

Baumgartner et al., 2009). Es de destacar que estos intervalos de tiempo, obtenidos por métodos geocronológicos, difieren en órdenes de magnitud a los tiempos calculados para la consolidación de intrusiones de pórfidos individuales (<40.000 años; Cathles, 1977; Cathles et al., 1997), para la formación de un depósito tipo pórfido de cobre (<100.000 años; McInnes et al., 2005), o para los eventos de alteración potásica (<2,000 años; Shinohara y Hedenquist, 1997; Cathles y Shannon, 2007) obtenidos a partir de modelados teóricos.

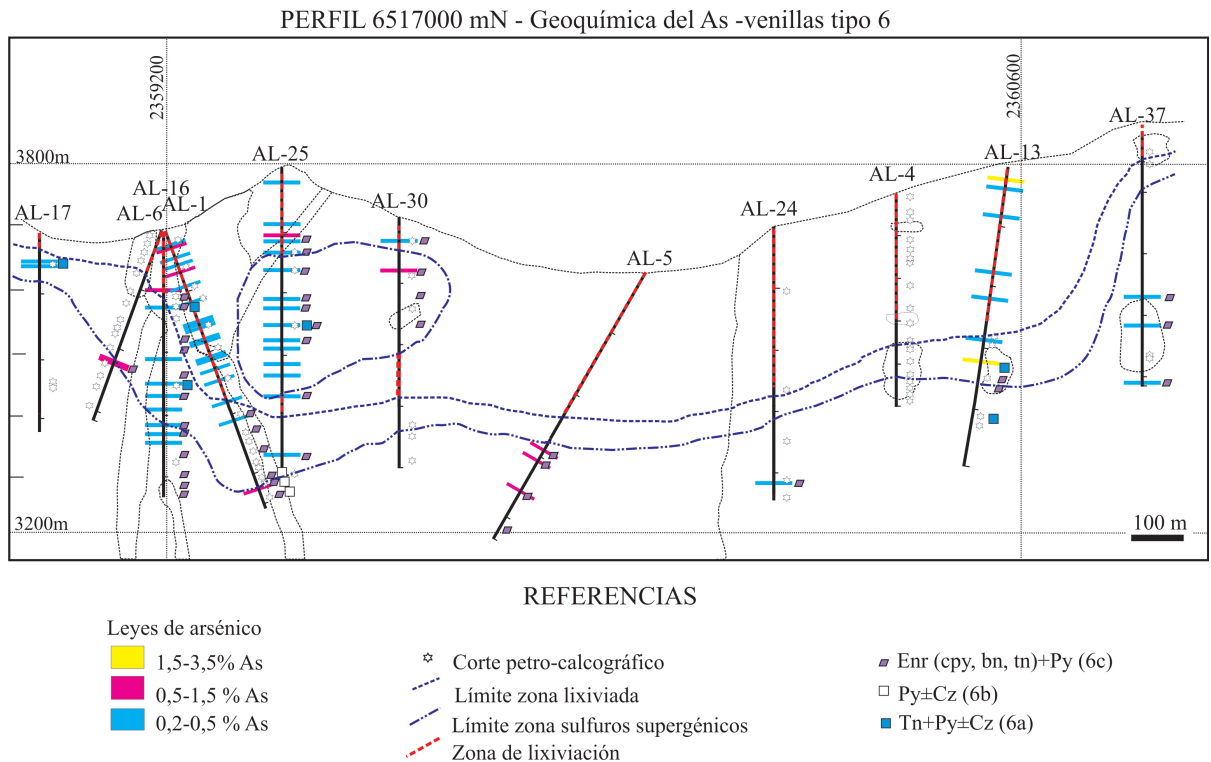


Figura 50. Distribución de las venillas 6 en el perfil 6517000 N y leyes de As.

La figura 55 sintetiza las edades U-Pb y Ar-Ar de las rocas y minerales datados en el distrito Altar. La muestra con alteración argílica avanzada arrojó una edad más antigua de la esperada ($12,8 \pm 1$ Ma Ar-Ar en alunita) (Fig. 55), por corresponder a la salbanda de alteración de una veta de cuarzo que corta al pórfido 1 ($11,75 \pm 0,24$ Ma). Los resultados obtenidos en dos splits de la misma muestra (Lm2 y Lm3, Figs. 42I y 42J) podrían indicar una heterogeneidad en las alunitas analizadas. Una disminución de la relación K/Ca con el aumento de la temperatura sugiere que la liberación de argón a mayores temperaturas se debe a una segunda fase rica en calcio. Además, hay una disminución concomitante en el porcentaje de ^{40}Ar con el cambio en la relación K/Ca que se traduce en mayores errores en los pasos de alta temperatura. Debe considerarse que los análisis químicos de las alunitas tienen contenidos de CaO que varían entre 0 a 3,2 %, (contenidos cuantitativos, ver capítulo VI,

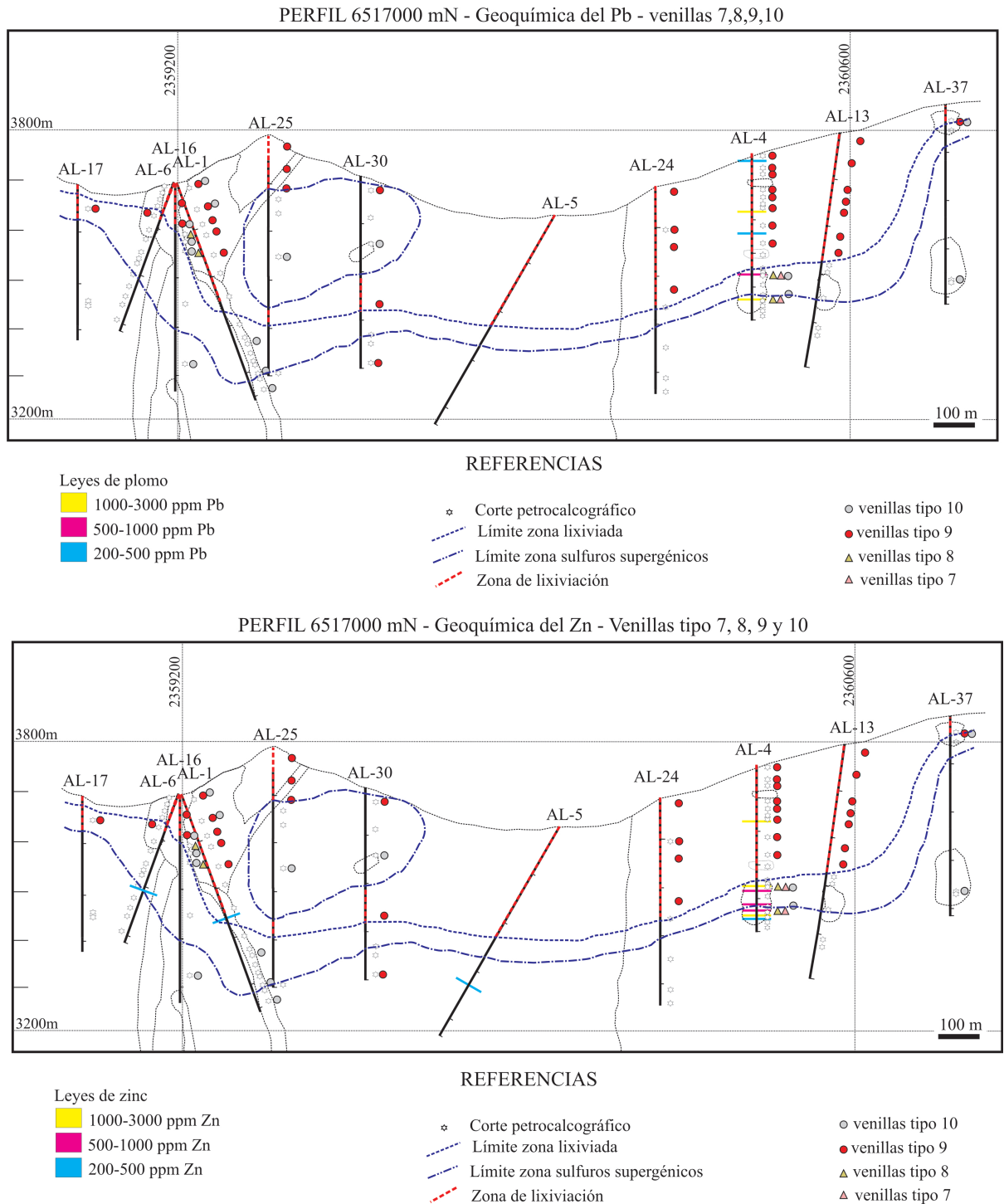


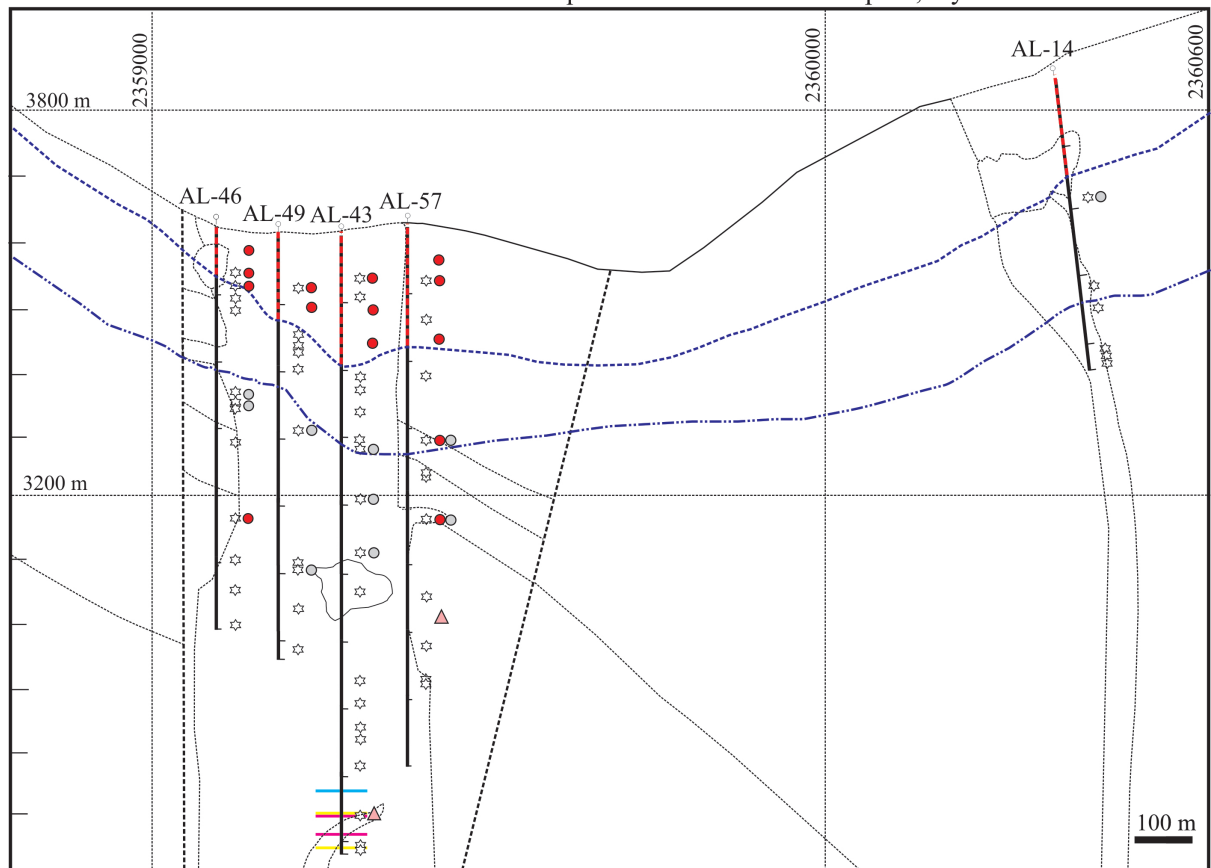
Figura 51. Distribución de las venillas 7, 8, 9 y 10 en el perfil 6517000 N y leyes de Pb y de Zn.

Tabla 35). Debido a que una fuente de calcio puede producir mayor Ar atmosférico y mayores errores, se sugiere que la concentración de calcio variable en las alunitas puede explicar el exceso de Ar atmosférico. Este último habría generado una edad Ar-Ar más antigua que la verdadera para el concentrado de alunita analizado.

De acuerdo con las edades de los intrusivos, las vetas de cuarzo con mineralización epitermal de Au-(Ag-Cu), se correlacionan en profundidad con el centro mineralizado más antiguo. En la figura 55, las edades Ar-Ar en alunita se superponen con las edades U-Pb en

circones de los pórfidos pórfidos 1 y 2, también localizados en el sector este del proyecto. Además, las vetas de cuarzo tienen una disposición radial y parecen confluir hacia el valle este, donde se localiza el pórfido 2 (Fig. 5); esta disposición de las vetas puede estar controlada por los ascensos y retracciones de los magmas de las cámaras magmáticas subyacentes (e.j., El Teniente; Cannell et al., 2005). El pórfido 2 en profundidad muestra alteración hidrotermal, con mineralización de Cu-(Au-Mo) diseminada y en un “*stockwork*” de distintos tipos de venillas y está separada del filo central por una zona débilmente mineralizada. Estas observaciones, sumadas a las interpretaciones de los datos geocronológicos, permiten inferir una conexión temporal y genética entre el pórfido 2 y la alteración argílica avanzada con mineralización epitermal de Au-(Ag-Cu) en las vetas localizadas en los fillos que circundan el distrito minero.

PERFIL 6516700 mN - Geoquímica del Pb - venillas tipo 7, 9 y 10



REFERENCIAS

Leyes de Plomo

- 1000-3000 ppm Pb
- 500-1000 ppm Pb
- 200-500 ppm Pb

- ☆ Corte petro-calcográfico
- Límite zona lixiviada
- Límite zona sulfuros supergénicos
- Zona de lixiviación

Venillas

- venillas tipo 10
- venillas tipo 9
- △ venillas tipo 7

Figura 52. Distribución de las venillas 7, 8, 9 y 10 en el perfil 6516700 N y leyes de Pb.

Una edad de 10,38 Ma Ar-Ar en illita fue obtenida para la alteración filica en una muestra del pórfido 4 del filo central (sondeo AL-01-293 metros de profundidad, Santiago

Gigola, comunicación personal). Esta edad Ar-Ar en illita puede correlacionarse con la edad U-Pb en circones obtenida para el pórfido 4 y representa un estadio de alteración-mineralización más joven con respecto al del sector este (Fig. 55).

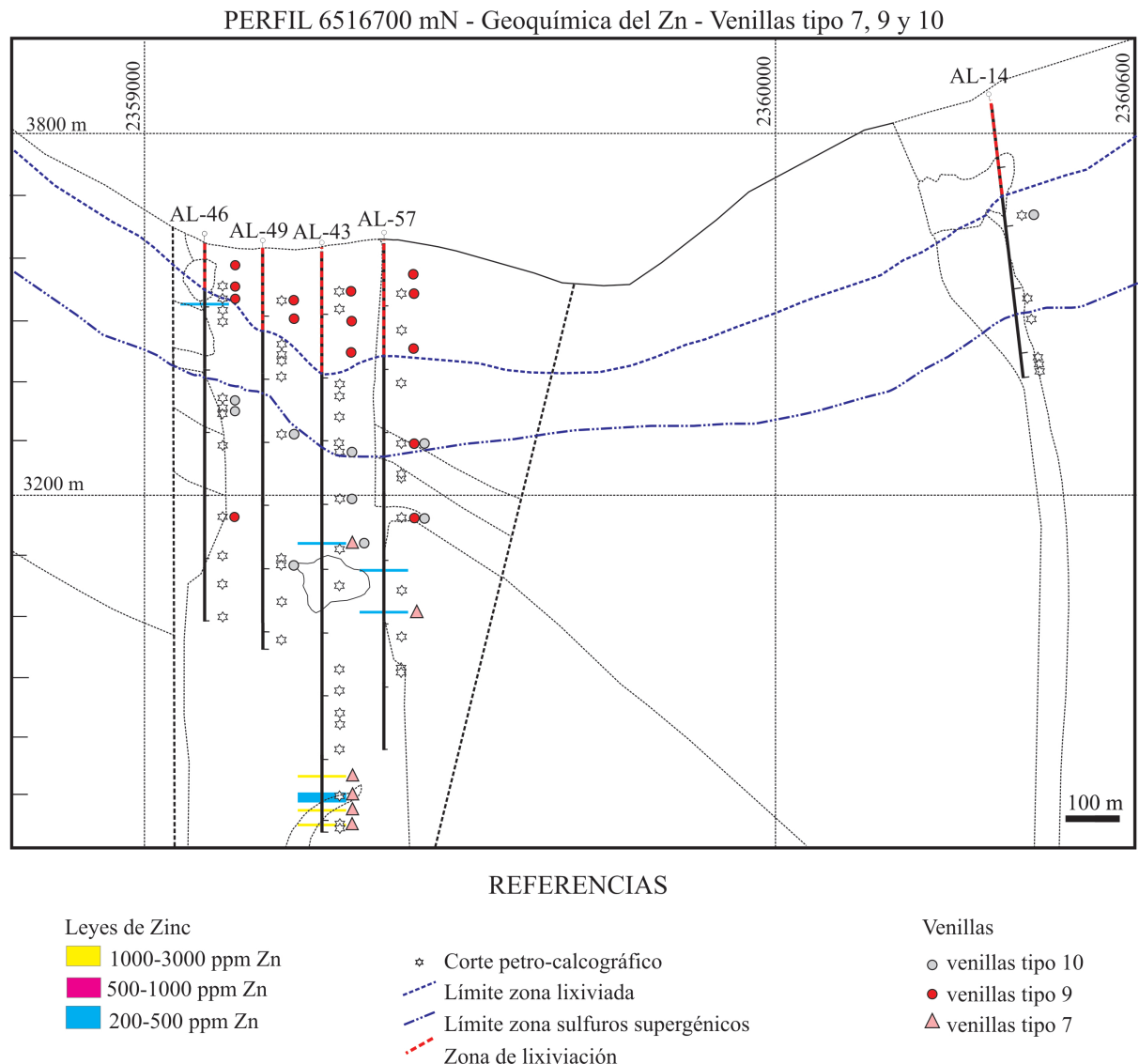


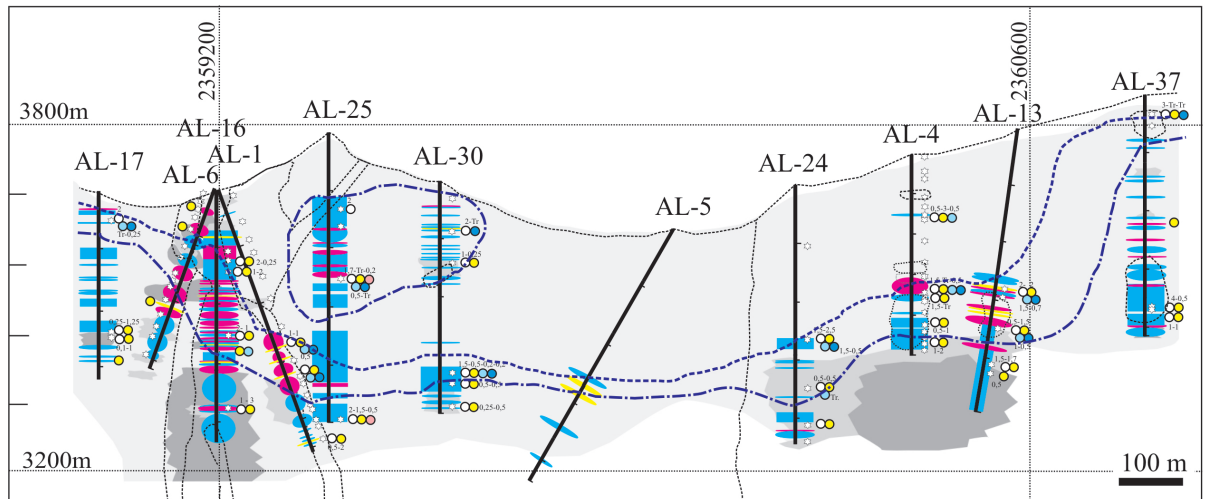
Figura 53. Distribución de las venillas 7, 8, 9 y 10 en el perfil 6516600 N y leyes de Zn.

En resumen, las edades Ar-Ar obtenidas para los minerales hidrotermales que proceden del valle este y filo central, coinciden con las edades U-Pb de las rocas subvolcánicas asociadas espacialmente a los mismos. Esto permite definir la presencia de dos centros magmáticos-hidrotermales con mineralización en el proyecto Altar localizados en el valle este (el más antiguo) y en el filo central (el más joven). Cada centro mineralizado está relacionado a más de un cuerpo ígneo intrusivo, brechas magmáticas e hidrotermales.

Las intrusiones relacionadas a los pórfidos de cobre comprenden fases ígneas múltiples (Kirkham, 1971; Gustafson, 1978) que se emplazan inmediatamente antes (pórfidos tempranos), durante (pórfidos intraminerales), cerca del final (pórfidos intraminerales tardíos) y después (pórfidos post-minerales) de los eventos de alteración y mineralización (Sillitoe,

2010). Según Sillitoe (2010), los pórfidos tempranos y las rocas de caja contiguas contienen las leyes de mineralización de Cu más elevadas, los pórfidos intraminerales tienen menores contenidos de mineralización a medida que se vuelven más jóvenes y los pórfidos tardíos y post-minerales no están mineralizados. Sin embargo, en el depósito Altar, los pórfidos 3 y 4 y la brecha magmática 2 (intra-minerales) son los más mineralizados. Los intrusivos tardíos (brecha magmática tardía y pórfido 5) carecen de mineralización y alteración. Cabe destacar que en el depósito El Teniente, los sucesivos pulsos de intrusión se asocian a mineralización y no se han reconocido pórfidos intraminerales poco mineralizados (Vry et al., 2010).

PERFIL 6517000 mN- Geoquímica de cobre-Alteraciones



REFERENCIAS

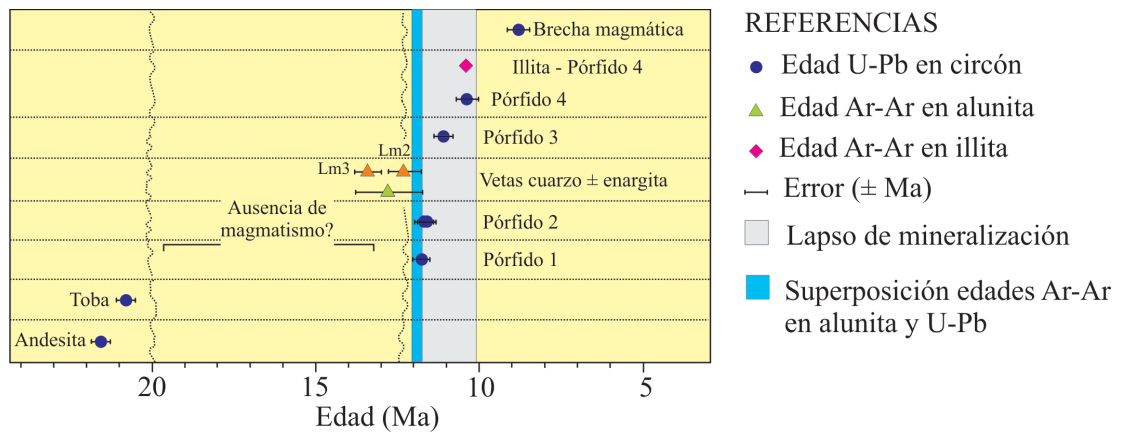
Leyes de Cobre	☆ Corte petro-calcográfico	● covellina	● calcopirita	□ Alteración filica
■ 1,5-3,5% Cu	--- Límite zona lixiviada	● digenita	○ pirita	□ Alteración clorítica
■ 0,5-1,5% Cu	--- Límite zona sulfuros supergénicos	● bornita	○ bornita	□ Alteración potásica
■ 0,2-0,5% Cu	--- Zona de lixiviación			

Figura 54. Ejemplo de correlación de alteraciones, mineralización disseminada y leyes de Cu en el perfil 6517000 N.

Teniendo en cuenta el modelo de Proffett (2009), las alteraciones y mineralizaciones de los pórfidos de Altar (ver Fig. 7) se distribuyen en zonas elongadas en sentido vertical, lo que permite inferir que los pórfidos se habrían emplazado a profundidades intermedias a superficiales.

Los estudios geológicos y las dataciones realizadas en las rocas y en los minerales del proyecto Altar (ver Fig. 55) prueban que en el Mioceno Medio-Tardío, la actividad ígnea estuvo activa durante un lapso de ~3 Ma, mientras que los intrusivos fértiles se emplazaron en un intervalo de ~1,27 Ma considerando la diferencia entre el pórfido 2 y el 4, que coincide con el lapso de actividad hidrotermal en el proyecto, también confirmado con las dataciones Ar-Ar en alunita e illita.

En primer lugar, se emplazaron los pórfidos 1 y 2 (11,75-11,62 Ma U-Pb) y las brechas magmáticas e hidrotermales que forman el centro magmático-hidrotermal del sector este. El primer pórfido en emplazarse fue el pórfido 1, que no parece haber producido alteración o mineralización hidrotermal. Luego de un período de $\sim 0,13$ Ma, se emplazó el pórfido 2 relacionado a un sistema hidrotermal que habría generado, en profundidad, la alteración-mineralización de tipo pórfido de Cu-(Au-Mo) y, en los niveles más superficiales, la alteración-mineralización epitermal de alta sulfuración. La intrusión y la expulsión de fluidos hidrotermales debieron haber fracturado las rocas de caja, entre ellas al pórfido 1 emplazado previamente, generando las vetas epitermales radiales de cuarzo y de enargita \pm cuarzo \pm alunita con las salbandas alteradas y mineralizadas. Luego de $\sim 0,49$ Ma, en el filo central se emplazó el pórfido 3 y luego de $\sim 0,78$ Ma, el pórfido 4 y las brechas magmática e hidrotermal reconocidas, que forman el centro magmático-hidrotermal del filo central (11,13-10,35 Ma U-Pb). Los sistemas hidrotermales asociados a estos intrusivos generaron -en un período de $\sim 0,78$ Ma- las zonas de alteración-mineralización de tipo pórfido de Cu-(Au-Mo).



6.2 Secuencia de las venillas

Como se expuso en el apartado precedente, en el proyecto Altar se reconocieron dos centros de alteración-mineralización, los cuales están asociados a los pórfidos y brechas magmáticas e hidrotermales del valle este (pórfido 2, brecha magmática 1 y brecha hidrotermal 1) y del filo central (pórfidos 3 y 4, “brecha pipe”, brecha magmática 2 y brecha hidrotermal 2). De acuerdo a su yacencia, características y contenido de mineralización, el “pórfido intramineral indiferenciado” parece ser un cuerpo intrusivo vinculado al centro mineralizado del sector este.

Todos los pórfidos exhiben una secuencia de venillas similar, que sigue la cronología detallada en este capítulo. Sin embargo, la presencia de al menos dos centros magmáticos-hidrotermales y 3 cuerpos porfíricos relacionados a alteración y a mineralización, sugieren que un modelo de sistema hidrotermal “unidireccional” no es aplicable al Proyecto Altar. Entonces, la secuencia de venillas previamente descrita se habría repetido al menos tres veces en el tiempo (asociada a los pórfidos 2, 3 y 4). En el sector este del distrito, en profundidad la zona de alteración-mineralización tipo pórfido de Cu del pórfido 2 no contiene enargita diseminada o en venillas y se reconocieron muy escasas venillas tipo 6. Las vetas de cuarzo y de enargita \pm cuarzo \pm alunita y la alteración argílica avanzada de la caja se localizan \sim 500m por encima del pórfido de Cu. Es decir, no hubo superposición del sistema epitermal con sulfosales de Cu y Au sobre el sistema profundo de tipo pórfido. En los pórfidos 3 y 4 del filo central, las venillas tipo 6 con sulfosales de Cu y el Au cortan a las mineralizaciones profundas, intermedias y superficiales. Es decir que durante el emplazamiento de los pórfidos 3 y 4 y los sistemas hidrotermales, el levantamiento por deformación, el fallamiento y la erosión habrían sido mayores, favoreciendo la superposición del sistema epitermal sobre el sistema pórfido de Cu.

Los pórfidos del centro mineralizado del sector este del proyecto se emplazaron sin seguir una dirección preferencial, el “*stockwork*” que rodea a los intrusivos en superficie tiene forma circular y las vetas de cuarzo y de enargita \pm cuarzo \pm alunita localizadas en los filos altos muestran una disposición radial. Estas características permiten interpretar que durante el emplazamiento de los pórfidos 1 y 2 y las brechas magmática e hidrotermal del sector este, los esfuerzos estuvieron controlados por la cámara magmática subyacente. Los pórfidos 3 y 4 del filo central y el “*stockwork*” asociado a los mismos en superficie, muestran una disposición en sentido N-S a NE-SO y parecen haber sido controlados por fracturas y fallas con similar orientación en el distrito. Por lo tanto, se interpreta que estos últimos pórfidos se habrían emplazado en un ambiente tectónico más compresivo, que explicaría la superposición de las mineralizaciones superficiales sobre las profundas.

En Altar no se observaron relaciones de corte de tipo inverso entre venillas (venillas formadas a mayor temperatura que corten venillas formadas a menor temperatura) que indican una reactivación termal del sistema hidrotermal (e.j depósito Henderson, Colorado, [Seedorff y Einaudi, 2004](#)). La única relación de corte inversa observada, detallada en la [Tabla 2](#), corresponde a venillas tipo 4 cortadas por venillas tipo 2a, y se debe a la conversión de las venillas tipo 1 en venillas tipo 4 (por transformación de la biotita en clorita), que genera una falsa relación de corte inversa. De acuerdo con [Vry et al. \(2010\)](#), en el yacimiento El Teniente

la cronología de las venillas del depósito podría ser interpretada en términos de un estilo unidireccional de todo el depósito, en el sentido de Seedorff y Einaudi (2004). Sin embargo, Vry et al. (2010) consideran que esto no refleja una evolución general, sino que indica pulsos separados y localizados de actividad hidrotermal que siguieron similares tendencias de evolución. Gustafson y Quiroga (1995) postulan que los distintos tipos de venillas mineralizadas no marcan necesariamente líneas de tiempo, sino que forman parte de una secuencia en la evolución del sistema hidrotermal que puede ser repetida en el tiempo. Para Vry et al. (2010), la ausencia de relaciones de corte inversas entre las venillas del depósito El Teniente, puede obedecer a una relación de aspecto elongada en sentido vertical entre los distintos complejos magmáticos-hidrotermales, su espaciamiento y por un similar nivel de emplazamiento, factores que generan que la superposición entre venillas sea poco común. Una explicación similar podría considerarse para la ausencia de relaciones de corte inversas entre las venillas del pórfido de Cu (Au-Mo) Altar.

6.3. Análisis de los estadios mineralizadores

En los pórfidos de Cu, las diversas generaciones de venillas se forman a partir de sucesivos estadios de fracturamiento hidráulico de las rocas y el relleno de las fracturas por los minerales hidrotermales. La secuencia de las venillas, considerando un único evento magmático-hidrotermal, marca pulsos o estadios de mineralización. En el proyecto Altar, la presencia de tres centros mineralizados asociados a los pórfidos 2 y 3-4 en los sectores este y central del proyecto, respectivamente, con una secuencia similar de venillas, indica que estos centros muestran una evolución similar de los fluidos hidrotermales. Para simplificar, a continuación se describen los distintos pulsos mineralizadores y sus productos haciendo referencia a los dos centros principales del filo este y del valle central.

El primer pulso de mineralización de Cu-(Au) está representado por calcopirita acompañada de pirita, ambas de grano fino, que se encuentran diseminadas en las rocas con alteración potásica, en el “*stockwork*” de venillas de cuarzo \pm anhidrita \pm feldespato potásico de paredes sinuosas a rectas (tipo 2a) y en las venillas finas a capilares (tipo 2b). También hay mineralización de Au asociada a estos sulfuros de la alteración potásica (ver capítulo VI). Las imágenes de CL indican que las venillas 2a fueron fracturadas, reabiertas y rellenadas con una nueva generación de cuarzo asociado a los sulfuros de las venillas tipo 2b que las cortan. Esta alteración-mineralización de Cu-Au está en los dos centros mineralizados del sector este y del filo central y representa el primer pulso de mineralización de cada intrusivo (pórfidos 2,3 y 4) es decir que se ha repetido tres veces en el tiempo. En ambos centros ha contribuido con leyes de 0,2 a 1,5 % Cu y 0,1 a 1 ppm de Au (Figs. 47 y 49).

Un segundo estadio de mineralización que introdujo Mo (\pm Cu) en el sistema se correlaciona con las venillas tipo 3 de cuarzo + molibdenita que cortan a los pórfidos y a las rocas adyacentes a distintas profundidades. Estas venillas, que parecen estar en equilibrio con la alteración potásica de las rocas, temporalmente son posteriores a las venillas tipo 2 y a la mineralización de Cu-Au, tal como lo indican las relaciones de corte. Según las imágenes de CL, la molibdenita precipitó luego de la generación de cuarzo que relleno el 90% de estas venillas. Las anomalías de Mo, que varían entre 200 y 500 ppm, se localizan en los dos centros mineralizados, es decir que este segundo pulso mineralizador también se repitió al menos tres veces en el lapso de 1,27 Ma durante el cual intruyeron los pórfidos 2, 3 y 4. Sin embargo, el halo de mineralización de Mo es más amplio y continuo en el sector central, alrededor del pórfido 4, y es más reducido al este, en el pórfido 2 y en la brecha hidrotermal 1 (Fig. 49).

La alteración clorítica no produjo cambios significativos en la mineralización y es probable que haya resultado de la alteración de la biotita a valores intermedios de $a(K^+) / a(H^+)$ en la medida en que el sistema se enfriaba y la composición química de los fluidos cambiaba (Seedorff et al., 2005), como también lo indica la transformación de magnetita en hematita (disminución de la temperatura, ver Einaudi et al., 2003). Las venillas tipo 4 se formaron a partir de la alteración de las venillas tipo 1 y la mineralización de calcopirita \pm pirita que suelen mostrar se interpreta como relíctica.

Excepto por las venillas 5a que adicionaron Cu (calcopirita) en los pórfidos 3 y 4 en profundidad, las otras variedades de venillas tipo 5 no están mineralizadas. Las venillas 5a representan un tercer pulso de Cu que sólo está presente en el centro mineralizado del filo central (ver figura 27) y que se repitió al menos dos veces en el lapso de 0,78 Ma.

El cuarto estadio significativo de mineralización introdujo Cu y Au en las venillas tipo 6 y en sus salbandas mineralizadas en los niveles profundos, intermedios y superficiales de los pórfidos 3 y 4, y son muy abundantes en el pórfido 4. Zonas con estas venillas tienen anomalías de Au de 0,1 a 5 ppm (venillas tipo 6a), 0,1 a 1 ppm (venillas tipo 6b) y 0,1 a 2 ppm (venillas tipo 6c) y con valores de Cu de 0,2 a 1,5 % (venillas tipo 6a) y de 0,2 a 3,5 % (venillas tipo 6c). En el centro mineralizado este, el pórfido 2 carece de venillas tipo 6, excepto por muy escasos ejemplos en un sector muy fracturado de este intrusivo (Fig. 38).

Las vetas de cuarzo y de enargita \pm cuarzo \pm alunita de los filones este y su "lithocap" de alteración argílica avanzada, contienen mineralización epitermal de Au-(Ag-Cu) y se formaron por pulsos de alteración-mineralización vinculados genéticamente al pórfido de Cu (Au-Mo) hospedado en el pórfido 2.

Un quinto estadio de mineralización de Zn-Pb se correlaciona con las venillas tipo 7 de esfalerita y galena cuyo emplazamiento estuvo controlado por zonas de fracturas tardías en los sectores profundos de ambos centros mineralizados.

Un sexto estadio de mineralización de Cu que afecta a los dos centros mineralizados consistió en el enriquecimiento de los sulfuros hipogénicos y el reemplazo de digenita ± covelina según calcopirita. Las relaciones texturales permiten atribuir un origen supergénico a los primeros. Este estadio supergénico originó zonas con altos valores de Cu (0,5- 3,5%) por debajo de la zona de lavado en las secciones estudiadas. La zona de enriquecimiento supergénico tiene espesores menores de 100 m en el sector este, mientras que en el filo central sus espesores varían entre 100 y 200 m (Fig. 10). Sobre los pórfidos muestra los valores más altos de Cu (hasta 3,5 % Cu), que disminuyen hacia las rocas de caja (hasta 1,5 % de Cu). Las anomalías de Au de 2 a 5 ppm en la zona de lavado coinciden con venillas de jarosita + hematita + cuarzo (tipo 9) y la lixiviación de la roca podría haber concentrado el oro residual.

6.4. Comparación con otros pórfidos de Cu (Au-Mo) de la región y del mundo

La cronología de venillas de los pórfidos de Cu, elaborada en primer lugar por [Gustafson y Hunt \(1975\)](#) en El Salvador, ha sido luego bien documentada en numerosos pórfidos de Cu y completada (e.j., [Dilles y Einaudi, 1992](#); [Gustafson y Quiroga, 1995](#); [Redmond et al., 2001](#); [Pollard y Taylor, 2002](#); [Cannell et al., 2005](#); [Masterman et al., 2005](#)). En términos generales, las venillas pueden ser subdivididas en tres grupos: (1) venillas de cuarzo tempranas, libres de sulfuros, que contienen uno o más de uno de los siguientes minerales: actinolita, magnetita (tipo “M”), biotita (tipo “EB”) y feldespato potásico, típicas sin salbandas de alteración; (2) venillas dominadas por cuarzo, portadoras de sulfuros y con salbandas de alteración delgadas a ausentes (venillas tipo “A” y “B”) y (3) venillas de cuarzo-sulfuros tardías con características salbandas de alteración destructivas de los feldespatos originales de la roca (que incluyen a las venillas tipo “D”). Los grupos 1 y 2 de esta clasificación se forman generalmente durante la alteración potásica, mientras que el grupo 3 acompaña la superposición de las alteraciones “clorita-sericita” ([Hedenquist et al., 1998](#)), fílica y argílica avanzada profunda ([Sillitoe, 2010](#)). De acuerdo con la secuencia de venillas propuesta para el depósito Altar y considerando esta clasificación general, las venillas tipo 1 corresponderían al grupo 1, las venillas tipo 2 y 3 de Altar pertenecerían al grupo 2, mientras que el resto de las venillas de Altar (tipos 4, 5 y 6) podría incluirse dentro del tercer grupo.

Hay algunos depósitos que presentan venillas delgadas de una mineralogía compleja de cuarzo-“sericita”-feldespato potásico-biotita con salbandas definidas por los mismos

minerales (\pm andalucita \pm corindón) y mineralización diseminada de calcopirita \pm bornita; estas venillas se forman entre las venillas tipo 1 y 2 y han sido denominadas venillas micáceas oscuras “*early dark micaceous*” (EDM) en Butte (Meyer, 1965; Brimhall, 1977; Rusk et al., 2008) y en Bingham (Redmond et al., 2004) y venillas tipo 4 (T4) en Los Pelambres (Atkinson et al., 1996; Perelló et al., 2007). Sin embargo, pueden haber sido confundidas con venillas tipo “D” debido a sus llamativas salbandas (Sillitoe, 2010).

Las venillas de cuarzo tipo 2a de Altar son similares en textura y en la mineralogía a las venillas tipo “A” descritas en el depósito de cobre El Salvador (Chile) (Gustafson y Hunt, 1975). Las paredes muy irregulares y la discontinuidad de las venillas 2a tempranas indican que se han formado bajo condiciones dúctiles de altas temperaturas y presión (Fournier, 1999). Estas venillas están típicamente constituidas por cuarzo, feldespatos, anhidrita, sulfuros y generalmente carecen de simetría interna (Gustafson y Hunt, 1975). Las venillas tipo “A” más jóvenes tienden a tener paredes paralelas (Gustafson y Hunt, 1975). En Altar, las venillas 2a de paredes sinuosas e irregulares han sido identificadas en los niveles más profundos alcanzados por los sondeos, mientras que en los niveles intermedios y superficiales tienen paredes rectas.

Las venillas tipo 3 de Altar portadoras de molibdenita son similares a las venillas de cuarzo-molibdenita del depósito de cobre El Salvador (Chile) denominadas venillas tipo “B” (Gustafson y Hunt, 1975). En ese depósito están en fracturas con paredes rectas y carecen de feldespatos potásicos y de salbandas de alteración (Gustafson y Hunt, 1975). En El Salvador, las venillas “B” están ligadas a las anomalías de Mo y se formaron en la etapa transicional de la alteración y mineralización, posterior a la depositación principal de Cu hipogénico (Gustafson y Hunt, 1975). A diferencia de lo observado en otros depósitos de Cu-Mo, en Butte, Montana, la mayoría de las venillas de cuarzo-molibdenita se localizan en el núcleo del depósito y son más profundas que las venillas micáceas oscuras asociadas a la mineralización de Cu hipogénico (Rusk et al., 2008).

En Altar, las venillas tipo 3 son complejas y en general no representan un único pulso de apertura y relleno. Son posteriores a las venillas tipo 2 y se formaron durante la alteración potásica. De acuerdo con las imágenes de catodoluminiscencia, la mineralización de molibdenita parece asociarse a la generación de cuarzo más tardía (Cz-3) y menos abundante de la venilla y los halos filicos que suelen tener obedecen a la reapertura y el relleno de la sutura central por venillas tardías de pirita + calcopirita, anhidrita, calcita, que corresponden a venillas tipo 5 más jóvenes. Ejemplos similares se han reconocido en el depósito de Bingham Canyon, en Utah, con la petrografía de CL de las venillas que indica claramente que la mayor parte de la molibdenita se depositó en cavidades de disolución del cuarzo de las venas

(Redmond, 2002). Como en las venillas tipo 3 de Altar, en El Salvador, las venillas "B" ocasionalmente muestran una sutura central rellena por anhidrita. La reapertura de las venillas "B" y su relleno por venillas más tardías en el depósito El Salvador es común y probablemente responsable de los halos de alteración filica (Gustafson y Hunt, 1975).

La alteración clorítica en Altar podría correlacionarse con la alteración clorita-sericita (Hedenquist et al., 1998), abreviatura de Sericita-Arcilla-Clorita ("*Sericite-Clay-Chlorite*", SCC, Sillitoe y Gappe, 1984). Esta alteración, que da lugar a un distintivo color verde claro de las rocas, está muy extendida en los niveles superficiales de algunos pórfidos de Cu, particularmente en ejemplos ricos en Au, donde se superpone a la alteración potásica preexistente (Sillitoe, 2010). Esta asociación ha sido interpretada como producto de un fenómeno de neutralización de los fluidos por las rocas de caja (e.j, Heinrich, 2003). En Altar esta alteración se reconoce en parches y zonas a niveles intermedios y es una alteración transicional entre las alteraciones potásica y filica.

Las venillas tipo 5 son similares a las venillas tipo "D" con halos filicos descritas en el depósito El Salvador (Gustafson y Hunt, 1975). En este depósito las venillas están constituidas por pirita + sulfato \pm cuarzo en profundidad y en los niveles superiores la pirita está acompañada de bornita, calcopirita, enargita, tennantita, esfalerita y galena (Gustafson y Hunt, 1975). En Altar, las venillas tipos 5 y 6 presentan una zonación con la profundidad que podría correlacionarse con las variaciones verticales observadas en las venillas tipo "D" de El Salvador. Estos tipos de venillas pueden considerarse análogos a las venillas del estadio principal "*Main stage*" de Chuquicamata (Ossandón et al, 2001), a las venillas del estadio principal de Butte (Meyer et al., 1968), a las venillas Rosario-Poderoso (Hunt, 1983) o a las venillas tipo E (o sulfuros masivos poli-metálicos hospedados en fallas) de Collahuasi (Masterman et al., 2005). De manera similar a lo observado en Altar, en El Salvador la tennantita de las venillas "D" se restringe a los niveles inferiores de la mina (por debajo de 2600 de nivel), mientras que las venas situadas por encima contienen abundante enargita (Gustafson y Hunt, 1975).

El estado de sulfuración de una asociación mineral, que es función de la fugacidad del azufre y de la temperatura, cambia de bajo a alto a medida que disminuye la temperatura de un sistema hidrotermal (Barton y Skinner, 1967; Einaudi et al, 2003). Brimhall (1979, 1980) y Brimhall y Ghiorso (1983) han documentado y modelado termodinámicamente la lixiviación hipogénica de la mineralización temprana y reprecipitación de Cu en asociaciones de alta sulfuración en Butte, Montana. Este fenómeno ha sido claramente operativo en El Salvador, donde la asociación calcopirita-bornita temprana han sido lixiviadas de los halos de las venas tipo "D", volviendo a precipitar más arriba en asociaciones de pirita + bornita (Gustafson y

Hunt, 1975). En Chuquicamata, gran parte de la mineralización temprana habría sido removilizada y el Cu fue re-precipitado en las venas del “estadio principal” (Main Stage Veins), lo cual requiere de una fuente magmática de calor y vapor de azufre (Ossandón et al., 2001).

En Altar, los fluidos hidrotermales que formaron las venillas tipo 5 parecen haber movilizado los sulfuros previos de las rocas alteradas, dado que la mayoría de las salbandas de alteración filica de estas venillas están lavadas de mineralización. Las asociaciones de alta sulfuración relacionadas a las venillas 6 y sus salbandas de alteración argílica avanzada se correlacionan con leyes de Cu similares a los de la alteración potásica (0,5-1,5% Cu) y mayores a las que predominan en la alteración filica (0,2-0,5% Cu). Estas asociaciones han sido interpretadas como producto de un fenómeno de enriquecimiento de Cu hipogénico en este distrito (Sillitoe, 1999; Almandoz et al., 2005). En las descripciones de las coronas del proyecto Altar se postuló la presencia de al menos dos eventos de alteración filica (Almandoz et al., 2005). Sin embargo, en este estudio se ha reconocido la presencia de caolinita/dickita en los halos de estas venillas, que están en desequilibrio con la alteración filica previa, y por lo tanto no corresponden a un segundo evento de alteración filica.

En el depósito el Salvador, la turmalina está en venillas y en brechas ligadas al estadio transicional junto a las venillas de molibdenita y están cortadas por las venillas tipo “D” (Gustafson y Hunt, 1975). En Altar, las venillas con turmalina constituyen venillas tipo “D” tardías (venillas tipo 5d) en los centros mineralizados del sector este y centro del proyecto y no son portadoras de mineralización. La turmalina también está como cemento de las brechas hidrotermales y relacionadas a las zonas de alteración filica en ambos centros y tienen escasa mineralización diseminada.

Las venillas de cuarzo \pm esfalerita \pm galena \pm pirita (tipo 7) y las venillas de calcita y anhidrita (tipo 8) de Altar están relacionadas espacialmente. Ambos tipos de venillas se asocian a un evento tardío de relleno de fallas. Como en Chuquicamata (Ossandón et al., 2001), en Altar estas venillas tardías con Zn y Pb cortan a los núcleos mineralizados, en vez de yacer en forma periférica.

Los sondeos de perforación 25 y 30 atraviesan una zona con mineralización hipogénica y enriquecimiento supergénico superpuesto relíctica dentro de la espesa zona de lavado (Fig. 6). Estas dos zonas de lixiviación y dos zonas de sulfuros hipogénicos podrían explicarse por la presencia de fallas inversas posteriores a la lixiviación que generaron la superposición observada en los sondeos.

6.4.1 Zonación de los metales

La distribución de los metales en el sistema Altar muestra una buena correlación Cu-Au (ver Figs. 47 y 49) como en la mayoría de los depósitos tipo pórfido de Cu (Sillitoe, 2000; Ulrich y Heinrich, 2001; Perelló et al., 2004). La principal mineralización de Mo se distribuye en el pórfido 4 y en las rocas de caja que lo rodean (ver figuras 47 y 49).

En muchos pórfidos de Cu ricos en Au, el Mo tiende a concentrarse en anillos externos que coinciden en parte con los núcleos de Cu-Au (por ejemplo, Saindak, Pakistán, Cabang Kiri, Batu Hijau y Esperanza, Sillitoe y Khan, 1977; Lowder y Dow, 1978; Ulrich y Heinrich, 2001; Garwin, 2002; Proffett, 2003; Perelló et al., 2004). En el depósito de Cu y Au La Alumbraera, el Mo es un componente económico menor, su precipitación es posterior al Cu y al Au y su distribución parece periférica (Ulrich y Heinrich, 2001). Bingham, Island Copper son pórfidos de Cu-Au-Mo que constituyen excepciones a esa generalización debido a sus núcleos profundos de molibdenita (John, 1978; Perelló et al., 1995, 1998). El Mo es un elemento incompatible que puede concentrarse en los magmas residuales, de allí la concentración de Mo en el pórfido más tardío del depósito Agua Rica (Trampeadero) (Franchini et al., 2011). El enfriamiento de los fluidos portadores de Mo (hecho que explicaría las altas concentraciones de Mo también en las rocas de caja con alteración filica) debieron haber favorecido la precipitación de molibdenita (e.j. en Agua Rica; Franchini et al., 2011).

6.5. Similitudes y diferencias con los pórfidos de Cu del segmento de subducción horizontal

En la Tabla 7 y a continuación se resumen los recursos minerales, las litologías, los pulsos mineralizantes, la relación de la mineralización con las alteraciones y las venillas, la correlación espacial entre metales, los lapsos de tiempo de alteración y mineralización y el estilo evolutivo de los principales pórfidos de Cu-(Mo-Au) del segmento de subducción horizontal: Los Pelambres, Pachón, Río Blanco y El Teniente y se comparan con las características del depósito Altar.

6.5.1. Los Pelambres

Los Pelambres (3,300 mT, 0,63% Cu; 0,016% Mo) (Perelló et al., 2007) se desarrolló entre los ~12,5 y 10,5 Ma a través del emplazamiento de un plutón de tonalita pre-mineral y sucesivos diques porfíricos intra-minerales de composición diorítica a cuarzo-monzonítica (14-10 Ma; Mpodozis, 2011) en secuencias volcánicas del Paleozoico tardío a Mioceno

(Atkinson et al., 1996) que incluye a riolitas del Cretácico superior, a la Formación Los Pelambres (33-25 Ma) y a la Formación Pachón (25-21 Ma) (Mpodozis, 2011). Este evento magmático-hidrotermal prolongado (~1,5-2 Ma) habría sido sostenido por el continuo aporte de magma intramineral (Perelló et al., 2007). Una falla de rumbo norte-noroeste que pasa por el centro del depósito se observa en fotografías aéreas (Atkinson et al., 1996) y continúa al norte hasta la zona de Altar.

La mineralización de Los Pelambres se relaciona a múltiples eventos de intrusión y alteración-mineralización y las leyes más altas de Cu están en las zonas de alteración potásica (Atkinson y Souviron, 1984; Skewes y Atkinson, 1985). En forma análoga a lo que se observa en Altar, en los Pelambres la mayor parte de la mineralización está alojada en “*stockworks*” de venillas y diseminaciones y las brechas magmáticas-hidrotermales son subordinadas (Sillitoe, 1973).

En Los Pelambres, hay venillas tempranas poco comunes con calcopirita y bornita que tienen halos con biotita, sericita y andalucita (tipo T4). Estas venillas indican una exsolución temprana de los fluidos hidrotermales que precipitaron Cu en desequilibrio con el intrusivo cuarzo diorítico. Excepto por la ausencia de estas venillas T4 tempranas mineralizadas, el resto de las venillas de Los Pelambres muestra una secuencia similar a la de Altar (ver Skewes y Atkinson, 1985).

En términos generales, las venillas incluyen: 1) un grupo de venillas milimétricas de sulfuros con salbandas de muscovita, sericita y clorita que introdujo calcopirita y bornita en las partes profundas del sistema (pulso principal de Cu-Mo y Au) y pirita en niveles superficiales y 2) un grupo tardío de venillas tipo “D” con salbandas de cuarzo-sericita que contiene pirita y sulfosales de Cu-As (pulso tardío de Cu-As) (Perelló et al., 2007). Este último grupo de venillas con salbandas fílicas parecen equivalentes a las venillas tipo 5 y 6 de Altar, aunque las venillas tipo 6 de Altar tienen salbandas de alteración argílica avanzada que indican cambios químicos y de temperatura en los fluidos hidrotermales.

Cada centro intrusivo mineralizado de Los Pelambres formó una zona central y profunda de bornita > calcopirita, seguida de una zona de calcopirita y finalmente una zona externa con pirita (Perelló et al., 2007). En Altar no se reconocieron núcleos profundos ricos en bornita. Considerando la mineralización hipogénica diseminada en las rocas alteradas y en las salbandas de las venillas de Altar, se puede establecer una zonación de los sulfuros con presencia de calcopirita > pirita en los niveles profundos, pirita > calcopirita y tennantita en niveles intermedios y pirita + enargita en los niveles superficiales.

6.5.2. El Pachón

El pórfido cuprífero El Pachón se encuentra aledaño a Los Pelambres pero en territorio argentino. Está formado por pórfidos diorítico-granodioríticos y diques dacítico-tonalíticos que en su conjunto intruyen a la Formación Pachón (Fernández et al. 1974), equivalente a la Formación Abanico a nivel regional. Con recursos de 1790 mT y una ley promedio de 0,51% de Cu estimado a diciembre de 2010, este proyecto es uno de los pórfidos de Cu sin desarrollar más mineralizados del mundo (Revista Panorama Minero, 2010).

Tabla 7. Comparación del depósito Altar con otros depósitos de Cu-(Mo-Au) del segmento de subducción horizontal					
Depósito	Altar	Los Pelambres	Pachón	El Teniente	Río Blanco
Referencias	Esta tesis; Peregrine et al., 2010.	Atkinson et al., 1996; Perelló et al., 2007.	Fernández et al. 1974.	Vry et al., 2010; Camus, 2002, 2003; Canell et al., 2005; Skewes et al., 2002, 2005.	Serrano et al., 1996; Deckart et al., 2005; A.J. Wilson com.per. 2009; Frikken et al., 2005; Cannel et al., 2005.
Recurso mineral	800mT 0,42% Cu; 0,059 gr/Tn Au *	3300 mT, 0,63% Cu; 0,016% Mo	1790 mT 0,51% Cu	>94 mT Cu; 2,5 mT Mo 12000 T con 0,65% Cu; 0,019 % Mo;	203 mT Cu, 0,018 % Mo 0,035 gr/Tn Au
Litologías asociadas a mineralización	Pórfidos andesíticos a dacíticos.	Pórfidos dioríticos a cuarzo monzoníticos intraminerales.	pórfiros dioríticos- granodioríticos y diques dacítico- tonalítico.	Plutones de composición intermedia a félsicos Brechas magmáticas- hidrotermales- CMET.	Brechas magmáticas- hidrotermales e intrusivos porfíricos.
Pulsos mineralizantes hipogénicos	P2: Cu-Au, Mo, Au-Ag-Cu y Pb-Zn. P3: Cu-Au, Mo, Cu, Cu-Au. P4: Cu-Au, Mo, Cu, Cu-Au y Pb-Zn.	1° Cu-Mo y Cu-Au 2° Cu-Mo 3° Cu-Mo-Au		1° Cu-Mo, 60% del Cu 2° Cu-Mo, 30% del Cu 3° Cu-Mo, 10% del Cu	1° Cu-Mo; 50% del Cu 2° Cu-Mo; 50% del Cu 3° Cu-Mo débil
Relación de pulsos mineralizantes con alteraciones y venillas	1° Cu-Au: Alt. potásica venillas 2b (1, 2a) 2° Mo: Alt.potásica venillas 3. 3° Au-Ag-Cu: vetas epitermales (P2); 3° Cu: venillas 5a (P3-P4) 4° Cu-Au: venillas tipo 6 (P3 y P4). 5° Pb-Zn: venillas tipo 7 (P2 y P4).	1° Alt. potásica venillas-brechas 2° Alt. filica venillas 3° Alt. filica venillas		1° Alt. potásica. Venillas de cz+anh- brechas 2° Alt. filica. Venillas ricas en Cu. 3° Alt. filica. Venillas ricas en Cu-brechas.	1° Alt. potásica. brechas y venillas 2° Alt. filica. brechas 3° Alt. filica. venillas
Correlaciones entre metales en zonas hipogénicas	Cu-Au: alta Cu-Mo: moderada Mo-Au: baja	Cu-Mo y Cu-Au en centros separados pero simultáneos		Cu-Mo: moderada, Mo se localiza alrededor de los centros ricos en Cu.	
Lapso de tiempo alt.-mineralización	~ 1,27 Ma	~1,5-2 Ma		~ 1,5-2 Ma	~ 2 Ma (Deckart et al., 2005)
Estilo evolutivo	Al menos tres ciclos de intrusión (P2, P3 y P4) alteración-mineralización.	Ciclos múltiples (Perelló et al., 2007).		Unidireccional (Klem et al., 2007); Ciclos múltiples (Vry et al., 2010).	Ciclos múltiples (Serrano et al., 1996).

* Recursos medidos e indicados, cut off 0,3% de Cu equivalente; P2: pórfido 2; P3: Pórfido 3; P4: pórfido 4.

El único antecedente para este depósito en la literatura científica corresponde al trabajo de Fernández et al. (1974) en el que describe la geología y en forma general la distribución de las alteraciones en superficie. No se cuenta hasta el momento con estudios de detalle de los pulsos mineralizantes ni datos geocronológicos de este proyecto. Según Clark (1993) El Pachón es una porción del mismo sistema que formó el depósito Los Pelambres.

La mineralización de Cu-Mo se concentra en los pórfidos y consiste de calcopirita, molibdenita con variable proporción de piritita y trazas de bornita (Fernández et al., 1974, Atkinson et al., 1996). Sin embargo el 70% de la mineralización del depósito ocurre en las rocas andesíticas contiguas a los pórfidos.

La alteración potásica se desarrolla con preferencia en las rocas porfíricas, cerca del contacto con la roca de caja. La alteración filica es intensa y también afecta a los plutones,

dando como resultado una paragénesis de sericita + pirita + cuarzo. La turmalina -en columnas de brecha y diseminada- es característica para este depósito. El halo propilítico afecta marginalmente a los intrusivos, siendo sus efectos más notorios en las rocas de caja volcánicas de composición intermedia y en las tobas ácidas (Fernández et al. 1974).

6.5.3. Río Blanco Los Bronces

Río Blanco-Los Bronces es un depósito de Cu-Mo hospedado en brechas, se encuentra 80 kilómetros al noreste de Santiago, en los Andes chilenos (latitud 33 ° 09') y a ~200 kilómetros de Altar. Tiene la concentración explotable de Cu más grande del mundo (203 millones de toneladas de Cu, A.j. Wilson, comunicación personal, 2009), 0,018% de Mo y 0,035 g/Tn de Au (Camus, 2002).

Este depósito está hospedado en las rocas volcánicas miocenas de la Formación Abanico, moderadamente deformada y la Formación Farellones, débilmente deformada (Warnaars et al, 1985; Serrano et al, 1996; Vargas et al, 1999; Hollings et al., 2005). Estas rocas han sido intruidas en el Mioceno tardío por el batolito San Francisco (Vergara et al, 1988; Serrano et al, 1996). En el Mioceno-Plioceno, el batolito San Francisco y la Formación Farellones fueron intruidas por brechas mineralizadas con cemento de biotita, brechas mineralizadas con cemento de turmalina y por pórfidos félsicos tardío-minerales (Serrano et al., 1996; Deckart et al., 2005).

Una significativa cantidad de mineralización de Cu (~ 90% del Cu hipogénico del depósito) se encuentra en la matriz de las brechas o diseminada alrededor de las brechas (Skewes y Stern, 1995; Serrano et al., 1996). Siete brechas diferentes han sido reconocidas (Cuadra, 1980; Warnaars, 1980, 1982). En la presente superficie de erosión, forman un único cuerpo alargado con forma de riñón que se extiende unos 2 km de norte a sur y alcanza una anchura máxima de 750 m (Warnaars et al., 1985). Las brechas de Los Bronces-Río Blanco son únicas debido a su abundancia, su tamaño, su gran complejidad y el alto contenido de turmalina. Cada brecha tiene sus propias características y cada una ha contribuido de manera diferente a la mineralización de Cu y Mo (Warnaars et al., 1985). A diferencia de Altar donde la mineralización en brechas es muy subordinada con respecto a la mineralización en venillas y diseminada, en Río Blanco-Los Bronces, las brechas dominan el sistema tanto en el aspecto geométrico como económico (Warnaars et al., 1985).

El primer pulso de mineralización de Cu-Mo en Río Blanco-Los Bronces (~50% del Cu del depósito) está en la matriz de las brechas con biotita del Complejo Río Blanco, en stockworks y diseminada en la alteración potásica de los intrusivos porfíricos cuarzo-monzoníticos (Serrano et al., 1996). Después de un período de levantamiento y erosión (ver

[Skewes y Holmgren, 1993](#)), se emplazaron las brechas ricas en turmalina (Donoso, Sur-Sur, La Unión, Don Luis, y Los Bronces) vinculadas a un estadio de alteración fílica y a segundo pulso de Cu-Mo que contienen el ~50% restante de Cu ([Serrano et al., 1996](#)). Finalmente, los pórfidos pliocenos débilmente mineralizados (tercer pulso de Cu-Mo), se emplazaron dentro y en forma periférica a la zona de brechas tempranas de biotita ([Frikken et al., 2005](#)). Esta mineralización de Cu-Mo tardía obedece a la removilización de la mineralización previa ([Rojas, 1985](#)), e incluye pirita y calcopirita, con bornita, molibdenita, galena, esfalerita, tennantita-tetraedrita, luzonita y enargita ([Serrano et al., 1996](#)). Cuando la alteración fílica de este estadio se superpone sobre la mineralización de la alteración potásica, suele observarse removilización y aumento local de las leyes de Cu ([Serrano et al., 1996](#)).

En resumen, en el depósito Río Blanco-Los Bronces se han definido dos pulsos importantes de mineralización de Cu-Mo y un tercer pulso de Cu-Mo débil. En cambio, en Altar se reconoció un mayor número de pulsos en dos centros mineralizados no coetáneos: Cu-Au, Mo, Au-Ag-Cu y Pb-Zn en el centro mineralizado del este, y pulsos de Cu-Au, Mo; Cu-Au y Pb-Zn en el centro mineralizado del filo central.

Los contactos de los intrusivos tardíos con plutones anteriores y brechas mineralizadas están comúnmente formados por zonas delgadas de brechas, algunas cementadas por turmalina \pm sulfuros y harina de roca ([Serrano et al., 1996](#)). Estas brechas de contacto están relacionadas a procesos mecánicos asociados a la intrusión de los pórfidos, que difieren de las grandes brechas magmáticas-hidrotermales mineralizadas descritas previamente ([Serrano et al., 1996](#)). La brecha magmática 2 de Altar, reconocida en el filo central entre las rocas de caja y el pórfido 4, podría ser interpretada como una brecha de contacto.

El emplazamiento de las brechas e intrusivos se produjo durante un lapso de tiempo de ~3 Ma ([Serrano et al., 1996](#)), mientras que la mineralización de Cu-Mo hipogénica probablemente persistió por 2 Ma ([Deckart et al., 2005](#)). [Deckart et al. \(2005\)](#) indican que los datos geocronológicos no resuelven si la formación de la mineralización fue continua o episódica. Sin embargo, sobre la base de relaciones de corte entre los intrusivos, postulan un modelo en el que el ascenso de fluidos salinos ricos en metales desde la cámara magmática parental ha sido periódicamente estimulado por la intrusión de los cuerpos hipabisales. Estos fundidos aportaron la energía térmica para la propulsión hacia arriba de los fluidos mineralizados, pero no fueron en sí mismos productivos. En este contexto, es significativo que [Davidson y Kamenetsky \(2001\)](#) y [Davidson et al. \(2005\)](#) han demostrado que la cámara magmática se mantuvo potencialmente fértil hasta sus etapas terminales. Estos hallazgos son compatibles con los nuevos datos geocronológicos que demuestran amplia coincidencia

temporal entre el alto grado de mineralización de Cu-Mo y el emplazamiento de los pórfidos félsicos tardíos (Deckart et al., 2005).

6.5.4. El Teniente

El Teniente es uno de los depósitos de Cu más grande del mundo (>94 mT Cu) y contiene la concentración explotable de Mo más grande conocida (2,5 mT Mo, Camus, 2003), con un recurso de más de 12.000 toneladas métricas de mineral y con leyes promedio de 0,65 % de Cu y 0,019 % Mo (Vry et al., 2010).

El depósito está alojado en el complejo plutónico-volcánico del Mioceno tardío conocido como el Complejo Máfico El Teniente, que forma parte de la Formación Farellones. El depósito ha sido objeto de numerosos estudios (Lindgren, 1922; Howell y Malloy, 1960; Camus, 1975; Skewes et al, 2002; Makshev et al, 2004; Cannell et al, 2005, 2007.; Skewes y Stern, 2007; Klemm et al, 2007). La mayoría de estos trabajos coinciden en que El Teniente representa un ejemplo clásico de depósito de tipo pórfido, en términos de la zonificación de sus alteraciones y sulfuros, su asociación con intrusiones félsicas y el predominio de la mineralización de Cu alojada en venas de cuarzo (e.j. Cannell et al., 2005). Skewes y colaboradores (Stern y Skewes, 2002; Skewes et al, 2005; Skewes y Stern, 2007) redefinieron a El Teniente como un depósito tipo mega-brecha con mineralización temporalmente ligada al emplazamiento de múltiples brechas ígneas- hidrotermales, previamente y de manera independiente a la intrusión de plutones félsicos. Otros estudios petrológicos y geocronológicos, de estructura y cronología de venillas y datos de química de los fluidos (Makshev et al., 2004, Cannell et al., 2005, 2007, Klemm et al., 2007) lo interpretaron en términos de los modelos convencionales de los depósitos de pórfidos de Cu. De acuerdo con Vry et al. (2010), El Teniente evolucionó a partir de la intrusión de una serie de plutones de composición intermedia a félsicos, asociados en forma espacial y temporal a brechas magmáticas-hidrotermales y a varios tipos de venillas que forman centros de mineralización individuales.

Las brechas magmáticas e hidrotermales de El Teniente tienen una extensión espacial significativa respecto a las dimensiones de los pórfidos y se asocian a centros de Cu hipógeno de alto grado (> 1%) (Skewes y Stern, 2007). Cinco tipos de brechas han sido observados en el depósito, asociadas espacialmente a las intrusiones individuales y que se superponen en el tiempo (Vry et al., 2010). A pesar de que estas brechas son importantes huéspedes de mineral de alta ley, más del 80 % de la mineralización de El Teniente se hospeda en el Complejo Máfico El Teniente (Camus, 1975; Cannell, 2004), formando parte de stockworks de múltiples tipos de venillas. El Complejo Máfico El Teniente proporcionó una trampa física

particularmente eficiente en términos de fracturas generadas por los complejos de brechas magmáticas-hidrotermales y además constituyó una trampa química eficaz para el depósito de sulfuros. En forma análoga, en las andesitas del CVI de Altar próximas a los intrusivos, se han reconocido altas leyes de Cu similares a las observadas en los pórfidos más mineralizados del proyecto, con mineralización principal de calcopirita. Las unidades litológicas con minerales máficos abundantes y por lo tanto ricas en hierro (Fe^{2+}), parecen favorecer un alto grado de mineralización en los pórfido de Cu (Phillips et al., 1974; Wilkinson et al., 1982), probablemente debido a su capacidad para precipitar de manera efectiva el Cu transportado en fluidos oxidantes (Sillitoe, 2010).

En los dos centros mineralizados de Altar, las brechas magmáticas e hidrotermales no hospedan mineralización de alta ley y son pequeñas. Se relacionan a la alteración filica. Contienen fragmentos de pórfidos, rocas de caja cercanas, a veces de venillas (e.j. venillas 2a en la brecha magmática 2 del filo central) y están cortadas por venillas tipo 5 y 6. Las brechas magmáticas e hidrotermales de los dos centros mineralizados reflejan episodios de fragmentación hidráulica (Burnham y Ohmoto, 1980; Fournier, 1999) de las rocas debido a la energía mecánica liberada por la expansión de la mezcla de magma y fluidos de baja densidad acumulados en el techo de la cámara magmática superficial. Este hidrofracturamiento indica que la P fluido superó la P hidrostática + resistencia al corte de las rocas (Tosdal y Richards, 2001). La brecha magmática tardía de mayor extensión en el sector este del proyecto no está mineralizada. En Altar como en El Teniente, la mayor parte de la mineralización se aloja en un stockwork de numerosos tipos de venillas y diseminada en las rocas alteradas. Las venillas de El Teniente han sido divididas en: (1) venillas pre-mineralización con biotita y/o feldespato potásico \pm cuarzo \pm albita, anhidrita-magnetita-actinolita-epidoto que se formaron antes del emplazamiento de los intrusivos y brechas con mineralización; (2) venas mineralizadas con gangas de cuarzo + anhidrita y halos potásicos formadas durante el primer pulso de mineralización de Cu-Mo (~60% del Cu total) que gradan a venas ricas en sulfuros con halos de alteración filica que representan el segundo pulso mineralizante (Cannell et al., 2005) y (3) venas tardías con sulfosales (Vry et al., 2010) (tercer pulso mineralizante, Cannell et al., 2005)

De manera similar a lo observado en Altar, las zonas hipogénica con altas leyes de Cu ($> 1,2\%$) están localizadas en los centros intrusivos (Cannell et al., 2005) y los valores más altos de Mo ($> 0,03\%$) están localmente alrededor de los intrusivos.

Se infiere que las claves de la evolución de un depósito gigante como El Teniente fueron una cámara magmática de larga vida (ver Cannell et al., 2005, Skewes y Stern 2007) que alcanzó composiciones más félsicas con el tiempo y alimentó a los cuerpos intrusivos que se

emplazaron por fallas (Vry et al., 2010). Como en Altar, la geocronología sugiere que los eventos episódicos transcurrieron durante ~1,5 Ma (Vry et al., 2010). El emplazamiento de múltiples intrusivos porfíricos en un volumen relativamente reducido de rocas de caja en El Teniente generó una superposición de los anillos de mineralización que incrementaron las leyes de los metales. Otra característica de El Teniente es la presencia de una brecha post-mineralización (Vry et al., 2010) en el centro del proyecto, formada durante la etapa tardía (Cannel et al., 2005).

Algunos autores interpretan que la secuencia temporal y las variaciones en la composición de los fluidos del sistema hidrotermal de El Teniente indican una evolución unidireccional (en el sentido de Seedorff y Einaudi, 2004) relativamente sencilla (Klemm et al., 2007). Sin embargo, como se expuso previamente, Vry et al. (2010) proponen que el depósito fue formado por una serie de pulsos localizados de actividad magmático-hidrotermal que siguieron caminos de evolución similares, y por lo tanto el modelo unidireccional de evolución de los fluidos y mineralización para el depósito no es adecuado.

7. CONCLUSIONES

El estudio de tres secciones este-oeste que cortan al pórfido de Cu-(Au-Mo) en profundidad, de las alteraciones-mineralizaciones y de las vetas epitermales de Au-(Ag-Cu) que afloran en la superficie del Proyecto Altar, permitió documentar las litologías, sus alteraciones-mineralizaciones, las asociaciones de minerales hidrotermales en equilibrio, los tipos y secuencia de venillas y la distribución de los metales.

Se diferenciaron dos centros magmáticos-hidrotermales con mineralización, localizados en el valle este y en el filo central, y tres intrusivos (pórfidos 2, 3 y 4) que aportaron fluidos hidrotermales y generaron alteraciones, mineralización diseminada y en una secuencia de venillas que se repitió al menos tres veces en un intervalo de ~1,27 Ma.

En primer lugar, se emplazó el pórfido 1 que no produjo alteración ni mineralización hidrotermal. Luego de un período de ~0,13 Ma, se intruyó el pórfido 2 relacionado a un sistema hidrotermal que generó, en profundidad, la alteración-mineralización de tipo pórfido de Cu-(Au-Mo) y el emplazamiento de brechas magmática e hidrotermal y en los niveles superficiales, las vetas epitermales de Au-(Ag-Cu) con salbandas de alteración argílica avanzada. En conjunto, el pórfido 2 mineralizado, las brechas y las vetas epitermales forman el centro magmático-hidrotermal del sector este (11,75-11,62 Ma U-Pb) con los siguientes pulsos de mineralización: Cu-Au (venillas tipo 2b y mineralización diseminada en alteración potásica), Mo (venillas tipo 3), Au-Ag-Cu (vetas epitermales) y Pb-Zn (venillas tipo 7). Durante la formación de este centro predominaron los esfuerzos locales inducidos por la

intrusión del magma desde una cámara magmática subyacente y no hubo superposición de la mineralización epitermal sobre el sistema profundo de tipo pórfido.

Luego de $\sim 0,49$ Ma, en el filo central se emplazó el pórfido 3 y luego de $\sim 0,78$ Ma, el pórfido 4 y las brechas magmática e hidrotermal que forman el centro magmático-hidrotermal del filo central (11,13-10,35 Ma U-Pb). Los sistemas hidrotermales asociados generaron -en un período de 0,78 Ma- las zonas de alteración y mineralización de tipo pórfido de Cu-(Au-Mo) en ambos intrusivos. Para cada pórfido se definió la siguiente secuencia de pulsos de mineralización: Cu-Au (venillas tipo 2b y mineralización diseminada en alteración potásica), Mo (venillas tipo 3), Cu (venillas 5a), Cu-Au (venillas tipo 6). En el pórfido 4 también se determinó un estadio tardío de mineralización de Pb-Zn. Durante la formación del centro magmático-hidrotermal del filo central, los esfuerzos compresivos regionales tuvieron mayor importancia en el control del emplazamiento de los pórfidos 3 y 4 que los esfuerzos relacionados a la actividad magmática local. El alzamiento por deformación (pliegues y fallas) y consiguiente denudación del terreno, habría ocasionando en este centro, la superposición de las venillas tardías portadoras de sulfosales y de oro sobre las venillas tempranas y profundas, fenómeno que se conoce como “*telescoping*”.

La mayor parte de la mineralización en el Proyecto Altar está diseminada y alojada en un “stockwork” de venillas formadas a partir de múltiples ciclos de fracturación y de relleno, y la secuencia de venillas se habría repetido en el tiempo. Cada venilla, a su vez, muestra múltiples aperturas, disolución y relleno con varias generaciones de cuarzo y con venillas tardías. En las venillas tempranas 2b y 3, la mineralización es posterior a las primeras y más abundantes generaciones cuarzo y está en contacto con la generación de cuarzo más joven y subordinada en volumen.

La distribución de los valores más elevados de Cu y de Au se asocia a los cuerpos intrusivos mineralizados del proyecto. La mineralización de Mo más importante está vinculada al pórfido mineralizado tardío (pórfido 4).

REFERENCIAS

- Almandoz, G., Zulliguer, G., y Márquez-Zavalía, F., 2005. Altar: Mineralización de alta sulfuración vinculada a un sistema de pórfido cuprífero, San Juan, Argentina. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, tomo II, p. 369-376.
- Atkinson, W.W., Jr., Souviron, A., Vehrs, T.I., y Faunes, A., 1996. Geology and mineral zoning of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 5, p. 131–156.

- Atkinson, W.W. y Souviron, A., 1984. Los Pelambres copper Project: Chile. Society of Mining Engineers of AIME Transactions, v. 280, p 1876-1882.
- Ballard, J.R., Palin, J.M., Williams, I.S., Campbell, I.H., y Faunes, A., 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by LA-ICP-MS and SHRIMP: *Geology*, v. 29, p. 383–386.
- Barton, P.B., Jr., y Skinner, B.J., 1967. Sulfide mineral stabilities, *in* Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Rinehart & Winston, p. 236–333.
- Baumgartner, R., Fontboté, L., Spikings, R., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Schneider, J., Page, L., y Gutjahr, M., 2009. Bracketing the age of magmatic- hydrothermal activity at the Cerro de Pasco epithermal polymetallic deposit, central Peru: A U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study: *Economic Geology*, v. 104, p. 479–504.
- Bendezú, R., Page, L., Spikings, R., Pecskey, Z., y Fontboté, L., 2008. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alunite ages from the Colquijirca district, Peru: Evidence of a long period of magmatic SO_2 degassing during formation of epithermal Au-Ag and Cordilleran polymetallic ores: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 777–789.
- Brimhall, G.H., Jr., 1977. Early fracture-controlled disseminated mineralization at Butte, Montana: *Economic Geology*, v. 72, p. 37–59.
- Brimhall, G.H., 1979. Lithologic determination of mass transfer mechanisms of multiple-stage porphyry copper mineralization at Butte, Montana: Vein formation by hypogene leaching and enrichment of hypogene protore: *Economic Geology*, v. 74, p. 556–589.
- Brimhall, G.H., 1980. Deep hypogene oxidation of porphyry copper potassium-silicate protore at Butte, Montana: A theoretical evaluation of the copper remobilization hypothesis: *Economic Geology*, v. 75, p. 384–409.
- Brimhall, G.H., Jr., y Ghiorso, M.S., 1983. Origin and ore-forming consequences of the advanced argillic alteration process in hypogene environments by magmatic gas contamination of meteoric fluids: *Economic Geology*, v. 78, p. 73–90.
- Burnham, C.W., y Ohmoto, H., 1980. Late-stage processes of felsic magmatism: *Mining Geology Special Issue 8*, p. 1–11.
- Camus, F., 1975. Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wallrock alteration: *Economic Geology*, v. 70, p. 1341–1372.
- Camus, F., 2002. The Andean porphyry systems: University of Tasmania, Centre for Ore Deposit Research Special Publication 4, p. 5–22.
- Camus, F., 2003. Geología de los sistemas porfiricos en los Andes de Chile: Santiago, Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, 267 p.

- Cannell, J., 2004. El Teniente porphyry copper-molybdenum deposit, central Chile: Unpublished Ph.D. thesis, Hobart, Australia, University of Tasmania, 299 p.
- Cannell, J., Cooke, D.R., Walshe, J.L., y Stein, H., 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit: *Economic Geology*, v. 100, p. 979–1003.
- Cannell, J., Cooke, D.R., Walshe, J.L., y Stein, 2007. Geology, mineralization, alteration and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit—a reply: *Economic Geology*, v.102, p. 1171–1180.
- Cathles, L.M., 1977. An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling: *Economic Geology*, v. 72, p. 804–826.
- Cathles, L.M., and Shannon, R., 2007. How potassium silicate alteration suggests the formation of porphyry copper deposits begins with the nearly explosive but barren expulsion of large volumes of magmatic water: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 262, p. 92–108.
- Cathles, L.M., Erendi, A.H.J., y Barrie, T., 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event?: *Economic Geology*, v. 92, p. 766–771.
- Clark, A.H., 1993. Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive?: *Society of Economic Geologists Special Publication 2*, p. 213–283.
- Cuadra, P.C., 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*, 27, 3-26.
- Davidson, P., Kamenetsky, V.S., Cooke, D.R., Frikken, P., Hollings, P., Ryan, C., Van Achterbergh, E., Mernagh, T., Skarmeta, J., Serrano, L., y Vargas R., 2005. Magmatic precursors of hydrothermal fluids at the Río Blanco Cu-Mo deposit, Chile: Links to silicate magmas and metal transport: *Economic Geology*, 100, 963-978.
- Davidson, P., y Kamenetsky, V.S., 2001. Immiscibility and continuous felsic melt-fluid evolution within the Rio Blanco porphyry system, Chile: Evidence from inclusions in magmatic quartz: *Economic Geology*, v. 96, p.1921–1929.
- Deckart, K., Clark, A.H., Aguilar, C., Vargas, R., Bertens, A., Mortensen, J.K., y Fanning, M., 2005. 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*, v. 100, p. 905–934.
- Deino, A.L., 2001. Users manual for Mass Spec v. 5.02: Berkeley Geochronology Center Special Publication 1a, 119 p.

- Demars C, Pagel M, Deloule E, Blanc P, 1996. Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of trace element distributions and fluid-inclusion P-T-X properties in authigenic quartz. *American Mineralogist* 81, 891-901.
- Dilles, J.H., y Einaudi, M.T., 1992. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada—a 6-km vertical reconstruction: *Economic Geology*, v. 87, p. 1963–2001.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., y Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments: *Society of Economic Geologists Special Publication* 10, p. 285–313.
- Fernández, R., Brown, F. y Lencinas, A. 1974. Pachón, un nuevo pórfido cuprífero argentino. *5º Congreso Geológico Argentino, Actas* 1: 77-89.
- Fournier R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment: *Economic Geology*, V. 94, p. 1193-1211.
- Franchini, M., Impiccini, A., Lentz, D., Ríos, J., O'Leary, S., Pons, J., y Schalamuk, A., 2011. Porphyry to epithermal transition in the Agua Rica polymetallic deposit, Catamarca, Argentina: An integrated petrologic analysis of ore and alteration parageneses. *Ore Geology Reviews* 41 (2011) 49–74.
- Frikken, P.H., Cooke, D.R., Walshe, J.L., Archibald, D., Skarmeta, J., Serrano, L., y Vargas, R., 2005. Mineralogical and isotopic zonation in the Sur-Sur tourmaline breccia, Río Blanco-Los Bronces Cu-Mo deposit, Chile: Implications for ore genesis: *Economic Geology*, v. 100, p. 935–961.
- Garwin, S., 2002. The geologic setting of intrusion-related hydrothermal systems near the Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa, Indonesia: *Society of Economic Geologists Special Publication* 9, p. 333–366.
- Götze, J., Plötze, M., Habermann, D., 2001. Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz ± a review. *Mineralogy and Petrology* 71, 225-250.
- Gustafson, L.B., 1978. Some major factors of porphyry copper genesis: *Economic Geology*, 73, 600-607.
- Gustafson, L.B., Orquera, W., McWilliams, M., Castro, M., Olivares, O., Rojas, G., Maluenda, J., y Mendez, M., 2001. Multiple centers of mineralization in the Indio Muerto district, El Salvador, Chile: *Economic Geology*, v. 96, p. 325–350.

- Gustafson L.B., y Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit al El Salvador, Chile: *Economic Geology*, V. 70, p.857-912.
- Gustafson, L.B., y Quiroga, J., 1995. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile: *Economic Geology*, v. 90, p. 2–16.
- Harris, A.C., Dunlap, W.J., Reiners, P.W., Allen, C.M., Cooke, D.R., White, N.C., Campbell, I.H., y Golding, S.D., 2008. Multimillion year thermal history of a porphyry copper deposit: Application of U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He chronometers, Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit, Argentina: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 295–314.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Jr., y Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines: *Economic Geology*, v. 93, p. 373–404.
- Heinrich, C.A., 2003. Magmatic vapor condensation and the relation between porphyries and epithermal Au (Cu-As) mineralization: Thermodynamic constraints: *Mineral Exploration and Sustainable Development, Society for Geology Applied to Mineral Deposits Biennial Meeting, 7th, Proceedings*, v. 1, p. 279–282.
- Hollings, P., Cooke, D., y Clark, A., 2005. Regional Geochemistry of Tertiary Igneous Rocks in Central Chile: Implications for the Geodynamic Environment of Giant Porphyry Copper and Epithermal Gold Mineralization. *Economic Geology*, 100, 887-904.
- Howell, F.H., y Molloy, S., 1960. Geology of the Braden orebody, Chile, South America: *Economic Geology*, v. 55, p. 863–905.
- Hunt, J.P., Bratt, J.A., y Marquardt, L., 1983. Quebrada Blanca, Chile: An enriched porphyry copper deposit: *Mining Engineering*, v. 35, p. 636–644.
- John, E.C., 1978, Mineral zones in the Utah Copper orebody: *Economic Geology*, v. 73, p. 1250–1259.
- Jones, B., Kamenetsky, V., Davidson, P., y Allen, C., 2007. Antapaccay porphyry Cu-Au deposit: A product of Andean tectonism and evolving magmatism, late Eocene-early Oligocene Abancay batholith, Altiplano, southern Peru [abs.]: *Ores and orogenesis. A symposium honoring the career of William R. Dickinson*, Tucson, 2007, Program with Abstracts: Tucson, Arizona Geological Society, p. 132–133.
- Kirkham, R.V., 1971. Intermineral intrusions and their bearing on the origin of porphyry copper and molybdenum deposits: *Economic Geology*, v. 66, p. 1244–1249.
- Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A., y Campos, E., 2007. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids: *Economic Geology*, v. 102, p. 1021–1045.

- Kuiper, K., Deino, A., Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Renne, P. R. y Wijbrans, J. R., 2008. Synchronizing Rock Clocks of Earth History: *Science*, v. 320, p. 500-504.
- Lindgren, W., y Bastin, E.S., 1922. The Geology of the Braden mine, Rancagua, Chile: *Economic Geology*, v. 17, p. 75–99.
- Lowder, G.G., y Dow, J.A.S., 1978. Geology and exploration of porphyry copper deposits in North Sulawesi, Indonesia: *Economic Geology*, v. 73, p. 628–644.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J., y Zentilli, M., 2004. 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: *Society of Economic Geologists Special Publication 11*, p. 15–54.
- Masterman, G.J., Cooke, D.R., Berry, R.F., Walshe, J.L., Lee, A.W., y Clark, A.H., 2005. Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile: *Economic Geology*, v. 100, p. 835–862.
- McInnes, I.A., Evans, N.J., Fu, F.Q., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W.L., Bertens, A., Sukarna, D., Permanadewi, S., Andrew, R.L., y Deckart, K., 2005. Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian and Iranian porphyry Cu-Au-Mo deposits, *in* Porter, T.M., ed., *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*: Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 27–42.
- Meyer, C., 1965. An early potassic type of wall rock alteration at Butte, Montana: *American Mineralogist*, v. 50, p. 1717–1722.
- Meyer, C., Shea, E.P., Goddard, C.C., Jr., y Staff, 1968. Ore deposits at Butte, Montana, *in* Ridge, J.D., ed., *Ore deposits of the United States, 1933–67*, v. 2: New York, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, p. 1373–1416.
- Moore, D.M., Reynolds, R.J.R., 1997. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, New York. 378 pp.
- Mpodozis, C.A., 2011. Presentación oral: Los Pórfidos Cupríferos como “Singularidades Tectónicas”: Relaciones entre Mineralización y Tectónica Global. Congreso Geológico Argentino, Neuquén.
- Müller, A., Lennox, P. y Trzebski, R. 2002. Cathodoluminescence and micro-structural evidence for crystallisation and deformation processes of granites in the Eastern Lachlan Fold Belt (SE Australia). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143, 510-524.
- Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L.B., Lindsay, D.D., y Zentilli, M., 2001. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report: *Economic Geology*, v. 96, p. 249–270.

- Padilla-Garza, R.A., Titley, S.R., y Eastoe, C.J., 2004. Hypogene evolution of the Escondida porphyry copper deposit, Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 11, p. 141–165.
- Peregrin Metals Ltd., 2006. Exploration Report, Altar Project. San Juan Province, Argentina. 73p.
- Peregrine Metals Ltd., 2010. Altar Project San Juan Province Argentina Project, Province, NI 43-101 Technical Report October 4. p.159.
- Perelló, J.A., Fleming, J.A., O’Kane, K.P., Burt, P.D., Clarke, G.A., Himes, M.D., y Reeves, A.T., 1995. Porphyry copper-gold-molybdenum deposits in the Island Copper cluster, northern Vancouver Island, British Columbia: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Special Volume 46, p. 214–238.
- Perelló, J., Rojas, N., Devaux, C., Fava, L., Etchart, E., y Harman, P., 1998. Discovery of the Agua Rica porphyry Cu-Mo-Au deposit, Catamarca Province, northwestern Argentina. Part II: Geology, *in* Porter, T.M., ed., Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective: Adelaide, Australian Mineral Foundation, p. 117–132.
- Perelló, J., Brockway, H., y Martini, R., 2004. Discovery and geology of the Esperanza porphyry copper-gold deposit, Antofagasta Region, northern Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 11, p. 167–186.
- Perelló, J., Sillitoe, R.H., Brockway, H., Posso, H.M., East, P., Solé, M., Stein, H., 2007. Los Pelambres, Chile: Recent advances in the geology and evolution of a major Cu-Mo and Cu-Au porphyry system. Ores and Ore genesis Symposium; Tucson, Arizona. Abstracts: 133-134.
- Perny B, Eberhardt P, Ramseyer K, Mullis J, Pankrath R, 1992. Microdistribution of Al, Li, and Na in quartz: possible causes and correlation with short-lived cathodoluminescence. *American Mineralogist* 77, 534-544.
- Phillips, C.H., Gambell, N.A., y Fountain, D.S., 1974. Hydrothermal alteration, mineralization, and zoning in the Ray deposit: *Economic Geology*, v. 69, p. 1237–1250.
- Pollard, P.J., y Taylor, R.G., 2002, Paragenesis of the Grasberg Cu-Au deposit, Irian Jaya, Indonesia: Results from logging section 13: *Mineralium Deposita*, v. 37, p. 117–136.
- Proffett, J.M., 2003. Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper gold deposit, Argentina: *Economic Geology*, v. 98, p. 1535–1574.
- Proffett, J.M. 2009. High Cu grades in porphyry Cu deposits and their relationship to emplacement depth of magmatic sources: *Geology*, v. 37, p. 675–678.
- Redmond, P.B., Landtwing, M.R., y Einaudi, M.T., 2001. Cycles of porphyry dike emplacement, veining, alteration and mineralization in the Bingham porphyry Cu-Au-

- Mo deposit, Utah, *in* Piestrzynski., A., et al., eds., Mineral deposits at the beginning of the 21st century: Joint Biennial SGA-SEG Meeting, 6th, Kraków, Poland, 2001, Proceedings, p. 473–476.
- Redmond, P.B., 2002. Magmatic-hydrothermal fluids and copper-gold ore formation at Bingham Canyon, Utha: Unpublished Ph.D. thesis, Stanford University, 228 p.
- Redmond, P.B., Einaudi, M.T., Inan, E.E., Landtwing, M.R., y Heinrich, C.A., 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposits, Utah: *Geology*, v. 32, p. 217–220.
- Revista Panorama Minero, 2010. El Proyecto Pachón, diciembre de 2010.
- Rojas, A., 1985, Geología y petrogénesis del pórfido Don Luis en el yacimiento Río Blanco, CODELCO-Chile: Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Unpublished Memoria de Título, 109 p.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., 2008. Fluid Inclusion Evidence for Magmatic-Hydrothermal Fluid Evolution in the Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Butte, Montana, *Economic Geology*, Vol. 103, pp.307-334.
- Seedorff, E., Dilles, J., Proffett, J., Einaudi, M., 2005. Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features, *Economic Geology* 100th anniversary volume, pp.251-298.
- Seedorff, E., y Einaudi, M.T., 2004. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: I. Sequence and abundance of hydrothermal mineral assemblages, flow paths of evolving fluids, and evolutionary style: *Economic Geology*, v. 99, p. 3–37.
- Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holmgren, C., Contreras, A., Godoy, S., Vela, I., Skewes, A.M., y Stern, C.R., 1996. The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes: *Society of Economic Geologists Special Publication* 5, p. 119–129.
- Shinohara, H., y Hedenquist, J.W., 1997. Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines: *Journal of Petrology*, v. 38, p. 1741–1752.
- Sillitoe, 1973. The tops and bottoms of porphyry copper deposits: *Economic Geology*, v. 68, p. 799–815.
- Sillitoe, R.H., 1999. Geology and Exploration Potential of the Altar and Quebrada de la Mina Porphyry Copper/Gold Prospects, San Juan Province, Argentina: Unpublished Report Prepared for Rio Tinto Mining and Exploration Ltd. 10 p.

- Sillitoe R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 315–345.
- Sillitoe R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, v. 105, pp. 3–41.
- Sillitoe, R.H., y Gappe, I.M., Jr., 1984. Philippine porphyry copper deposits: Geologic setting and characteristics: Bangkok, Thailand, United Nations ESCAP, CCOP Technical Publication 14, 89 p.
- Sillitoe, R.H., y Khan, S.N., 1977. Geology of the Saindak porphyry copper deposit, Pakistan: *Institution of Mining and Metallurgy Transactions*, sec. B, v. 86, p. B27–B42.
- Skewes, A.M., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P.H., y Stern, C.R., 2002. The giant El Teniente breccia deposit: Hypogene copper distribution and emplacement: *Society of Economic Geologists Special Publication 9*, p. 299–332.
- Skewes, A.M., Arevalo, A., Floody, R., Zuñiga, P.H., y Stern, C., 2005. The El Teniente megabreccia deposit: The world's largest copper deposit, *in* Porter, T.M., ed., *Super porphyry copper and gold deposits—a global perspective*: Adelaide, Australia, Porter Geoscience Consultancy Publishing, v. 1, p. 83–113.
- Skewes A.M y Atkinson W.W., 1985. Petrology of the early formed hydrothermal veins within the central potassic alteration zone of Los Pelambres porphyry copper deposit: Chile: *Revista Geológica de Chile*, 25-26, 39-56.
- Skewes, A., y Holmgren, C., 1993. Solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfídico Los Bronces, Chile Central (33S): Aplicación de geotermometría de inclusiones fluidas: *Revista Geológica de Chile*, v. 20, p. 71–83.
- Skewes, M.A., y Stern, C.R., 1995. Genesis of the giant Late Miocene to Pliocene copper deposits of central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution: *International Geology Reviews*, v. 37, p. 71–84.
- Skewes, A.M., y Stern, C.R., 2007. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit—a discussion: *Economic Geology*, v. 102, p. 1165–1170.
- Steiger, R.H., y Jäger, E., 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 36, p. 359-363.
- Stern, C., y Skewes, A.M., 2002. Role of mantle-derived mafic magmas in the generation of the giant Miocene and Pliocene copper deposits of central Chile [abs.]: *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, v. 34, p. 88.

- Stevens Kalceff MA, Phillips MR, 1995. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz. *Phys Rev* 52, 3122-3134.
- Tosdal, R.M., y Richards, J.P., 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu \pm Mo \pm Au deposits: *Reviews in Economic Geology*, v. 14, p. 157–181.
- Ulrich, T., y Heinrich, C.A., 2001. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina: *Economic Geology*, v. 96, p. 1719–1742.
- Vargas, R., Gustafson, L.B., Vukasovic, M., Tidy, E., y Skewes, M.A., 1999. Ore breccias in the Rio Blanco-Los Bronces porphyry copper deposit, Chile: *Society of Economic Geologists Special Publication* 7, p. 281–297.
- Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S, Sepulveda, P., Thiele, R., y Drake, R., 1988. Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31°30'S-34°35'S): *Journal of South American Earth Sciences*, v.1, p.199–209.
- Warnaars, F. W., 1980. Brechas de Cobre y Turmalina en Los Bronces, Chile: *Cong. Porphyry Copper Mining*, 50th, Santiago, Nov. 1980, *Proc.*, v. 3, p. 175-201.
- Warnaars, F. W., 1982. Copper tourmaline breccias at Los Bronces, Chile: *Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers Trans.*, v. 272, p. 1902-1911.
- Warnaars, F.W., Holmgren, C., y Barassi, S., 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Rio Blanco, Chile: *Economic Geology*, v. 80, p. 1544–1565.
- Vry, V.H., Wilkinson, J. J., Seguel, J., Millán, J., 2010. Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System. *Economic Geology*, 105, 119-153.
- Wilkinson, W.H., Jr., Vega, L.A., and Titley, S.R., 1982. Geology and ore deposits at Mineral Park, Mohave County, Arizona, *in* Titley, S.R., ed., *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*: Tucson, University of Arizona Press, p. 523–541.
- Wright, T.L. y Stewart, D.B. 1968. X-ray and optical study of alkali-feldspar: I. Determination of composition and structural state from refined unit-cell parameters and 2V. *American Mineralogist* 53:38-87.

Tabla 3. Análisis de DRX en muestras de los sondeos AL-1, AL-4 y 43 (Perfiles 6517000 N y 65166700 N)

Muestra	Mineralogía Muestra Total	Mineralogía Muestra Total	Mineralogía Fracción
Profundidad (m)	Minerales Transparentes	Minerales Opacos	< 2 mm (%) IK
A-1-7		hem, jar	ill, ik: 0.31 (90), chl (10)
A-1-58	plag (54), arc (19), arc (14), y (3)	py, cpy (hm); dg, cv	chl (80), ill ik 0.21 (20)
A-1-86	cz (55), arc (37), plag (5), anh (3)	jar	ill (100), ik: 0.20
A-1-107	cz (43), arc (49), plag (5), anh (3)	jar	ill (100), ik: 0.38
A-1-150	cz (72), arc (25), anh (3)	jar	ill (100), ik: 0.15
A-1-190	plag (64), cz (17), arc (17), anh (2)	mg	chl (100)
A-1-296	cz (58), arc (37), plag (5)	py, cpy; cv, dg; en	ill, ik: 0.13 (100)
A-1-300	cz (53), arc (41), plag (3), anh (3), py	py, cpy; dg, cv	ill, ik: 0.13 (100)
A-1-327	cz (63), arc (31), plag (6)	cpy, py; dg, cv	ill, ik: 0.15 (100)
A-1-340	plag (40), cz (30), arc (30), anh (t)	cpy, py, (hm); dg, cv	ill, ik: 0.15 (75), chl (25)
A-1-353	cz (56), arc (38), plag (3), anh (3)	cpy, py; cv, dg; en	ill, ik: 0.15, chl (t)
A-1-362	plag (45), cz (33), arc (20), anh (2)	cpy, py; dg, cv.	ill, ik: 0.11 (90), chl (10)
A-1-375	cz (64), arc (24), plag (10), anh (2)	cpy, py; dg	ill, ik: 0.13 (94), chl (6)
A-1-382	arc (39), cz (33), plag (15), y (10), anh (2)	cpy, py; dg	ill, ik: 0.15 (90), chl(10)
A-1-406	arc (52), cz (34), y (10), plag (2), anh (2)	cpy, py, bn; dg, cv	ill, ik: 0.23 (96), chl (4)
A-1-414	arc (66), cz (27), plag (5), anh (2)	py, cpy; tn; en	ill, ik: 0.11 (100)
A-1-444	cz (55), arc (37), plag (4), anh (4),	py, tn, en	ill, ik: 0.12 (100)
A-1-456	cz (58), arc (34), plag (3), y (3), anh (2)	py, tn, en	ill, ik: 0.13 (100)
A-1-466	plag (50), cz (25), arc (15), y (8), anh (2)	cpy, py; en	ill, ik: 0.13 (90), chl (10)
A-4-33	cz (45), plag (19), arc (11), anh (1)	hm, jar, py (t)	ill (100)
A-4-67	cz (50), arc (50)	jar	ill (100)
A-4-86	cz (53), arc(45), plag (2)	jar	ill (100)
A-4-135	plag(48), cz (27), arc (25)	jar	chl (100)
A-4-148	cz (35), plag (34), arc (31)	hm	ill (100)
A-4-172	cz(55), y (30), arc (14), plag (1)	cpy, dg, py (t)	ill (100)
A-4-299	cz (43), arc (47), ksp(10)		ill (100)
A-4-370	cz (55), arc (26), plag (15), y (4)	py	
A-4-378	plag (53), arc (21), cz (19), y (7)	cpy, py, hm	chl (100)
A-4-387	cz (47), arc (42), y (6), plag (3), ksp (2)	py	
A-4-428	plag (35), cz (27), arc (22), anh (13), y (3)	py, cpy	ill, chl
A-4-436	plag (45), arc (22), cz (21), anh (10), y (2)	py, cpy	ill, chl
A-4-467	cz(54), arc (30), plag(6), anh (6), y(3), Ksp (1)	py, cpy	ill (100)
A-4-477	plag(44), arc(20), cz(23), anh (12), y(1)	py, cpy	ill, chl
A-4-479	plag(43), cz(21), anh(20), arc (16),	py, cpy	ill, chl
A-4-489	cz (49), arc(25), y (17), plag (6), anh (2)	py, cpy	ill (100)
A-4-500	plag (46), cz (34), arc (10), (5), anh (5)	py, cpy	ill, chl
A-43-210	cz >> arc > plag, Ksp, anh, y (t)	py, cpy, bn, en, dg	ill, chl (t)
A-43-229	plag >> arc > cz, y (t)	py, cpy, tn, en, dg	ill (46), chl (40), caol/dick
A-43-263	cz > arc >> plag > Ksp, anh, y (t)	py, cpy, tn, , dg, cv	ill (77), chl (12), caol/dick (11)
A-43-661	cz > plag >> arc > anh, y (t)	cpy, py	ill (100)
A-43-690	plag > cz >> arc = anh, y (t)	hm, bn, tn, dg, cv	ill, chl (t), caol/dick (t)
A-43-745	plag > cz >> arc = anh, y (t)	cpy, py	ill (100)
A-43-869	plag > cz >> arc = anh, y (t)	cpy, py, tn (t)	ill, caol/dick (t)
A-43-907	plag > cz >> arc = anh, y (t)	cpy, py, hm	ill, caol/dick (t) y chl (t)

Análisis realizados con difractor de rayos X y microscopio de polarización.

Abreviaturas: anh: anhidrita; arc: arcilla+mica; bn: bornita; caol: caolinita; chl: clorita; cpy: calcopirita; cz: cuarzo; cv: covelina; dick: dickita; dg: digenita; en: enargita; hm: hematita; kps: feldespato potásico; fdp: filosilicato dioctaédrico potásico; jar: jarosita; mo: molibdenita; plag: plagioclasa; py: pirita; rt: rutilo; sl: esfalerita; td: tetraedrita; tn: tennantita; tour: turmalina; y: yeso. (t): trazas. IK: índice de kubler

Entre paréntesis se indica la proporción determinada por métodos de cuantificación.

Tabla 4. Análisis de DRX en muestras de los sondeos AL-57, AL-49, AL-46 y AL-14 (Perfil 6516700 N)

Muestra sondeo-profundidad (m)	Mineralogía Muestra Total Minerales Opacos	Mineralogía Fracción < 2 mm (%)
A-57-79,3	oro (t)	ill (100)
A-57-223	py, en, tn, dg	ill (100)
A-57-317	cpy, py	ill, caol/dick (t)
A-57- 317	hm	ill, caol/dick (t)
A-57 -338	cpy, py	ill (100)
A-57- 366	cpy, py	ill (40), caol/dick (40), chl (20)
A-57-374	cpy, py	ill (100)
A-57- 374	cpy, py	illita. caol/dick (t)
A-57- 434	hm	ill (100)
A-57-622	cpy, py	ill (100)
A-57-672	cpy, py, tn	ill (100)
A-49- 77	py	ill (54), chl (35), caol/dick (11)
A-49- 142	cpy, py, dg, cv	ill (50), chl (38), caol/dick (12)
A-49- 161	dg	ill (100)
A-49- 170	dg+cv	ill (40), chl (30), caol/dick (30)
A-49- 192	py	ill (100)
A-49- 289	py+cpy, tn	ill (100)
A-49- 483	cpy, py	ill (100)
A-49- 498	tn	ill (100)
A-49- 553	cpy, py	ill (100)
A-49- 611	cpy, py, bn, en, tn	ill (64), chl (21), caol/ dick (15)
A-46- 67	hm	ill (100)
A-46- 89	cpy, py, dg, cv	ill (100)
A-46- 107	cpy, tn, dg, cv	ill (100)
A-46- 246	cpy, py, bn	ill, caol/dick (t), chl (t)
A-46- 261	cpy, py, bn, hm	ill, caol/dick (t), chl (t)
A-46- 271	cpy, py	ill, caol/dick (t), chl (t)
A-46- 321	cpy, py, en, cv	ill (60), caol/dick (30), chl (10)
A-46- 434	cpy, py	ill (100)
A-46- 496	cpy, py	ill (100)
A-46- 540	tn, py, oro (t)	caol/dick (56) ; ill (38), chl (6)
A-46- 593	cpy, py, tn, bn	ill (100)
A-14-42	hm	ill (53), caol/dick(32), chl (15)
A-14-182.9	cpy, py	ill (100)
A-14-317	cpy, tn, dg, cv, hm	ill (64), chl (20), caol/dick (16)
A-14-353	cpy, py	ill (100)

Análisis realizados con difractómetro de rayos X y con microscopio de polarización.

Abreviaturas: bn: bornita; caol: caolinita; chl: clorita; cpy: calcopirita; cz: cv: covelina; cuarzo; dick: dickita; en: enargita; dg: digenita; hm: hematita; ill: illita mt: magnetita; py: pirita; rt: rutilo; sl:esfalerita; td: tetraedrita; tn: tennantita. (t): trazas. Entre paréntesis se indica la proporción determinada por métodos de cuantificación.

Tabla 5. Análisis Ar-Ar en Alunita

Muestra A-36A, 37.08 mg alunite J = 0.0004382 Lab#=1796-1 SPLIT LM2										
ID	Temp	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (x 10-3)	^{39}ArK (x 10-16 mol)	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	^{39}Ar (%)	Age (Ma)	$\pm 1s$ (Ma)
B	400	1458.472	0.4771	4.9030	0.02	1.0694	0.7	0.1	7.6	5.61
C	425	442.822	0.2149	1.4293	0.03	2.3741	4.6	0.4	16.1	3.14
D	450	160.668	0.1199	0.5073	0.08	4.2541	6.7	0.9	8.5	1.53
E	475	49.539	0.0660	0.1144	0.41	7.7276	31.8	3.9	12.4	0.43
F	500	40.962	0.0708	0.0859	1.56	7.2107	38.0	14.9	12.3	0.43
G	525	61.910	0.1323	0.1560	3.87	3.8571	25.5	42.4	12.5	0.68
H	550	111.098	0.3824	0.3251	3.03	1.3341	13.5	64.0	11.8	1.49
I	575	160.197	0.7839	0.4930	1.07	0.6508	9.1	71.5	11.4	3.15
J	600	213.022	0.9296	0.6859	0.52	0.5488	4.9	75.2	8.2	4.50
K	625	237.172	0.4839	0.7670	0.45	1.0543	4.4	78.4	8.3	5.47
L	650	258.085	1.1971	0.8067	0.43	0.4262	7.6	81.5	15.5	5.82
M	700	352.289	1.0589	1.1193	0.45	0.4818	6.1	84.7	17.0	5.73
N	800	2322.549	0.9041	7.8227	0.45	0.5643	0.5	87.9	8.6	8.06
O	900	300.626	1.1297	0.9528	0.60	0.4516	6.3	92.2	15.0	5.62
P	1000	408.644	0.8514	1.3416	0.52	0.5993	3.0	95.9	9.6	6.66
Q	1100	589.836	0.7580	1.9621	0.40	0.6731	1.7	98.7	7.9	7.18
R	1200	1084.302	0.4747	3.6101	0.18	1.0747	1.6	100.0	13.8	9.43
total gas age				n= 17	14.07				11.9	1.5
plateau	MSWD = 0.28			n= 14	14.02	steps C-R	99.6	12.3	0.5*	

Tabla 6. Análisis Ar-Ar en Alunita

Sample A-36A, 25.46 mg alunite J = 0.0004368 Lab#=1797-1 SPLIT LM3										
ID	Temp	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (x 10-3)	^{39}ArK (x 10-16 mol)	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	^{39}Ar (%)	Age (Ma)	$\pm 1s$ (Ma)
C	500	80.887	0.1001	0.2156	4.61	5.0992	21.2	36.2	13.5	0.32
D	600	87.938	0.2429	0.2381	3.58	2.1006	20.0	64.4	13.8	0.48
E	645	84.166	0.2153	0.2241	1.21	2.3693	21.3	73.9	14.1	0.73
F	700	162.846	0.0985	0.4981	0.68	5.1809	9.6	79.3	12.3	1.27
G	750	87.547	0.2305	0.2370	0.52	2.2130	20.0	83.3	13.7	0.87
H	800	80.838	0.2217	0.2155	0.42	2.3018	21.2	86.6	13.5	0.96
I	850	72.260	0.1950	0.1871	0.41	2.6163	23.5	89.8	13.3	0.89
J	900	87.323	0.2554	0.2411	0.36	1.9977	18.4	92.6	12.6	1.02
K	950	114.156	0.1924	0.3320	0.34	2.6525	14.1	95.3	12.6	1.14
L	1000	131.183	0.3332	0.3888	0.32	1.5313	12.4	97.8	12.8	1.23
M	1050	122.008	0.3828	0.3627	0.28	1.3330	12.2	100.0	11.7	1.04
total gas age				n= 11	12.73				13.5	0.5
plateau	MSWD = 0.67			n= 11	4.53	steps C-R	35.6	13.4	0.4*	

Notas: Relaciones isotópicas corregidas por decaimiento radioactivo y discriminación de masa.

Análisis individuales muestran sólo el error analítico, plateau y los errores de gas total incluyen errores en J y en los parámetros de irradiación. n= número de pasos de calentamiento. K/Ca = relación molar calculada del reactor ^{39}ArK y $^{37}\text{ArCa}$. * 2s error

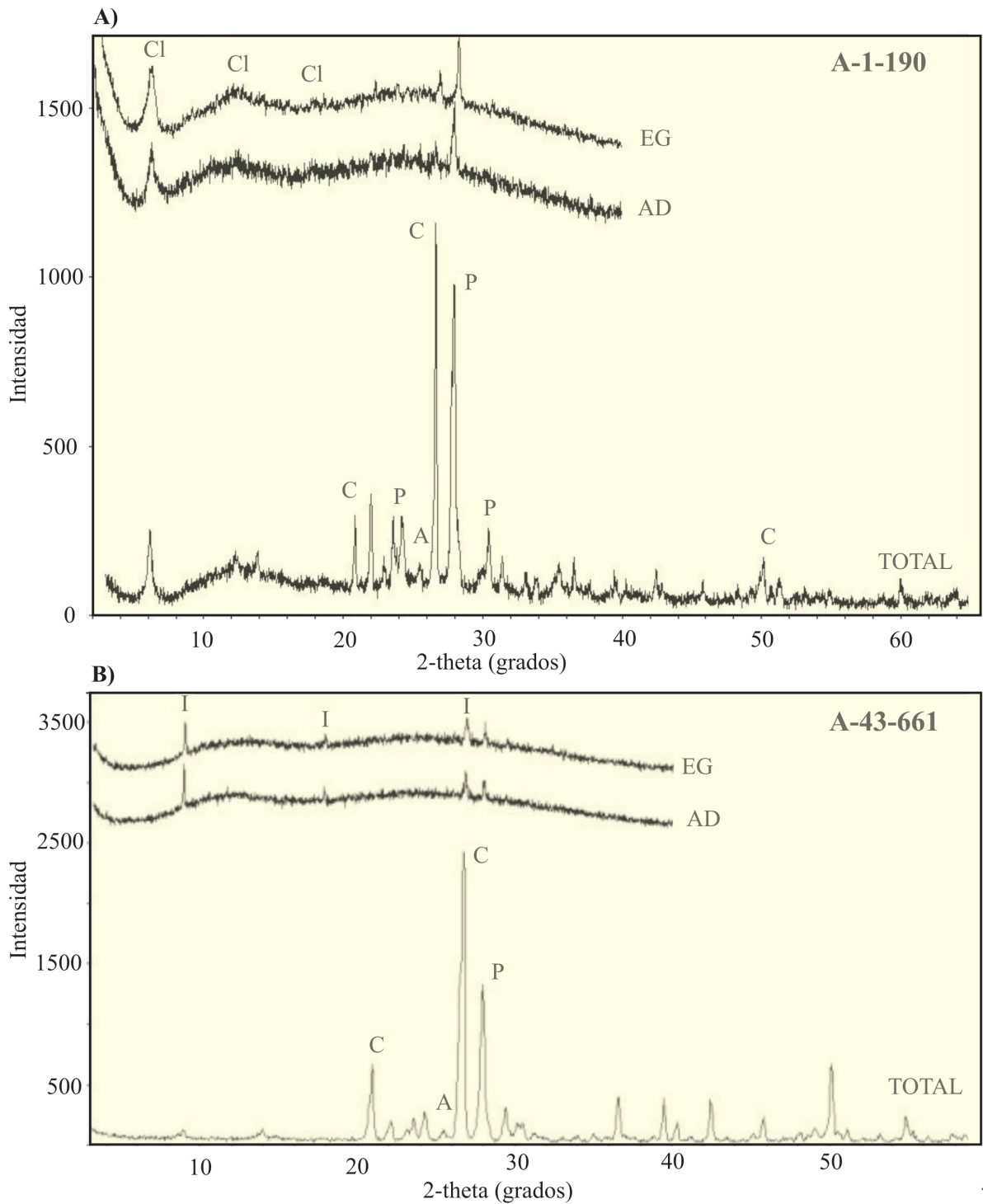


Figura 56. A) Diagrama de rayos X de la muestra A-1- 190 m sobre muestra en polvo total y en la fracción menor a $< 2\mu\text{m}$, secada al aire (AD) y con etilenglicol (EG). Se observan las reflexiones características de la clorita (Cl) asociada a cuarzo (C), plagioclasa (P) y anhidrita (A).
B) Diagrama de Rayos X de la muestra A-43- 661 m sobre muestra en polvo total y en la fracción menor a $< 2\mu\text{m}$, secada al aire (AD) y con etilenglicol (EG). Se observan las reflexiones características de la illita (I) asociada a cuarzo (C), plagioclasa (P) y anhidrita (A).