



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

DEPP 05/2016

Resumen Ejecutivo

La mayor concentración de yacimientos en Chile se ubica en el centro norte del país, entre las regiones XIV y VI. La formación de estos depósitos se debe al contexto geológico en que se ubica el territorio nacional; una zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. La convergencia entre ellas permite la generación de magmas, que dan origen a conjuntos de yacimientos alineados con una determinada edad geológica, agrupados en franjas metalogénicas. Las franjas de mayor importancia económica en Chile son de edades: Jurásico, Cretácico temprano, Paleoceno-Eoceno temprano, Eoceno tardío-Oligoceno temprano, Mioceno temprano a medio y Mioceno medio a Plioceno temprano.

Algunas compañías consideran esta zona como madura en términos de exploración y que sus depósitos más expuestos o evidentes ya han sido encontrados. Ante esta situación se busca esclarecer cuán conveniente es seguir explorando esta zona. Para esto se revisaron antecedentes de las franjas metalogénicas, se identificaron los yacimientos significativos de cobre y oro descubiertos en Chile entre los años 2000 a 2015 y se trabajó sobre esos datos y otros antecedentes.

Previo al año 2000 la exploración minera en Chile fue bastante exitosa, culminando con el *boom de los 90's* con hallazgos tales como Collahuasi, Spence, El Tesoro y Esperanza. Desde entonces han aumentado significativamente las inversiones en exploraciones con resultados positivos, pero más bajos que en las décadas anteriores.

En el periodo 2000-2015, se han descubierto en el centro-norte de Chile al menos 35 yacimientos con cobre como mineral primario y tres yacimientos de oro incrementando en más de 208,6 Mt de cobre y 34,3 Moz de oro a los recursos y reservas anteriormente conocidos. El promedio de años entre el descubrimiento de un yacimiento y la puesta en marcha de la mina es de 13,27.

De los yacimientos descubiertos, el 94% del cobre contenido en sus recursos y reservas se descubrió antes del año 2010, y, si bien la inversión en exploración ha aumentado significativamente desde esa fecha, los resultados de la exploración no han sido proporcionales al incremento de presupuesto. Aun así, comparado los resultados de exploración con el resto del mundo, Chile es el país que lidera tanto en número de hallazgos como en la cantidad de cobre contenido en estos.

Los yacimientos de cobre de mayor tamaño corresponden a Escondida Este y Pampa Escondida, asociados al pórfido cuprífero Escondida y, Los Sulfatos, asociado al mega yacimiento Rio Blanco-Los Bronces. La mayor parte de los nuevos yacimientos de cobre se ubican en la II Región de Antofagasta mientras que los oro; en la III Región de Atacama. Respecto al tipo de exploración asociada a cada descubrimiento, la mitad de los depósitos de cobre se descubrieron a través de exploración brownfield y la otra mitad; greenfield, mientras que los de oro; todos greenfield.

Respecto a profundidad de los yacimientos encontrados solo el 20,6% de los yacimientos tienen mineralización económica en superficie, el 49,9% se encuentra a más de 100 m de profundidad y se extienden hasta 800-2000 m bajo la superficie. Incluso un 11,7 % de los yacimientos se



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

encuentran a más de 400 m. La profundidad de los cuerpos mineralizados encontrados entre el 2000 y 2008 no excedía los 200 m, mientras que a partir del año 2009 los hallazgos de yacimientos de cobre comenzaron a ser más profundos, hasta 500-600 m de profundidad. Actualmente existe la posibilidad de realizar sondajes más profundos que hace algunos años (hasta 2000 m), lo que permite alcanzar depósitos cubiertos y en consecuencia, sectores que anteriormente fueron descartados por no presentar mineralización económica en superficie, podrían ser reconsiderados como blancos de exploración.

De los 38 yacimientos encontrados, 36 de ellos se asocian a las franjas metalogénicas previamente definidas y dos de ellos se asocian a magmatismo del Cretácico tardío. La mayor cantidad de yacimientos de cobre se concentran en la Franja del Eoceno tardío-Oligoceno temprano con 14 depósitos minerales, le sigue la franja del Mioceno medio-Plioceno temprano con 11 nuevos yacimientos de cobre. Además la totalidad de los yacimientos de oro se ubica en la franja del Mioceno temprano a medio.

La exploración brownfield fue exitosa en las franjas Eoceno tardío-Oligoceno temprano, con seis nuevos yacimientos de cobre encontrados, y Mioceno Medio-Plioceno temprano, con nueve nuevos yacimientos de cobre, y la exploración greenfield, exitosa en prospectos de oro en la franja Mioceno temprano a medio, con tres yacimientos. Además, se descubrieron dos yacimientos asociados al arco magmático del Cretácico tardío, lo que abre puertas a definir nuevos blancos de exploración asociados a magmatismo de esta edad.

Los yacimientos encontrados a más de 100 m de profundidad se encontraron en todas las franjas metalogénicas, principalmente en la franja Eoceno tardío- Oligoceno temprano y en la franja Mioceno medio-Plioceno temprano.

Sumado a lo anterior, se revisaron estudios en los que se reconocen patrones geológicos favorables para la formación de yacimientos de cobre en franjas del Mioceno en sectores donde no se han identificado yacimientos superficiales, pero que podrían estar en profundidad.

Para concluir, se aprecia un posible agotamiento de yacimientos de cobre en superficie en el centro-norte de Chile, pero también se evidencia un alto potencial para descubrir nuevos depósitos en profundidad (100-400 m) en las diversas franjas metalogénicas. El hecho de que actualmente sea factible realizar perforaciones profundas, favorece el desarrollo de esta línea de exploración. Respecto al oro, aún existiría un alto potencial de encontrar yacimientos en superficie, asociados a la franja Mioceno temprano a medio.

El presente estudio establece una nueva línea de trabajo en Cochilco que busca integrar factores históricos, económicos, geográficos y geológicos para lograr un mejor entendimiento de las tendencias de la exploración en Chile, y a la vez, reducir la brecha que existe entre Chile y otros países más avanzados en cuanto a la disponibilidad, organización y difusión de la información.



Índice

Resumen Ejecutivo	I
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
1. Introducción	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Metodología.....	1
2. Antecedentes	4
2.1. Modelo de Franjas metalogénicas	4
2.1.1. Importancia del contexto tectónico	4
2.1.2. Historia teoría de franjas.....	5
2.1.3. Modelo actual de Franjas Metalogénicas	9
2.2. Minería de cobre y oro en el norte de Chile previo al año 2000	12
3. Resultados de exploración minera en Chile (2000-2015)	15
3.1. Relación con la inversión en exploración	19
3.2. Hallazgos por empresa.....	20
3.3. Hallazgos por región	21
3.4. Hallazgos por tipo de yacimiento	23
3.5. Hallazgos según tipo de exploración	24
3.6. Profundidad de los hallazgos	25
3.7. Destino de los hallazgos.....	26
3.8. Hallazgos por franja metalogénica	28
3.9. Otros resultados	32
3.10. Contexto Global.....	33
4. Comentarios finales.....	34
5. Referencias	37
6. Anexos	42
6.1. Anexo 1: Datos.....	42
6.2. Anexo 2: Tipos de Yacimientos	44
6.3. Anexo 3: Principales yacimientos por franja metalogénica.....	47



Índice de figuras

Figura 1. Configuración tectónica de los Andes Centrales en el centro-norte de Chile	5
Figura 2. Esquema de las provincias metalogénicas identificadas en Chile durante los 60.	6
Figura 3. Zonación de yacimientos minerales en Chile en franjas longitudinales identificadas en los 70.	6
Figura 4. Mapa con principales yacimientos de cobre y edades de las intrusiones relacionadas a estos depósitos.	8
Figura 5. (a) Mapa del centro-norte de Chile mostrando los yacimientos asociados a cada franja metalogénica y (b) Escala de tiempo geológica mostrando el periodo de generación los yacimientos asociados a cada franja.	11
Figura 6. Ubicación aproximada de las minas de plata y de cobre explotadas en Chile durante el siglo XIX.	13
Figura 7. Año aproximado de descubrimientos de los principales yacimientos de cobre y oro en el centro-norte de Chile por región.....	14
Figura 8. Mapa del norte de Chile con los yacimientos de cobre encontrados entre 2000 y 2015.	15
Figura 9. Hallazgos de yacimientos en Chile entre 2000 y 2015.	16
Figura 10. Cobre contenido en recursos y reservas en los 36 yacimientos de cobre estudiados.	17
Figura 11. Tonelaje versus ley de cobre en recursos y reservas de yacimientos de cobre descubiertos entre 2000 y 2009 (marcadores rojos), entre 2010 y 2015	17
Figura 12. Oro contenido en recursos y reservas en los 3 yacimientos de oro estudiados.	18
Figura 13. Cobre contenido en recursos y reservas acumulados (periodo 2000-2015).....	18
Figura 14. Inversión total y por tipo de exploración.....	19
Figura 15. Porcentaje de inversión según tipo de exploración y número de hallazgos por año.	20
Figura 16. Número de hallazgos por empres.....	21
Figura 17. Descubrimientos de yacimientos de cobre y oro por región entre años 2000 y 2015.....	22
Figura 18. Descubrimientos de yacimientos de cobre y oro por región y por año entre 2000 y 2015.	22
Figura 19. Tipos de yacimientos encontrados entre 2000 y 2015 según su mineral primario.....	23
Figura 20. Ubicación y tamaño de yacimientos de cobre y oro encontrados entre 2000 y 2015 según su tipo de exploración	24
Figura 21. Distribución de la profundidad a la que se encuentran los cuerpos con mineralización económica.....	25
Figura 22. Profundidad a la que se ubica la mineralización económica en los yacimientos encontrados y el año de descubrimiento.	26
Figura 23. Estado de avance de los proyectos en nuevos hallazgos.	27
Figura 24. Años entre el descubrimiento de un yacimiento y la puesta en marcha de la mina para 11 proyectos. (e)	27
Figura 25. Distribución de los yacimientos de cobre según su franja metalogénica.	29
Figura 26. Distribución espacial de los yacimientos descubiertos entre 2000 y 2015, por región y por franja metalogénica	30



Figura 27. Distribución de los tipos de yacimientos de los hallazgos (2000-2015) en cada franja metalogénica.....31

Figura 28. Profundidad de los yacimientos según las franja metalogénica a la que se asocian.31

Figura 29. Resultados de exploraciones mundiales de yacimientos de cobre entre 2000 y 2014 ...33

Índice de tablas

Tabla 1. Tipo de exploración asociada a cada hallazgo de cobre y oro entre 2000 y 2015. 24

Tabla 2. Hallazgos de yacimientos de cobre y oro entre 2000 y 2015. 42

Tabla 3. Distribución de hallazgos entre 2000 y 2015 por región y franja metalogénica. 43



1. Introducción

Los Andes chilenos constituyen la provincia más rica de cobre del mundo (e.g. USGS, 2016; Maksaev y otros, 2007), la explotación de estos recursos ha llevado a Chile a convertirse en el primer productor mundial de cobre desde hace ya 33 años. La mayor concentración de yacimientos en el país se ubica en la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes en el centro-norte de Chile, entre las regiones de Arica y Parinacota y Libertador Bernardo O'Higgins.

La generación de los grandes yacimientos minerales del centro-norte de Chile se deben al contexto geológico-tectónico en que se ubica el territorio nacional: una zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. La convergencia entre ellas permite la generación de magmas alineados en dirección norte-sur, que, a su vez, permiten la generación de yacimientos de metales en sus proximidades. Estos arcos magmáticos se han situado en diferentes posiciones a lo largo del tiempo geológico, dando origen a franjas de yacimientos, cada una con su respectiva edad geológica, conocidas como las Franjas Metalogénicas.

Algunas compañías consideran estas zonas como maduras en términos de exploración y que sus depósitos más expuestos o evidentes ya han sido encontrados, sin embargo, existe una serie de antecedentes que incentivan a continuar explorando en esta región.

1.1. Objetivo

El presente estudio tiene como objetivo identificar los yacimientos significativos de cobre y oro descubiertos recientemente en el centro-norte de Chile (2000-2015), entender su contexto geológico y su relación con las franjas metalogénicas y, en base a esto y otros antecedentes, esclarecer cuán conveniente es seguir explorando esta zona.

1.2. Metodología

Para realizar este estudio se comenzó por una recopilación bibliográfica respecto a la historia de la minería en Chile, y a diversos estudios geológicos en los que se fundamenta el modelo de Franjas Metalogénicas, posteriormente se identificaron los nuevos yacimientos de cobre y oro encontrados en Chile entre 2000 y 2015, se recopiló información de estos, y, por último, se hizo un análisis estadístico respecto a estos últimos.

i. Recopilación bibliográfica sobre las Franjas Metalogénicas

Revisión de información histórica, artículos científicos e información geológica que permite conocer:

- ✓ La evolución del entendimiento de la metalogénesis andina desde los años 60 hasta la actualidad.
- ✓ La configuración tectónica pasada y actual del territorio nacional y su relación con la génesis de los yacimientos minerales.



ii. Recopilación de información sobre yacimientos descubiertos entre 2000 y 2015

Para esto se consideraron solo los yacimientos de cobre y oro que cuentan con una estimación de recursos a marzo de 2016 y que contienen al menos 200.000 t de cobre en sus recursos y/o reservas, para yacimientos de cobre, o al menos 400.000 oz de oro, para los yacimientos del metal precioso. Esta información fue obtenida a partir de datos publicados por SNL Metals & Mining, Wood Mckenzie, Reportes Anuales de las compañías mineras, documentos públicos de las compañías, publicaciones científicas, presentaciones de congresos y solicitudes internas de información.

Se constituyó una base de datos con aspectos tales como:

- ✓ Nombre de los yacimientos
- ✓ Mineral primario y minerales secundarios
- ✓ Ubicación (región, provincia)
- ✓ Año de descubrimiento
- ✓ Empresa descubridora
- ✓ Tipo de exploración, esta puede ser:
 - Greenfield: exploración en terrenos donde no hay actividad minera previa.
 - Brownfield: se refiere a la exploración que se hace en distritos mineros ya conocidos, puede ser en busca de nuevos depósitos o extensiones de depósitos ya conocidos.
- ✓ Propietario Actual
- ✓ Estado de avance del proyecto, esta puede ser:
 - Estimación de Recursos y Reservas: el proyecto se encuentra en estudios geológicos y realización de sondajes para delimitar sus recursos y reservas.
 - Factibilidad: el proyecto ya tiene una estimación de recursos y reservas y se encuentra en etapa de realización de estudios prefactibilidad o factibilidad. También en este grupo se encuentran proyectos que esperan la tramitación de los derechos de aguas, permisos ambientales, entre otros, y los proyectos que están a la espera de un alza en el precio de metales para poner en marcha las operaciones.
 - Producción-Operación: proyectos que ya están puestos en marcha, con sus minas y plantas operando.
- ✓ Año de inicio de operaciones de la mina o año propuesto para este.
- ✓ Estimación de Recursos ya sean inferidos, indicados y medidos, y de Reservas Probadas y Probables, en caso de haber una. Se consideró el tonelaje, la ley del metal y el total de cobre u oro contenidos en los depósitos¹.

¹ Frecuentemente se utiliza el contenido de cobre de un yacimiento para comparar yacimientos, sin embargo esto no entrega una idea del potencial económico del depósito ya que no describe la calidad de la concentración. Es por esto que se prefiere hablar del tonelaje y la ley de cada metal a la hora de evaluar la factibilidad económica de la explotación de un depósito.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

- ✓ Tipo de Yacimiento, se consideraron ocho grupos (Ver Anexos 1 para más detalle):
 - Pórfido Cu-Mo/Cu-Au
 - IOCG
 - Estratoligado
 - Exótico
 - Skarn
 - Epitermal HS
 - Epitermal LS
 - Placer
- ✓ Profundidad a la que se ubica el cuerpo mineralizado.
- ✓ Identificación de la franja metalogénica a la que pertenece cada yacimiento a partir de su ubicación geográfica y la información geológica disponible de la zona. Se consideraron seis periodos geológicos asociados a franjas metalogénicas (Ver Sección 2.1.3 y Anexo 2):
 - Jurásico
 - Cretácico temprano
 - Paleoceno- Eoceno temprano
 - Eoceno tardío-Oligoceno temprano
 - Mioceno temprano a medio
 - Mioceno tardío-Plioceno temprano

iii. Análisis de datos

En esta parte del proceso se trabajaron los datos obtenidos, generando gráficos que permiten conocer las tendencias generales de los hallazgos minerales de cobre y oro de los últimos 16 años, respecto a su distribución espacial (latitudinal y longitudinal), su relación con las franjas metalogénicas, las profundidades de los hallazgos, entre otros aspectos.



2. Antecedentes

2.1. Modelo de Franjas metalogénicas

La metalogénesis es el estudio de la génesis de los depósitos minerales (metálicos o no metálicos) en la corteza terrestre, enfocándose en su relación temporal y espacial y su contexto geológico. La formación de estos depósitos puede estar relacionado a procesos magmáticos-hidrotermales² (e.g. pórfidos cupríferos), metamórficos o sedimentarios (e.g. placeres de oro, salares). La mayor parte de los yacimientos de metales en Chile son de origen magmático-hidrotermal.

Un área caracterizada por una agrupación de depósitos minerales de uno o más tipos característicos de depósitos, se conoce como Provincia Metalogénica, esta, a la vez, se puede sub dividir en sub provincias o franjas metalogénicas. Para referirse a los depósitos minerales en la Cordillera de los Andes al sur de Perú y en el norte y centro de Chile, se utiliza el concepto de *Provincia Metalogénica de los Andes* y esta se subdivide en franjas metalogénicas, que corresponden a agrupaciones de depósitos minerales dispuestos en cinturones longitudinales de orientación norte-sur formados durante periodos discretos, los más antiguos se ubican al oeste, en la Cordillera de la Costa, mientras que los más recientes; al este, en la Cordillera de los Andes.

2.1.1. Importancia del contexto tectónico

La metalogénesis en el norte y centro de Chile está determinada por el ambiente tectónico en el que se encuentra, es decir un margen continental activo (Figura 1), donde una placa tectónica oceánica (Placa de Nazca) subduce bajo una placa continental (Placa Sudamericana). Esta configuración permite que se generen magmas³ bajo la corteza continental y que, por diferencias de densidad, asciendan. Algunos magmas alcanzan la superficie terrestre formando volcanes, mientras que otros, llegan solo a niveles medios de la corteza dónde las cámaras magmáticas se enfrían lentamente hasta solidificarse. El magmatismo libera fluidos calientes (fluidos hidrotermales) que alteran la mineralogía de la roca huésped y, además, transportan metales. Finalmente, al enfriarse los fluidos, nuevos minerales van precipitando en las fracturas o porosidades de las rocas.

Actualmente, los volcanes activos y sus respectivas cámaras magmáticas, se distribuyen a lo largo de una faja de orientación norte-sur llamada *arco magmático* a aproximadamente a 240 km de distancia de la fosa, en la Cordillera de los Andes, cerca de la frontera entre Chile y Argentina. Pero el registro geológico permite reconocer que el arco magmático no siempre estuvo en esta posición, sino que, a lo largo del tiempo geológico, ha ido migrando: hacia el este durante el Paleozoico: desde el oeste de Argentina hasta la Cordillera de la Costa chilena y, luego, hacia el interior del

² Procesos generados a partir de magmas, es decir, una roca fundida (mezcla de material líquido, sólido y gaseoso a altas temperaturas) y/o de los fluidos liberados por estos magmas.

³ Roca fundida; compuesta por una mezcla de gases, líquidos y sólidos calientes.

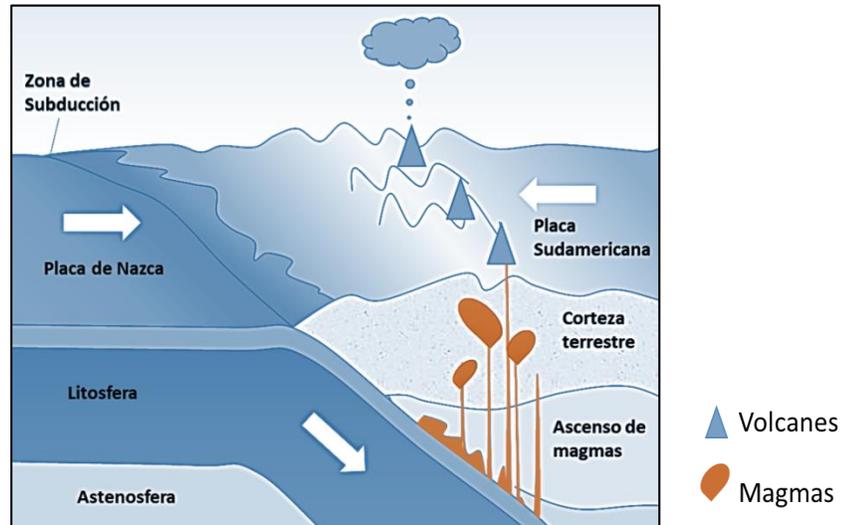


Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

continente a partir del Jurásico hasta el presente, pasando de la Cordillera de la Costa, a la Depresión Central, Precordillera y Cordillera de los Andes.

Esto es importante ya que la génesis de la mayor parte de los depósitos metálicos en Chile tiene relación espacial y temporal con la actividad magmática y, por lo tanto, la posición del arco magmático en cada periodo geológico es de vital importancia para entender la formación de yacimientos de metales a lo largo y ancho del país.

Figura 1. Configuración tectónica de los Andes Centrales en el centro-norte de Chile



Fuente: Cochilco basado en Tarbuck y Lutgens (2005).

2.1.2. Historia teoría de franjas

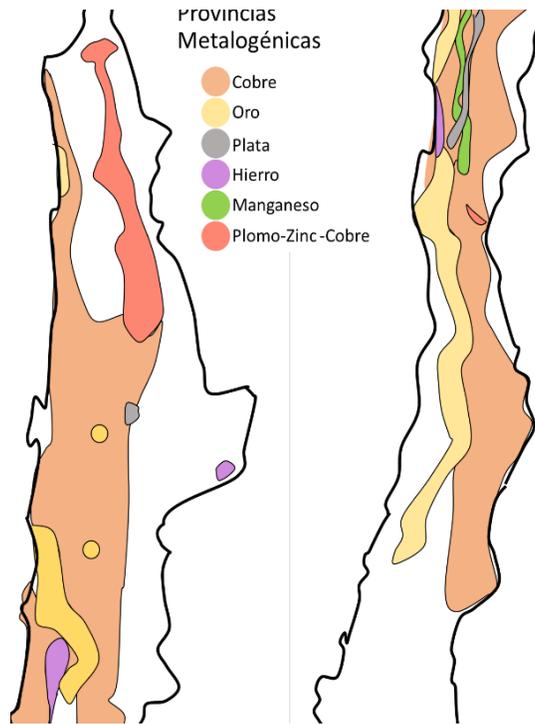
Previo al desarrollo y consolidación de la teoría de placas tectónicas, durante la década de los 60, no había un claro entendimiento de los grandes procesos que controlaron la metalogénesis en Chile. En uno de los primeros trabajos en Chile, sobre la distribución espacial de los depósitos, de Eriksen y Ruiz (1962), se definieron seis provincias metalogénicas caracterizadas por la predominancia de los minerales: cobre, hierro, oro, plomo-zinc-cobre, plata y manganeso (Figura 2). Se reconoce la distribución espacial de estas, paralela a la Cordillera de los Andes, siendo la de cobre la más extensa, desde la frontera con Perú hasta la ciudad de Linares. También se reconoce el origen magmático-hidrotermal de los yacimientos de cobre, asociados principalmente a rocas intrusivas de composición granítica a diorítica⁴, que en ese entonces se consideraban del Jurásico a Cretácico tardío. Stoll (1965), por su parte, distinguió en Chile la “Faja Cuprífera Chilena”, polimetálica pero con predominancia de cobre.

⁴ Rocas formadas a partir de magmas con contenido de sílice (SiO₂) alto a medio.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

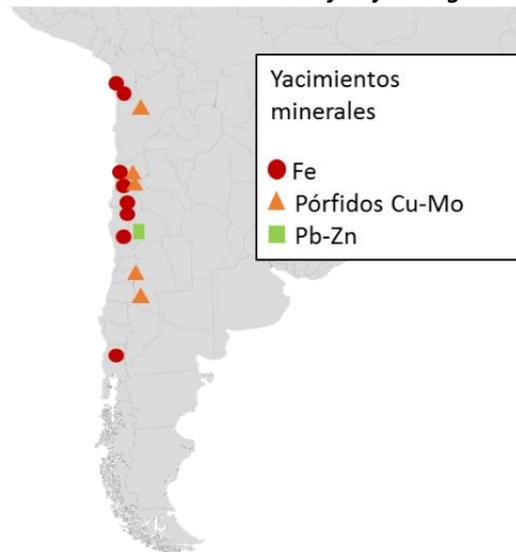
Figura 2. Esquema de las provincias metalogénicas identificadas en Chile durante los 60.



Fuente: Cochilco, modificado de Eriksen y Ruiz (1962).

También Petersen (1970) hizo notar la zonación de los yacimientos en franjas longitudinales en los Andes Centrales, reconociendo una franja de hierro adyacente a la costa, seguida de una franja cuprífera tierra adentro, una franja central de plomo-zinc y, finalmente, una franja oriental de estaño en Bolivia (Figura 3).

Figura 3. Zonación de yacimientos minerales en Chile en franjas longitudinales identificadas en los 70.



Fuente: Cochilco, modificado de Petersen (1970).



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Con la aparición de la teoría de tectónica de placas, se derribaron una serie de conceptos y modelos geotectónicos fundamentados bajo la teoría del geosinclinal⁵ y se buscaron nuevas explicaciones para la zonación de yacimientos definida por Petersen (1970), relacionándola a procesos de subducción, con la hipótesis de que la corteza oceánica, al subductarse, se funde y genera magmas calcoalcalinos⁶ que ascienden por la corteza continental, dando origen a las rocas ígneas⁷ y a los depósitos hidrotermales asociados. Sillitoe (1972) creó el modelo de *Geostill* que intenta explicar la zonación de los yacimientos, suponiendo que la extracción de metales en la fusión parcial de la corteza oceánica es selectiva, y va variando a medida que aumenta la temperatura y presión a mayores profundidades. Posteriormente este modelo fue considerado una sobre-simplificación de los procesos metalogénicos ya que, se observó que la “zonación tipo” no se mantiene en todos los sectores de los Andes y, además, nuevos estudio señalaron que la fuente generadora de magmas no era a placa oceánica subductada, sino que el manto sublitosférico⁸ (Brunham 1979,1981).

En los 70 se comenzaron a realizar dataciones radiométricas de K-Ar⁹ (Quirt 1972) en las rocas ígneas de las diversas franjas que entregaron resultados que permitieron darle una distribución cronológica a las franjas metalogénicas de los Andes: las más antiguas en la costa (Jurásico) a más recientes hacia el interior del continente. Además se reconoce la importancia de los procesos supérgenos¹⁰ en los procesos de mineralización (Zentilli 1974).

Le siguieron una serie de trabajos que intentaban explicar la zonación de la mineralización andina durante los 80, variando las delimitaciones de las franjas y sus minerales. Sillitoe (1981) usó las edades de las rocas y otros datos adicionales y definió y delineó franjas de pórfidos cupríferos del Cretácico Inferior, Paleoceno a Eoceno Inferior, Eoceno Medio a Oligoceno Inferior y Mioceno a Plioceno Inferior. Estas coinciden en edad con otros depósitos en Perú y más dataciones demostraron que los depósitos de los Andes se formaron en épocas metalogénicas breves, discretas, asociadas a cada faja. El trabajo de Sillitoe (1988) es el primero que plantea la delimitación de franjas consideradas hasta la actualidad (Figura 4).

Tras una intensa serie de mapeos geológicos, investigaciones, dataciones radiométricas y nuevos hallazgos de yacimientos, durante los 90 y la primera década del siglo XXI (eg. Sillitoe, 1990, 1991; Mpodozis y otros, 1995; Makshev, 2001; Camus, 2003; Deckart y otros, 2005; Richards 2003; Makshev y otros, 2007; Sillitoe, 2008; entre otros) el modelo de franjas se ha ido refinando y

⁵ Concepto obsoleto que intentaba explicar la formación de montañas.

⁶ Magmas con alto contenido de sílice (Si₂O) y de álcalis (Na₂O y K₂O), característicos en la generación de pórfidos cupríferos.

⁷ Rocas originadas a partir de la solidificación de un magma.

⁸ La litosfera es la capa más externa de la tierra, es rígida y está constituida por la corteza y la parte más externa del manto. El manto sublitosférico corresponde a la porción de manto bajo la litosfera, de carácter viscoso, sobre la cual “flota” la litosfera.

⁹ Técnica radiométrica para obtener las edades a las que se forman ciertos minerales en las rocas.

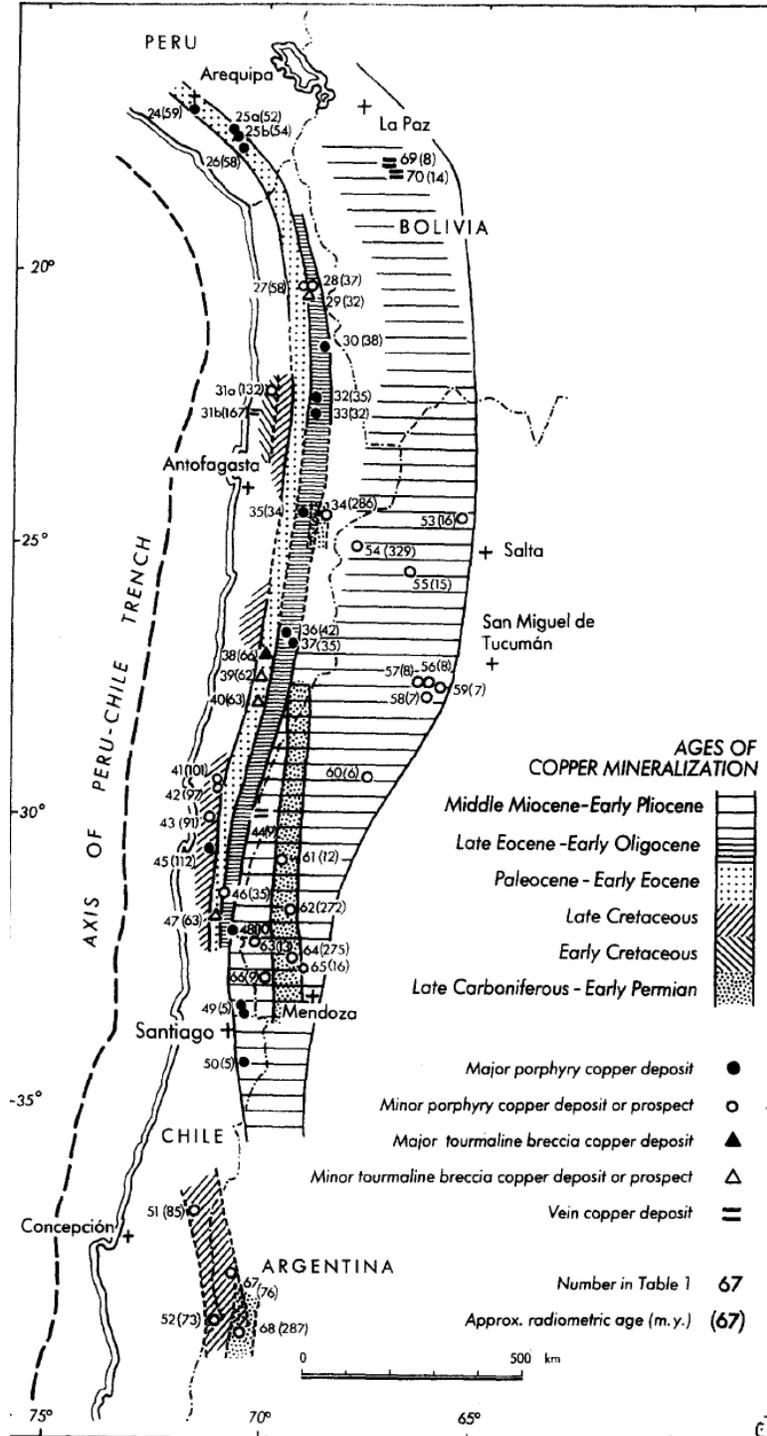
¹⁰ Procesos de meteorización de las rocas debido a circulación descendente de aguas superficiales (oxidación, hidratación, lixiviación).



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

acotando en temporalidad, distribución espacial y también en los tipos de yacimientos y minerales presentes en ellas.

Figura 4. Mapa con principales yacimientos de cobre y edades de las intrusiones relacionadas a estos depósitos.



Fuente: Sillitoe (1988).



2.1.3. Modelo actual de Franjas Metalogénicas

Después de más de 50 años de exploraciones e investigación asociada a la Metalogénesis Andina se llegó a la siguiente delineación de franjas metalogénicas de mayor importancia económica en el centro-norte de Chile: Franja Jurásico, Franja Cretácico temprano, Franja Paleoceno- Eoceno temprano, Franja Eoceno tardío- Oligoceno temprano, Franja Mioceno temprano a medio, Franja Mioceno tardío-Plioceno temprano (Maksaev y otros, 2007; Ver Figura 5).

2.1.3.1 Jurásico

Los yacimientos de esta franja se ubican en la porción más occidental de la Cordillera de la Costa y corresponden principalmente a yacimientos estratoligados de cobre hospedados en rocas volcánicas de edades Jurásicas como la Formación La Negra (Kojima y otros, 2002). Entre ellos destacan por su volumen y contenido de cobre el depósito Mantos Blancos y el Distrito Michilla, ambos de tipo estratoligado (ver Anexo 1.1).

2.1.3.2 Cretácico temprano

Esta franja metalogénica se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa entre los 22° y 34° de latitud sur y presenta un variado conjunto de depósitos metalíferos, entre ellos pórfidos cupríferos, depósitos de óxido de Fe-Cu-Au (IOCG's), depósitos de óxido de Fe-apatito y depósitos estratoligados (Maksaev y otros, 2007). Las edades de la génesis de los depósitos están entre los 132 y 97 Ma¹¹.

Los yacimientos más importantes asociados a este cinturón metalogénico de mayor importancia económica son: Andacollo, el más importante económicamente de esta franja, de tipo "híbrido" con características de pórfido cuprífero con transición a epitermal, Candelaria y Mantoverde de tipo IOCG y El Soldado, del grupo de los estratoligados (ver Anexo 1.2). Otros yacimientos reconocidos pertenecientes a esta franja metalogénica son: El Algarrobo, de grupo de los depósitos de óxidos de Fe-apatito, Lo Aguirre; estratoligado y Punta del Cobre; IOCG.

2.1.3.3 Paleoceno- Eoceno temprano

La franja metalogénica del Paleoceno-Eoceno temprano se extiende, en Chile, desde el extremo norte hasta la altura de Vallenar (29°30'S), ocupando la porción central del país (Depresión Central y Precordillera). La continuación de esta franja hacia el norte, contiene los depósitos de mayor importancia económica en Perú (Cerro Verde-Santa Rosa, Cuajone, Quellaveco y Toquepala). La preservación de estos cuerpos se debe a la baja tasa de denudación¹² en el desierto de Atacama durante el Cenozoico que impidió su erosión.

¹¹ Millones de años.

¹² Proceso por el cual cierto volumen de roca a cierta profundidad queda expuesto en superficie debido a la meteorización y erosión de los volúmenes de roca ubicados encima de este.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Los depósitos metalíferos que presenta esta franja en Chile corresponden principalmente a pórfidos de Cu-Mo, los más importantes son los yacimientos del Distrito Centinela, el depósito Spence y Sierra Gorda (ver Anexo 1.3). Otros pórfidos de Cu-Mo destacados en esta franja son Relincho, Lomas Bayas y Cerro Colorado.

Además, asociados a este periodo geológico y franja metalogénica, existen depósitos epitermales de metales preciosos como El Peñón (epitermal de baja sulfuración) y Guanaco (epitermal de alta sulfuración) con mineralización en vetas con alto contenido de oro y, por otra parte, El Inca, Cachinal, y Cerro Bayo con vetas ricas en plata.

2.1.3.4 Eoceno tardío-Oligoceno temprano

Esta franja se extiende por 1400 km desde el extremo norte del país hasta aproximadamente la localidad de Combarbalá (31° de latitud sur), a lo largo de la Cordillera de Domeyko. Según Camus (2002), esta zona contiene la mayor concentración de cobre del mundo, con al menos 220 Mt de cobre considerando los recursos, reservas y la producción. Es el cinturón de pórfidos de Cu-Mo de mayor importancia económica en Chile y contiene los depósitos de cobre más grandes conocidos en el mundo (Chuquicamata y Escondida).

Su característica geológica principal es la relación espacial con la el Sistema de falla Domeyko, los yacimientos ocurren a lo largo de las fallas maestras de este sistema (orientación N-S) y en fallas secundarias de orientación NW (eg. Sillitoe, 1981; Makshev y otros, 2007), Esta relación genética ha sido utilizada para la exploración de nuevos yacimientos.

Los depósitos más importantes son La Escondida, Chuquicamata y Collahuasi (ver Anexo 1.4). Otros yacimientos asociados a esta franja metalogénica y de gran importancia económica para Chile son El Abra, Gaby, Radomiro Tomic, El Salvador y Zaldívar.

2.1.3.5 Mioceno temprano a medio

La Franja Metalogénica del Mioceno, que incluye a las conocidas franjas de Maricunga y de El Indio-Pascua, se ubica en la Cordillera de los Andes, entre los 27° y 30° de latitud sur, en la parte más oriental del territorio chileno. Se caracteriza por presentar depósitos auríferos, predominantemente de tipo epitermal de alta sulfuración, con mineralización en vetas controladas por fallas, mineralización en brechas o diseminada. También se han encontrado yacimientos de tipo pórfido ricos en oro, pero no se han explotado de manera continua porque se trata de yacimientos de alto tonelaje pero baja ley.

Los más importantes son los depósitos epitermales El Indio y Pascua-Lama y el pórfido aurífero Cerro Casale. Otros cuerpos mineralizados contenidos en esta franja son los depósitos epitermales La Coipa, Caspiche, Pimentón en Chile y Veladero en Argentina, y el pórfido aurífero Lobo-Marte.

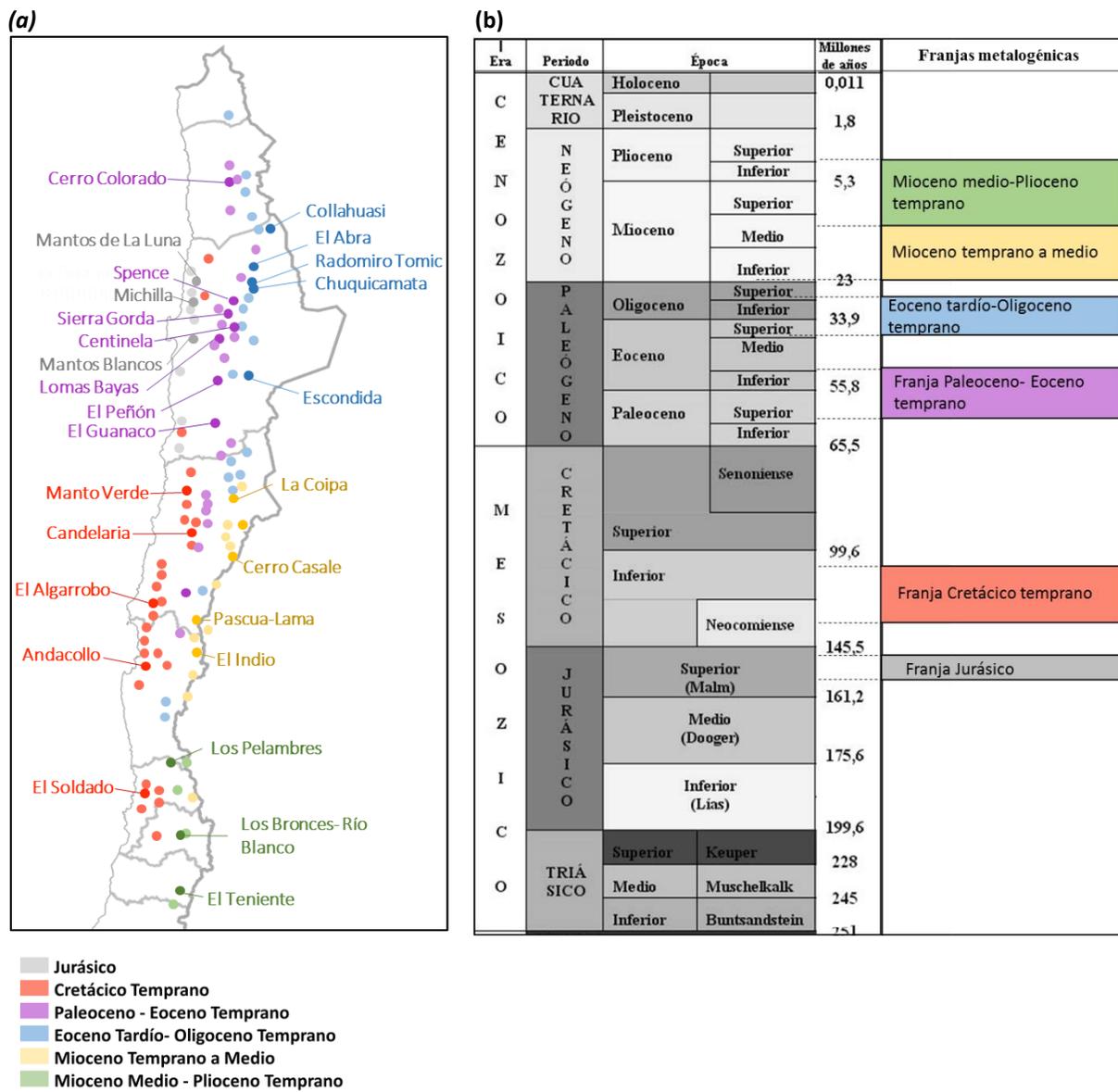


Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

2.1.3.6 Mioceno tardío- Plioceno temprano

Esta franja metalogénica se ubica en los Andes de Chile central, entre 32° y 34° de latitud sur, en la parte más oriental del territorio, cercano a la frontera con Argentina. Es el segundo cinturón metalogénico más importante del país. Presenta pórfidos de Cu-Mo de clase mundial como los son El Teniente, Los Bronces-Río Blanco, Los Pelambres en Chile y El Pachón en Argentina. Primero se formó el depósito Los Pelambres entre 13 y 10 Ma (Bertens y otros, 2003) y posteriormente los depósitos El Teniente y Río Blanco-Los Bronces entre 6,46 y 4,37 Ma (Deckart y otros, 2005; (Maksaev y otros, 2004).

Figura 5. (a) Mapa del centro-norte de Chile mostrando los yacimientos asociados a cada franja metalogénica y (b) Escala de tiempo geológica mostrando el periodo de generación los yacimientos asociados a cada franja.



Fuente: Cochilco, basado en Maksaev y otros (2007).

2.2. Minería de cobre y oro en el norte de Chile previo al año 2000

Periodo pre-hispánico

La minería de cobre en territorio chileno tuvo lugar desde, al menos, 500 a.c. en el norte del país, donde pueblos nativos extraían cobre nativo o minerales ricos en cobre. También los Incas, que dominaban el norte del territorio, extraían oro de depósitos de placeres (Maksaev y otros, 2007).

Periodo colonial

Durante la época colonial (1541 a 1810) se extrajeron entre 80.000 a 85.000 toneladas de oro y se explotó cobre nativo u óxidos de cobre de alta ley, sin embargo, en ese entonces el cobre era un metal de relativamente bajo valor y los españoles de la época concentraban sus esfuerzos en encontrar yacimientos de oro y plata y la actividad minera se enfocaba en la explotación de estos metales. La extracción de oro durante el siglo XVI fue exclusivamente en depósitos de placeres, donde los españoles utilizaban mano de obra de indígenas y producían 1 a 2 toneladas de oro por año. Durante el siglo XVII la explotación minera fue casi nula, debido al agotamiento de los depósitos de placeres de oro y a constantes enfrentamientos entre españoles y mapuches. En el siglo XVIII se reanudó la minería y comenzó la explotación de oro en depósitos en roca (Cuadra y Dunkerley 1991).

Siglo XIX

Durante el siglo XIX, se descubrieron una serie de yacimientos tipo bonanza¹³ de plata (e.g. Cachinal de la Sierra en 1822 y Arqueros en 1825, Chañarcillo en 1832; Figura 6) y, una vez alcanzada la estabilidad política después de la independencia, se activó la minería y se explotaron depósitos de tipo placer y de roca dura, extrayendo tanto cobre como metales preciosos. La producción de oro disminuyó debido a la falta de hallazgos de nuevos yacimientos, mientras que la de plata aumentó, llegando incluso a posicionar a Chile como uno de los mayores productores de plata del mundo (Cuadra y Dunkerley 1991).

Durante este siglo se explotaron vetas de óxidos de cobre y sulfuros supérgenos de cobre (covelina y calcosina) con leyes mayores a 6-8% de cobre en las regiones de Atacama y Coquimbo. Los principales distritos explotados fueron Carrizal Alto, Dulcinea, La Higuera, Andacollo, Brillador y Tamaya (Figura 6). Si bien desde la segunda mitad del siglo ya se sabía que había mineralización importante en los sectores de El Teniente y Chuquicamata, estos aún no eran económicamente explotables y no existía la tecnología para hacerlo (Maksaev y otros, 2007).

¹³ Depósitos de metales preciosos de alta ley.



Figura 6. Ubicación aproximada de las minas de plata y de cobre explotadas en Chile durante el siglo XIX.



Siglo XX

La alta demanda mundial de cobre para aplicaciones eléctricas impulsó el desarrollo de tecnologías que permitieron explotar los pórfidos cupríferos de baja ley y alto tonelaje presentes en Chile. Es por esto que a comienzos del siglo XX comenzaron a explotarse a gran escala las minas El Teniente, Chuquicamata, Los Bronces (Ex Disputada) y Potrerillos.

Desde entonces se han descubierto y explotado pórfidos cupríferos de clase mundial (e.g. El Salvador, El Abra, Zaldívar), que han permitido a Chile posicionarse como el primer productor de cobre mundial desde el año 1982 hasta la actualidad (datos Cochilco).

El *boom de los 90*, dio inicio a la explotación de grandes minas como de La Escondida en 1990, Quebrada Blanca y Cerro Colorado en 1994, Zaldívar el 1995, Radomiro Tomic, El Abra y Andacollo en 1996, Ujina y Lomas Bayas en 1998 y Los Pelambres en 1999. Este *boom* minero también incentivó un fuerte componente de exploración durante los 90, con exitosos descubrimientos como Escondida Norte, Mina Ministro Hales, Spence, Esperanza, Relincho, entre otros (Figura 7).

Respecto a la producción de metales preciosos durante el siglo XX, estuvo reducida a la extracción de oro como subproducto de la explotación de los pórfidos cupríferos hasta el descubrimiento, en 1975, y puesta en marcha de la mina, en 1979, del yacimiento epitermal El Indio, seguido de una serie de hallazgos de depósitos de metales preciosos (Figura 7). Entre los más relevantes figuran El

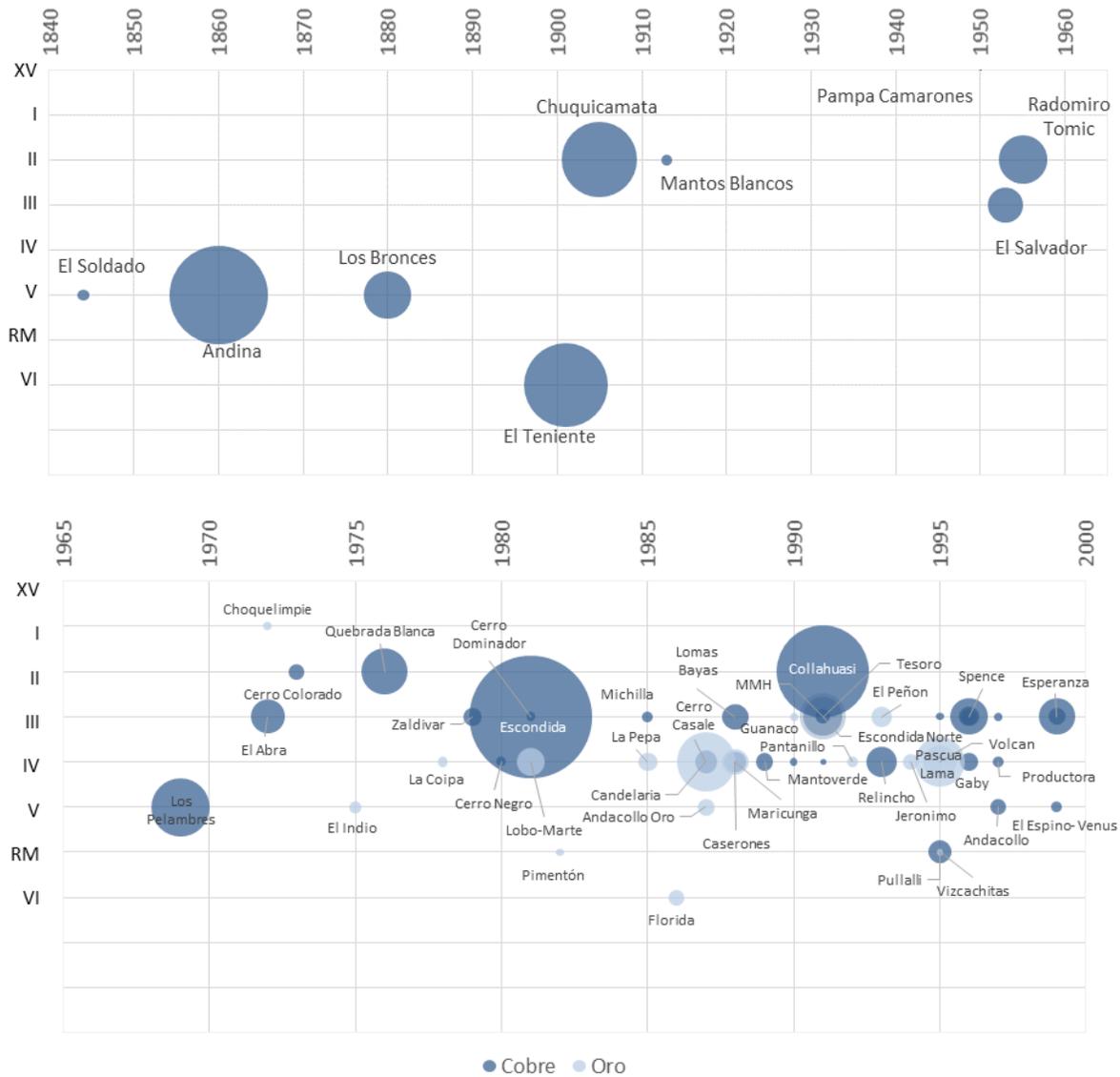


Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Peñón, Jerónimo y Florida con altas leyes de oro y Pascua Lama y Cerro Casale con alto tonelaje y baja ley. La producción de oro aumentó significativamente los años consiguientes, desde aproximadamente 4 t/año en los 70 hasta alcanzar un peak de 54,1 t/año el 2000. Desde entonces la producción de oro ha disminuido, variando entre 38 y 51 t/año (Maksaev y otros 2007).

En la década de los 80 el promedio de hallazgos de yacimientos significativos por año de cobre fue de 0,8 y de oro 0,7. En los 90, con *boom* de la minería de cobre, el promedio de hallazgos de yacimientos de cobre al año aumentó a 2 y el de oro se mantuvo.

Figura 7. Año aproximado de descubrimientos de los principales yacimientos de cobre y oro en el centro-norte de Chile por región.



Nota: El tamaño de los marcadores corresponde al contenido relativo de cobre u oro en cada depósito.

Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.



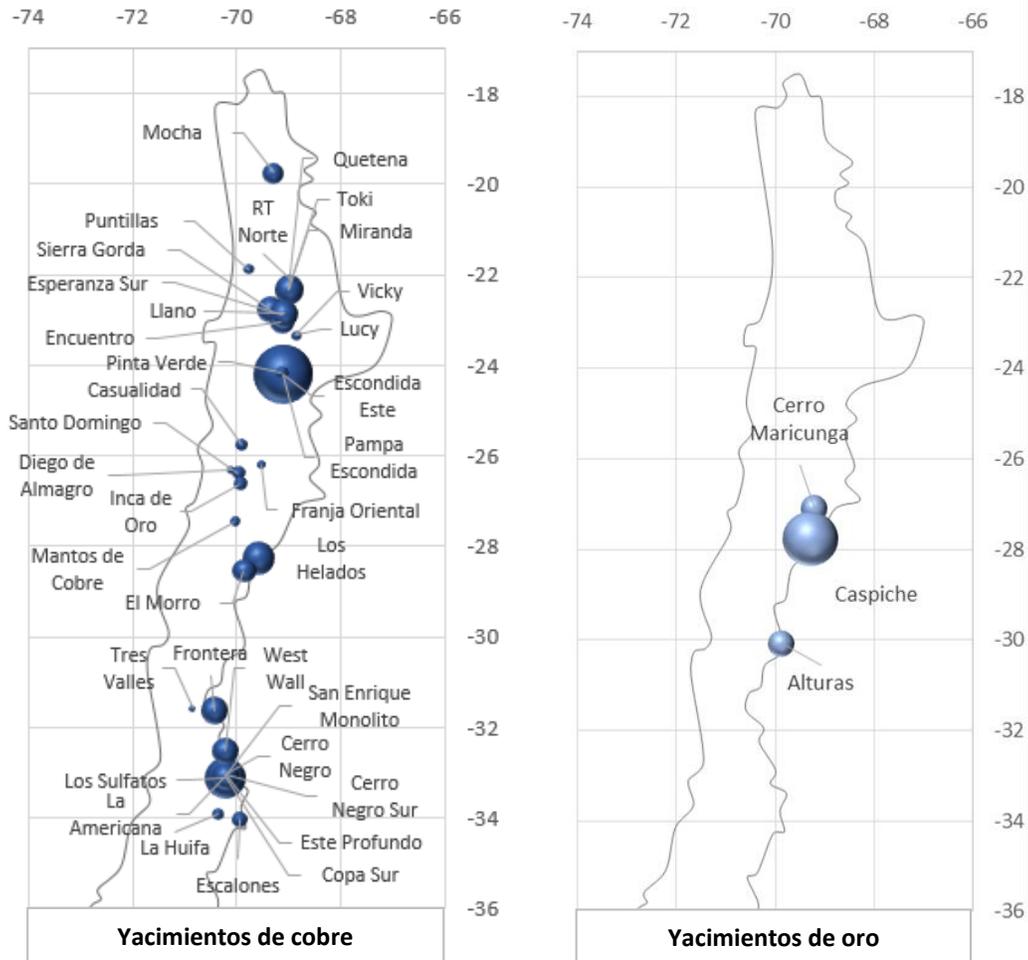
3. Resultados de exploración minera en Chile (2000-2015)

Entre los años 2000 y 2015, se han descubierto al menos 35 yacimientos con cobre como mineral primario y tres yacimientos de oro en el centro-norte de Chile (considerando solamente los yacimientos que ya tienen una estimación de recursos y que sus contenidos de cobre y oro son de al menos 200.000 t de cobre o 400.000 oz de oro), incrementando en más de 208,6 Mt de cobre y 34,3 Moz de oro a los recursos y reservas anteriormente conocidos (ver ubicación en Figura 8).

Si bien ha aumentado el presupuesto de inversión en exploración, la cantidad, calidad y tamaño de los hallazgos no ha mejorado, si no que más bien, ha disminuido.

Con algunas excepciones como Sierra Gorda, Toki, Los Helados, la mayoría de los hallazgos de mayor tamaño se ha dado en exploración brownfield y corresponden más bien a extensiones de cuerpos mineralizados ya conocidos (e.g. Pampa Escondida y Escondida Este).

Figura 8. Mapa del norte de Chile con los yacimientos de cobre encontrados entre 2000 y 2015.



Nota: El tamaño de los marcadores corresponde al contenido relativo de cobre u oro en cada depósito.

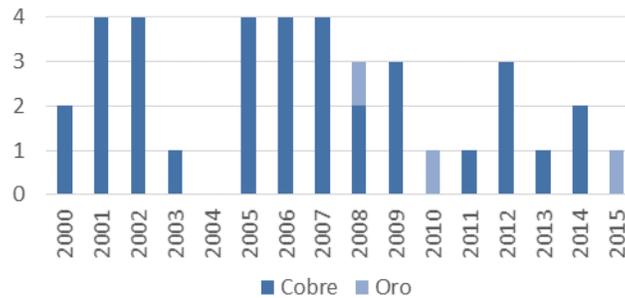
Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining y compañías mineras.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Entre los años 2000 y 2015, las tasas promedio de descubrimientos por año fueron de 2,19 yacimientos de cobre y 0,19 yacimientos de oro por año. Destacan los años 2001, 2002, 2005, 2006, exitosos en cuanto a los descubrimientos de cobre, con cuatro hallazgos cada año. A partir del 2010 se observa una tendencia a la disminución del número de hallazgos por año (Figura 9).

Figura 9. Hallazgos de yacimientos en Chile entre 2000 y 2015.



Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.

De los depósitos minerales de cobre considerados en estudio (Figura 10 y Figura 11), los de mayor tamaño son los yacimientos descubiertos por BHP Billiton, en las proximidades de la mina Escondida, estos son: Escondida Este, con al menos 36 Mt de cobre contenido, y Pampa Escondida, con más de 33,6 Mtm estos se caracterizan por tener alto tonelaje y leyes entre 0,4 y 0,45% de cobre.

Destaca también, entre los yacimientos recientemente descubiertos, el yacimiento Los Sulfatos, propiedad de Anglo American y otros (Codelco, Mitsubishi y Mitsui & Co) al sur de la mina Los Bronces, por su alto contenido de cobre (17,5 Mt) y también por su ley (1, 46% Cu).

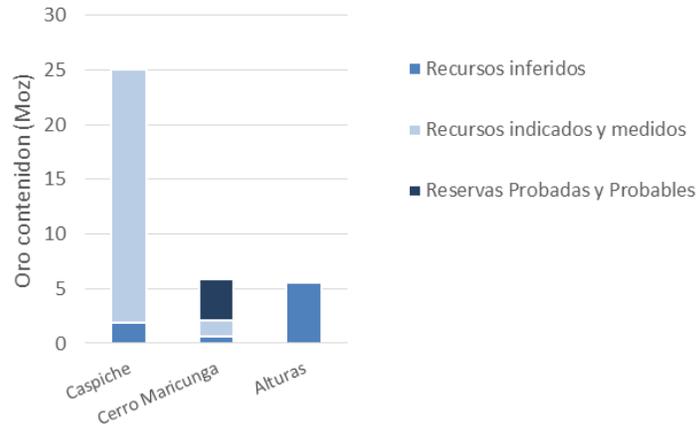
Les sigue el depósito Toki, parte del *Cluster Toqui* (conformado por los depósitos Toki, Quetena, Opache, Genoveva y Miranda en el distrito de Chuquicamata), propiedad de Codelco, con 12,3 Mt de cobre contenido y leyes de 0,36% Cu.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Respecto a los yacimientos de oro (Figura 12), el con mayor contenido del metal en sus recursos y reservas es Caspiche con 25 Moz de oro, seguido por el yacimiento Cerro Maricunga (5,8 Moz) y el proyecto Alturas (5,5 Moz).

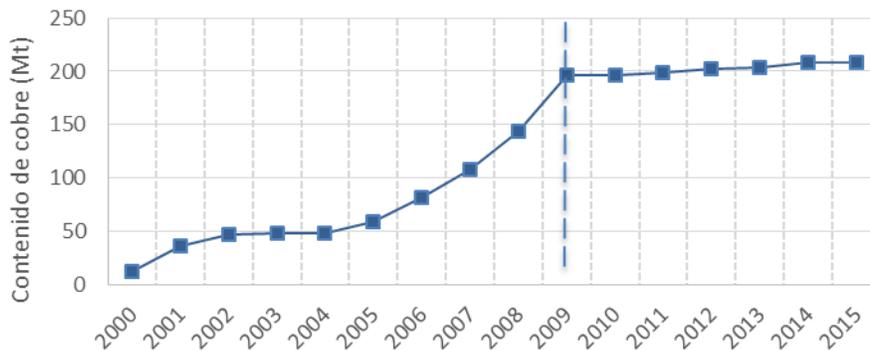
Figura 12. Oro contenido en recursos y reservas en los 3 yacimientos de oro estudiados.



Fuente: Cochilco basado en SNL Metals & Mining e información pública de compañías.

Como se mencionó anteriormente, en los últimos 16 años, los depósitos de cobre descubiertos en Chile han incrementado los recursos y reservas en más de 208,6 Mt de cobre. El 94% de este valor se adicionó antes del año 2010 (Figura 13), desde este año en adelante no ha habido hallazgos que aumenten significativamente el total de recursos y reservas del país.

Figura 13. Cobre contenido en recursos y reservas acumulados (periodo 2000-2015).



Fuente: Cochilco basado en SNL Metals & Mining.



3.1. Relación con la inversión en exploración

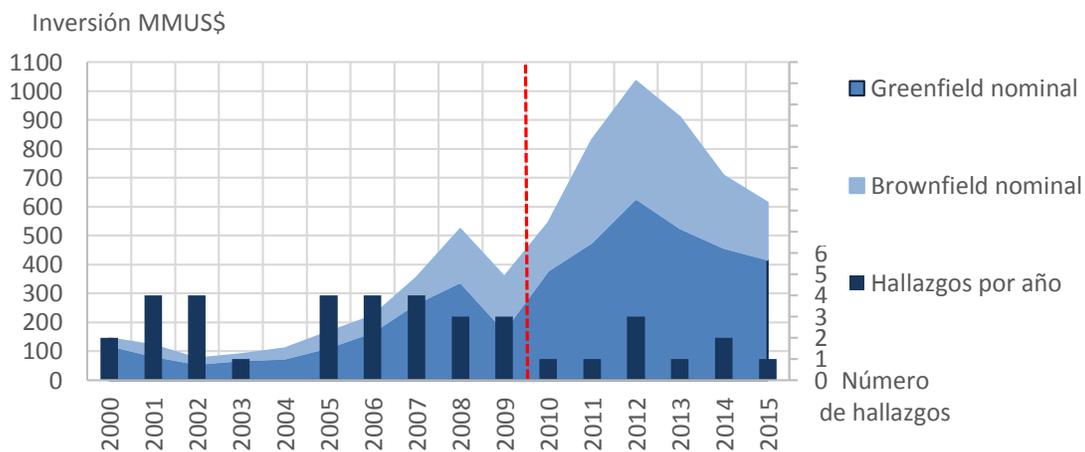
La inversión en exploración por año en Chile, entregada por SNL Metals & Mining, se clasifica según su tipo y etapa, esta puede ser tipo *mine site* o “Mina”, para exploraciones brownfield y “Básica” o “Avanzada” para exploraciones greenfield.

Se puede ver que entre los años 2000 y 2012 la inversión total en exploración aumentó más de 7 veces (Figura 14), de MUS\$ 145 en el año 2000 (MUS\$ 228 en valor real¹⁴) hasta MUS\$ 1.035 en 2012 (MUS\$ 1.106 en valor real) y, desde entonces, ha disminuido hasta poco más de la mitad, con US\$ 615 millones de inversión el 2015. A pesar del aumento en el presupuesto de exploraciones, el éxito de las exploraciones, que fue muy significativo entre los años 2000 a 2010 con el hallazgo de grandes yacimientos como Toki (2000), Esperanza Sur (2001), Quetena (2002), Los Sulfatos (2007), Pampa Escondida (2008), Escondida Este y Los Helados (2009), no ha ido en aumento si no que ha tendido a disminuir desde el 2010 en adelante.

Un importante aumento de la inversión en exploración el año 2012 tuvo cierto éxito, con tres hallazgos de Codelco: Cerro Negro Sur, Copa Sur y RT Norte, sin embargo desde el 2013 en adelante disminuyó el presupuesto de exploraciones y también el número de hallazgos por año.

Si bien, a partir de los datos se observa un marcado aumento en la inversión en exploración, se debe considerar que la cantidad de compañías identificadas por SNL Metals & Mining con inversión en exploración en Chile fue menor durante la primera década del siglo XXI, con solo 40 compañías identificadas en el 2000, en contraste a las 77 compañías que figuran con presupuesto de inversión en exploración en Chile el 2015.

Figura 14. Inversión total y por tipo de exploración (Greenfield o Brownfield) por año y número de hallazgos de yacimientos de cobre u oro por año entre 2000 y 2015.



Fuente: Cochilco sobre datos de SNL Metals & Mining.

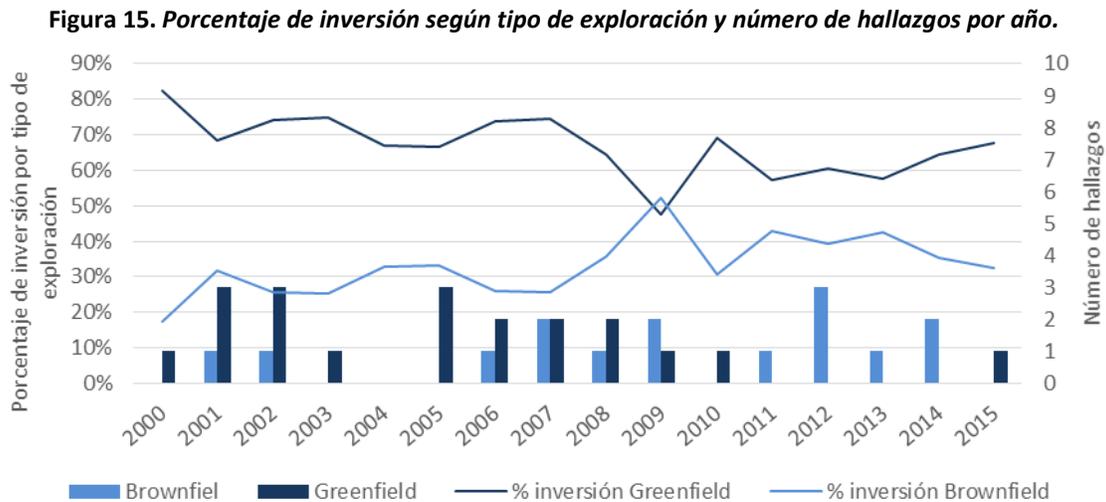
¹⁴ Valor real deflactado con *All commodity index* de EE.UU con base 2015.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Observando los datos (Figura 15), se puede ver que durante todo el periodo analizado, con excepción del año 2009, la mayor parte de la inversión fue destinada a exploración greenfield.

Entre 2000 y 2008 la mayor parte de los hallazgos fueron fruto de exploraciones greenfield. A partir del año 2009, para disminuir el riesgo asociado a exploraciones greenfield, se comenzó a invertir una mayor proporción del presupuesto en exploración *mine site*, resultando de esto, una mayor cantidad de hallazgos producto de exploración brownfield. Lo anterior demuestra la correlación positiva entre la distribución de la inversión en cada tipo de exploración y el éxito de las exploraciones.



Fuente: Cochilco sobre la base de SNL Metals & Mining e información proporcionada por compañías mineras.

3.2. Hallazgos por empresa

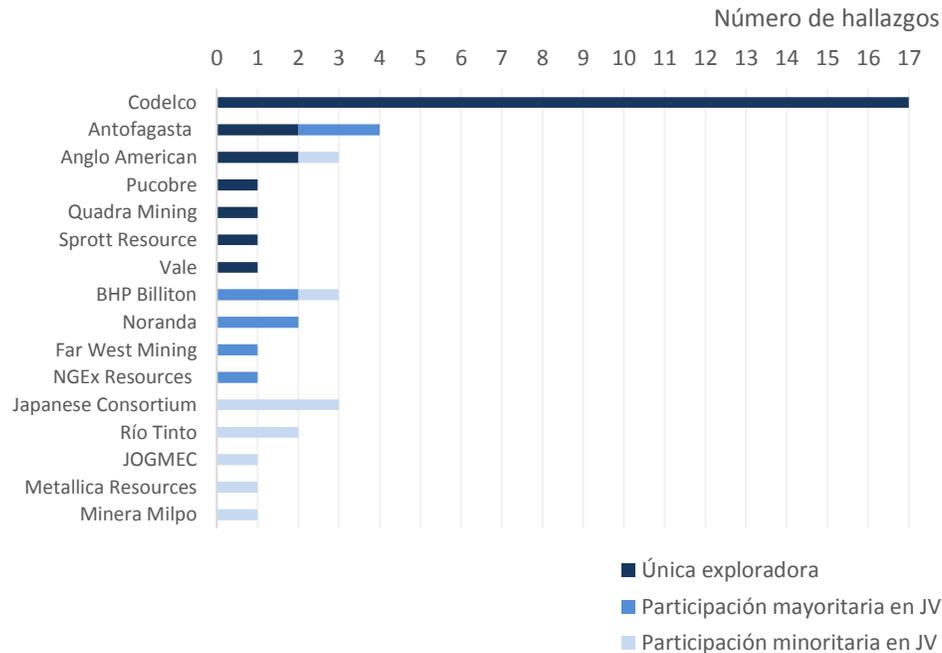
Revisando las compañías mineras y exploradoras que han descubiertos los yacimientos de cobre entre el 2000 y 2015 (Figura 16), es indiscutible ver que la estatal Codelco lidera con creces el número de éxitos (17 de los 35 yacimientos de cobre), además el contenido de cobre en los recursos y reservas de estos yacimientos corresponden al 25,2% del total analizado (208 Mt de cobre contenido).

En segundo lugar se encuentra Antofagasta plc. (Antofagasta Minerals) con dos hallazgos como explorador único y dos hallazgos en *joint venture* con participación mayoritaria y en tercer lugar, Anglo American con dos hallazgos como única empresa exploradora y uno en *joint venture* con participación minoritaria.

En cuanto a los yacimientos de oro, fueron descubiertos por tres compañías diferentes: Cerro Maricunga por Atacama Pacific Gold, Caspiche por Exeter Resources y Alturas por la canadiense Barrick.

Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Figura 16. Número de hallazgos por empresa, ya sea como explorador único, en joint venture con más empresas, con participación mayoritaria o minoritaria.



Fuente: Cochilco basado en SNL Metals & Mining.

3.3. Hallazgos por región

La II Región de Antofagasta, caracterizada por ser la región de mayor actividad minera del país, corresponde también a la región donde se localizan la mayor cantidad de yacimientos descubiertos. Corresponden a 15 nuevos yacimientos, de un total de 38 hallazgos identificados, todos ellos de cobre como mineral primario (Figura 17 y Figura 18). En esta región se encuentran los yacimientos más grandes encontrados: Escondida Este y Pampa Escondida.

En segundo lugar le sigue la III Región de Atacama, con siete yacimientos de cobre y dos de oro (Cerro Maricunga y Caspiche), y luego, la V Región de Valparaíso con siete yacimientos de cobre, entre ellos el antes mencionado Los Sulfatos.

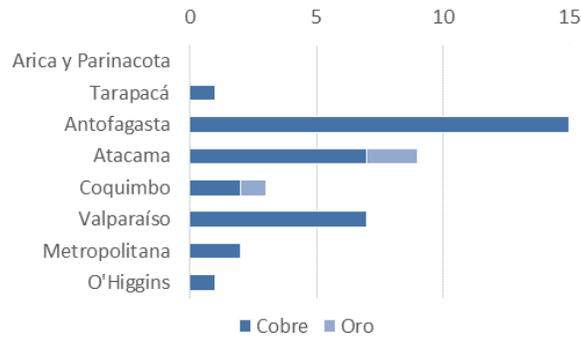
En las regiones IV y RM se descubrieron dos yacimientos de cobre en cada una y, en la IV Región, también un yacimiento de oro (Alturas, de Barrick Gold). Las regiones I y VI cuentan con 1 hallazgo de cobre cada una.

En la XV Región de Arica y Parinacota, que solo cuenta con dos proyectos mineros en curso (Pampa Camarones-Salamanqueja en estudios de factibilidad y el prospecto Choquelimpie de la Cia Minera Can Can SA, aún en etapa de estimación de recursos), no se hicieron nuevos hallazgos en el periodo analizado.



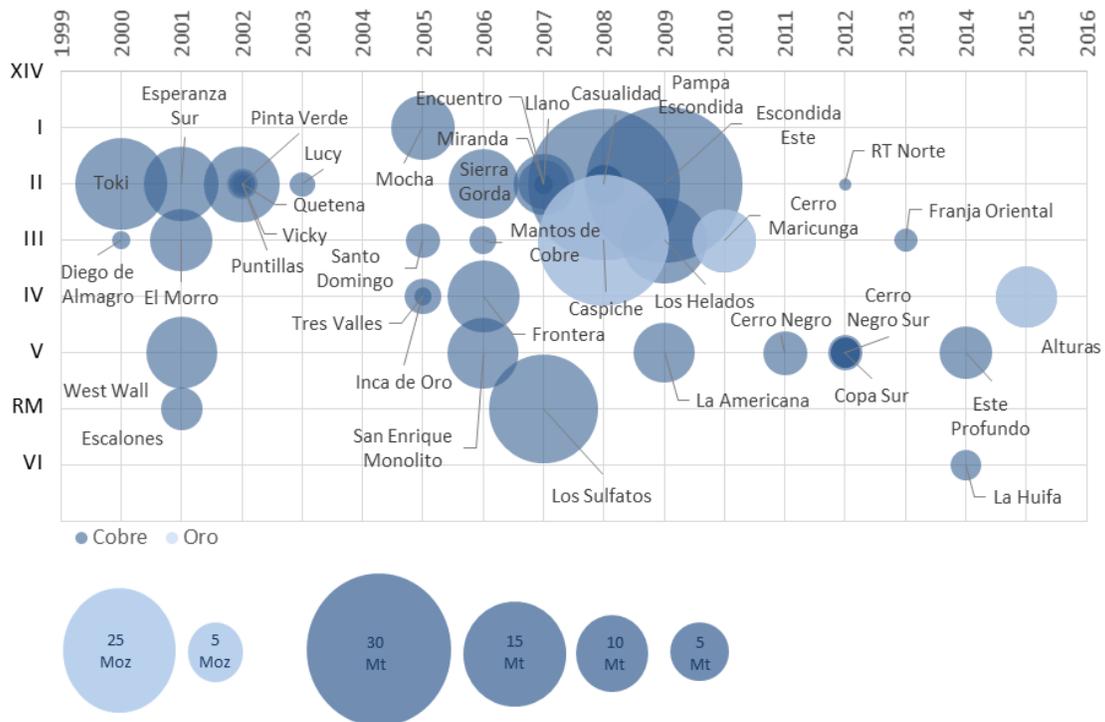
Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Figura 17. Descubrimientos de yacimientos de cobre y oro por región entre años 2000 y 2015.



Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.

Figura 18. Descubrimientos de yacimientos de cobre y oro por región y por año entre 2000 y 2015.



Nota: El tamaño de los marcadores indica el contenido de cobre u oro en los recursos y reservas de cada depósito.

Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining y documentos públicos de compañías mineras.



3.4. Hallazgos por tipo de yacimiento

Respecto a los tipos de yacimientos encontrados (ver Anexo 2), se tiene que 28 de los yacimientos de cobre son en de tipo pórfido Cu-Mo o Cu-Au o parte de sistemas relacionados a estos, tres de tipo IOCG, dos estratoligados, uno de tipo Skarn y otro de tipo exótico (Figura 19).

Destaca la alta cantidad de hallazgos que son extensiones de pórfido de Cu-Mo ya conocidos, por ejemplo La Escondida, con los nuevos Escondida Este, Pampa Escondida y Pinta Verde, y Rio Blanco-Los Bronces, con los yacimientos Los Sulfatos y San Enrique Monolito, al sur de la mina, y Cerro Negro, Cerro Negro Sur, La Americana y Este Profundo por la parte norte. También los yacimientos Esperanza sur y Encuentro en el Distrito Centinela y el yacimiento La Huifa en El Teniente.

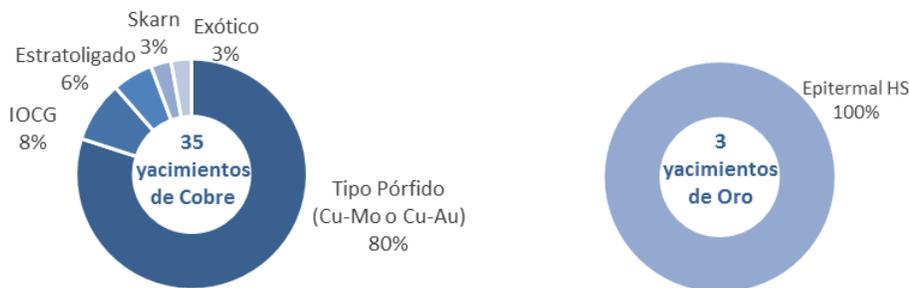
Además, el yacimiento Vicky, de tipo exótico, que tiene un origen relacionado a los procesos supérgenos que enriquecen al yacimiento Gaby.

El depósito tipo pórfido de Cu-Au más importante es el yacimiento El Morro, con 5,7 Mt de cobre contenido y 16,5 Moz de oro. En esta categoría también destaca el yacimiento Los Helados, con 10,6 Mt de cobre y 12,8 Moz de oro contenidos, según su estimación de recursos.

Además se encontraron tres yacimientos de cobre de tipo IOCG (Casualidad, Santo Domingo y Diego de Almagro), dos yacimientos estratoligados (Mina Mantos de Cobre y Tres Valles), y un depósito tipo Skarn (Escalones), todos estos en la Cordillera de la Costa y Depresión Central.

Respecto a los yacimientos de oro como mineral primario, corresponden en su totalidad a yacimientos epitermales de alta sulfuración.

Figura 19. Tipos de yacimientos encontrados entre 2000 y 2015 según su mineral primario.



Fuente: Cochilco basado en datos públicos de compañías mineras y publicaciones científicas.



3.5. Hallazgos según tipo de exploración

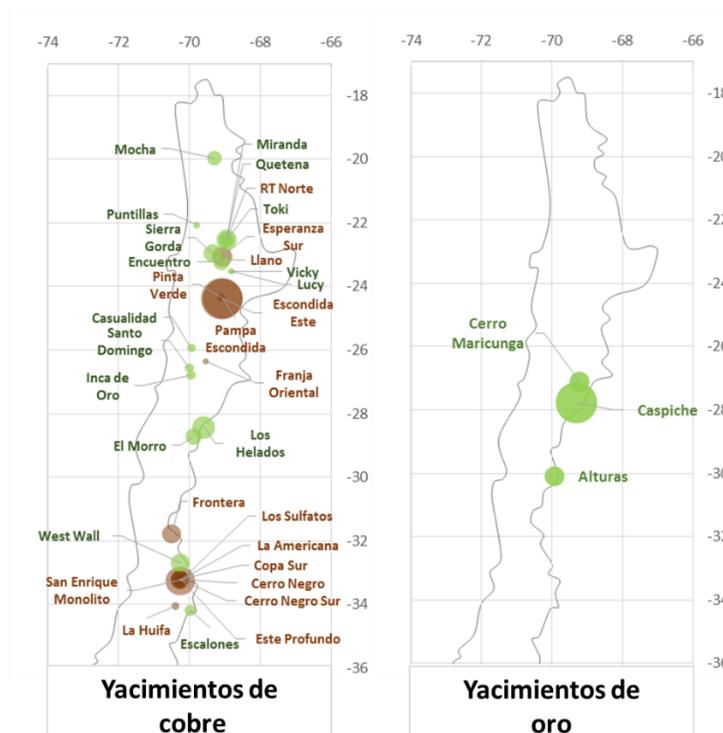
De los descubrimientos de yacimientos en el periodo entre 2000 y 2015, el 50% se encontró en campañas de exploración greenfield y un 42% por medio de exploraciones tipo brownfield. Existe un 8% del cual no se tiene información disponible. Es importante notar que la totalidad de los hallazgos de yacimientos de oro fueron en exploración a campo abierto, mientras que los de cobre fueron la mitad de tipo greenfield y la otra mitad tipo brownfield (Tabla 1 y Figura 20).

Tabla 1. Tipo de exploración asociada a cada hallazgo de cobre y oro entre 2000 y 2015.

Tipo de exploración	Cobre	Oro
Greenfield	16	3
Brownfield	16	
s/i	3	
Total	35	3

Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.

Figura 20. Ubicación y tamaño de yacimientos de cobre y oro encontrados entre 2000 y 2015 según su tipo de exploración greenfield (en verde) o brownfield (en marrón).



Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.



3.6. Profundidad de los hallazgos

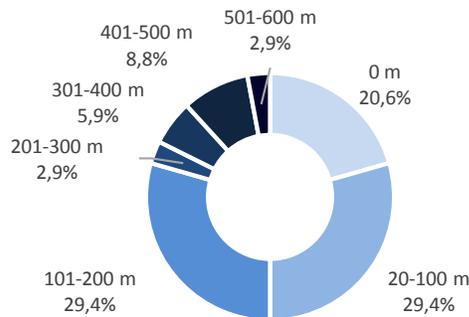
De los yacimientos que se obtuvo información de la profundidad a la que comienzan los volúmenes de roca con mineralización económica (Figura 21 y Figura 22), se observa que solo el 20,6 % tienen mineralización económica en superficie y que la mitad de estos cuerpos (49,9%) se encuentra a más de 100 m de profundidad y se extienden hasta 800-2000 m bajo la superficie. Incluso un 11,7 % de los yacimientos encontrados se encuentran a más de 400 m de distancia de la superficie.

También se puede ver que la profundidad de los cuerpos mineralizados encontrados entre el 2000 y 2008 no excedía los 200 m, con excepción del depósito Mina Mantos de Cobre, mientras que a partir del año 2009 los hallazgos de yacimientos de cobre comienzan a ser más profundos, hasta 500 m (Este Profundo, Cerro Negro y Cerro Negro Sur) e incluso hasta 600 m de profundidad en el depósito Copa Sur (Figura 22). El hallazgo de estos depósitos solo es posible gracias a la integración de herramientas, complementación de diferentes factores geológicos y geofísicos, aplicación de modelos ya conocidos y, sobre todo, la posibilidad de hacer perforaciones cada vez más profundas.

Varios de los estudios de los yacimientos indican que estos aún no han sido suficientemente estudiados en profundidad y están abiertos en profundidad, es decir, pueden tener altas leyes de cobre y oro hacia profundidades aún no exploradas.

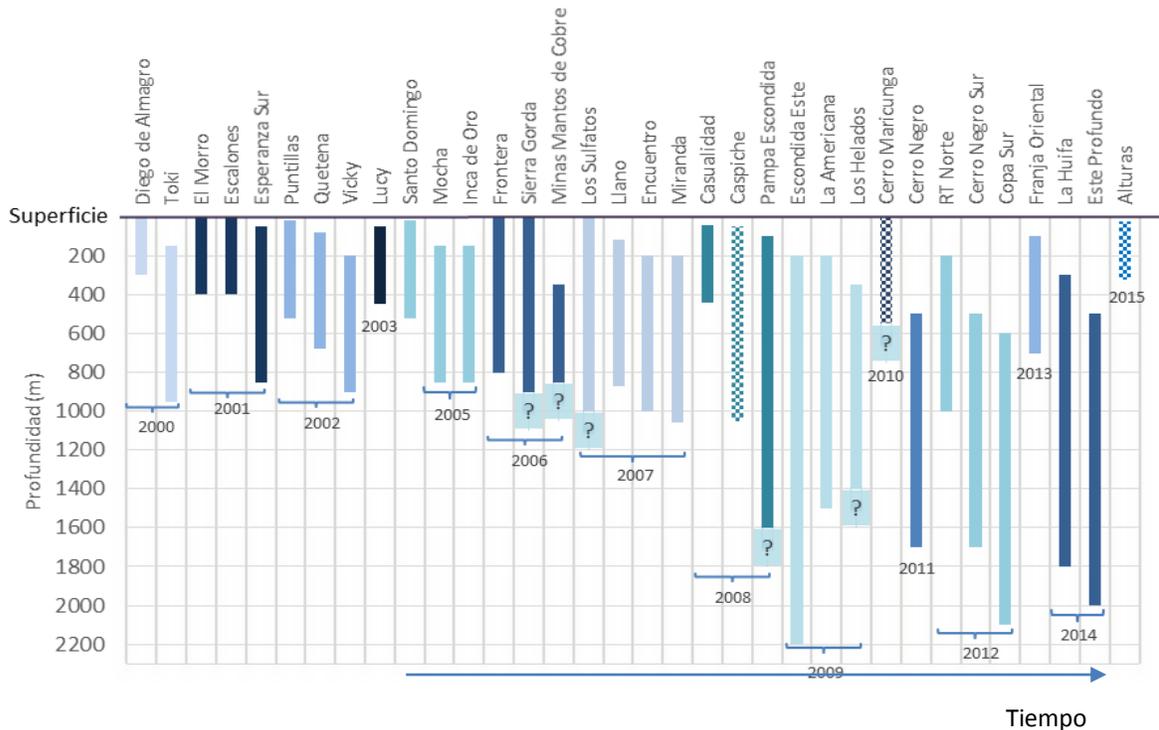
Los yacimientos de oro, por su parte, se encuentran todos a menos de 100 m de profundidad.

Figura 21. Distribución de la profundidad a la que se encuentran los cuerpos con mineralización económica.



Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.

Figura 22. Profundidad a la que se ubica la mineralización económica en los yacimientos encontrados y el año de descubrimiento.



Fuente: Cochilco basado en SNL Metals & Mining, publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.

3.7. Destino de los hallazgos

De los hallazgos logrados en este periodo, tres de ellos, todos de cobre, han llegado poner en marcha las operaciones: Mina Mantos de Cobre, de Sociedad Punta del Cobre; Tres Valles, de Vecchiola SA; y Sierra Gorda, de las compañías KGMH, Sumitomo y otros.

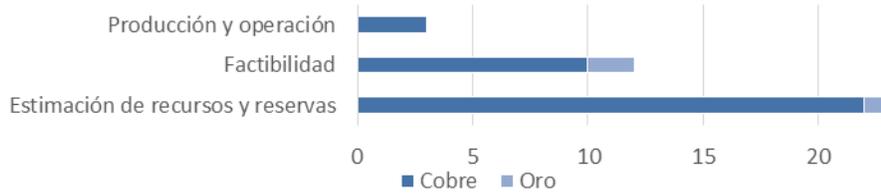
En tanto, diez yacimientos de cobre y dos de oro ya tienen estimación de recursos y reservas pero aún no entran en operación (etapa de prefactibilidad y factibilidad). Algunos de estos se encuentran tramitando derechos de aguas, permisos ambientales o bien a la espera de un alza en el precio de metales para reactivar los proyectos.

Por último, un grupo de 22 yacimientos de cobre y uno de oro aún se encuentran en etapa de estimación de recursos, delineando sus recursos y delimitando las reservas económicamente extraíbles (Figura 23).



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

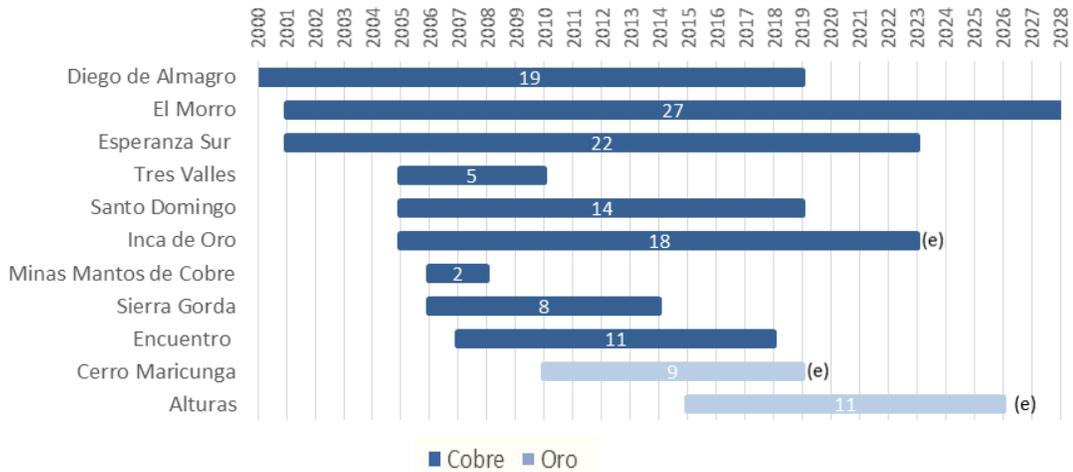
Figura 23. Estado de avance de los proyectos en nuevos hallazgos.



Fuente: Cochilco sobre la base de SNL Metals & Mining.

De los proyectos que fueron puestos en marcha o que ya tienen una fecha propuesta para el inicio de operaciones (solo 11 de los proyectos identificados, Figura 24), se observa que el promedio de años transcurridos entre el descubrimiento del yacimiento y la puesta en marcha de la mina es de 13,27 años (con un máximo 27 años y mínimo de 2¹⁵).

Figura 24. Años entre el descubrimiento de un yacimiento y la puesta en marcha de la mina para 11 proyectos. (e)



Fuente: Cochilco sobre la base de SNL Metals & Mining y Catastro de Proyectos Mineros de Cochilco.

15 El valor mínimo de dos años para el tramo de tiempo entre el descubrimiento de Minas Mantos de Cobre y su puesta en marcha, es excepcionalmente bajo, por lo que se piensa que puede estar subestimado y podría haber conocimiento previo de este yacimiento, no registrado en las fuentes utilizadas en este estudio (SNL Metals & Mining).



3.8. Hallazgos por franja metalogénica

De los 38 hallazgos identificados en este estudio, 35 de cobre y tres de oro, 36 de ellos se ubican dentro de las franjas metalogénicas definidas en el capítulo 2 (Figura 25).

Además dos de ellos se asocian a magmatismo del Cretácico tardío, los yacimientos de esta edad no fueron considerados como parte una de las franjas más importantes a nivel económico, sin embargo la literatura (Maksaev, 2001) describe la franja del Cretácico tardío como una franja que se extiende desde Copiapó a Rancagua, de menor importancia económica hasta el momento que se caracteriza por tener yacimientos en vetas polimetálicas epitermales y mesotermiales y brechas hidrotermales polimetálicas (Au-Cu, Au-Ag). Los nuevos yacimientos son: un depósito IOCG (Casualidad) y un pórfido cuprífero (Inca de Oro).

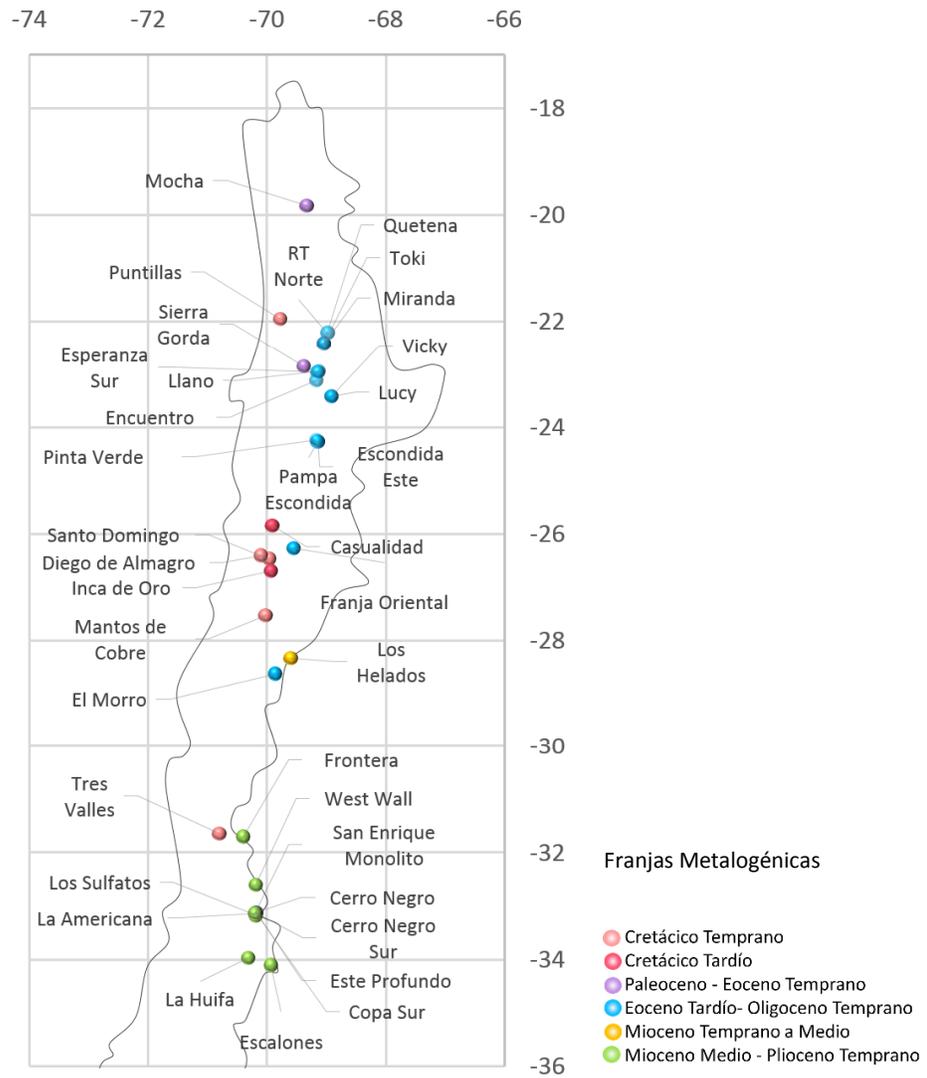
No se identificaron nuevos hallazgos asociados a la Franja del Jurásico.

La mayor cantidad de yacimientos de cobre se concentran en la Franja del Eoceno tardío-Oligoceno temprano con 14 depósitos minerales, 12 en la II Región de Antofagasta y 2 en la III Región de Atacama (Figura 26 a). Le sigue la franja del Mioceno medio –Plioceno temprano con 11 nuevos yacimientos de cobre, en su mayoría de tipo pórfidos cupríferos (con excepción del depósito tipo skarn Escalones), siete de ellos se ubican en la V Región de Valparaíso y los otros en las regiones IV, VI y Metropolitana. La totalidad de los yacimientos de oro se ubica en la franja del Mioceno temprano a medio (Figura 26 b), dos en la III Región y uno en la IV.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Figura 25. Distribución de los yacimientos de cobre según su franja metalogénica.

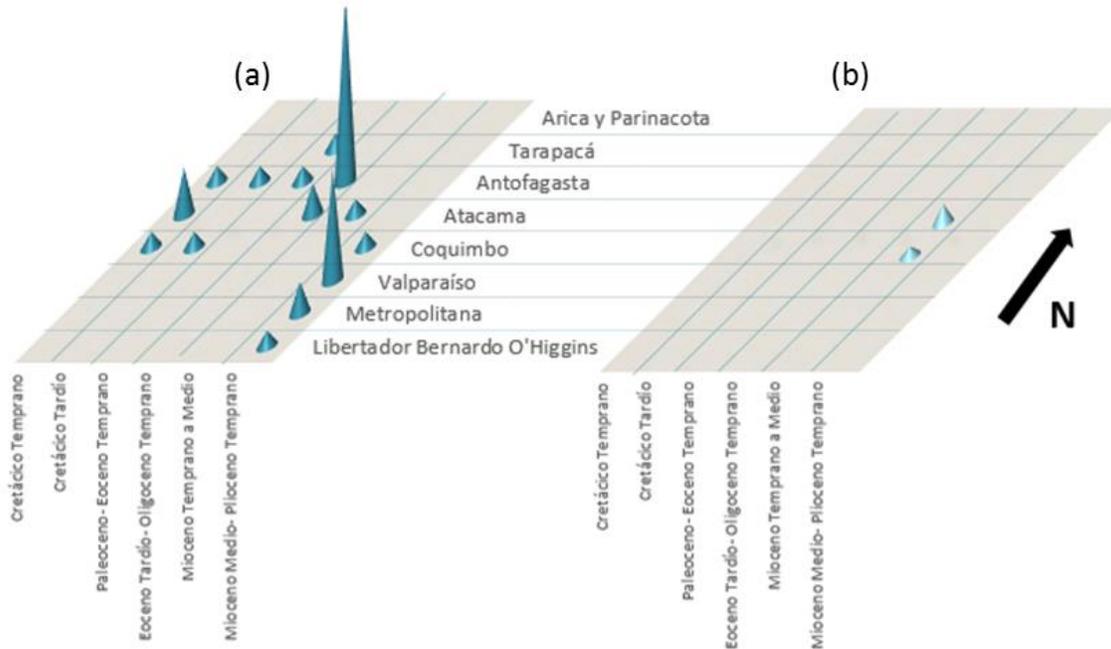


Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Figura 26. Distribución espacial de los yacimientos descubiertos entre 2000 y 2015, por región y por franja metalogénica para depósitos de (a) cobre y (b) oro (ver Anexo 1).



Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.

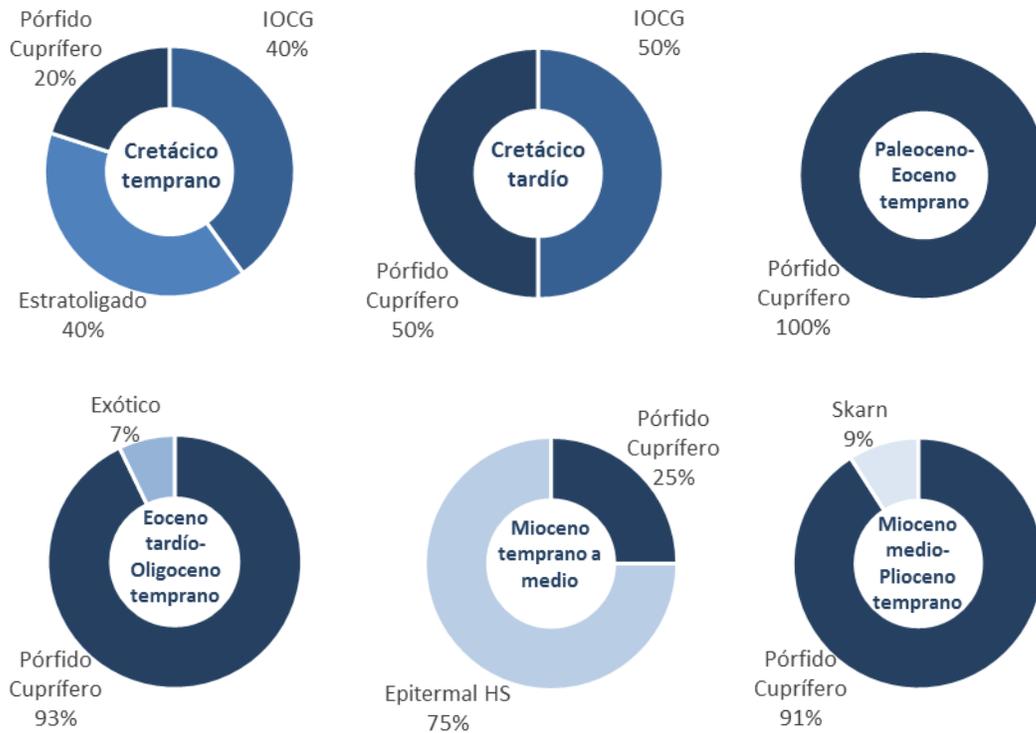
Respecto a los tipos de depósitos identificados en cada franja (Figura 27) se puede decir que, de los cinco yacimientos de la franja Cretácico temprano, dos son de tipo IOCG, dos estratoligados y un pórfido cuprífero. De los yacimientos de edad Cretácico tardío, uno es pórfido cuprífero y el otro IOCG. Por su parte, los dos hallazgos que forman parte de la franja del Paleoceno-Eoceno temprano corresponden a pórfidos. Los yacimientos de la franja Eoceno tardío-Eoceno temprano también corresponden, en su mayoría, a pórfidos cupríferos, excepto por el yacimiento Vicky, de tipo exótico (de todos modos con una génesis relacionada a los procesos supérgenos que enriquecen los pórfidos). La franja del Mioceno temprano a medio contiene los tres yacimientos de oro de tipo epitermal de alta sulfuración y un yacimiento de tipo pórfido cuprífero (Los Helados). Por último, en la franja del Mioceno tardío- Plioceno temprano, 10 de los 11 yacimientos corresponden a sistemas de pórfidos, mientras que uno de los yacimientos es de tipo Skarn (Escalones).

En cuanto a la profundidad de los yacimientos según su franja metalogénica, se aprecia que en todas las franjas analizadas, si bien tienen algunos yacimientos en superficie, la gran mayoría de ellos se encuentran en profundidad (Figura 28). La franja del Cretácico temprano tiene yacimientos en superficie hasta yacimientos a 350 m, en la franja del Cretácico tardío se encontraron yacimientos a 25 y a 150 m de profundidad, en la franja del Eoceno tardío a Oligoceno temprano los depósitos hallados están entre 0 y 200 m de profundidad, en la franja del Mioceno temprano a medio los yacimientos de oro están cerca de la superficie, entre 0 y 25 m, mientras que el de cobre se encontró a 350 m de profundidad, y, por último, los depósitos hallados en la franja del Mioceno medio a Plioceno temprano están entre 0 y 600 m de profundidad.



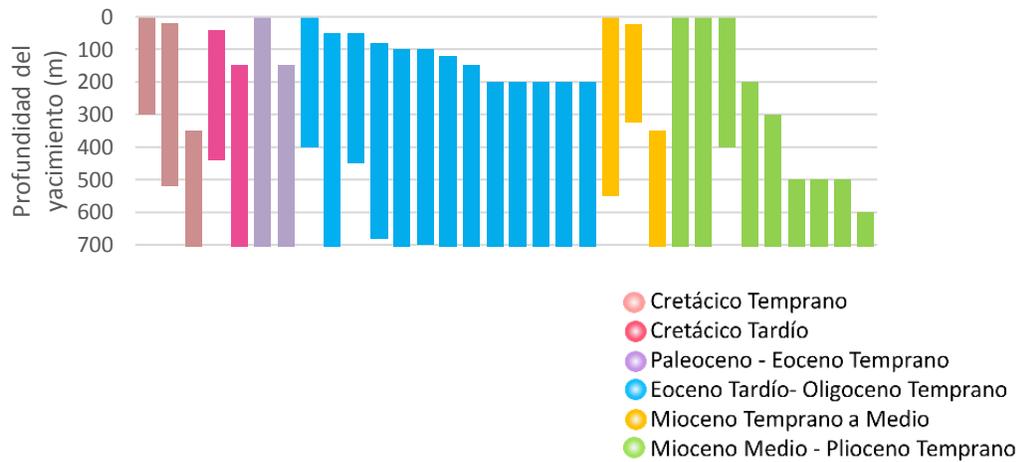
Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Figura 27. Distribución de los tipos de yacimientos de los hallazgos (2000-2015) en cada franja metalogénica.



Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.

Figura 28. Profundidad de los yacimientos según las franja metalogénica a la que se asocian.



Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.



3.9. Otros resultados

Existen resultado de exploraciones y de investigaciones académicas, que si bien aún no tienen yacimientos detectados o no tienen estimaciones de recursos, sugieren nuevos blancos de exploración asociadas al magmatismo de edad Mioceno.

Pórfidos del Mioceno al norte de Pelambres

Los pórfidos cupríferos gigantes del Mioceno (Los Pelambres, Rio Blanco-Los Bronces, El Teniente) se ubican en la zona central de Chile, siendo Los Pelambres el punto extremo norte conocido para los cuerpos mineralizados de este grupo, sin embargo antecedentes geológicos, geofísicos y geoquímicos, sugieren la existencia de sectores en la Cordillera de los Andes, al norte de Los Pelambres (específicamente entre 30,5°y 31°S), donde diversos factores geológicos favorables para la formación de pórfidos (como la presencia de intrusivos del Mioceno, lineamientos o canales de circulación de fluidos, zonas de importante alteración hidrotermal, el estado de preservación, entre otros) coinciden espacialmente en ciertos puntos definiendo nuevos blancos de exploración en esta franja (Diaz, 2015).

Depósitos epitermales de edad Mioceno extremo norte de Chile

Estudios recientes identificaron en el segmento andino de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá (18°-21°S), áreas con patrones geológicos similares a los depósitos epitermales de las franjas de Maricunga y El Indio (Franja Mioceno temprano a medio). Pese a no haber minerales de mena, ni contenidos importantes de metales en estos sectores, los antecedentes geológicos (presencia de rocas intrusivas porfíricas y volcánicas de composición intermedia y afinidad calcoalcalina, con alteración hidrotermal y edades entre 23,8 a 9,9 Ma) muestran que se repiten patrones geológicos favorables de periodos fértiles para la mineralización, lo que abre posibilidades de exploración en la zona (Cajal y Otros 2015)

Exploración profunda en franja Mioceno temprano a medio.

El descubrimiento del pórfido de Cu-Au Valeriano, propiedad de la compañía Hochschild Mining, asociado a la franja del Mioceno temprano a medio, si bien está en una zona con antecedentes de mineralización en superficie y se habían realizado algunas campañas de sondaje someras, no fue hasta la campaña de perforación entre 2010 y 2013, en la que se perforaron pozos de hasta 1.857 m de profundidad, que se descubrió el pórfido. El descubrimiento fue exitoso solamente por la perforación de sondajes profundos; ni la geofísica (IP en profundidad), ni la vectorización de sondajes someros permitieron pronosticar el éxito de esta campaña (Burgoa y otros, 2015).

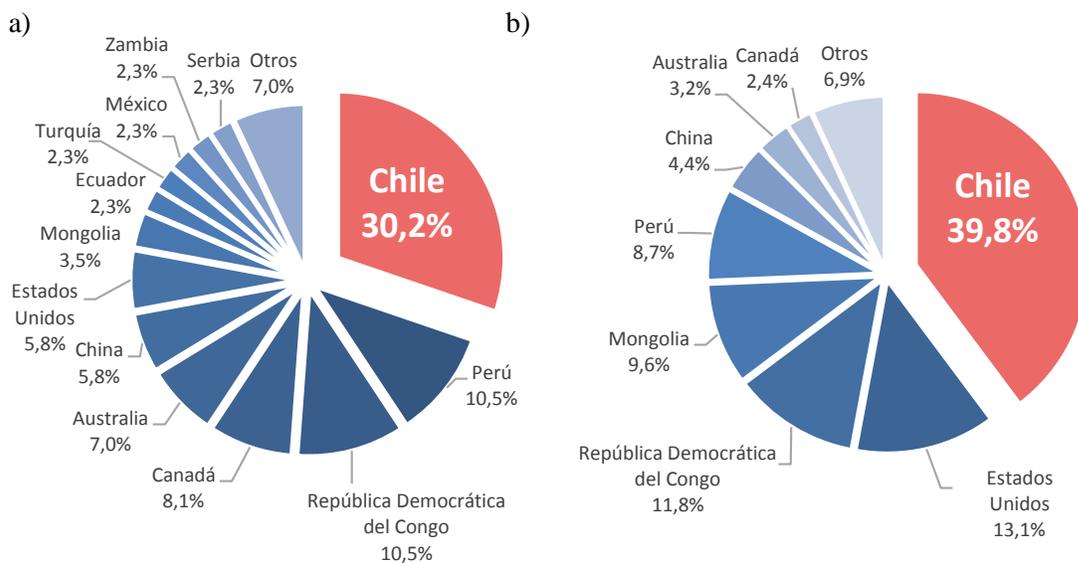


3.10. Contexto Global

Comparando la cantidad de hallazgos de grandes yacimientos de cobre entre los años 2000 y 2014 con otros países del mundo, según el reporte de SNL “Strategies For Copper Reserves Replacement”, Chile cuenta con el mayor número de descubrimientos (30,2% de los 101 depósitos considerados) seguido por Perú y la República Democrática del Congo ambos con un 10,5% de los descubrimientos (Figura 29a).

Considerando la suma del cobre contenido en los recursos y reservas de todos estos nuevos yacimientos (un total de 390 Mt), Chile también lidera con un 39,8%, le sigue Estados Unidos con un 13,1%, la República Democrática del Congo con 11,8%. De esto último se puede concluir que Chile no solo presenta un alto número de yacimientos sino que además se trata de yacimientos de gran relevancia y tamaño (Figura 29b).

Figura 29. Resultados de exploraciones mundiales de yacimientos de cobre entre 2000 y 2014 (a) Distribución según cantidad de descubrimientos y (b) Distribución de cobre contenido en los yacimientos descubiertos.



Fuente: Cochilco sobre la base de SNL Metals & Mining.



4. Comentarios finales

Tendencias de exploración en Chile

En los últimos 16 años se han encontrado en territorio chileno 35 yacimientos de cobre y tres de oro, incrementando en más de 208,6 Mt de cobre y 34,3 Moz de oro a los recursos y reservas anteriormente conocidos. El 94% del contenido de cobre en recursos y reservas se encontró antes del año 2010, y, si bien la inversión en exploración ha aumentado significativamente desde la fecha, el éxito de las campañas no ha sido proporcional a este incremento en el presupuesto de exploración. Aun así, comparado los resultados de exploración con el resto del mundo, Chile es el país que lleva el primer lugar tanto en número de hallazgos como en la cantidad de cobre contenido en estos depósitos.

En los últimos años se ha hecho posible la perforación de sondajes más profundos que permitieron hallar nuevos depósitos a mayores profundidades. De los depósitos evaluados, solo un 20,6% presenta mineralización económica en superficie, y para un 49,9% esta se encuentra a más de 100 m de profundidad. La profundidad de los cuerpos mineralizados encontrados entre el 2000 y 2008 no excedía los 200 m, con excepción del depósito Mina Mantos de Cobre, mientras que a partir del año 2009 los hallazgos de yacimientos de cobre comenzaron a ser más profundos, hasta 500-600 m de profundidad. Ante la posibilidad de hacer sondajes más profundos, se pueden alcanzar depósitos cubiertos y, además, permite que algunos sectores que anteriormente fueron descartados por no presentar mineralización económica en niveles someros sean reconsiderados como blancos de exploración. Respecto a los yacimientos de oro, se considera que aún existe potencial de encontrarlos en superficie

A partir de la información disponible, se aprecia un posible agotamiento de yacimientos de cobre en la superficie, pero un alto potencial para encontrar nuevos depósitos en profundidad (100-600 m) y, el hecho de que actualmente sea factible realizar perforaciones profundas, permite seguir esa línea de exploración.

Franjas metalogénicas

Enfocándose en las franjas metalogénicas se obtuvieron las siguientes conclusiones que incentivan a continuar explorando en centro norte de Chile:

- ✓ Exploración brownfield exitosa en franjas Eoceno tardío-Oligoceno temprano y Mioceno Medio-Plioceno temprano.

Numerosas compañías han llevado a cabo campañas de exploración brownfield en torno a los grandes pórfidos cupríferos chilenos ya conocidos, llegando a resultados exitosos. El caso más llamativo es el de Escondida, en la franja Eoceno tardío-Oligoceno temprano, donde se encontraron Escondida Este, Pampa Escondida y Pinta Verde.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

También en la franja del Mioceno Medio-Plioceno temprano destaca el descubrimiento los yacimientos Los Sulfatos y San Enrique Monolito, al sur del mega-yacimiento Rio Blanco-Los Bronces y los hallazgos Cerro Negro, Cerro Negro Sur, La Americana, Este Profundo por el lado norte (Andina). Otros casos destacados asociados a esta franja son La Huifa en El Teniente y Frontera en Los Pelambres.

Por último, los yacimientos Encuentro, Esperanza Sur y Llano fueron blancos exitosos de la exploración brownfield en el Distrito Centinela, en la franja Eoceno tardío- Oligoceno temprano.

- ✓ Exploración greenfield exitosa en prospectos de oro en Franja Mioceno temprano a medio

Todos los yacimientos de oro evaluados en este estudio se encontraron a causa campañas de exploración tipo greenfield en la Franja del Mioceno temprano a medio, es decir, sin conocimiento previo de yacimientos en las áreas a explorar. El éxito de estas campañas sugiere que aún pueden existir sectores de esta franja con mineralizaciones importantes de oro.

- ✓ Patrones geológicos favorables en franjas del Mioceno

Antecedentes geológicos sugieren la existencia de sectores en la Cordillera de los Andes, al norte de Los Pelambres (específicamente entre 30,5°y 31°S), donde diversos factores geológicos favorables para la formación de pórfidos coinciden espacialmente en ciertos puntos definiendo nuevos blancos de exploración en esta franja.

Por otra parte, estudios recientes identificaron en el segmento andino de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá (18°-21°S), áreas con patrones geológicos similares a los depósitos epitermales de las franjas de Maricunga y El Indio (Franja Mioceno temprano a medio) donde se repiten patrones geológicos favorables de periodos fértiles para la mineralización, lo que abre posibilidades de exploración en esta región.

- ✓ Yacimientos de cobre asociados al arco magmático del Cretácico tardío

El hallazgo de dos nuevos yacimientos con edad de mineralización del Cretácico tardío (Casualidad e Inca de Oro) abre puertas a buscar depósitos de cobre en esta franja metalogénica, más bien asociada a yacimientos de hierro, en los sectores con rocas ígneas del arco magmático de esta edad.

- ✓ Depósitos en profundidad en todas las franjas

Los yacimientos encontrados a más de 100 m de profundidad se encontraron en todas las franjas metalogénicas, los más profundos se encuentran en la franja Eoceno tardío-Oligoceno temprano y en la franja Mioceno medio-Plioceno temprano. Respecto a los yacimientos de oro, se considera que aún existe potencial de encontrarlos en superficie, asociados a la franja Mioceno temprano a medio.



Implicancias para industria minera

Los últimos hallazgos de oro y cobre en el país son, en su mayoría, yacimientos medianos o pequeños, pero de alta ley, lo que sugiere que, a futuro, los esfuerzos de políticas públicas deberían centrarse en el fomento de la mediana minería en Chile.

El término “madurez” de la exploración minera en el centro y norte de Chile es relativo y no se debe tomar como un agotamiento de recursos geológicos, si no que como una señal de que es necesario replantear las formas de afrontar los nuevos yacimientos. Se debiera entender la madurez como una oportunidad, en la que se ha alcanzado tal técnica, tecnología y experticia en los profesionales que estamos preparados para desarrollar nuevas técnicas y afrontar la minería del futuro en Chile. Es claro ver que la minería de los próximos años será en niveles más profundos de la corteza, por esto es importante ser visionarios y comenzar a desarrollar desde ya tecnologías en la industria extractiva y de exploración, además de formar profesionales, tanto ingenieros en minas como geólogos, con las capacidades de enfrentar estos desafíos.

Respecto a las estrategias de inversión aplicadas en los últimos años que responden, año a año, a la variación del precio de los metales produciendo aumentos o recortes bruscos del presupuesto, no son auspiciosas para llevar a cabo exploraciones expeditas, planificadas y continuas en el tiempo. El ciclo de las exploraciones es de más largo plazo que los ciclos de precios de metales y requiere de un presupuesto constante en el tiempo.

Implicancias para Cochilco

El presente estudio abre una nueva línea de trabajo en Cochilco que permite entender de manera integral las tendencias de la exploración minera en el país. Dicha línea de trabajo intenta sistematizar la información disponible considerando factores históricos, económicos, geográficos y geológicos. En este contexto se destaca la importancia de la recolección, sistematización y contextualización de la información geológica, en un formato claro y comprensible.

El estudio también apunta reducir la amplia brecha que existe entre Chile y otros países más avanzados en cuanto a disponibilidad, organización y difusión de la información tanto histórica como presente de la exploración minera en el país (e.g. Australia, Canadá, USA).



5. Referencias

- Araya, Victor, Alejandro Maldonado, y José Astudillo. «Geology of Carmen de Andacollo Deposit.» *XIII Congreso Geológico Chileno*. Antofagasta, 2012. 25-27.
- Bertens, Alfredo, Katja Deckart, y A Gonzalez. «Geocronología U-Pb, Re-Os y 40Ar/39Ar del pórfido Cu-Mo Los Pelambres, Chile central.» Concepción: X Congreso Geológico Chileno, 2003.
- BHP Billiton. «Unlocking shareholder value presentation.» 2014.
- Bissig, T, AH Clark, JKW Lee, y KB Heather. «evised metallogenetic model for the El Indio-Pascua/Lama Au (Ag, Cu) belt, Regiones III/IV, Chile and Provincia San Juan, Argentina.» *GSA Abstracts with Progrmas*. 2000.
- Bissig, Thomas, James KW Lee, Alan H Clark, y Kevin B Heather. «The Cenozoic History of Volcanism and Hydrothermal Alteration in the Central Andean Flat-Slab Region: New 40Ar-39Ar Constraints from the El Indio-Pascua Au (-Ag, Cu) Belt, 29° 20'-30° 30' S.» *International Geology Review* 43, nº 4 (2001): 312-340.
- Boric, R, C Holmgren, N S F Wilson, y M Zentilli. *The geology of the El Soldado manto-type Cu (Ag) deposit, central Chile*. Vol. 2, de *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, editado por T M Porter, 163-184. Adelaide: PGC Publishing, 2002.
- Brunham, Charles W. «Convergence and mineralization, is there a relation?» En *Nazca plate: Crustal Formation and Andean Convergence*, de Klum LaVerne D., Jack Dymond y E. Julius Dasch, 761-768. Geological Society of America Memoir, 1981.
- Brunham, Charles W. «Magmas and hydrothermal fluids.» En *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, de Hubert Lloyd Barnes, 71-136. Nueva York: John Wiley, 1979.
- Burgoa, Claudio, David Hopper, y Jozef Ambrus. «Exploración profunda de un Pórfido Cu-Au bajo el Litocap Valeriano: Geología y Zonación del Sistema Hidrotermal, Región de Atacama, Chile.» *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena, 2015.
- Cajal, Yamila, Osvaldo Rabbia, y Cíctor Valencia. «Nuevos antecedentes magmático-hidrotermales del Oligo-Mioceno de los Andes del norte de Chile (21°-.)» *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena, 2015.
- Camus, Francisco. «Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile.» Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.
- Camus, Francisco. *The Andean porphyry systems*. Vol. 4, de *Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration*, editado por David R. Cooke y June Pongratz, 5-21. Australia: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, 2002.

Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Chávez, William Xavier. *Geologic setting and the nature and distribution of disseminated copper mineralization of the Mantos Blancos District, Antofagasta Province, Chile*. Berkeley: University of California, 1985.

Chile Copper Company. «First annual report: New York.» 1917.

COCHILCO. *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales* . 2015.

Cornejo, Paula, y otros. «U/Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Region, Chile.» *Actas XI Congreso Geológico Chileno*. Antofagasta, 2006. 129-133.

Cuadra, W, y P.M. Dunkerley. «A history of gold in Chile.» *Economic Geology* 86, nº 6 (1991): 1155-1173.

Deckart, Katja, y otros. «Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Rio Blanco porphyry copper deposit, central Chile: implications of an integrated U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ database.» *Economic Geology* 100, nº 5 (2005): 905-934.

Deyell, CL, RO Rye, GP Landis, y T Bissig. «Alunite and the role of magmatic fluids in the Tambo high-sulfidation deposit, El Indio-Pascua belt, Chile.» Editado por Elsevier. *Chemical geology* 215, nº 1 (2005): 185-218.

Díaz, Javier. «Factores Geológicos para la Generación de Sistemas Hidrotermales tipo Pórfidos, a través del Arco Magmático Mioceno - 31°S, Cordillera Frontal, IV Región, Chile/Argentina.» *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena, 2015.

Eriksen, George, y Carlos Ruiz. «Metallogenetic provinces of Chile, S.A.» *Economic Geology*, 1962: 91-106.

Kojima, Shoji, José Astudillo, Juan Rojo, Dania Trista, y Ken-ichiro Hayashi. «Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile.» *Mineralium Deposita* 38, nº 2 (2002): 208-216.

Maksaev, Victor. «Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis Andina.» Santiago, 2001.

Maksaev, Victor, Brian Townley, Carlos Palacios, y Francisco Camus. «Metallic ore deposits.» En *Geology of Chile*, editado por Teresa Moreno y Wes Gibbons, 179-1999. Londres: The Geological Society, 2007.

Maksaev, Victor, y otros. «New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re/Os and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit.» En *Andean Metallogeny: New discoveries, Concepts, Update*, de R. H. Sillitoe, J. Perelló y C. E. Vidal, 15-54. Society of Economic Geologists, Special Publication, 2004.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

- Moreno, Luis, y otros. «Mineralización Hipógena del Pórfido Paleoceno Spence. .» *XII Congreso Geológico Chileno*. Antofagasta, 2012.
- Mpodozis, Constantino, Paula Cornejo, Suzanne M. Kay, y Andrew Tittler. «La Franja de Maricunga: Síntesis de la evolución del Frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales.» *Andean Geology* 22, nº 2 (1995): 273-314.
- Orrego, Mario, W Robles, A Sanhueza, R Zamora, y J Infanta. «Mantos Blancos y Mantoverde: depósitos del tipo Fe-Cu-Au? Una comparación con implicancias en la exploración.» *Actas IX Congreso Geológico Chileno*. Puerto Varas, 2000. 145-149.
- Ossandón, Guillermo, Roberto Fréaut, Lewis Gustafson, Darryl Lindsay, y Marcos Zentelli. «Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report.» *Economic Geology*, 2001: 249-270.
- Padilla, Ruben A, Spencer R Titley, y Francisco Pimentel. «Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile.» *Economic Geology* 96, nº 2 (2001): 307-324.
- Palacios, Carlos, y otros. «The composition of gold in the Cerro Casale gold-rich porphyry deposit, Maricunga belt, northern Chile.» *The Canadian Mineralogist* (Mineralogical Association of Canada) 39, nº 3 (2001): 907-9015.
- Petersen, Ulrich. «Metallogenic Provinces in South AMerica.» *Geologische Rundschau*, 1970: 834-897.
- Quirt, S.G. *A potassium-argon geochronological investigation of the Andean mobile belt of north-central Chile*. Ph.D. Thesis, Kingston, Ontario, Canadá: Queen's University, 1972.
- Reyes, Manuel. «The Andacollo strata-bound gold deposit, Chile, and its position in a porphyry copper-gold system.» *Economic Geology* (Society of Economic Geologists) 86, nº 6 (1991): 1301-1316.
- Richards, Jeremy P. «Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation.» *Economic Geology* (Society of Economic Geologists) 98, nº 8 (2003): 1515-1533.
- Rojas, O, J Camacho, y C Sprhonle. «Evolución de Recursos Minerales de Minera Collahuasi, Distrito Collahuaso, I Región Chile.» *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago, 2009.
- Ryan, P. J, A L Lawrence, R A Jenkins, J P Matthews, y G Zamora. *The Candelaria copper-gold deposit, Chile*. Vol. 20, de *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*, editado por Frances Wahl Pierce y John G Blon, 625-645. Arizona Geological Society, Digest , 1995.
- Serrano, L, y otros. «The late miocene to early pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes.» *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny* (Society of Economic Geologists, Special Publication) 5 (1996): 119-130.



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

- Shaver, Stephen. «THE SIERRA GORDA PORPHYRY CU-MO (AU) DEPOSIT, REGION II, NORTHERN CHILE, PART 1: ALTERATION, MINERALIZATION, AND FLUID INCLUSIONS.» *2009 Portland GSA Annual Meeting*. 2009.
- Sillitoe, Richard H. « A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits.» *Economic Geology*, 1972: 184-197.
- Sillitoe, Richard H. «Regional aspects of the Andean porphyry copper belt in Chile and Argentina.» *Institution of Mining and Metallurgy Transactions* 90 (1981): 15-36.
- Sillitoe, Richard H. *Copper deposits and Andean evolution*. Vol. 11, de *eology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*, editado por G. E. Ericksen, M. T. Cañas y J. A. Reinemund, 285-311. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, 1990.
- Sillitoe, Richard H. «Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes.» *Journal of South American Earth Sciences* 1, nº 1 (1988): 89-108.
- Sillitoe, Richard H. «Gold metallogeny of Chile- An introduction.» *Economic Geology* 86 (1991): 1187-1205.
- Sillitoe, Richard H. «Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view.» *Menralum Deposita*, 2003: 787-812.
- Sillitoe, Richard H. «Special paper: major gold deposits and belts of the north and south American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations.» *Economic Geology* (Society of Economic Geologists) 104, nº 4 (2008): 663-687.
- Skewes, MA, A Arévalo, R Floody, PH Zuñiga, y Ch R Stern. «The giant El Teniente breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement.» *Special Publication- Society of Economic Geologists* 9 (2002): 299-332.
- SNL Metals & Mining. «Strategies for Copper Reserves Replacement- The cost of Finding and Acquiring Copper- Major Copper Discoveries, 1990-2014.» 2015.
- SNL Metals & mining. www.snl.com. 2016. (último acceso: marzo de 2016).
- Stoll, W C. «Metallogenic provinces of South America.» *Mining Magazine*, 1965: 22-33.
- Tapia, Miguel. «Geology of the Spence porphyry copper deposit.» *X Congreso Geológico Chileno*. Concepción, 2003.
- Tarback, Edward, y Frederick Lutgens. «Tectónica de Placas: El desarrollo de una revolución científica.» En *Ciencias de la Tierra*, 33-75. 2005.



US Geological Survey. «Copper.» En *Mineral commodity summaries 2016*, de Joyce A. Ober, 54-55. 2016.

Vila, T, N Lindsay, y R Zamora. *Geology of the Manto Verde copper deposit, northern Chile: a specularite-rich, hydrothermal- tectonic breccia relates to the Atacama Fault Zone*. Vol. 5, de *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization Styles and Metallogeny*, editado por R Camus, R H Sillitoe y R PEtersen, 157-170. Society of Economic Geologists, Special Publication, 1996.

Zamora, R, y B Castillo. «Mineralización de Fe-Cu-Au en el Distrito Manto Verde, Cordillera de la Costa, III Región de Atacama, Chile.» Lima: II Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, 2001.

Zentilli, Marcos. *Geological Evolution and Metallogenic Relationships in the Andes of Northern Chile Between 26° and 29° South*. Tesis Doctoral, Kingston, Canadá: Queen's University, 1974.



6. Anexos

6.1. Anexo 1: Datos

Tabla 2. Hallazgos de yacimientos de cobre y oro descubiertos entre 2000 y 2015.

Hallazgo	Año descubrimiento	Compañía descubridora	Propietario actual
Yacimientos de cobre			
Escondida Este	2009	BHP Billiton	BHP Billiton 57.5%/ Rio Tinto 30%/ Nippon Mining and Metals 10%/ JECO 2.5%
Pampa Escondida	2008	BHP Billiton 57.5%/ Rio Tinto 30%/ Japanese Consortium 12.5%	BHP Billiton 57.5%/ Rio Tinto 30%/ Mitsubishi 8.25%/ Nippon Mining and Metals 3%/ Mitsubishi Materials 1.25%
Los Sulfatos	2007	Anglo American	Anglo American 50.1%/ Codelco 24.5%/ Mitsubishi 20.4%/ Mitsui & Co 1.25%
Toki	2000	Codelco	Codelco
Los Helados	2009	NGEx Resources 60%/ JOGMEC 40%	NGEx Resources 60%/ Pan Pacific Copper Co. 40%
Quetena	2002	Codelco	Codelco
Esperanza Sur	2001	Antofagasta	Antofagasta plc 70%/ Marubeni 30%
Frontera	2006	Antofagasta 60%/ Japanese Consortium 40%	Antofagasta 60%/ JX Nippon Mining Metals 15%/ Mitsubishi Materials 10%/ Marubeni 8.75%/ Mitsubishi 5%/ Mitsui & Co 1.25%
West Wall	2001	Noranda 60%/ Anglo American 40%	Anglo American 50% / Glencore 50%
San Enrique Monolito	2006	Anglo American	Anglo American 50.1%/ Codelco 24.5%/ Mitsubishi 20.4%/ Mitsui & Co 5%
Sierra Gorda	2006	Quadra Mining	KGHM 55%/ Sumitomo Metal Mining 31.5%/ Sumitomo Corp 13.5%
Mocha	2005	Codelco	Codelco
El Morro	2001	Noranda 70%/ Metallica Resources 30%	Goldcorp 50%/ Teck Resources 50%
Encuentro	2007	Antofagasta 84.5%/ Minera Milpo 15.5%	Antofagasta Plc 70% /Marubeni Corp 30%/Minera Centinel Inc
La Americana	2009	Codelco	Codelco
Este Profundo	2014	Codelco	Codelco
Miranda	2007	Codelco	Codelco
Cerro Negro	2011	Codelco	Codelco
Escalones	2001	Sprott Resource	Tri Metals Mining
Casualidad	2008	Codelco	Codelco



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Inca de Oro	2005	Codelco	Pan Aust 61.4% / Codelco 33.2% / Minera Group 5.4%
Cerro Negro Sur	2012	Codelco	Codelco
Santo Domingo	2005	Far West Mining 70%/ BHP Billiton 30%	Capstone Mining 70%/ Korea Resources 30%
Pinta Verde	2002	BHP Billiton 57.5%/ Rio Tinto 30%/ Japanese Consortium 12.5%	BHP Billiton 57.5%/ Rio Tinto 30%/ Mitsubishi 8.25%/ Nippon Mining and Metals 3%
La Huifa	2014	Codelco	Codelco
Copa Sur	2012	Codelco	Codelco
Mantos de Cobre	2006	Pucobre	Pucobre
Puntillas	2002	Codelco	Codelco 40% y Sociedad Punta del Cobre 60%
Lucy	2003	Codelco	Codelco
Llano	2007	Antofagasta	Antofagasta 70% /Marubeni 30%
Diego de Almagro	2000	s/i	Cia Minera Can Can SA (propietaria de Cia Minera Sierra Norte) (de grupo Copec)
Vicky	2002	Codelco	Codelco
Tres Valles	2005	Vale	Vecchiola S.A.
RT Norte	2012	Codelco	Codelco
Franja Oriental	2013	Codelco	Codelco
Yacimientos de oro			
Caspiche	2008	Exeter Resources	Exeter Resources
Cerro Maricunga	2010	Atacama Pacific Gold	Atacama Pacific Gold
Alturas	2015	Barrik	Barrik

Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining

Tabla 3. Distribución de hallazgos entre 2000 y 2015 por región y franja metalogénica.

Región	Cretácico temprano	Cretácico tardío	Paleoceno - Eoceno temprano	Eoceno tardío-Oligoceno temprano	Mioceno temprano a medio	Mioceno medio-Plioceno temprano
Mineral Primario:	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu, Au	Cu
Arica y Parinacota						
Tarapacá			1			
Antofagasta	1	1	1	12	1	2
Atacama	3			2		1
Coquimbo	1	1				1
Valparaíso						7
Metropolitana						2
Libertador Bernardo O'Higgins						1

Fuente: Cochilco basado en publicaciones científicas e información solicitada a compañías mineras.

6.2. Anexo 2: Tipos de Yacimientos

Los yacimientos son zonas o cuerpos donde existe una concentración natural de recursos minerales. Pueden ser de origen ígneo (magmático-hidrotermal), sedimentario, metamórfico o superficiales. La mayoría de los depósitos de minerales metálicos en Chile son de origen ígneo, aunque también hay de tipo metamórfico y sedimentario.

Pórfidos cupríferos

Yacimiento de baja ley y alto tonelaje, asociados frecuentemente, pero no exclusivamente, a rocas ígneas intrusivas félsicas¹⁶ de textura porfírica¹⁷ que se forman a 2-4 km de profundidad. Los magmas asociados a estas rocas intrusivas liberaron fluidos hidrotermales¹⁸ que alteran la roca huésped y transportan metales y luego, al enfriarse, los depositan. Esta es la mineralización primaria o hipógena, que se produce tanto en las rocas intrusivas como en la roca huésped.

Posterior a esto, gracias a procesos supérgenos¹⁹, ocurre el enriquecimiento secundario²⁰, donde el cobre se concentra dejando en el yacimiento una zona superior lixiviada (escaso contenido metálico), una zona de óxidos (crisocola, atacamita, malaquita), un horizonte de mineralización de sulfuros secundarios (calcosina y covelina) que sobreyacen a una mineralización hipógena (sulfuros primarios: bornita calcopirita, pirita). La mayor parte de los pórfidos cupríferos no son económicos a menos que hayan desarrollado enriquecimiento secundario o supérgeno.

La mayor parte de la producción cuprífera chilena y toda la producción de molibdeno provienen de la explotación de pórfidos cupríferos; también se produce oro y plata. Los pórfidos cupríferos más comunes en Chile son de Cu-Mo, seguido de los de Cu-Au.

Epitermales

Depósitos formados a niveles poco profundos de la corteza, a entre 50 m a 1,5 km de profundidad y a temperaturas entre 160° a 270°C, asociados a campos geotermales en áreas de volcanismo activo (en el momento de su formación), los depósitos más importantes son de minerales preciosos (oro y plata), aunque pueden contener cantidades variables de cobre, plomo, zinc, bismuto, entre otros. La mineralización se encuentra predominantemente en vetas. Hay dos tipos extremos:

Alta sulfuración: Formados a partir de fluidos oxidados y de pH ácido, también conocidos como enargita-oro o alunita-caolinita. Son los depósitos epitermales más abundantes en Chile.

¹⁶ Rocas ricas en sílice (Si₂O) alto contenido de cuarzo y feldespato, en general de colores claros y baja densidad.

¹⁷ Las rocas de textura porfírica son rocas con cristales grandes inmersos en una matriz de cristales más pequeños.

¹⁸ Fluidos calientes, generalmente dominados por agua, a veces ácidos, que pueden transportar metales y otros compuestos en solución al lugar de depositación o producir alteración de la roca huésped.

¹⁹ Meteorización de rocas debido a circulación descendente de aguas superficiales (oxidación, hidratación).

²⁰ Resultado de alteración supérgena en depósitos minerales, en la cual la oxidación produce soluciones ácidas que lixivian metales hacia abajo y los precipitan al pasar a un ambiente reductor (nivel freático).



Baja sulfuración: Formados a partir de fluidos reducidos y de pH neutros o alcalinos. También conocidas como adularia-sericita, tipo hot spring. Son los depósitos epitermales más abundantes a nivel mundial, pero no tan abundantes en Chile.

Estratoligados

Los yacimientos estratoligados de cobre chilenos, también conocidos como tipo manto, corresponden a cuerpos mineralizados que tradicionalmente se definieron con forma de manto (subhorizontales) hospedados en rocas volcánicas, aunque más adelante se incluyeron cuerpos irregulares, chimeneas de brecha y vetas subordinadas, también alojados en rocas volcánicas. Son comunes en las rocas volcánicas de la Cordillera de la Costa.

IOCG's

Los depósitos de cobre-oro-óxidos de hierro (Iron Oxide Copper Gold: IOCG) corresponden a un grupo diverso de yacimientos de origen magmático-hidrotermal con ganga de óxidos de hierro (magnetita y hematita) y leyes económicas de oro y cobre. En Chile están asociados a rocas de edad Cretácico inferior en la Cordillera de la Costa.

Exóticos

Los depósitos exóticos se forman próximos a los pórfido cupríferos, debido a la migración lateral de soluciones supérgenas. Estas soluciones, cargadas de elementos metálicos, migran lateralmente y pueden infiltrarse en depósitos sedimentarios sueltos (como gravas o arenas) y depositar los metales a cierta distancia de la fuente. La mineralización de cobre se presenta como cemento en gravas aluviales, y en menor grado, recubriendo los planos de fracturas. Algunos casos reconocidos en Chile de este tipo son: el yacimiento Exótica, que tiene como fuente las soluciones supérgenas generadas a partir el pórfido de Chuquicamata, Hunquintipa asociado al pórfido de Rosario de Collahuasi y Damiana; a El Salvador.

Skarn

Yacimiento formado a partir del metamorfismo de contacto causado por la intrusión granitoides en rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) en el que ocurre un cambio mineralógico en estas a minerales calco-silicatados como variedades cálcicas de granate (como andradita y grosularita), piroxenos (diópsido, edembergita), piroxenoides (wollastonita) anfíbolos (hornblenda, tremolita-actinolita, entre otros), este proceso también da origen al marmol. El metamorfismo de contacto ocurre a temperaturas entre 400° y 600°C. Según el metal predominante, existen skarns de Fe, Au, Cu, Zn, W, Mo y Sn. Los distintos metales se asocian a intrusivos de distintas composiciones y distintos estados de oxidación. Los skarn de cobre, por ejemplo, se asocian a granitoides oxidados, de tipo pórfidos, formadora a profundidades someras.

Aunque en el mundo existen ricos yacimientos de tipo skarn, la mayoría de estos depósitos no contiene mineralización económica. En Chile, destaca el yacimiento Potrerillos, pórfido de cobre con desarrollo de skarn que fue explotado entre 1926 y 1959 con la extracción **de 1.8 Mt** de cobre



fino. Actualmente se explota un depósito tipo skarn en el Distrito Cabildo y está activo el proyecto de exploración Escalones.

Placer

Los depósitos de placeres corresponden a acumulaciones económicas de minerales densos o “pesados” concentrados durante la sedimentación de materiales clásticos. El gran peso específico del mineral es la causa principal de concentración ya que permite la separación mecánica del resto de los sedimentos. La alta densidad les permite ser concentrados debido a que son menos fáciles de mover por corrientes de agua y los minerales menos densos que los rodean son arrastrados (lavados) con mayor facilidad que los minerales pesados que se quedan atrás. Los placeres de oro (auríferos) son los más conocidos entre este tipo de depósitos, aunque también existen de casiterita (mena de Sn), cromita (mena de Cr), diamantes, granate, entre otros.



6.3. Anexo 3: Principales yacimientos por franja metalogénica

Franja Jurásico

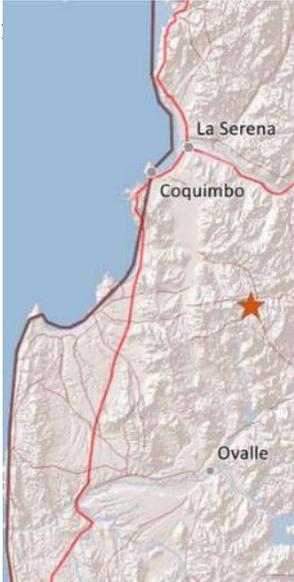
Yacimiento	Mantos Blancos	Mapa
Ubicación	40 km al noreste de Antofagasta, II Región.	
Geología	Depósito estratoligado hospedado en rocas volcánicas del Jurásico en la Cordillera de la Costa (Maksaev y otros, 2007). La mineralización de Cu-(Ag) está ligada a un estrato en particular de la Secuencia Volcánica de Mantos Blancos de 181.8 ± 0.6 a 180.8 ± 0.2 Ma que la sitúan en el Jurásico Inferior alto como parte de la Formación La Negra (Chávez, 1985; Cornejo y otros, 2006). La mineralización es unos 30 Ma más joven que la roca de caja, asociada al sistema hidrotermal del Plutón Alibaud (Orrego y otros, 2000)	
Producción	Desde 1960 a 2015 se han producido en torno a 3 Mt de cobre fino.	
Reservas	99,8 Mt @ 0,488% Cu (SNL, 2014)	
Recursos y Reservas	329 Mt con @ 0,448% Cu (SNL, 2014)	

Yacimiento	Distrito Michilla/ Lince	Mapa
Ubicación	Los yacimientos de este distrito se ubican en la Cordillera de la Costa, 110 km al norte de Antofagasta.	
Geología	Serie de yacimientos estratoligados de cobre (Susana, Carolina, Juarez, Lince, entre otros) hospedados en rocas volcánicas andesíticas del Jurásico (Formación La Negra) intruídas por una serie de stocks y diques de composición intermedia, pertenecientes al Batolito de la Costa (Maksaev y otros, 2007).	
Producción	La mina entró en producción el año 1992, con una producción total de 1.086 toneladas de cobre hasta el 2015. La extracción de mineral entre 2000 y 2015 fue de más de 60 Mt, llegando a agotar la mina, la cual cerró en diciembre de 2015.	
Reservas	2,7 Mt @ 1,2% Cu (SNL, 2014)	
Recursos y Reservas	62 Mt @ 1,62% Cu (SNL, 2014)	

Franja Cretácico temprano



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento	Andacollo	Mapa
Ubicación	Yacimiento ubicado en la Cordillera de la Costa, a 37 km al sureste de la Serena	
Geología	Corresponde al yacimiento de mayor importancia económica en este cinturón metalogénico. Es un depósito "híbrido" con características de pórfido de Cu-Au y de yacimiento estratoligado (Araya y otros, 2012) con transición a epitermal con mineralización de oro inmediatamente al NW y W del depósito (Reyes, 1991), donde se explota el yacimiento Dayton. La mineralización se hospeda en rocas volcánicas e intrusivos hipoabisales, ambas muy fracturadas (tipo stockwork) del Cretácico temprano.	
Producción	Desde su puesta en marcha en 1996 hasta el 2015 se han producido 693.972 t de cobre fino.	
Reservas	470, 7 Mt @0,328% Cu, 0,103 g/t Au (SNL, 2014)	
Recursos y Reservas	En 1997 se estimaron 300Mt @ 0,7% Cu, 0,015% Mo y 0,23 g/t Au (Reyes, 1991), las estimaciones más actualizadas son de 684 Mt @ 0,314% Cu, 0,103 g/t Au (SNL, 2014).	

Yacimiento	Candelaria	Mapa
Ubicación	Ubicado 20 km al sur de Copiapó	
Geología	Yacimiento tipo IOCG, los cuerpos mineralizados son mantiformes o lenticulares de orientación N-S, hospedados en rocas volcánicas de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Formación Punta del Cobre). La mineralización habría tenido lugar a los 110-114 Ma aproximadamente (Cretácico temprano) y consiste principalmente en magnetita, calcopirita y, en menor medida, pirita (Maksaev y otros 2007).	
Producción	Desde 1994 se han producido 3.908 toneladas de cobre.	
Reservas	Las reservas en 1995 eran de 366 Mt @1,08 % Cu, 0,26 g/t de Au (Ryan, y otros 1995), en 2015; 455 Mt @ 0,568 % Cu, 0,130 g/t Au, 2,121 g/t Ag (SNL 2015). Se proyecta seguir extrayendo mineral hasta, al menos, el 2028.	
Recursos y Reservas	725,6 Mt @0,667 % Cu, 0,156 g/t Au, 2,814 G/t Ag (/SNL, 2015)	



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento Manto Verde	
Ubicación	32 km al SE de Chañaral, III Región.
Geología	Corresponde a un depósito tipo IOCG en la Cordillera de la Costa. La mineralización está hospedada en rocas cataclásticas andesíticas e intrusivas (pórfido diorítico) del Cretácico Inferior en brechas con matriz de especularita y/o hematita asociadas a la falla Manto Verde que se relaciona a dominios transtensionales del Sistema de falla Atacama (Vila y otros, 1996) (Zamora y Castillo, 2001).
Producción	Desde el año 1996 se ha producido en torno a 1,005 Mt de cobre.
Reservas	91 Mt con 0,357% Cu (SNL, 2014)
Recursos y Reservas	646,1 Mt @ 0,474% Cu (SNL, 2014)



Yacimiento El Soldado	
Ubicación	60 km al NE de Valparaíso, V Región.
Geología	Corresponde un yacimiento estratoligado de cobre la mineralización se presenta en rocas volcánicas del Cretácico Inferior (Formación Lo Prado), en cuerpos irregulares con orientación N-S y NE de manera diseminada o en vetillas de calcopirita, bornita, pirita y calcosina (Boric y otros, 2002).
Producción	Si bien la explotación de la mina remonta al año 1844, la data disponible está entre 1992 y 2015, dónde se han producido 1.177.538 ton de cobre.
Reservas	89 Mt con 0,82 % Cu (SNL, 2014).
Recursos y Reservas	237 Mt de 0,6% Cu (SNL, 2014)



Franja Paleoceno- Eoceno temprano

Yacimiento Spence	
Ubicación	Ubicado 150 km al NE de Antofagasta
Geología	Presenta la zonación característica de los pórfidos de cobre-molibdeno del norte de Chile. La mineralización se hospeda en rocas intrusivas (stocks y diques de monzonitas y granodioritas) de 57 Ma (Paleoceno) que intruyen rocas de rocas volcánicas (Formación Quebrada Mala) del Cretácico Inferior (Tapia, 2003) (Moreno y otros, 2012).
Producción	Desde la puesta en marcha de la mina en 2006, hasta el 2015, se han producido 1.400.200 t de cobre.
Reservas	Las reservas iniciales fueron de 330 Mt @ 1,18% de Cu (2006), actualmente son de 287 Mt @ 0,714% Cu (SNL, 2015)
Recursos y Reservas	2.693 Mt @ 0,461% Cu (SNL, 2015)



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento Distrito Centinela	
Ubicación	50-80 km al sur de Calama.
Geología	Comprende una serie de yacimientos tipo pórfido Cu-Mo (Au) ubicados en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko.
Producción	La mina de Centinela Óxidos (Ex El Tesoro) ha producido entre 2001 y 2015, 1.353.263 t de cobre fino, por su parte, la mina Centinela Sulfuros (Ex Esperanza) ha producido 601.000 t entre 2011 y 2014.
Reservas	Centinela Óxidos: 208,1 Mt @ 0,470 % Cu Centinela Sulfuros: 1.882,5 Mt @ 0,440% Cu (SNL, 2014).
Recursos y Reservas	Centinela Sulfuros: 3.399,7Mt @ 0,37% Cu Centinela Óxidos: 391,8 Mt @ 0,4% Cu Encuentro: 1.319,4 MT @0,414% Cu (SNL, 2014) Esperanza Sur: 2.63 Mt @ 0,358 % Cu, 0,117 g/t Au, 0,012% Mo (SNL, 2012)



Yacimiento Sierra Gorda	
Ubicación	4 km al norte del poblado de Sierra Gorda
Geología	Es un pórfido de Co-Mo (Au) de edad Paleoceno-Eoceno hospedado en rocas andesíticas intruidas por dique o stocks de composición monzodiorita a granodiorita generando una mineralización en vetas, diseminada y en brechas, tanto en los intrusivos como en la roca caja (Shaver, 2009)
Producción	100.600 t de cobre entre 2014 y 2015.
Reservas	1.546 Mt @ 0,397 % Cu, 0,019 % Mo y 0,056 g/t Au (SNL, 2014)
Recursos y Reservas	1.786,384 Mt @ 0,397% Cu, 0,019% Mo y 0,057 g/t Au (SNL, 2014)



Franja Eoceno tardío-Oligoceno temprano

Yacimiento La Escondida	
Ubicación	150 km al sureste de Antofagasta
Geología	Yacimiento de tipo pórfido Cu-Mo, ubicado en la Cordillera de Domeyko asociado a rocas intrusivas, de composición monzonita a granodiorita, que intruyen a rocas volcánicas de edad Paleoceno (Padilla y otros, 2001). Se han encontrado una serie de sistemas porfíricos sobre impuestos (Escondida Este) y otros pórfidos cercanos (Escondida Norte, Pampa Escondida, Pinta Verde, entre otros) aumentando significativamente las reservas en el sector (BHP Billiton, 2014).
Producción	23.102.000 t de cobre fino entre 1990 y 2015
Reservas	Al año 2002 eran de 2.408 Mt @ 1,03% Cu, pero este número ha crecido gracias a campañas de exploración brownfield exitosas, con reservas de 8.407 Mt @ 0,6% Cu (SNL, 2015)
Recursos y Reservas	19,216 Mt @ 0,541% Cu (SNL, 2015)



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento Chuquicamata	
Ubicación	18 km al norte de Calama
Geología	Es uno de los depósitos de cobre más grande del mundo conocido y también destaca por la abundancia de molibdeno y oro. Se trata de un complejo de pórfidos de edad Eoceno tardío a Oligoceno temprano en que los eventos de mineralización están relacionados a intrusiones de granodioritas que tuvieron lugar hace 36-33 Ma y a una posterior brechización asociada a desplazamientos de la falla Oeste (Ossandón y otros, 2001). El depósito presenta la típica zonación vertical de un pórfido cupífero y mineralización exótica (Mina Sur).
Producción	Entre 1915 y 2014, se han producido más de 41 Mt de Cu.
Reservas	Las reservas al inicio de la explotación de la mina fueron de 700 Mt @ 2.12% Cu (Chile Copper Company 1917), tras 100 años de explotación, las reservas son de 902 Mt @ 0,83% Cu (SNL, 2014).
Recursos y Reservas	15.416 Mt @ 0,45 % Cu (SNL, 2014)



Yacimiento Distrito Collahuasi	
Ubicación	El distrito minero Collahuasi se ubica a 170 km al este de Iquique.
Geología	Está compuesto por varios yacimientos: Quebrada Blanca, Rosario, Rosario Oeste, Ujina, entre otros. Son principalmente depósitos de tipo pórfido de Cu-Mo o yacimientos relacionados genéticamente a estos de edad Eoceno tardío a Oligoceno temprano, por ejemplo, el yacimiento Rosario de Collahuasi se clasifica como un clásico pórfido de Cu-Mo y el yacimiento Rosario Oeste, que corresponde a un sistema de vetas-fallas de alta sulfidación, está relacionado genéticamente al mismo sistema de alteración hidrotermal que tuvo lugar a entre 34.4 y 32.3 Ma (Rojas, y otros, 2009)
Producción	Entre 1998 y 2015 se han producido 7.609.500 t de cobre explotando el Complejo Rosario-Rosario Oeste.
Reservas	Rosario-Rosario Oeste: 3.123 Mt @ 0,848%Cu y 0,02% Mo
Recursos y Reservas	9.978 Mt @ 0.808% Cu (SNL, 2015)



Franja Mioceno temprano a medio



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento El Indio	
Ubicación	120 km al este de La Serena
Geología	Depósito epitermal con una zonación espacial y temporal pasando de zonas con mineralización temprana, de alta sulfuración, que se manifiesta en vetas de energita-pirita a zonas con alteración tardía de baja sulfuración que da lugar a vetas con la asociación cuarzo-oro. Se hospeda en rocas volcánicas de edad Mioceno (Toba Amiga) y la mineralización tiene aproximadamente 7 Ma. El yacimiento consiste en un sistema de vetas de orientación NE, controladas por la falla Inca Norte (Bissig y otros, 2001)
Producción	Entre 1979 y 2002 se extrajeron en total 4,5 Moz de oro, 25 Moz de plata y 472.000 t de cobre, con una ley de explotación promedio de 8,33 g/t de oro.



Yacimiento Cerro Casale	
Ubicación	110 km al SE de Copiapó
Geología	Pórfido de oro ubicado en el extremo sur de la franja de Maricunga. Se trata de un yacimiento de oro de edad Mioceno hospedado en rocas porfíricas graníticas a granodioríticas. La mineralización de oro está asociada a alteración potásica y sericitica (Palacios y otros, 2001).
Producción	sin producción
Reservas	1.197,600 Mt @ 0,6 g/t Au, 1,52 g/t Ag y 0,219% Cu (SNL,2014)
Recursos y Reservas	1.989,688 Mt @ 0.51 g/t Au, 1,34 g/t Ag y 0,204% Cu (SNL, 2014)



Yacimiento Pascua-Lama	
Ubicación	Ubicado en la frontera de Chile y Argentina, a 130 km al NE de La Serena.
Geología	Es un depósito epitermal de alta sulfuración con mineralización de principal de oro y plata, también hay cobre pero sus leyes son subeconómicas. La mineralización se presenta en brechas, diseminada, y en fracturas con un importante control estructural (Deyell y otros, 2005). El depósito se hospeda principalmente en granitos y riolitas del Paleozoico tardío (Bissig y otros, 2000).
Producción	Sin producción
Reservas	325 Mt @ 1,474 g/t Au, 64,66 g/t Ag y 0,072% Cu (SNL, 2014).
Recursos y Reservas	502 Mt @ 1,425 g/t Au, 49,743 g/t Ag y 0,068% Cu (SNL, 2014).



Franja Mioceno tardío- Plioceno temprano



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento Los Pelambres	
Ubicación	45 km al este de Salamanca.
Geología	Porfido Cu-Mo relacionado a stocks de tonalitas del Mioceno Superior que intruyen rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico Superior- Cretácico medio a lo largo de una falla de orientación N-S. Presenta la alteración característica de un pórfido y sus principales minerales de mena con calcosina, calcopirita y bornita asociados a cantidades significativas de molibdeno y menor oro y plata (Maksaev y otros, 2007).
Producción	5.815.100 t de cobre entre 1999 y 2015 (COCHILCO 2015)
Reservas	1.367,8 Mt@ 0,59% Cu, 0,019% Mo, 0,04 g/t Au (SNL, 2014)
Recursos y Reservas	6.224,1 Mt @ 0,51% Cu, 0,017% Mo, 0,06 g/t Au (SNL, 2014)



El Teniente	
Ubicación	130 km al sureste de Santiago, en la parte occidental de la Cordillera de los Andes.
Geología	Es uno de los pórfidos de Cu- Mo más grandes del mundo. La mineralización se emplaza en rocas máficas del "Complejo Máfico El Teniente" de edad Mioceno y en menor medida en el "Complejo Félsico". Existe una brecha en el centro del cuerpo con baja ley de cobre. Su principal mineral de cobre es la calcopirita, que se aloja en un enrejado de vetillas polidireccionales (stockwork), desarrolladas preferentemente en Complejo Máfico y en menor medida en el Complejo Félsico (Skewes y otros, 2002).
Producción	Inicia operaciones en 1906, sin información hasta 1950, se produjeron 18.196.100 t de cobre fino entre 1950 y 2015.
Reservas	1.673 Mt @ 0,93% Cu (SNL, 2014)
Recursos y Reservas	15.471 Mt @ 0,56% Cu (SNL, 2014)



Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Yacimiento	Río Blanco- Los Bronces	Mapa
Ubicación	50 km al noreste de Santiago	
Geología	Es un mega-yacimiento cuprífero emplazado en rocas intrusivas de composición granodiorítica (Batolito San Francisco) del Mioceno, cuerpos porfíricos menores y en rocas volcánicas de la misma edad. La mineralización de cobre y molibdeno encuentra como sulfuros en stockworks de vetillas en rocas intrusivas y porfíricas y, también, gran parte de la mineralización de cobre; en la matriz de brechas hidrotermales (Serrano y otros, 1996) (Maksaev y otros, 2007)	
Producción	Por la parte norte del mega-yacimiento (sector Río Blanco) se explota la mina Andina y por el lado sur; Los Bronces. <u>Andina:</u> 6.641.400 t de cobre entre 1970 y 2015 (COCHILCO, 2015) <u>Los Bronces:</u> comienza operaciones en 1906, pero solo se dispone de datos de producción entre 1986 y 2015 con 4.922.838 t de cobre (SNL, 2015).	
Reservas	<u>Andina:</u> 1.941 Mt @ 0,81% Cu <u>Los Bronces:</u> 2.059Mt @ 0,513% Cu, 0,01% Mo (SNL, 2014)	
Recursos y Reservas	<u>Andina:</u> 19.766 Mt @ 0,6% Cu <u>Los Bronces:</u> 6.384Mt @ 0,424% Cu, 0,009% Mo (SNL, 2014)	



Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

Daniela Villela Olavarría

Analista Mercado Minero

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Junio/ 2016

