 1) intersectaron el ancho total de la zona inferior enriquecida con metales preciosos de PMZ.

En base a los resultados obtenidos de la exploración, Rincón del Tigre representa un gran depósito de PGM de baja ley (0,25 ppm Pt, 0,5 ppm Pd) y de níquel garnierítico con más de 50 Mt con leyes mayores a 1 % Ni, debajo de una capa relativamente delgada de sílice, así como un gran recurso de V y Ti de baja ley (0,1% V, 0,3-0,5 % Ti) en un gabro magnético. A manera de comparación, se puede mencionar que las rocas

del prospecto Reef J-M revelan 3,3 - 5 ppm de platino, 11,4 – 17,3 ppm de paladio y 0,15% Cu + Ni.

Adicionalmente existe un potencial aun no descubierto de EGP; Cu, Cr, Ni y Co en el Complejo Básico de Chaquipoc, que consiste en capas definidas de intrusiones menores de composición básica, con texturas de cúmulo.

### **3.13 Yacimientos Aluvionales y Fluvioglaciales de Oro**

#### ***Yacimientos Aluvionales***

Bolivia presenta un gran potencial para yacimientos de oro aluvional, posiblemente uno de los mayores de Sud América. La producción histórica de estos placeres se ha estimado en >1.200 t de Au, por lo que se trata de depósitos de oro tipo placer de clase mundial.

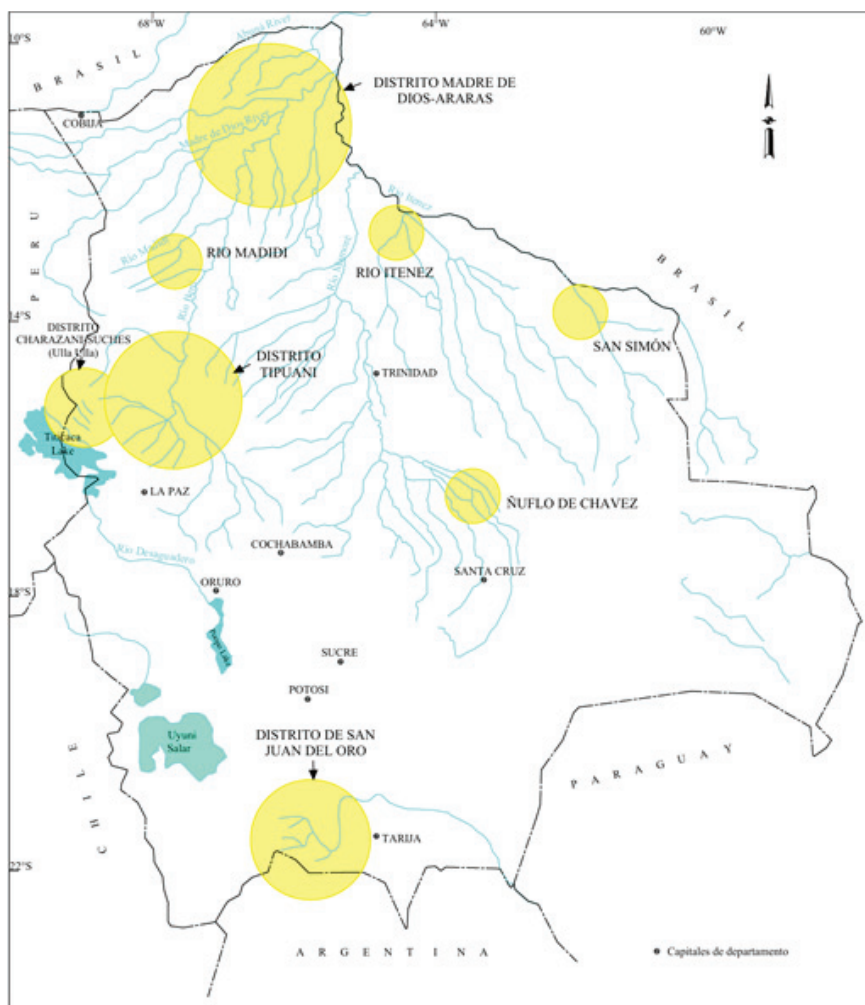
Los grandes ríos Madera, Madre de Dios, Beni, y Mamoré y sus numerosos afluentes drenan en las laderas nor-orientales de los Andes Centrales (Fig. 7, Tabla 1), que contienen abundantes yacimientos de oro orogénico del Paleozoico y transectan luego la parte septentrional de la llanura Chaco-Beniana, la cual en su parte norte incluye las áreas de Río Madre de Dios y Río Beni, con un potencial considerable de oro aluvial, estaño, wolframio, monacita, etc., donde varios de estos sistemas fluviales contienen cantidades importantes de oro en placeres, que definen la Cuenca Aurífera Amazónica.

Varias empresas explotan actualmente yacimientos aluviales de oro en el Río Madre de Dios, Río Madera (Nueva Esperanza) y otros ríos de los departamentos de Pando, Beni y La Paz. Los tenores son bajos, entre 2,4 y 72,9 mg/m<sup>3</sup>, aunque en niveles conglomerádicos puede subir a 210 mg/m<sup>3</sup>. La reserva de oro en el Río Madera se estima en 660 Mm<sup>3</sup> con un tenor aproximado de 0,25 g/m<sup>3</sup> de oro

No obstante, los depósitos de oro en placeres o aluviones revelan una ley promedio de aproximadamente 0,5 g/m<sup>3</sup> Au, aunque las concentraciones en algunas localidades sobrepasan 10 g/m<sup>3</sup>.

Los depósitos de la Formación Manoa del distrito de Araras, que aflora en la ribera occidental del Alto Madera, presentan gravas (y en menor proporción las arenas) enriquecidas en oro, especialmente en el interior de antiguos cauces intraformacionales donde las concentraciones alcanzan 10 g Au/m<sup>3</sup>, como en el caso de Nueva Esperanza.

## Principales Distritos Aluvionales de oro y de otros metales en Bolivia



El conglomerado basal de la Formación Manoa presenta concentraciones generalmente menores a 1 g Au/m<sup>3</sup>.

A lo largo río Madera, la mineralización de estaño y oro se presenta asociada a cuerpos graníticos precámbricos, que en Brasil muestran una alineación aproximada al noreste, constituyendo una faja relativamente continua. Hacia el Oeste, en territorio boliviano, los granitos disminuyen, tanto en número como en tamaño. La reserva de este río se estima en 660 Mm<sup>3</sup> con un tenor aproximado de 0,25 g/m<sup>3</sup> Au.

En Ascención de Guarayos, se descubrió una extensa anomalía geoquímica de estaño y concentraciones significativas de casiterita aluvial (7,8% de Sn). A la casiterita, acompañan topacio, turmalina, y trazas de fluorita y scheelita.

Los sitios favorables para la deposición de oro detrítico y de otros metales y minerales, consisten principalmente en paleocanales a orillas de los ríos, rápidos (cachuelas) que actuaron como "riffles", playas de islas, orillas convexas de meandros, intervalos hidrográficos de alta a baja gradiente y fondos de cauces activos (con profundidades de hasta 10 ó 15 m). En estos sectores las concentraciones promedio de oro son de aproximadamente 0.5 g/m<sup>3</sup> Au, aunque existen sectores donde superan los 4 g/m<sup>3</sup>.

### 3.14 Otros estilos de mineralización

#### *Metal Indio*

El territorio boliviano se caracteriza por hospedar yacimientos y prospectos de casi todos los metales críticos mencionados, en particular de indio que presenta contenidos importantes en yacimientos como Potosí donde se reveló leyes máximas de 5.740 ppm In; en Jaquegua 4.390 ppm In; 3.080 ppm en Huari Huari; 2.730 ppm en Bolívar; y 2.510 ppm en Siete Suyos-Ánimas (Fig. 4, Tablas 1 y 2).

El metal indio se encuentra incluido en varios minerales de los yacimientos polimetálicos epitermales y de tipo boliviano. Investigaciones mineralógicas realizadas en Japón, mediante técnicas como ICP/MS y EPMA (plasma acoplado inductivamente /espectrómetro de masas y micro-sonda) en muestras provenientes de varios yacimientos polimetálicos bolivianos, han reportado los contenidos máximos de indio que se muestran en la siguiente tabla:

La esfalerita es el principal portador de indio en estos depósitos, aunque con diferencias en su modo de ocurrencia y en la distribución de In. Los yacimientos polimetálicos estudiados que contienen zinc y plata serían aparentemente los más favorables para hospedar indio. Se han observado contenidos importantes de In en jamesonita, y en otras sulfosales de Ag y sulfuros de Sn. Asimismo, se han encontrado contenidos anómalos de In, Bi y Au en miargirita bornita, calcopirita y calcosina, los que se encontrarían en solución sólida, en lugar de inclusiones a nano escalas.

### 3.15 Estaño en granitos rapakivi en el Precámbrico

El Precámbrico es rico también en estaño en los granitos de estilo Rondoniano. En el área de Ascención de Guarayos y en el Complejo Alcalino de Velasco, se presentan granitos rapakivi relacionados con una mineralización de estaño, la cual está relacionada con pegmatitas complejas de posible edad Sunsás (1000 Ma), asociadas

con turmalina, topacio, fluorita y scheelita. En proximidades de la Comunidad de Ascensión de Guarayos, asimismo, se han reportado extensas anomalías geoquímicas de estaño y concentraciones significativas de casiterita aluvial y aluvial. En el margen occidental del Precámbrico, esta faja está en contacto con el augenais de Ascensión, un granito de biotita y feldespato alcalino sincrónico que se cree se desarrolló como resultado de la migmatización de los esquistos que se encuentran como relictos dentro el granito. Lo mencionado puede ser indicativo de la continuación de la mineralización de casiterita hacia el NNO.

### Valores máximos de In en yacimientos bolivianos

Yacimiento	Muestras seleccionadas	Muestras comunes	Concentrados de zinc
	ppm In	ppm In	ppm In
Potosí	5.74	292	10.27
Bolívar	2.73	-----	584
Siete Suyos-Animas	2.51	103	-----
San Vicente	1.29	-----	-----
Huari Huari	-----	3.08	-----
Tuntoco	-----	100	-----
Porco	-----	152	499
San Lorenzo	-----	-----	1.08
Reserva	-----	-----	449
Colquiri	-----	-----	213

**Nota:** Los resultados obtenidos revelan elevados contenidos de indio a nivel mundial. Una novedad interesante es el descubrimiento del mineral petrukita (Cu,Fe,Zn)<sub>2</sub>(Sn,In)<sub>4</sub>S<sub>4</sub> en Potosí.

### 3.16 Yacimientos y Ocurrencias de tantalio/niobio

El niobio y el tantalio se presentan en los endo y exo contactos de los mencionados granitos rapakivi, formando greisens, stockworks, vetas y (o) pegmatitas, dependiendo de la profundidad de formación y las condiciones geotectónicas. El potencial de tantalio en pegmatitas está relacionado con áreas anómalas en elementos como: Rb, Ba, Sr, Cs, Sn, Ta, Nb, Li y F (considerados como guía), y adicionalmente con minerales como la muscovita y feldespato potásico.

### 3.17 Tierras Raras en Bolivia

#### Elementos de Tierras Raras (ETR) en Cerro Manomó en el Precámbrico Boliviano

En el Precámbrico existen grandes complejos, producto de un magmatismo alcalino/carbonatita de edad jurásica/cretácica tales como el Complejo Alcalino de Velasco,

el Cerro Manomó, la Depresión (rift) de Mercedes y el Complejo "El Tigre", de edad jurásica-cretácica, con un gran potencial de torio, uranio, niobio, tantalio y lantánidos de tipo Lovozero, Las rocas consisten en sienitas, traquitas y tobas traquíticas y la mineralización está controlada por diques subvolcánicos de carbonatitas intensamente silicificados.

Los elementos de tierras raras en Manomó incluyen la asociación escandio, itrio y lantánidos, los que revelan similitudes geoquímicas (Figs. 8 y 9). Programas sistemáticos de recolección de muestras de suelo y sedimentos de corriente, revelaron elevadas concentraciones de niobio, torio, uranio, fosfatos y escandio (61 y 88 ppm Sc).

La bastnasita se presenta comúnmente en diques carbon-áticos laterales y en los paraneises altamente alterados de la zona central, en forma de ramilletes de diminutos cristales aciculares dentro la baritina o el cuarzo.

En las pegmatitas del Complejo La Bella, se han reportado cantidades menores de monacita, fergusonita y samarskita, así como un cristal de monacita de gran tamaño en Mina La Verde.

Un dique de melasienita de más de 20 m de ancho y más de 100 m de longitud, que disecta las rocas plutónicas del complejo Anillo de Bamba en el Complejo Alcalino Velasco, contiene aproximadamente 9% de lantánidos en un silicato con ETR.

En Manomó, se han encontrado valores máximos para elementos tales como Ba (hasta 10.43%), Th (hasta 1739 ppm) y ETR, La (40-469 ppm), Ce (3519) y Yb (82 ppm); carbon-atos con La (hasta 2570 ppm) y apatito con U y Th (1010 y 1730 ppm, respectivamente). Estos contenidos muestran que los mencionados complejos pueden hospedar importantes recursos minerales de ETR y elementos radioactivos.

Mo (120 a 350 ppm), Ta (153 ppm), Sn (100-138 ppm), Bi (60 – 192 ppm), Te (69 – 153 ppm), Co (1550 – 275 ppm), Sb (358 ppm), Ga (237 ppm) y anomalías de Ba, As, Mn, Cd y Au (anómalo en varias muestras).

### ***Elementos de Tierras Raras en la Provincia Alcalina de Ayopaya***

En Ayopaya, los diques ultramáficos y diatremas presentan xenolitos de wehrlita y clinoproxenita, como se observa en regiones del rift occidental sudamericano.

Silicatos menos evolucionados en la fusión parcial del manto metasomatizado y enriquecido en carbonatos mayormente sódicos y alcalinos, son comunes en rocas meliliticas y nefeliniticas, tal el caso de Cerro Sapo donde las calcio-carbonatitas

## Metales Críticos en Bolivia

- |  |   |
|--|---|
| 1. <b>Antimonio</b> (Faja Au-Sb)   | 22. <b>Manganeso</b> (asociado con Fe sedimentario, BIF)                      |
| 2. <b>Arsénico</b> (Faja Au-Sb, Valle de Cochabamba)                         | 23. <b>Níquel</b> (Cerro Pelón, Rincón del Tigre)                             |
| 3. <b>Baritina</b> (Cerro Manomó, Epitermales)                               | 24. <b>Niobio</b> (Complejo pegmatítico Los Patos, La Verde, La Negra)        |
| 4. <b>Berilio</b> (La Bella)   | 25. <b>Rubidio</b> (Granitoides Orogenia San Ignacio)                         |
| 5. <b>Bismuto</b> (Tasna)  | 26. <b>Escandio</b> (TTRR transición, Co. Manomó y Complejo Alcalino Velasco) |
| 6. <b>Cesio</b>  | 27. <b>Tantalio</b> (complejo pegmatítico Los Patos, La Verde, La Negra)      |
| 7. <b>Cromo</b> (Rincón del Tigre)   | 28. <b>Telurio</b>  |
| 8. <b>Cobalto</b> (Rincón del Tigre)   | 29. <b>Terbio</b>   |
| 9. <b>Disprobio</b> (evidencias PE)  | 30. <b>Tulio</b>  |
| 10. <b>Erbio</b> (evidencias PE)   | 31. <b>Estaño</b> (Faja Estañífera, ganitos Rapakivi)                         |
| 11. <b>Europio</b> (TTRR Livichuco, Co. Manomó y Complejo Alcalino Velasco)  | 32. <b>Titanio</b> (Serranía de San Simón)                                    |
| 12. <b>Fluorita</b> (Conde Auque)  | 33. <b>Wólfram</b> (Kami, Cordillera Vera Cruz, Real)                         |
| 13. <b>Galio</b> (Poopó, Huari Huari)  | 34. <b>Vanadio</b> (complejo granulítico Lomas Maneches)                      |
| 14. <b>Germanio</b> (Poopó, Huari Huari)                                     | 35. <b>Iterbio</b> (Cerro Manomó y Complejo Alcalino de Velasco)              |
| 15. <b>Hafnio</b>  | 36. <b>Itrio</b> (granito Diamantina)   |
| 16. <b>Holmio</b>  | 37. <b>Zinc</b> (faja orogénica zinquífera, VMS)                              |
| 17. <b>Indio</b> (yacimientos polimetálicos – zinquíferos T. Boliviano)      | 38. <b>Zirconio</b> (Co. Petas)   |
| 18. <b>Iridio</b> (Mina Santa Rosa-San Ramón)                                |   |
| 19. <b>Litio</b> (Salares y Cordillera Real)                                 |   |
| 20. <b>Lutecio</b>   |   |
| 21. <b>Magnesio</b> (Salares y PE, Quebrada Domingo, cerca Rincón del Tigre) |   |

están enriquecidas en Sr (> 4 %) y Nb (> 2.000 ppm). Adicionalmente, un pequeño dique ferro-carbonatítico reveló un contenido de 6.400 ppm Th.

En Chiaracke, la magnesio-carbonatita se caracteriza por su bajo contenido en sílice (<1 % SiO<sub>2</sub>) y en álcalis (<0.25 % Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), aunque está fuertemente enriquecida en elementos livianos de tierras

raras o LREEs (> 3.800 ppm La; 6.600 ppm Ce; 2.100 ppm Nd; 250 ppm Sm), y en ETR (La/Yb entre 580 a 1.500).

### Monacita en el yacimiento de Llallagua

La monacita de Llallagua (Figs. 3 y 4) presenta concentraciones moderadas a levemente anómalas de elementos radiogénicos, como: U (177 ± 42 ppm), Th (63 ± 30 ppm), 99.9% de <sup>206</sup>Pb. La monacita fue datada mediante el método U-Pb, en 23,4 ± 2,2 Ma, y 19,0 ± 1,6 Ma.

### 3.18 Yacimientos de Selenio

En Bolivia, los depósitos de selenio son de origen hidrotermal, tales como Pacajake y El Dragón, ambos localizados en el Departamento de Potosí, al sud del país, a una distancia de unos 135 km entre sí.

El depósito exhibe una veta principal, la cual está alojada en areniscas blancas y lutitas negras en una zona de alteración regional, donde se observan vetas de cuarzo

lechoso, silicificación, hematización, limonitización y blanqueamiento.

### 3.19 Yacimientos Evaporíticos

Aunque el presente artículo no trata específicamente de este tipo de yacimientos minerales, sin embargo, se los describe sucintamente debido a la importancia económica que representan para el país.

Para su formación, es esencial que el ritmo de evaporación exceda al de los aportes de agua, manteniendo los niveles de sobresaturación. Se originan, por lo tanto, como consecuencia de la evaporación del agua que forma disoluciones con abundantes sales. Al alcanzarse por evaporación el nivel de sobresaturación de las sales presentes en la mezcla, se produce la precipitación del mineral que forma este compuesto. A menudo ocurren precipitaciones sucesivas; en una primera etapa cristalizan las sales menos solubles y cuando aumenta la evaporación van precipitando las más solubles.

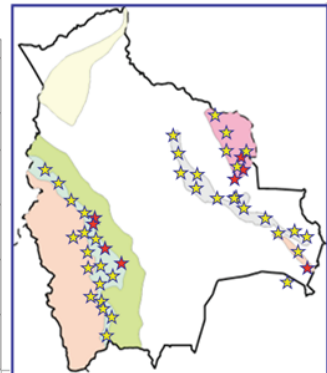
El territorio boliviano contiene 21 millones de toneladas métricas de litio en el Salar de Uyuni (Fig. 4). La distribución por país de reservas probadas es: Bolivia (23%), Chile (19%), Argentina (16%), EEUU (14%), China (13%), Australia (4%) y Canadá, Congo, Rusia, Serbia, Brasil (11%) (USGS, 2018).

Las reservas de potasio de Bolivia, asimismo, son importantes y la distribución de estas según países sería: Canadá (51%), Bolivia (12%), Rusia (11%), Bielorrusia (5%), Alemania (4%), Brasil (3%), China (2%) e Israel, Jordania, Ucrania, Chile, EE. UU., España (10%) (USGS, 2018).

#### Metales Críticos y Tierras Raras en Bolivia

Tierras Raras en Bolivia

Localidad	TTRR y otros minerales
Complejo Alcalino de Velasco	Th (hasta 1739 ppm) y ETR, con La (40-469 ppm), Ce (3519) y Yb (82 ppm), Ba (hasta 10.43%)
Cerro Manomó	escandio, itrio y lantánidos. Muestras de suelo y sedimentos de corriente, niobio, torio, uranio, fosfatos y escandio (61 y 88 ppm Sc)
Provincia Alcalina de Ayopaya	Sr (> 4 %) y Nb (> 2.000 ppm), una muestra 6.400 ppm Th.
Monacita en Llallagua	U (177 ± 42 ppm), Th (63 ± 30 ppm), 99.9% de 206Pb
TTR en los Yacimientos de Fe-Mn	en diagramas de condrita normalizada presentan LREE: (ratios): La/Sm = 5.66; La/Ce = 0.63; Eu/Sm = 0.19 y Sm/Lu = 8.09
Yacimientos de Selenio	Pacajake: <u>petroseita</u> (NiSe <sub>2</sub> ), íntimamente mezclada con <u>clausthalita</u> (PbSe), <u>naumanita</u> (Ag <sub>2</sub> Se), <u>chalcomenita</u> (CuSeO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O), <u>cobaltomenita</u> (CoSeO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O), <u>molibdomenita</u> (PbSeO <sub>3</sub> ).



★ Tierras Raras

★ Metales Críticos

### 3.20 Yacimientos de Piedras Semi-preciosas

La secuencia de unidades ricas en hierro (Grupo Boquí) y ricas en carbonatos (Grupo Murciélagos) albergan los yacimientos de amatista morada y púrpura, citrino anaranjado-amarillo, cristal de roca de cuarzo, cuarzo ahumado y bolivianita (ametrino) en los yacimientos de La Gaiba, Anahí, La Esperanza y Los Pobres, ubicados al norte de Puerto Suárez al SE del Precámbrico Boliviano. Sus controles estructurales consisten en fallas reactivadas de dirección norte-sud.

### 3.21 Ocurrencia de diamantes en Bolivia

En Bolivia, la identificación de diamantes se restringió a depósitos aluviales auríferos en dos zonas: Ixiamas al norte de La Paz, y valle de Ayopaya en Cochabamba.

En las serranías de Ixiamas, en 1930, se identificó cristales de diamantes, durante trabajos de prospección por oro aluvional. En las arenas de un río en Ayopaya en los años 1990, se descubrió "stones" o cristales de dos milímetros de diámetro, en proximidades de un afloramiento de una roca masiva magnética, especie de kimberlita, que podría ser la portadora.

### 3.22 Yacimientos y Ocurrencias de Uranio

Los yacimientos de uranio se presentan en Bolivia en todas las unidades morfo-estructurales y edades, desde el Proterozoico hasta el Cuaternario. Los yacimientos de uranio se presentan en todos los ambientes geológicos, tales como metamórficos, metasomáticos, magmáticos, hidrotermales y diagenéticos, y corresponden a los siguientes tipos:

1. Depósitos hidrotermales relacionados a vulcanismo riolítico-dacítico (Mioplioceno), asociados a vetas hidrotermales o depósitos supérgenos. Estos yacimientos se encuentran distribuidos en el Altiplano y la Cordillera Oriental.
2. Depósitos de enriquecimiento supérgeno por la lixiviación de la mineralización primaria. Los yacimientos se presentan principalmente en la Cordillera Oriental y Altiplano.
3. Depósitos y ocurrencias hidrotermales relacionadas con metasedimentitas paleozoicas (intragraníticas-epimetamórficas-peribatolíticas); los que se presentan en las Cordilleras Oriental y Real.
4. Depósitos magmáticos con mineralización singenética a la roca encajonante asociada a pegmatitas, carbonatitas, carbonatos y metasedimentarias. Los depósitos ocurren en el Precámbrico Boliviano y en la Cordillera Oriental.
5. Mineralización de reemplazamiento en estratos rojos (areniscas, lutitas y

- conglomerados) del Terciario, asociados con Cu-U y materia orgánica. Los yacimientos se presentan en el Altiplano Boliviano y Cordillera Occidental.
6. Depósitos de segregación metamórfica tipo alaskita, enriquecidos por soluciones supergénicas. Los principales yacimientos y ocurrencias se encuentran en la Cordillera Chichas y Subandino sud.
  7. Depósitos asociados con areniscas arcosas y cuarcitas paleozoicas, mesozoicas y terciarias. Morfología es tres tipos en areniscas: Roll front, tabular y estructural. Los principales yacimientos y ocurrencias se encuentran en la Cordillera Oriental (central y sud). Altiplano y Sub-andino sud.
  8. Depósitos relacionados con lutitas negras y pizarras. Mineralización de uranio uniformemente diseminada y adsorbida en las partículas arcillosas y orgánicas en lutitas de ambiente marino bajo condiciones libres de oxígeno, altamente rica en materia orgánica. Los principales yacimientos y ocurrencias se encuentran en la Cordillera Oriental, Sud-Subandino oeste y Llanuras Benianas.

### 3.23 Yacimientos de hierro oolítico

Los mismos corresponden a formaciones intrasedimentarias de hierro con contenidos mayores a 50% de ooides ferruginosos y 15% de ley de hierro. Se trata de acumulaciones de ooides de berthierita en ambientes marinos durante la diagénesis post-óxica, los cuales fueron modificados mecánicamente y transformados mineralógicamente durante el tiempo geológico.

## 4. Recursos Metalíferos de Bolivia

### 4.1 Estimación de los Recursos Metalíferos de Bolivia

Una estimación de los recursos metalíferos de Bolivia se realizó aplicando el método de "repetición" (clustering) de Tanimoto, el cual consiste en un registro de similitudes de yacimientos, a partir de proyecciones de sus componentes tales como fallas, litologías, mineralizaciones (en vetas, vetillas, stockworks y/o diseminaciones y alteraciones hidrotermales), y la dimensión de una correlación fractal mixta (a partir de los datos relativos de posiciones espaciales de los diferentes tipos de depósitos), cuyos resultados son bastante aproximados a los estimados mediante el método de mínimos cuadrados utilizando las mismas variables geológicas.

Se ha considerado que el territorio boliviano alberga más 3.000 yacimientos metalíferos distribuidos en todas sus unidades morfo-estructurales y en más de 20 estilos de mineralización. Históricamente, la producción metalífera boliviana ha sido especialmente polimetálica (de altas leyes) de Sn, Ag, Zn (+/-Sb, W y Pb), con una clara predominancia de Ag-Sn-Zn; proveniente de los conocidos yacimientos estanníferos

y/o polimetálicos del país tales como Cerro Rico de Potosí, Llallagua, Huanuni, Bolívar entre otros, que a excepción de Llallagua, contienen aproximadamente la mitad de sus recursos intactos, no obstante, su larga explotación.

No obstante, en los últimos años, se ha identificado un importante potencial metalífero masivo (de altos tonelajes y bajas leyes) de Au, Ag, Zn, Cu, Pb, Pt, Pd, Ta, Nb, Ni, Cd, In, Li y B, que en muchos casos han sido objeto de operaciones a "cielo abierto" o susceptibles de serlo en los yacimientos tales como Puquio Norte, Escarcha, Don Mario, San Simón, Miguela y Rincón del Tigre en el Precámbrico; Isidora, Cachi Laguna y Carangas en la Cordillera Occidental; Kori Kollo, San Cristóbal, Pulacayo, Iroco y Vinto en el Altiplano; y San Bartolomé, San Bernardino, Amayapampa-Capacirca, Chorolque, Tatasi, Tasna, Siete Sutos-Chocaya-Animas, San Vicente, Silver Sand e Iska Iska en la Cordillera Oriental. Se debe mencionar como ejemplo que a principios de la década de 1990 inició operaciones la primera mina a "cielo abierto" de Bolivia con Kori Kollo (Au-Ag), que constituyó en el mayor productor de oro de Sudamérica a principios de los años 1990.

#### **4.2 Estimación de los recursos de los principales yacimientos de Bolivia**

Una estimación actualizada de los recursos metálicos inferidos en yacimientos conocidos del territorio boliviano, según los metales principales se presenta en Tabla 3.

De acuerdo con el ritmo actual de explotación y en referencia a los valores de Tabla 3, se tendrían recursos minerales a ser minados entre 50 a 100 años. Adicionalmente, existen aproximadamente 250,000 km<sup>2</sup> inexplorados (~ 25% de territorio nacional) y 200,000 km<sup>2</sup> subexplorados (~ 20% de territorio nacional), los que son susceptibles de contener importantes recursos adicionales de una gran variedad de metales.

#### **4.3 Proyectos mineros avanzados**

En Bolivia existe un portafolio de los proyectos mineros con mayor grado de avance, con estudios de factibilidad o prefactibilidad completados, o en etapas de exploración avanzada, cuyos recursos/reservas y leyes se muestran en la siguiente tabla, los que podrían desarrollarse en los próximos años, con una inversión aproximada de 3.000 millones de dólares, para generar exportaciones adicionales mayores a 1.000 millones de dólares por año.

Los proyectos mencionados constituyen en un indicador del potencial metalífero identificado en pocos años de exploración a partir de 1990, que puede gravitar en el desarrollo social y económico de Bolivia si ingresan a explotación.

## 5. Conclusiones y cierre del documento

Bolivia cuenta con una geología privilegiada que data dos billones de años, tiempo durante el se formó una gran cantidad y diversidad de yacimientos minerales de metales preciosos, metales base, ferrosos, no ferrosos y otros.

Históricamente, la minería es un sector clave para la economía boliviana, cuyas exportaciones de minerales de estaño, plata, oro, zinc, plomo, antimonio y wólfram entre otros, en la actualidad alcanzan el 50% del total de exportaciones, no obstante permanecer vigentes los desafíos de atraer mayores inversiones y resolver los problemas, entre otros, como la minería ilegal, el contrabando y la fuga de divisas.

Nuestra industria minera, asimismo, debe tener garantizado su continuo crecimiento económico y fortalecimiento, a través de nuevas regulaciones favorables que redundarán en nuevos emprendimientos mineros de exploración, explotación e industrialización maximizando el valor agregado de los minerales, que contribuirán de manera significativa al desarrollo del país.

### *Estimación actualizada de los recursos metálicos de algunos de los principales yacimientos de Bolivia*

Unidad Geo-estructural	Mt	Moz Indicadas/Inferidas		Mt Finas Indicadas/Inferidas			
	Netas Inferidas	Au	Ag	Mt Pb	Mt Zn	Mt Sn	Mt Cu
Cord. Occidental	527.34	5,0	1.186,8	4,72	9,34	-----	0,91
Altiplano	967.25	13,6	2.046,9	5,15	4,73	0.43	3,11
Cord. Oriental	2,115.16	29,6	3.780,2	13,7	21,8	7.5	-----
Llanuras*	258,427.50	40,2					
Precámbrico	367.41	4,4	919,1	-----	-----	1	1,65
<b>Total</b>	<b>3,977.16</b>	<b>92,8</b>	<b>7.933</b>	<b>23,57</b>	<b>35,87</b>	<b>8,93</b>	<b>5,67</b>

Mt: Millones de toneladas métricas; Moz, millones de onzas troy. \* yacimientos secundarios

Nota: No se incluyen los recursos potenciales, que al menos podrían duplicar los existente.

La minería puede generar amplios beneficios económicos, especialmente en países como el nuestro que no disponen de muchas fuentes alternativas de desarrollo y, que actualmente resultan poco atractivos para la inversión nacional y extranjera. De cumplir ciertas condiciones como un marco jurídico adecuado, políticas apropiadas, estabilidad política, social y económica, fortalecimiento de las instituciones públicas dirigidas por funcionarios idóneos, y derechos de propiedad bien definidos eliminando la burocracia, es muy probable que la inversión, principalmente extranjera, se sienta altamente atraída por el potencial geológico-minero del país.

Esto generará un flujo sustancial económico, creando nuevas oportunidades de desarrollo, que incluyen la generación de divisas para fortalecer la balanza de pagos, el aumento de los ingresos públicos, la creación de empleo directo e indirecto, el progreso de la educación, el desarrollo de capacidades, contribución al desarrollo de habilidades y negocios, la generación de beneficios duraderos y de infraestructura como carreteras, electricidad y telecomunicaciones, y en general en la mejoría de calidad de vida de sus habitantes.

La economía en su conjunto puede estimularse a medida que las empresas mineras forjen múltiples vínculos externos, así con las industrias que suministran bienes y servicios, y/o con las industrias que procesan los productos minerales. Finalmente, habrán beneficios económicos más generales, como el pago de regalías e impuestos que impulsan los ingresos gubernamentales.

Se enfatiza que el marco político debe proporcionar los medios para garantizar el respeto de los diversos derechos e intereses y evitar cualquier riesgo a la inversión.

Asimismo, se debe reconocer que un yacimiento mineral específico tiene una vida útil finita; por lo que cuando la mina cierre, es vital que se desarrolle una industria alternativa, como otra forma de uso de capital y de garantía de prosperidad.

Muchos de los países más ricos del mundo se han beneficiado enormemente de la extracción, uso y comercialización de minerales, tales como Australia, Canadá, Finlandia, Suecia y Estados Unidos, por ejemplo, que tienen industrias minerales extensas y las han utilizado como plataforma para un desarrollo industrial de base amplia, que son actualmente algunas de las economías más exitosas del mundo. Sin embargo, cualquier país que desee convertir la riqueza mineral en desarrollo humano para su población se enfrenta a grandes desafíos tales como:

- Demostrar técnicamente el potencial minero y atraer inversiones para su exploración y desarrollo;
- Establecer un clima de inversión atractivo y políticas favorables;
- Desarrollar una infraestructura local y nacional para el sector minero;
- Aprovechar sosteniblemente la riqueza mineral, protegiendo la calidad ambiental y los valores sociales y culturales;
- Compartir los excedentes o las rentas económicas de la producción minera de manera equitativa entre las comunidades locales y el país en su conjunto;
- Convertir recursos no renovables (riqueza mineral) en renovables mediante la inversión en capital físico y humano, de forma que también se protejan los intereses de las generaciones futuras;

- Mantener un entorno económico estable, a la vez que se afronta los impactos relacionados con la sostenibilidad, la reducción del impacto ambiental, la transformación digital, la adopción de tecnologías avanzadas, las condiciones cambiantes de las exportaciones minerales, la fluctuación de los precios internacionales de las materias primas, la capacitación de la fuerza laboral y la construcción de relaciones sólidas con las comunidades locales; y
- Abordar el posible impacto del sector minero en cuestiones cruciales de gobernanza, en particular la corrupción, las tensiones regionales sobre la distribución de los ingresos, los derechos humanos y los conflictos internos.



## Bibliografía

Arce-Burgoa, O. (2020). Yacimientos Metalíferos de Bolivia, Super Print Impresores, Cochabamba, 356+[86]p.

Nota. En el libro mencionado líneas arriba, se encuentran todas las referencias bibliográficas de la acerca de la información que se presenta en el presente artículo.

## Reservas y recursos indicados a medidas de los nuevos prospectos y minas descubiertas en los últimos veinte años

Yacimiento	Ubicación Geo-estructural	Estilo de Mineralización	Compañía Propietaria	Leyes	M. Tons.	Oro (M onzas)	Plata (M onzas)	Zinc (tons. finas)	Plomo (tons. finas)	Cobre (tons. finas)
Puquio Norte*	Precambrico	BIF	COOPERATIVA	2.0 g/t Au	25	1.60				
Don Mario*	Precambrico	Skarn	ORVANA	LMZ: 15.5 g/t Au UMZ: 3.7 g/t Au	2	1.00	1.90			22,800
San Simon	Precambrico	Epigenético rel zonas de cizalla	COOPERATIVA	5 g/t Au	4	0.64				
Miguela	Precambrico	VMS	?????	3.76 % Cu, 1.26 g/t Au, 11.3 g/t Ag 0.33 % Zn	3	0.12	1.09	9,900		101,280
Kori Kollo*	Atiplano	Transicional	CIERRE	2.0 g/t Au	92	5.92	40.82			
San Cristóbal	Atiplano	Epiternal IS	CRISTOBAL SAN MINING	1.38 g/t Ag 62 g/t Ag; 1.57% Zn; 0.55% Pb	259		516.33	4,066,300	1,424,500	
Kori Chaka*	Atiplano	Au Orogénico	CIERRE	1.1 g/t Au	19	0.92				
Vinto	Atiplano	Au Orogénico	EMUSAN ANDEAN	1.1 g/t Au	16	0.57				
San Bartolomé	Cordillera Oriental	Eluvio-coluvial	PRECIOUS METALS	122 g/t Ag	37		145.15			
San Bernardino	Atiplano	Au Orogénico	ESTADO	1.4 g/t Au	52	2.32				
Amyaspampa	Cordillera Oriental	Au Orogénico	COMIBOL	1.68 g/t Au	10	0.60				
San Vicente	Cordillera Oriental	Polimetálico de tipo "boliviano"	COMIBOL- PAN AMERICAN SILVER	170 g/t Ag, 0.15% Pb, 2.45% Zn	5		27.33	122,500	7,500	
<b>TOTAL</b>	<b>Orogeno y Precambrico</b>	<b>9 estilos de mineralización</b>		<b>Variables</b>	<b>524</b>	<b>10.69</b>	<b>732.62</b>	<b>4,198,700</b>	<b>1,432,000</b>	<b>124,080</b>

\* Toneladas y leyes previo a su explotación. No obstante, una gran cantidad de recursos fueron explotados en varios de los yacimientos en la lista, la información es útil para la proyección de nuevos depósitos a descubrirse.



# DIÁLOGOS MINEROS

Oswaldo R. Arce Burgoa, Ph.D., P.Geo, QP

Este estudio presenta una síntesis geológica y metalogénica del territorio boliviano, destacando su extraordinaria diversidad y riqueza mineral. Bolivia posee un 75% de su superficie dotada de mineralizaciones de gran valor económico, incluyendo plata, estaño, oro, zinc, plomo, bismuto, wolframio, antimonio, cobre, litio, tierras raras y otros metales estratégicos. Estas ocurrencias se distribuyen principalmente en el Orógeno Andino, el Escudo Precámbrico y las Llanuras Chaco-Benianas, configurando uno de los laboratorios geológicos más completos del mundo, con más de 20 estilos de mineralización y más de 3.000 yacimientos registrados, muchos de ellos aún subexplorados.

El análisis describe los principales distritos y depósitos, entre ellos Cerro Rico de Potosí, Llallagua, Chorolque, Huanuni, Iska Iska, Colquiri y El Mutún, que han marcado la historia económica del país. Se detalla la génesis de los yacimientos polimetálicos tipo “boliviano”, asociados a sistemas hidrotermales y corteza engrosada, así como los yacimientos auríferos orogénicos, epitermales, vetiformes y formaciones de hierro bandeado (BIF). Además, se identifican recursos gigantes y de clase mundial en estaño, plata, zinc, plomo y oro, junto con importantes potenciales en cobre, elementos del grupo del platino y tierras raras.

El autor subraya que, pese a la reconocida riqueza geológica, gran parte del territorio boliviano permanece inexplorado o parcialmente explorado, lo que abre oportunidades para el descubrimiento de nuevos depósitos económicamente rentables. Asimismo, se enfatiza la necesidad de una exploración minera sistemática, acompañada de políticas que promuevan inversión, investigación geocientífica y sostenibilidad ambiental.

En conclusión, Bolivia posee un potencial mineralógico inmenso y diversificado que, con una adecuada gestión, puede convertirse en un pilar para el desarrollo económico sostenible y estratégico del país, integrándose a las demandas globales de metales críticos para la transición energética y tecnológica.