

1 **Química de minerales hidrotermales como herramienta de exploración en depósitos**
2 **tipo pórfido de Cu-Au-Mo y epitermales de Au-Ag-Cu asociados. Ejemplos del**
3 **Proyecto Altar, San Juan**

4
5 Laura MAYDAGÁN ¹⁻²⁻³, Marta FRACHINI ³⁻⁴

6
7 ¹ Instituto Geológico del Sur (INGEOSUR), Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía
8 Blanca, Argentina. e-mail: lauramaydagan@yahoo.com.ar

9 ² Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

10 ³ Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos - CONICET.

11 ⁴ Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina.

12 e-mail: mfranchini2014@gmail.com

13
14 **RESUMEN**

15
16 Los estudios de química mineral en minerales hidrotermales han demostrado su potencial
17 para extender significativamente las dimensiones de la huella geoquímica de los depósitos
18 tipo pórfido sobre las rocas débilmente alteradas que rodean estos grandes sistemas
19 hidrotermales. Estudios realizados en los depósitos Altar Central (AC) y Quebrada de la
20 Mina (QDM) del proyecto Altar (San Juan) han permitido reconocer variaciones
21 composicionales en filosilicatos y arcillas a través de estudios de microsonda electrónica,
22 difracción de rayos X y análisis de espectroscopia infrarroja (SWIR), así como también en
23 sulfuros y cuarzo mediante análisis de microsonda electrónica y AL-ICPMS. En esta
24 contribución se realiza una revisión de las diferencias composicionales más significativas
25 reconocidas en minerales hidrotermales del proyecto Altar y se aportan nuevos datos
26 preliminares sobre investigaciones que continúan en desarrollo, que tienen potencial para
27 ser utilizados en la exploración minera de depósitos tipo pórfido de Cu-Au-Mo y epitermales
28 de Au-Ag-Cu asociados.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28

ABSTRACT

Chemistry of hydrothermal minerals as an exploration tool in Cu-Au-Mo porphyry type deposits. Examples from the Altar Project, San Juan. Mineral chemistry studies on hydrothermal minerals have demonstrated their potential to significantly extend the geochemical footprint dimensions of porphyry-type deposits on the weakly altered rocks surrounding these large hydrothermal systems. Studies carried out in the Altar Central (AC) and Quebrada de la Mina (QDM) deposits of the Altar project (San Juan) allowed to recognize compositional variations in phyllosilicates and clays through electron microprobe studies, X-ray diffraction and spectroscopy infrared (SWIR) analysis, as well as in sulphides and quartz by means of electron microprobe analysis and LA-ICPMS. In this contribution, a summary review of the most significant compositional differences recognized in hydrothermal minerals from Altar project is provided as well as new preliminary data on investigations that are still being developed, which have the potential to be used in mineral exploration of Cu-Au-Mo porphyry type deposits and associated Au-Ag-Cu epithermal deposits.

Palabras clave: exploración minera, depósitos tipo pórfido, transición pórfido epitermal, vectorización, química mineral, Argentina.

Keywords: mining exploration, porphyry type deposits, porphyry epithermal transition, vectorization, mineral chemistry, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los depósitos tipo pórfido son uno de los objetivos clave de exploración para las principales empresas mineras. Sus características están bien documentadas ([Sillitoe 1989, 2010](#), [Seedorff et al. 2005](#); [Cernuschi et al. 2023](#)) y los modelos de exploración están bien

1 desarrollados ([Lowell y Guilbert 1970](#); [Gustafson y Hunt 1975](#); [Holliday y Cooke 2007](#)). Los
2 primeros estudios de los sistemas tipo pórfido de cobre han utilizado la geoquímica y los
3 patrones de zonación mineralógica de estos depósitos como guía para la exploración (p. ej.
4 [Meyer y Hemley, 1967](#); [Lowell y Guilbert, 1970](#); [Gustafson y Hunt, 1975](#); [Dilles y Einaudi,](#)
5 [1992](#)).

6 La transición mundial hacia una economía baja en carbono aumentará la demanda de
7 metales, especialmente de cobre, que se utiliza en vehículos eléctricos y aerogeneradores.
8 Los depósitos tipo pórfido suministran alrededor del 60% del cobre y del 95% del molibdeno
9 (Mo) utilizado en el mundo, y contenidos significativos de oro y plata ([John y Taylor, 2016](#)).
10 Además, estos depósitos son la fuente principal de varios elementos estratégicos
11 (elementos químicos esenciales para aplicaciones tecnológicas) y elementos críticos
12 (aquellos que además presentan riesgos potenciales de suministro a nivel global, [Zappettini](#)
13 [2021](#)).

14 Sin embargo, durante la última década a nivel global disminuyeron los descubrimientos de
15 recursos metalíferos de Cu-Au-Mo a pesar del notable aumento de los gastos de exploración
16 minera (ej., [Cooke et al. 2020](#)). En este contexto, los estudios de química mineral en
17 minerales de alteración han demostrado tener el potencial para colaborar en la exploración
18 de depósitos tipo pórfido y epitermales, complementando el conocimiento obtenido con las
19 técnicas geoquímicas y geofísicas convencionales. Recientes investigaciones postulan que
20 los análisis de elementos trazas en minerales de alteración mediante AL-ICPMS
21 (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente por ablación láser) pueden
22 expandir el tamaño de la huella geoquímica de los depósitos tipo pórfido-epitermal,
23 permitiendo explorar depósitos profundos o ubicados debajo de coberturas post-minerales
24 (ej. [Cooke et al. 2020](#)). Algunas líneas de investigación utilizan las composiciones químicas
25 de minerales hidrotermales como epidoto, clorita, alunita, y turmalina para predecir la
26 dirección y la distancia a los centros mineralizados, y el contenido potencial de metales de
27 un distrito mineral (ej. [Chang et al. 2011](#); [Cooke et al. 2014, 2017](#); [Wilkinson et al. 2015,](#)
28 [2017](#); [Baker et al. 2017](#); [Xiao et al. 2018](#)). Estas investigaciones han sido posibles gracias a

1 los avances y el mayor acceso a la espectrometría de masas de plasma acoplado
2 inductivamente por ablación láser (AL-ICP-MS), el infrarrojo de longitud de onda corta
3 (SWIR), el infrarrojo cercano visible (VNIR) y las tecnologías hiperespectrales (Cooke et al.
4 2020).

5 El importante recurso de cobre-oro del proyecto Altar constituye un *cluster* de depósitos tipo
6 pórfido constituido por tres núcleos con mineralización de Cu-Mo-Au a lo largo de un
7 lineamiento de 6 km en sentido oeste-este: Altar Este, Altar Central y Quebrada de la Mina-
8 Radio (<https://www.aldebaranresources.com>, Marek et al. 2021). Estudios realizados en los
9 depósitos Altar Central (AC) y Quebrada de la Mina (QDM) han permitido reconocer
10 variaciones composicionales en filosilicatos y arcillas a través de estudios de microsonda
11 electrónica, difracción de rayos X y análisis de espectroscopia infrarroja (SWIR), así como
12 también en sulfuros y cuarzo mediante análisis de microsonda electrónica y AL-ICPMS
13 (Maydagán et al. 2013, 2015, 2016, 2018). En esta contribución se presentan nuevos datos
14 de química mineral junto a una revisión de las principales diferencias en composición
15 química reconocidas en minerales hidrotermales del proyecto teniendo en cuenta la
16 presencia y/o proximidad a zonas mineralizadas con Cu-Au-Mo.

17

18 **MARCO GEOLÓGICO**

19

20 El proyecto Altar (31° 29' S, 70° 30' O) es un *cluster* de depósitos tipo pórfido de Cu y Au,
21 localizado en la Cordillera Principal de San Juan, cerca del límite internacional con Chile.
22 Los recursos medidos e indicados reportados en los centros mineralizados Altar Central y
23 Altar Este según cut-off EqCu 0.30 %, totalizan 1,198.2 Mt con 0.43 % Cu y 0.09 g/t Au y
24 1.00 ppm Ag (Marek et al. 2021). Los recursos medidos e indicados reportados para el
25 centro mineralizado QDM según cut-off EqAu 0.33-0.70 ppm, totalizan 20 Mt con 0.06 % Cu,
26 0.78 ppm Au y 3.62 ppm Ag (Marek et al. 2021).

27 Numerosos depósitos de Cu (Au-Mo) han sido descubiertos en esta zona de San Juan
28 (Pachón, Los Azules, Rincones de Araya, Piuquenes, Yunque, entre otros). Esta región

1 corresponde a la porción sur del segmento de subducción horizontal de los Andes Centrales
2 (~27° a 33° 30'S), y es continuación de la faja de pórfidos miocenos y pliocenos que aloja en
3 Chile a tres de los depósitos de cobre más grandes del mundo (El Teniente, Río Blanco-Los
4 Bronces y Los Pelambres). En Argentina, el magmatismo de esta edad se asocia a los
5 depósitos de tipo pórfido más grandes con los mayores recursos metálicos (Rubinstein et al.
6 2021).

7 Maydagán et al. (2011, 2014) realizaron el primer mapa geológico, estudios petrográficos,
8 geoquímicos y geocronológicos de las rocas ígneas de la zona de Altar (Fig. 1). Las rocas
9 expuestas más antiguas comprenden un batolito tonalítico del Carbonífero tardío (Batolito
10 Pico Los Sapos) datado en 297 Ma (Maydagán 2012), rocas sedimentarias jurásicas en el
11 sector este, y rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico presentes a lo largo del límite
12 argentino-chileno (Mpodozis et al. 2009, Maydagán et al. 2020). Las rocas ígneas de la zona
13 de Altar se agruparon en el Complejo volcánico inferior (CVI) del Mioceno temprano (con
14 edades de 21.6 ± 1.2 Ma a 20.8 ± 0.3 Ma, AL-ICPMS U-Pb en circones), integrado por
15 intercalaciones de niveles lávicos y piroclásticos que gradan a un nivel espeso de tobas
16 riolíticas, y la Suite subvolcánica superior (SSS) del Mioceno medio-tardío (con edades de
17 entre 11.75 ± 0.24 Ma y 8.9 ± 0.4 Ma, AL-ICPMS U-Pb en circones) que consiste en una
18 serie de intrusiones porfíricas, diques y brechas hidrotermales (Maydagán et al. 2011).

19 Las rocas volcánicas del Mioceno temprano que hospedan a Altar Central, Altar Este y QDM
20 (Maydagán et al. 2011, Maydagán et al. 2016) son equivalentes a la Formación Pachón en
21 las inmediaciones del yacimiento Los Pelambres, a la Formación Abanico en Chile (Klohn,
22 1960), la Formación Coya Machalí en la zona de El Teniente (Charrier et al. 2002) y el Grupo
23 Doña Ana del cinturón de El Indio y Valle del Cura (Bissig et al. 2001, Litvak et al. 2009,
24 2019). Las edades U-Pb obtenidas mediante AL-ICPMS en los stocks subvolcánicos de la
25 Suite subvolcánica superior de Altar Central y Altar Este indican cuatro eventos discretos de
26 intrusiones durante un período de actividad magmática de ~3 millones de años, entre ~12 y
27 9 Ma (Maydagán et al. 2014). Edades Re-Os en molibdenita obtenidas a la fecha indican
28 que la mineralización en Altar se asocia a dos centros magmáticos-hidrotermales: Altar Este

1 (11.16 ± 0.06 Ma) y Altar Central (10.38 ± 0.05 Ma) formados en períodos temporalmente
2 distintos ([Maydagán et al. 2020](#)). En el centro mineralizado QDM, las rocas volcánicas del
3 Mioceno temprano fueron intruidas por un stock circular de pórfido dacítico de
4 aproximadamente 0.6 km de diámetro (pórfido dacítico QDM), con una edad AL-ICPMS U-
5 Pb en circones de 11.91 ± 0.33 Ma ([Maydagán et al. 2016](#)).

6

7 **ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN EN ALTAR CENTRAL Y ALTAR ESTE**

8

9 Los centros mineralizados Altar Central (AC) y Altar Este (AE) contienen principalmente la
10 transición (y localmente la superposición) entre depósitos tipo pórfido de Cu-Au-(Mo) y vetas
11 y vetillas típicas de depósitos epitermales de alta sulfuración ([Fig. 2](#)). En base a las
12 dataciones AL-ICPMS U-Pb en circones y Re-Os en molibdenita disponibles a la fecha,
13 varios eventos de stocks subvolcánicos asociados a brechas mineralizadas formaron dos
14 centros magmáticos-hidrotermales con mineralización de Cu-Au que se encuentran en el
15 valle este (AE, el más antiguo) y en la zona central del depósito (AC, el más joven, [Fig. 2](#);
16 [Maydagán et al. 2011, 2014, 2015, 2020](#)).

17 La alteración potásica temprana se asocia a vetillas de biotita + cuarzo ± magnetita (vetillas
18 tipo EB), vetillas de cuarzo ± calcopirita ± bornita (vetillas tipo A) y vetillas de cuarzo ±
19 molibdenita (vetillas tipo B). La alteración clorita sericita (clorita + cuarzo + muscovita ± illita
20 ± rutilo) denominada previamente como alteración clorítica, se asocia a vetillas de clorita +
21 rutilo ± hematita, calcopirita ± pirita (vetillas tipo C). La alteración fílica forma un halo
22 continuo asociado a vetillas de pirita ± cuarzo (vetillas tipo D), rodeada por alteración
23 propilítica periférica (clorita + epidoto + calcita) desarrollada en las crestas y fillos que rodean
24 a los centros mineralizados ([Maydagán et al. 2015](#)).

25 La turmalina se presenta principalmente como: a) agregados de cristales con disposición
26 fibro-radial de color verdoso a negro diseminados en la alteración fílica, b) forma el relleno
27 de vetillas finas e irregulares tipo D tardías y c) constituye parte del cemento de brechas
28 hidrotermales asociadas a un evento magmático-hidrotermal tardío ([Maydagán et al., 2015](#)).

1 La proporción de turmalina aumenta hacia los niveles superficiales de los centros
2 mineralizados Altar Central y Altar Este rodeando al núcleo potásico.

3 Vetillas tardías ricas en sulfuros y sulfosales, definidas como vetillas tipo E, están
4 compuestas por tenantita ± pirita ± oro ± cuarzo; enargita + pirita ± cuarzo; sin halos o
5 localmente con halos irregulares de caolinita ± cuarzo ± rutilo, y por cuarzo ± esfalerita ±
6 pirita ± galena; calcita + anhidrita, que se encuentran superpuestas a las vetillas de alta
7 temperatura (vetillas tipo A, B y C). Las vetillas tipo E ocurren principalmente en niveles
8 superficiales de los sondajes de AC, y son muy escasas en los sondajes de AE (Maydagán
9 et al. 2015).

10 En los filos que rodean AE, a ~4000 m s.n.m, afloran estructuras silicificadas (*siliceous*
11 *ledges*) típicas de las raíces de un ambiente epitermal de alta sulfuración, caracterizadas por
12 texturas de cuarzo oqueroso (*vuggy quartz*) y halos de alteración argílica avanzada que se
13 encuentran por encima del depósito tipo pórfido (Maydagán et al. 2015). Estas estructuras
14 presentan localmente rellenos constituidos por calcedonia ± oro; cuarzo ± alunita ± enargita
15 ± baritina ± oro. Presentan un halo proximal de alteración a cuarzo + alunita hipogénica, un
16 halo intermedio de cuarzo + caolinita y un halo externo de clorita + epidoto + calcita
17 (Maydagán, 2012).

18

19 **ALTERACIÓN Y MINERALIZACION EN QUEBRADA DE LA MINA**

20

21 Estudios realizados por la empresa minera Peregrine Argentina S.A. entre 2010 y 2012 en
22 Quebrada de la Mina indicaron la presencia de un stock de pórfido de composición dacítica
23 (pórfido dacítico QDM) con mineralización de oro en niveles someros. Sondajes realizados
24 por la empresa en 2017 al SE del sector mineralizado con oro, interceptaron un núcleo de
25 Cu-Au con mineralización de bornita-magnetita (Pórfido Radio), a ~400 m de profundidad
26 vinculado a alteración potásica y a varias generaciones de vetillas tempranas de magnetita y
27 de cuarzo (Fig. 3). La figura 3 a presenta el mapa simplificado de las alteraciones
28 hidrotermales de QDM en superficie, y la figura 3b muestra la distribución de las alteraciones

1 en el perfil 6517600 N. En cuanto a la zonación de alteraciones, Los niveles superficiales de
2 QDM se caracterizan por presentar parches relictos de alteración potásica
3 (cuarzo+feldespatos K \pm alteración de rutilo), y parches de alteración de clorita-sericita (\pm
4 hematita), un halo externo propilítico rico en clorita y un halo central de alteración fílica
5 caracterizada por mica blanca ($> 2 \mu\text{m}$) e illita, con sectores de alteración fílica rica en
6 turmalina. La mineralización de Au ($> 0.5 \text{ ppm Au}$) se dispone en un halo subhorizontal
7 somero y coincide con el halo fílico (Fig. 3, Maydagán et al. 2018). Como se observa en la
8 figura 3, los sectores de alteración fílica rica en turmalina en QDM se disponen en
9 proximidad al contorno del pórfido Radio de Cu-Au en profundidad (Maydagán et al. 2018).
10 En niveles superficiales, QDM muestra rasgos típicos de un depósito tipo pórfido como la
11 presencia de vetillas tipo D asociadas a alteración fílica y turmalinización. Sin embargo,
12 otros rasgos como la mineralización de Au en un horizonte subhorizontal somero y la
13 diseminación de esfalerita parecen reflejar un ambiente epitermal. Por lo tanto, QDM refleja
14 un ambiente tipo pórfido somero sobreimpuesto por un pulso de mineralización tardío en la
15 transición pórfido-epitermal, caracterizado por esfalerita, pirita rica en Au, y contenidos
16 subordinados de enargita y tenantita. A diferencia de otros centros mineralizados del área,
17 en niveles superficiales de QDM no se reconocieron vetillas tempranas de cuarzo tipo A y B,
18 solo se observaron escasas vetillas tipo D, sugiriendo un menor grado de erosión del
19 sistema pórfido en comparación con AC y AE.

20

21 **METODOLOGÍAS**

22

23 Este estudio se basa en trabajos de mapeo geológico en terreno, observaciones de registros
24 de sondajes, estudios petrográficos y calcográficos. Los filosilicatos, biotita, clorita,
25 muscovita, illita y caolinita, fueron identificados y caracterizados mediante difracción de
26 rayos X (Universidad Nacional del Comahue y Universidad Nacional del Sur), microsonda
27 electrónica (Universidad Estatal de Oregon) y análisis de espectroscopia infrarroja
28 (PetraGaia, Chile). La química mineral de sulfuros y de cuarzo fue caracterizada mediante

1 microsonda electrónica (Universidad Estatal de Oregon) y AL-ICPMS (Universidad de
2 Western Washington, USA; Universidad de New Brunswick, Canadá). Para detalles de las
3 metodologías empleadas referirse a [Maydagán et al. \(2015, 2016, 2018\)](#), [Bocanegra et al.](#)
4 [\(2018\)](#). Nuevos datos de composición química de esfalerita y mapas de elementos traza en
5 pirita fueron obtenidos mediante una microsonda electrónica de la Universidad Estatal de
6 Oregon (Corvallis, USA) y mediante un AL-ICPMS en la Universidad de New Brunswick
7 (New Brunswick, Canadá), respectivamente. La microsonda electrónica Cameca SX-100 de
8 la Universidad Estatal de Oregon está equipada con cinco espectrómetros de dispersión de
9 longitud de onda (WDS) y espectrómetro de energía dispersiva (EDS). Las condiciones de
10 operación fueron 15 kV y 30 nA con un haz de 5 μm de diámetro. El equipo AL-ICPMS
11 corresponde a un láser excimer Resonetics M-50 de 193 nm conectado a un ICP-MS Agilent
12 7700x. Las condiciones utilizadas fueron un láser de 17 μm , una velocidad de escaneo de 8
13 $\mu\text{m/s}$ y una repetición de 10 Hz y una densidad de energía regulada a $\sim 1,5 \text{ J/cm}^2$. Se
14 analizaron los siguientes isótopos: ^{34}S , ^{51}V , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{62}Ni , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{75}As , ^{95}Mo ,
15 ^{107}Ag , ^{121}Sb , ^{125}Te , ^{197}Au , ^{207}Pb , ^{209}Bi , ^{125}Te , ^{78}Se . Las concentraciones trazas se calibraron
16 con respecto a al estándar de sulfuro MASS-1 y al standard NST 610. Todos los datos se
17 redujeron utilizando el *software* Iolite v2.2 ([Paton et al. 2011](#)) en Wavemetrics IgorPro v6.22.
18 Para mayores detalles de la metodología referirse a [McFarlane y Luo \(2012\)](#).

19

20 **RESULTADOS**

21

22 A continuación, se presentan de manera resumida las principales diferencias
23 composicionales reconocidas en minerales hidrotermales del proyecto Altar teniendo en
24 cuenta la presencia y/o proximidad a zonas mineralizadas con Cu-Au-Mo.

25

26 **Filosilicatos**

27 La figura 4 muestra la composición química de biotitas magmáticas de pórfidos estériles y
28 mineralizados, junto a la composición química de biotitas hidrotermales presentes en

1 pórfidos mineralizados y en las rocas de caja. En AC, las biotitas magmáticas e
2 hidrotermales de los pórfidos mineralizados tienen mayores contenidos de X_{Mg} , K, y F y
3 menores relaciones Fe/(Fe+Mg) que las biotitas de los pórfidos estériles (Fig. 4). La relación
4 X_{Mg} se incrementa desde las biotitas de los pórfidos frescos estériles a las biotitas
5 hidrotermales de las rocas de caja, mostrando los mayores valores en las biotitas de los
6 pórfidos mineralizados con alteración potásica. Las biotitas hidrotermales de niveles
7 profundos con alteración potásica y altas leyes de Cu presentan mayores valores de X_{Mg} , Mg
8 y F y menor contenido de Cl que las biotitas de niveles más superficiales. (Maydagán et al.
9 2015).

10 Las figuras 5 muestra las composiciones químicas de cloritas provenientes de la alteración
11 propilítica de los halos superficiales periféricos y de la alteración clorita-sericita asociada a
12 mineralización en AC. En AC, las cloritas asociadas a la mineralización de Cu en
13 profundidad (alteración clorita-sericita) muestran una menor relación Fe/Fe+Mg, menores
14 contenidos de Fe (2–3.5 apfu) y Mn (0.01–0.07 apfu) y mayores contenidos de Mg (5.5–7.5
15 apfu) que las cloritas de las zonas poco profundas y distales (alteración propilítica, Figs. 5,
16 6). En QDM, en muestras del halo propilítico periférico se reconocen muy elevados
17 contenidos de Mn (0.17–0.25 apfu) (Fig. 6).

18 Se realizaron análisis SWIR en muestras de sondajes correspondientes a dos perfiles O-E
19 en AC (Fig. 2, Fig. 7). Los valores de longitud de onda de absorción de Al-OH obtenidos en
20 las micas blancas varían entre 2197 y 2215 nm. Valores entre 2197 y 2209 nm reflejan
21 micas con composición "normal" potásica mientras que valores mayores que 2209 indican
22 una tendencia a composición fengítica.

23 Las muestras afectadas por alteración filica temprana (las mismas incluyen variedades
24 transicionales potásica-fílica o alteración clorita-sericita), asociadas a altas leyes de Cu,
25 presentan micas caracterizadas por longitudes de onda de absorción de Al-OH más largas
26 (2204–2215 nm). Por otra parte, muestras afectadas por alteración filica tardía, formadas a
27 partir de fluidos hidrotermales más ácidos y asociadas a menores leyes de Cu, presentan
28 micas blancas con longitudes de onda de absorción de Al-OH más cortas (2197–2204 nm).

1 En AC, los análisis de microsonda indican que en zonas con altas leyes de Cu (> 0.8% Cu),
2 las micas blancas tienen entre 2.4 y 2.8 de Al total (apfu) y Fe+Mg+Mn entre 0.4 y 0.1 apfu,
3 mientras que las que presentan contenidos mayores y menores provienen de zonas con
4 menores valores de Cu (Fig. 8). Rangos similares de Al (2.45 y 2.7 apfu) y de Fe+Mg+Mn
5 (0.35 y 0.15 apfu) se reconocen en las micas blancas de la zona fílica superficial de QDM
6 donde coinciden con altas leyes de oro (> 0.5 ppm Au, [Maydagán et al. 2018](#)).

7

8 **Cuarzo**

9 El estudio detallado de las diferentes generaciones de vetillas y su distribución en centro
10 mineralizado Altar Central, combinado con estudios de catodoluminescencia (CL) y análisis
11 de ablación laser ICPMS en cuarzo y microtermometría de inclusiones fluidas permitió
12 generar un modelo de la evolución de los fluidos hidrotermales desde sus orígenes
13 magmáticos profundos hasta el ambiente epitermal a niveles superficiales ([Maydagán et al.](#)
14 [2015](#)). Se identificaron 5 generaciones principales de vetillas de cuarzo+sulfuros en el
15 pórfido de cobre (vetillas EB, A, B, C y D), vetillas transicionales (E) y vetillas epitermales
16 que pudieron ser diferenciadas mediante su composición de elementos trazas en cuarzo
17 (principalmente Li, Al, Ti, y Ge) y por las características de texturas de cuarzo y de brillo en
18 las imágenes de CL ([Maydagán et al. 2015](#)). En la [figura 9](#) se muestran los campos
19 correspondientes a las composiciones de cuarzo de vetillas tempranas (tipo A, B y C),
20 vetillas tipo D, vetillas tipo E y de estructuras silicificadas de alta sulfuración, estas dos
21 últimas indicadas en conjunto como vetillas epitermales.

22

23 **Sulfuros**

24 [Maydagán et al. \(2013\)](#) realizaron análisis en sulfuros y sulfosales de muestras
25 representativas de distintas zonas de alteración y mineralización de AC mediante
26 microsonda de electrones y AL-ICPMS. Calcopirita ± pirita de la alteración potásica
27 mostraron bajos contenidos de la mayoría de los elementos trazas analizados, excepto Zn,
28 Sn y Ag en calcopirita, y Co y Ni en pirita. La calcopirita y la pirita precipitadas durante la

1 alteración fílica muestran micro-inclusiones de Au (aleaciones con Ag) e inclusiones de
2 sulfosales con As, Ag, V, Zn, Sn, Bi y Sb que se correlacionan con cambios en la
3 composición de los fluidos. En AC, las piritas profundas asociadas a la alteración potásica
4 presentan mayores contenidos de Co y Ni y menores de As, Sb, Te, Ag, Pb que aquellas de
5 pulsos tardíos y más superficiales (Maydagan et al. 2013).

6 La enargita de las vetillas tipo E interceptadas en los sondajes está enriquecida en Zn, Sb,
7 Ag y Bi, mientras que la enargita de las estructuras silicificadas del ambiente epitermal tiene
8 concentraciones bajas de elementos traza, excepto por inclusiones aisladas de Au-Bi
9 (Maydagán et al. 2013). En los niveles superficiales del depósito QDM, el sulfuro dominante
10 es pirita que ocurre como cristales diseminados (0.01-1 mm) y como relleno de vetillas tipo
11 D. La pirita en esta zona superficial posee en general altos contenidos de elementos trazas:
12 Au (hasta 100 ppm), Ag (hasta 500 ppm), Pb (hasta 1000 ppm), Co (hasta 200 ppm), Ni
13 (hasta 100 ppm), Mn (hasta 50 ppm), As (hasta 8000 ppm), Zn (hasta 100 ppm), Sb (hasta
14 10 ppm), Cu (hasta 500 ppm), Sn (hasta 10 ppm), Se (hasta 50 ppm), Te (hasta 1000 ppm) y
15 Bi (hasta 50 ppm). Mapas de pirita obtenidos por AL-ICPMS indican que el Au ocurre como
16 micro-inclusiones que también contienen Ag, Pb, Te, Zn, Cu, y Bi. En cambio, la pirita
17 representativa de zonas con predominio de alteración potásica, obtenida de un sector
18 proximal a la mineralización tipo pórfido, muestra en general menores contenidos de todos
19 los elementos traza. La figura 10 presenta ejemplos de los mapas de AL-ICPMS realizados
20 en pirita en una muestra proximal al pórfido y otra más distal correspondiente al sector
21 mineralizado con oro, que permiten comparar sus contenidos de As, Te y Au (se observan
22 diferencias de varios ordenes de magnitud).

23 En la figura 11a se presentan diagramas sobre la composición química de la esfalerita de
24 QDM, AC y AN. Se destaca la diferencia en los contenidos de Fe y Zn de la esfalerita
25 correspondiente a sectores de alteración fílica proximal a la mineralización de cobre y de
26 zonas distales con alteración propilítica. En muestras de QDM tomadas de la zona con
27 alteración propilítica periférica, la esfalerita presenta valores más altos de Mn (0.14 a 0.27 %
28 en peso) y Fe (1.7 a 2.95% en peso) en comparación con la esfalerita de la zona fílica

1 central. Los diagramas binarios de estas esfaleritas muestran una correlación negativa entre
2 Zn y Mn, y Zn y Fe (Figs. 11b y 11c). En general todos los cristales de esfalerita de QDM
3 tienen trazas de Cd (0.13 a 0.30 % ep.) que no muestran correlación con Zn (Fig. 11d).

5 **DISCUSIÓN**

7 A continuación, se analizan las variaciones composicionales reconocidas en los minerales
8 hidrotermales estudiados, teniendo en cuenta su posición dentro de la zonación de
9 alteraciones hidrotermales y su proximidad a los núcleos mineralizados con Cu, Au y Mo, y
10 se discuten sus implicancias y utilidad en las actividades de exploración minera.

12 ***Filosilicatos***

13 Las figuras 4, 5 y 6 reflejan la correlación existente entre los análisis químicos realizados en
14 biotitas y cloritas con las asociaciones de alteración hidrotermal presentes en las muestras,
15 las litologías, y el contenido de mineralización presente en los sectores analizados.

16 En cuanto a las cloritas, aquellas que forman parte de las alteraciones propilíticas distales
17 muestran una geoquímica muy diferente a las correspondientes a las zonas de alteración
18 clorita – sericita asociadas a mineralización de cobre en sectores intermedios y profundos.
19 Además, en QDM, se reconocen muy elevados contenidos de Mn en cloritas (0.17-0.25
20 apfu) del halo propilítico periférico. Estos contenidos podrían reflejar el halo de
21 enriquecimiento en Mn observado en cloritas distales en depósitos tipo pórfido, por ejemplo,
22 en el depósito Batu Hijau este halo se encuentra a una distancia de 1.3 km del centro
23 mineralizado con Cu-(Au) en profundidad (Wilkinson et al. 2015).

24 En el pórfido cuprífero Campana Mahuida (Neuquén, Argentina), la cristalinidad de illita
25 muestra una zonación concéntrica (índice de Kübler determinado mediante difracción de
26 rayos x) que es ampliamente coincidente con las asociaciones de alteración hidrotermal del
27 pórfido, preservándose esta zonación no sólo en niveles hipogénicos sino también en los
28 niveles superficiales con alteración supergénica (Franchini et al. 2007). En el nivel

1 hipogénico de Campana Mahuida, la cristalinidad de illita aumenta desde el límite exterior de
2 la zona fílica ($0.2\text{--}0.5\ 2\theta$) hacia el centro del depósito por encima del núcleo potásico (≤ 0.2
3 2θ , [Franchini et al. 2007](#)). En QDM, los valores del índice de Kübler de illita de $0.19\text{--}0.1\ 2\theta$
4 en la fracción de arcilla de muestras profundas son indicativos de mayor temperatura y/o
5 mayores relaciones fluido/roca durante la formación de illita, en comparación con los valores
6 de índice de Kübler $> 0.2\ 2\theta$ reconocidos en muestras poco profundas ([Maydagán et al.](#)
7 [2018](#)).

8 Otras investigaciones sobre la composición de micas blancas utilizando espectroscopía de
9 infrarojo y análisis de microsonda (ej., [Cohen 2011](#), [Halley et al. 2015](#)) demostraron que la
10 longitud de onda de la característica de absorción de 2200 nm correspondiente a la energía
11 del enlace Al-OH de las muestras que contienen mica blanca muestra una correlación con el
12 pH de los fluidos hidrotermales en los sistemas de pórfido. La longitud de onda de la
13 característica de 2200 nm de la mica blanca (que incluye tanto la muscovita como la illita)
14 cambia de 2195 nm en la muscovita a 2220 nm en la fengita, ya que el Al se reemplaza por
15 (Fe, Mg) + Si. La composición de mica blanca muscovítica (incluida la illita) refleja un
16 entorno ácido, mientras que una composición fengítica indica un entorno neutro (p. ej.,
17 [Cohen 2011](#)).

18 La zonación observada en filosilicatos de AC, AE y QDM de las diferentes zonas de
19 alteración podría usarse como guía para la exploración, ya que las muestras con
20 mineralización aurífera en QDM y mineralización de Cu en AC y AE presentan micas con
21 contenido bajo a intermedio de Fe, Mg y Mn, con composiciones intermedias entre
22 muscovita normal K y muscovita fengítica. Estas variaciones composicionales fueron
23 reconocidas mediante dos técnicas diferentes (microsonda de electrones y SWIR, [Figs. 7 y](#)
24 [8](#)). La presencia de mica blanca con composición normal potásica y con tendencia a
25 composición fengítica coincide con zonas de altas leyes de cobre en el centro mineralizado
26 AC, como puede reconocerse en la [figura 2](#).

27

28 **Cuarzo**

1 Las concentraciones de trazas en cuarzo se pueden utilizar para discriminar entre vetillas de
2 alta temperatura correspondientes a núcleos mineralizados de depósitos tipo pórfido en
3 comparación con cuarzo de ambientes epitermales, principalmente en función de sus
4 contenidos de Ti, Al, Ge y Li (Fig. 9). En depósitos tipo pórfido el cuarzo contiene entre ~1 y
5 200 ppm de Ti y valores de Al entre ~50 y 500 ppm. En claro contraste, el cuarzo de los
6 depósitos epitermales presenta valores de Ti menores a 10 ppm y concentraciones de Al que
7 oscilan entre 20 y 4000 ppm (Rusk, 2012; Maydagán et al. 2015).

8 El análisis químico de trazas en cuarzo (en especial Ti, Al) en vetillas podría utilizarse para
9 determinar el nivel de erosión de un sistema transicional pórfido-epitermal. En depósitos con
10 presencia de numerosos pulsos de mineralización tipo pórfido y epitermales
11 sobreimpuestos, el estudio de trazas de cuarzo podría permitir identificar sectores con
12 presencia de vetillas de alta temperatura potencialmente asociadas a mineralización de Cu-
13 Au-Mo tipo pórfido.

14

15 **Sulfuros**

16 Calcopirita, bornita y pirita constituyen los sulfuros más abundantes en depósitos tipo
17 pórfido, sin embargo, el contenido de elementos traza en sulfuros de estos sistemas
18 permanece aun escasamente estudiado. Recientes investigaciones demuestran la
19 importancia de la pirita como huésped de Au y de una gran variedad de elementos críticos
20 (como Te, Se, Co y Ni, Maydagan et al. 2013; Reich et al. 2013; Franchini et al. 2015,
21 Roman et al. 2019). En un estudio reciente, Rivas-Romero et al. (2021) indican que la
22 concentración de elementos traza en calcopirita, bornita y pirita del pórfido Chuquicamata
23 varía de acuerdo a los distintos eventos de alteración hidrotermal. Estos autores indican que
24 el contenido de trazas en sulfuros está controlado por la temperatura, pH, fO_2 y fS_2 de los
25 fluidos hidrotermales, así como también por la partición de trazas entre las fases de sulfuros
26 que cristalizan desde el fluido. Asimismo, los autores destacan la importancia de estos
27 estudios desde un punto de vista exploratorio, indicando que las relaciones Se/In en
28 calcopirita y Ag/Co y Co/Cu en pirita tienen potencial para vectorizar hacia los núcleos

1 mineralizados asociados a los mayores recursos de cobre en estos sistemas.
2 Por otro lado, en el yacimiento Lihir, en Papua, Nueva Guinea los granos de pirita del estadio
3 epitermal están enriquecidos en As, Mo, Ag, Sb, Au, and Tl, mientras que los granos de pirita
4 del estadio pórfido están empobrecidos en la mayoría de los elementos excepto por Co, Ni, y
5 Se (Sykora et al., 2018).
6 En AC, las piritas profundas asociadas a la alteración potásica presentan mayores
7 contenidos de Co y Ni y menores de As, Sb, Te, Ag, Pb que aquellas de pulsos tardíos y más
8 superficiales (Maydagan et al. 2013). En QDM, se reconocieron diferencias significativas en
9 los contenidos de elementos trazas en los mapas de cristales de pirita representativos de
10 una pirita proximal a la mineralización de cobre tipo pórfido, y una pirita distal, representativa
11 de un ambiente transicional a una mineralización epitermal de Au. La pirita de la zona distal
12 posee altos contenidos de Au, Ag, Pb, Mn, As, Zn, Sb, Cu, Te y Bi, mientras que la pirita
13 representativa del sector proximal a la mineralización tipo pórfido muestra menores
14 contenidos de todos los elementos traza previamente mencionados (Fig. 10). Las
15 variaciones en las composiciones de pirita, así como las variaciones observadas en
16 calcopirita, esfalerita y enargita de distintas zonas de alteración hidrotermal del proyecto
17 Altar, enumeradas en los resultados, demuestran la posible utilidad de la composición
18 química de sulfuros en la vectorización hacia núcleos mineralizados de estos sistemas.

19

20 **CONCLUSIONES**

21

22 A modo de conclusión de este trabajo se presentan modelos esquemáticos con la
23 distribución de litologías, tipos de alteración hidrotermal, zonación de sulfuros y metales en
24 los niveles someros de Quebrada de la Mina, y en los niveles someros y profundos de Altar
25 Central y Altar Este. Se indican en los mismos las principales diferencias composicionales
26 reconocidas en los minerales hidrotermales estudiados (Fig. 12).

27 Las variaciones observadas en la composición química de filosilicatos (biotita, clorita, mica
28 blanca), de cuarzo correspondientes a distintas generaciones de vetillas, y de sulfuros (pirita

1 y esfalerita) muestran un potencial como herramientas de exploración para localizar zonas
2 proximales a núcleos mineralizados con Cu (Au), en especial en depósitos que no se
3 encuentran aflorantes o están parcialmente cubiertos por coberturas post-minerales.

4

5 **AGRADECIMIENTOS**

6

7 Agradecemos a Kevin Heather, John Black, Javier Robeto, Stanford Foy, and Mariano
8 Poodts (Aldebaran Resources) por el apoyo continuo a nuestros estudios de investigación y
9 a todo el personal de Peregrine Argentina S.A.U. por la provisión de acceso a la zona de
10 estudio, apoyo logístico y ayuda durante el trabajo de campo y muestreo. Agradecemos a
11 los profesores Agnes Impiccini, David Lentz, John Dilles, Brian Rusk, Christopher
12 McFarlane, Francisco Javier Ríos, Patricia Patrier y Daniel Beaufort por sus valiosos aportes
13 y colaboración con esta investigación. Además, agradecemos a los geólogos Roger Rey y
14 Jeff Toohey de la empresa Peregrine Metals Ltd por su apoyo al doctorado de Laura
15 Maydagan, a CONICET, Agencia, Universidad Nacional del Sur y Universidad Nacional de
16 Comahue. Agradecemos a los geólogos Luciano Bocanegra y María Carolina Díaz Vergara
17 (empresa PetraGaia) por su colaboración con los análisis de espectroscopia de infrarojo.
18 Parte del trabajo se llevó a cabo en el Departamento de Geociencias de la Universidad
19 Estatal de Oregón USU, Corvallis, Oregón, USA, a través de un Programa de Cooperación
20 Internacional financiado por CONICET y NSF. Además, se realizaron estancias de
21 investigación en la Universidad de New Brunswick (Canadá), en el Centro de
22 Desarrollo da Tecnología Nuclear, Belo Horizonte, Brasil y en la Universidad de Utah,
23 Salt Lake City, USA. Se agradece a la editora, la Dra. Vanesa Litvak, al Dr. Julio Bruna
24 Novillo y a una revisora anónima por sus valiosos aportes que permitieron mejorar este
25 manuscrito.

1 Bibliografía

2

3 Baker, M., Cooke, D.R., Hollings, P. y Piquer, J. 2017. Identification of hydrothermal alteration
4 related to mineralisation using epidote mineral chemistry. In Mineral Resources to
5 Discover: Society of Geology Applied to Ore Deposits, 14th Biennial Conference
6 Proceedings:, 3, 1069–1071, Quebec.

7 Bissig, T., Lee, J. K., Clark, A. H. y Heather, K. B. 2001. The cenozoic history of volcanism
8 and hydrothermal alteration in the central andean flat-slab region: new ^{40}Ar - ^{39}Ar
9 constraints from the El Indio-Pascua Au (-Ag, Cu) belt, $29^{\circ} 20'$ - $30^{\circ} 30'S$. International
10 Geology Review 43(4): 312-340.

11 Bocanegra, L. M., Vergara, D., Maydagan, L. y Franchini, M. 2018. White mica mineral
12 vectors to ore obtained by SWIR spectroscopy mapping in the Altar Porphyry Cu-(Au)
13 Deposit, San Juan, Argentina. Actas 15th Quadrennial IAGOD International Association on
14 the Genesis of Ore Deposits Symposium: 138-139, Salta, Argentina.

15 Cernuschi, F., Dilles, J. H., Osario, J., Proffett, J. M. y Kouzmanov, K. 2023. A Reevaluation of
16 the Timing and Temperature of Copper and Molybdenum Precipitation in Porphyry
17 Deposits. Economic Geology, 118, 5: 931–965.

18 Chang, Z., Hedenquist, J.W. White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L., Garcia, J.,
19 Gemmell, B., Mcknight, S., y Cuisson A.L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and
20 epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district,
21 Luzon, Philippines. Economic Geology, 106:1365–1398,
22 <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>.

23 Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R. y
24 Zurita, E., 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic
25 inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33 - $36^{\circ} S$). Journal
26 of South American Earth Sciences 15: 117-139.

27 Cohen, J.F. 2011. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration at the Ann-Mason
28 copper deposit, Nevada: Comparison of large-scale ore exploration techniques to mineral

1 chemistry, Master thesis, Corvallis, Oregon, Oregon State University, 112 p.

2 Cooke, D.R. y Baker, M. 2014. New advances in detecting systems Epidote mineral
3 chemistry as a tool for vectoring and fertility assessments. *Society of Economic*
4 *Geologists, Special Publication*, 18: 127–152, <https://doi.org/10.5382/SP.18.07>

5 Cooke, D.R., White, N.C., Zhang, L., Chang, Z. y Chen, H. 2017. Lithocaps – characteristics,
6 origins and significance for porphyry and epithermal exploration. *In Mineral Resources to*
7 *Discover: Society of Geology Applied to Ore Deposits, 14th Biennial Conference*
8 *Proceedings*, 1: 219–294, Quebec.

9 Cooke, D.R., Agnew, P., Hollings, P., Baker, M., Chang, Z., Wilkinson, J.J., Ahmed, A., White,
10 N.C., Zhang, L., Thompson, J., Gemmell, B., Danyushevsky, L. y Chen, H. 2020. Recent
11 advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper–gold–
12 molybdenum deposits: detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene
13 mineralization and alteration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20(2):
14 176-188.

15 Dilles, J.H. y Einaudi, M.T. 1992. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the
16 Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada—a 6-km vertical reconstruction. *Economic*
17 *Geology*, 87: 1963–2001, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.8.1963>

18 Franchini, M., Impiccini, A., Meinert, L., Grathoff, G. y Schalamuk, I. B. 2007. Clay mineralogy
19 and zonation in the Campana Mahuida porphyry Cu deposit, Neuquén, Argentina:
20 implications for porphyry Cu exploration. *Economic Geology*, 102(1): 27-54.

21 Franchini, M., McFarlane, C., Maydagán, L., Reich, M., Lentz, D. R., Meinert, L. y Bouhier, V.
22 2015. Trace metals in pyrite and marcasite from the Agua Rica porphyry-high sulfidation
23 epithermal deposit, Catamarca, Argentina: Textural features and metal zoning at the
24 porphyry to epithermal transition. *Ore Geology Reviews*, 66: 366-387.

25 Gustafson, L.B. y Hunt, J.P. 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile.
26 *Economic Geology*, 70: 857–912, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.857>

27 Halley, S., Dilles, J.H. y Tosdal, R.M. 2015. Footprints: hydrothermal alteration and
28 geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *SEG Newsletter*, 100: 12–17.

1 Holliday, J.R. y Cooke, D.R. 2007. Advances in geological models and exploration methods
2 for copper ± gold porphyry deposits. Decennial International Conference on Mineral
3 Exploration 5, Conference Proceedings: 791–809, Toronto, Canada.

4 John, D.A. yTaylor, R.D., 2016. By-Products of Porphyry Copper and Molybdenum Deposits.
5 Reviews in Economic Geology, 18: 137–164.

6 Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de
7 Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín,
8 8 p.

9 Litvak, V. D. 2009. El volcanismo oligoceno superior-mioceno inferior del grupo Doña Ana en
10 la alta cordillera de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 64(2): 201-
11 213.

12 Litvak, V. D., Paz, L. F., Iannelli, S., Poma, S. y Folguera, A. 2019. Cenozoic arc-related
13 magmatism in the southern Central and North Patagonian Andes. In: Horton, B.K,
14 Folguera, A. (eds.), Andean Tectonics: 573-607, Editorial Elsevier.
15 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00021-6>.

16 Lowell, J.P. y Guilbert, J.M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in
17 porphyry ore deposits. Economic Geology, 65: 373–408.

18 Marek, J.M., Foy, S.T. yHeather, K.B., 2021. 43-101 Technical Report, Estimated Mineral
19 Resources Altar Project. San Juan province, Argentina, 210 p.

20 Maydagán, L., 2012. El Prospecto de Cu-(Au-Mo) Altar (31° 29'LS, 70°28' LO). San Juan:
21 Tesis doctoral inédita. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 340 p.

22 Maydagán, L., Franchini, M., Chiaradia, M., Pons, J., Impiccini, A., Toohey, J. y Rey, R.,
23 2011. Petrology of the Miocene igneous rocks in the Altar region, main Cordillera of San
24 Juan, Argentina: a geodynamic model within the context of the Andean flat-slab segment
25 and metallogensis. Journal of South American Earth Sciences 32: 30-48.

26 Maydagán, L., Franchini, M., Chiaradia, M., Dilles, J. y Rey, R., 2014. Intrusion history of the
27 Altar porphyry Cu-(Mo-Au) deposit (Argentina): a complex magmatic hydrothermal system
28 with evidence of recharge processes. Economic Geology 109: 621-641.

- 1 Maydagán, L., Franchini, M., Lentz, D., Pons, J. y McFarlane, C. 2013. Sulfide composition
2 and isotopic signature of the Altar Cu-Au deposit, Argentina: constraints on the evolution
3 of the porphyry-epithermal system. *The Canadian Mineralogist* 51: 813-840.
- 4 Maydagán, L., Franchini, M., Rusk, B., Lentz, D.R., Impiccini, A., Ríos, F.J. y Rey, R. 2015.
5 Porphyry to Epithermal Transition in the Altar Cu-(Au-Mo) Deposit, Argentina, Studied by
6 Cathodoluminescence, LA-ICP-MS, and Fluid Inclusion Analysis. *Economic Geology* 110:
7 889-923.
- 8 Maydagán, L., Franchini, M., Impiccini, A. y Lentz, D.R. 2016. Phyllosilicates geochemistry
9 and distribution in the Altar Porphyry Cu-(Au) deposit, Andes Cordillera of San Juan,
10 Argentina: applications in exploration, geothermometry, and geometallurgy. *Journal of*
11 *Geochemical Exploration* 167: 83–109.
- 12 Maydagán, L., Franchini, M., Impiccini, A., Lentz, D., Patrier, P. y Beaufort, D. 2018. Chlorite,
13 white mica and clay minerals as proximity indicators to ore in the shallow porphyry
14 environment of Quebrada de la Mina deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 92: 297-
15 317.
- 16 Maydagán, L., Zattin, M., Mpodozis, C., Selby, D., Franchini, M., y Dimieri, L., 2020. Apatite
17 (U–Th)/He thermochronology and Re–Os ages in the Altar region, Central Andes
18 (31° 30' S), Main Cordillera of San Juan, Argentina: implications of rapid exhumation in
19 the porphyry Cu (Au) metal endowment and regional tectonics. *Mineralium Deposita* 55:
20 1365–1384.
- 21 McFarlane, C. y Luo, Y., 2012. U–Pb geochronology using 193 nm excimer LA–ICP-MS
22 optimized for in situ accessory mineral dating in thin section. *Geoscience Canada* 39:
23 158–172.
- 24 Meyer, C. y Hemley, J.J. 1967. Wall rock alterations. *Geochemistry of hydrothermal ore*
25 *deposits* (HG Barnes, ed.), Winston Inc. New York, 670 p.
- 26 Mpodozis C. 2016. Mapa Geológico Regional del área de Los Pelambres (escala 1:75.0000).
27 Informe Interno, Antofagasta Minerals, Santiago, Chile.
- 28 Mpodozis C., Brockway H., Marquardt C. y Perelló J. 2009. Geocronología U/Pb y tectónica

1 de la región de Los Pelambres–Cerro Mercedario: Implicancias para la evolución
2 cenozoica de los Andes del centro de Chile y Argentina. 12 Congreso Geológico Chileno,
3 Actas S9, S059, Santiago de Chile.

4 Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. y Hergt, J., 2011. Iolite: freeware for the
5 visualization and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic*
6 *Spectrometry*, 26: 2508–2518.

7 Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S., Li, J.W., Ma, C.Q., Parada, M.A., Barra, F.
8 y Mittermayr, F., 2013. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry
9 copper system: a SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica Cosmochimica Acta* 104:
10 42–62.

11 Rivas-Romero, C., Reich, M., Barra, F., Gregory, D. y Pichott, S. 2021. The relation between
12 trace element composition of Cu-(Fe) sulfides and hydrothermal alteration in a porphyry
13 copper deposit: Insights from the Chuquicamata underground mine, Chile. *Minerals*, 11(7)
14 671: 1-29.

15 Román, N., Reich, M., Leisen, M., Morata, D., Barra, F. y Deditius, A. P. 2019. Geochemical
16 and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246:
17 60-85.

18 Rubinstein, N. A., Zappettini, E. O. y Gómez, A. L. 2021. Porphyry Cu deposits in the Central
19 Andes of Argentina: An overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 112:
20 103543.

21 Rusk, B. 2012. Cathodoluminescent textures and trace elements in hydrothermal quartz. En:
22 Götze J. y Möckel R. (eds.), *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Springer
23 *Geology*: 307-329, Verlag Berlin Heidelberg.

24 Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson,
25 D.A. y Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene
26 features. *Economic Geology*, 100: 251–298, <https://doi.org/10.5382/AV100.10>

27 Sillitoe, R.H. 1989. Gold deposits in western Pacific island arcs; the magmatic connection.
28 *Economic Geology Monograph*, 6: 274–291.

1 Sillitoe, R.H. 2010. Porphyry-copper systems. *Economic Geology*, 105: 3–41,
2 <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

3 Sykora, S., Cooke, D. R., Meffre, S., Stephanov, A. S., Gardner, K., Scott, R. y Harris, A. C.
4 2018. Evolution of pyrite trace element compositions from porphyry-style and epithermal
5 conditions at the Lihir gold deposit: Implications for ore genesis and mineral processing.
6 *Economic Geology*, 113(1): 193-208.

7 Wilkinson, J.J., Chang, Z. Cooke, D.R., Baker M.J., Wilkinson C.C., Inglis, S., Chen, H., y
8 Gemmell, B., 2015. The chlorite proximator: A new tool for detecting porphyry ore deposits.
9 *Journal of Geochemical Exploration*, 152, 10–26,
10 <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.005>

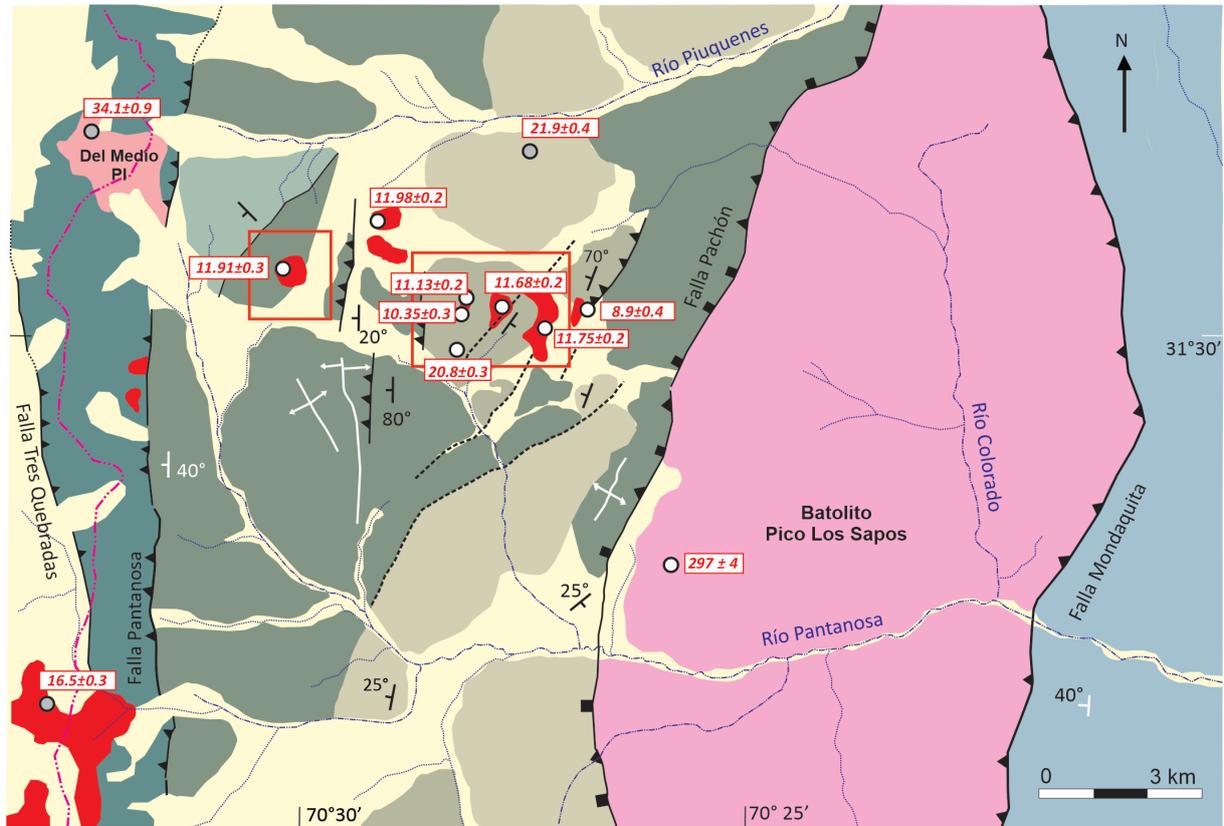
11 Wilkinson, J.J., Baker, M., Cooke, D.R., Wilkinson, C.C. y Inglis, S. 2017. Exploration
12 targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry: a case study of the El
13 Teniente deposit, Chile. *In Mineral Resources to Discover: Society of Geology Applied to
14 Ore Deposits, 14th Biennial Conference Proceedings*, 3: 1112–1114, Quebec.

15 Xiao, B., Chen, H., Wang, Y., Han, J., Xu, C. y Yang, J. 2018. Chlorite and epidote chemistry
16 of the Yandong Cu deposit, NW China: Metallogenic and exploration implications for
17 Paleozoic porphyry Cu systems in the Eastern Tianshan. *Ore Geology Reviews*, 100:
18 168–182, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.03.004>

19 Zappettini, E.O. 2021. *Minerales y metales críticos y estratégicos- Análisis de situación y
20 metodología de clasificación para la República Argentina*. Instituto de Geología y
21 Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones
22 Técnicas. Recursos Minerales N° 45, 17 p.

23

1
2

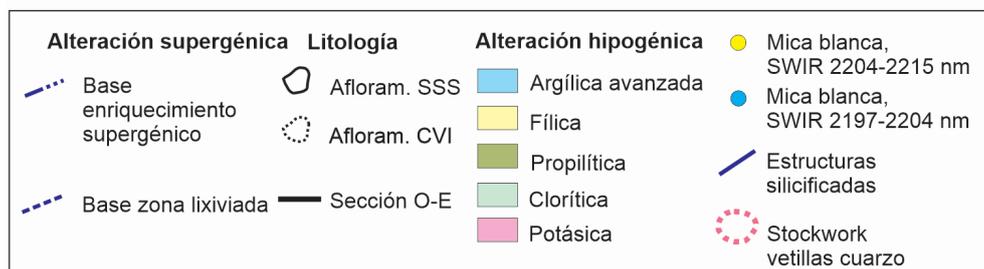
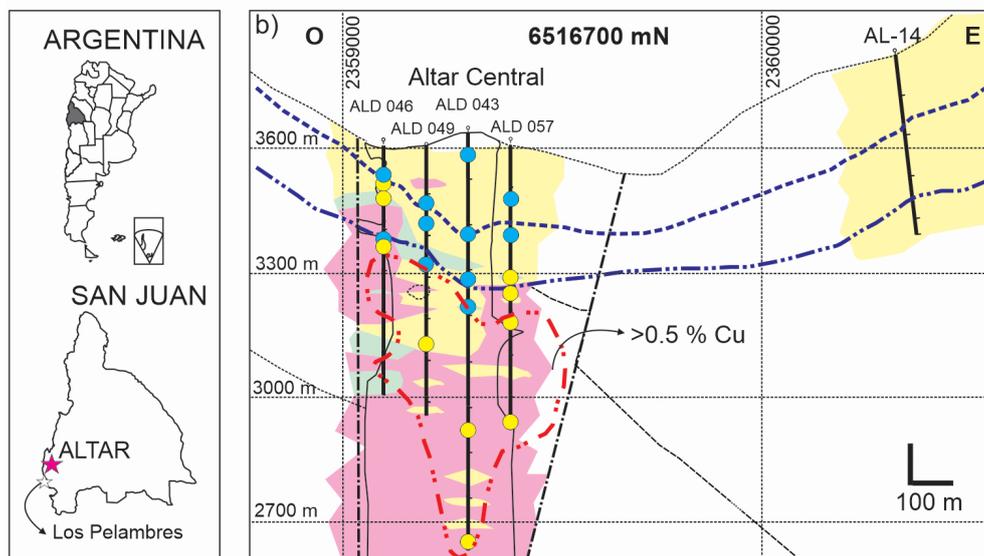
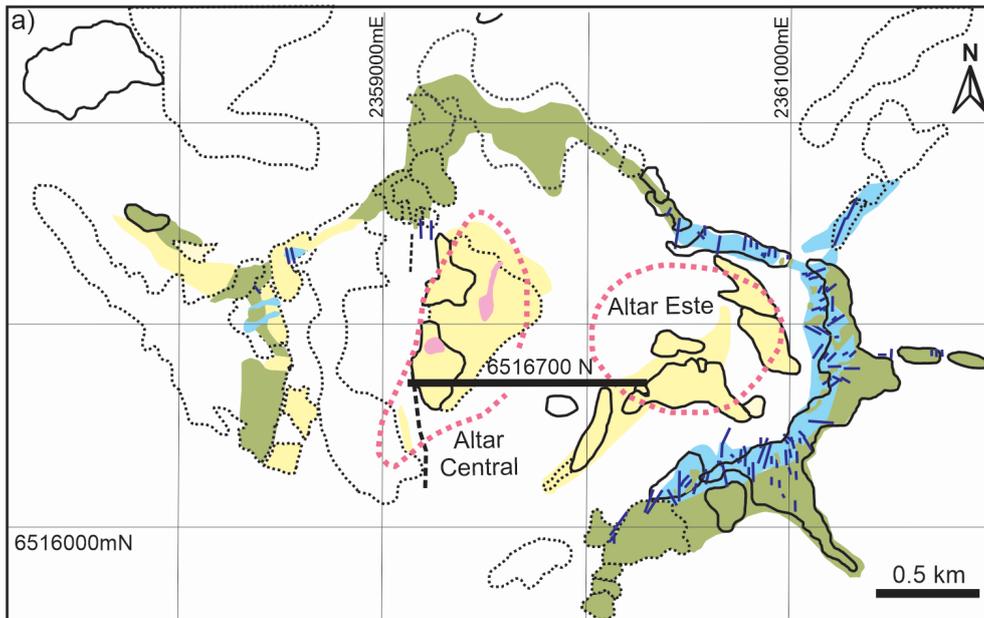


REFERENCIAS

- U-Pb circón Maydagán et al. (2014, 2016)
- U-Pb circón Mpodozis (2015)
- ↘ Rumbo y buzamiento
- Río efímero
- Río permanente
- Lineamientos
- ▲ Falla inversa
- ▼ Falla normal invertida
- ↔ Pliegue
- - - Límite Argentina-Chile
- Depósitos cuaternarios
- Stocks subvolcánicos (SSS, Mioceno medio a tardío)
- Rocas piroclásticas (CVI, Mioceno temprano)
- Lavas andesíticas (CVI, Mioceno temprano)
- Rocas volcano-sedimentarias (Mioceno?)
- Tonalita (Plutón del Medio, Eoceno)
- Rocas volcano-sedimentarias (Triásico-Jurásico?)
- Rocas volcano-sedimentarias (Cretácico?)
- Tonalita (Batolito Pico Los Sapos, Carbonífero tardío)

3

4 **Figura 1.** Mapa geológico de la región del proyecto Altar que muestra la ubicación de las
 5 edades U–Pb obtenidas por Maydagán et al. (2011, 2012, 2014, 2016) y Mpodozis (2016).
 6 Los recuadros rojos corresponden a las figuras 2 (Altar Central y Este) y 3 (Quebrada de la
 7 Mina). Mapa geológico modificado de Maydagán et al. (2020).



1

2 **Figura. 2.** a) Mapa con la distribución de las alteraciones hidrotermales en los centros

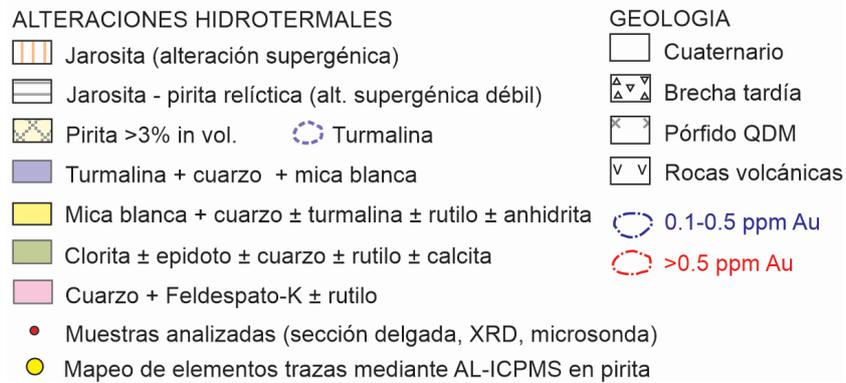
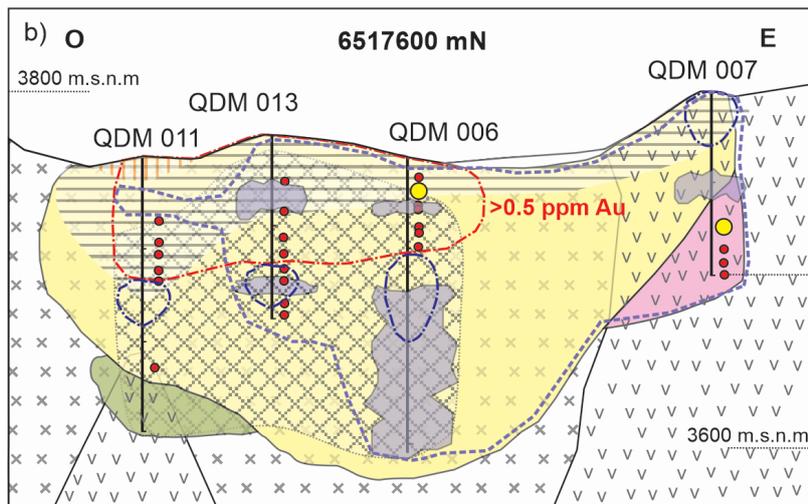
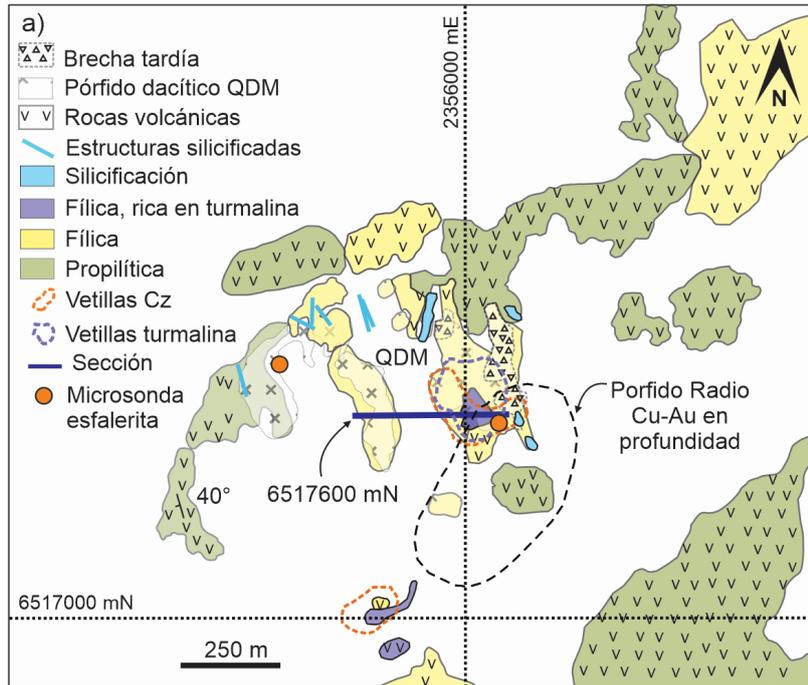
3 mineralizados Altar Central y Altar Este. Se indica la ubicación de la sección 6516700 N y

4 los contornos de los afloramientos del CVI y la SSS (Maydagán et al. 2011). (b) Distribución

5 de las zonas de alteración hidrotermal, lixiviación y enriquecimiento supergénico en la

1 sección 6516700 N. Se muestran con círculos amarillos y celestes las composiciones de
2 micas blancas obtenidas mediante la técnica SWIR. Modificado de Maydagán et al. 2015.
3

1

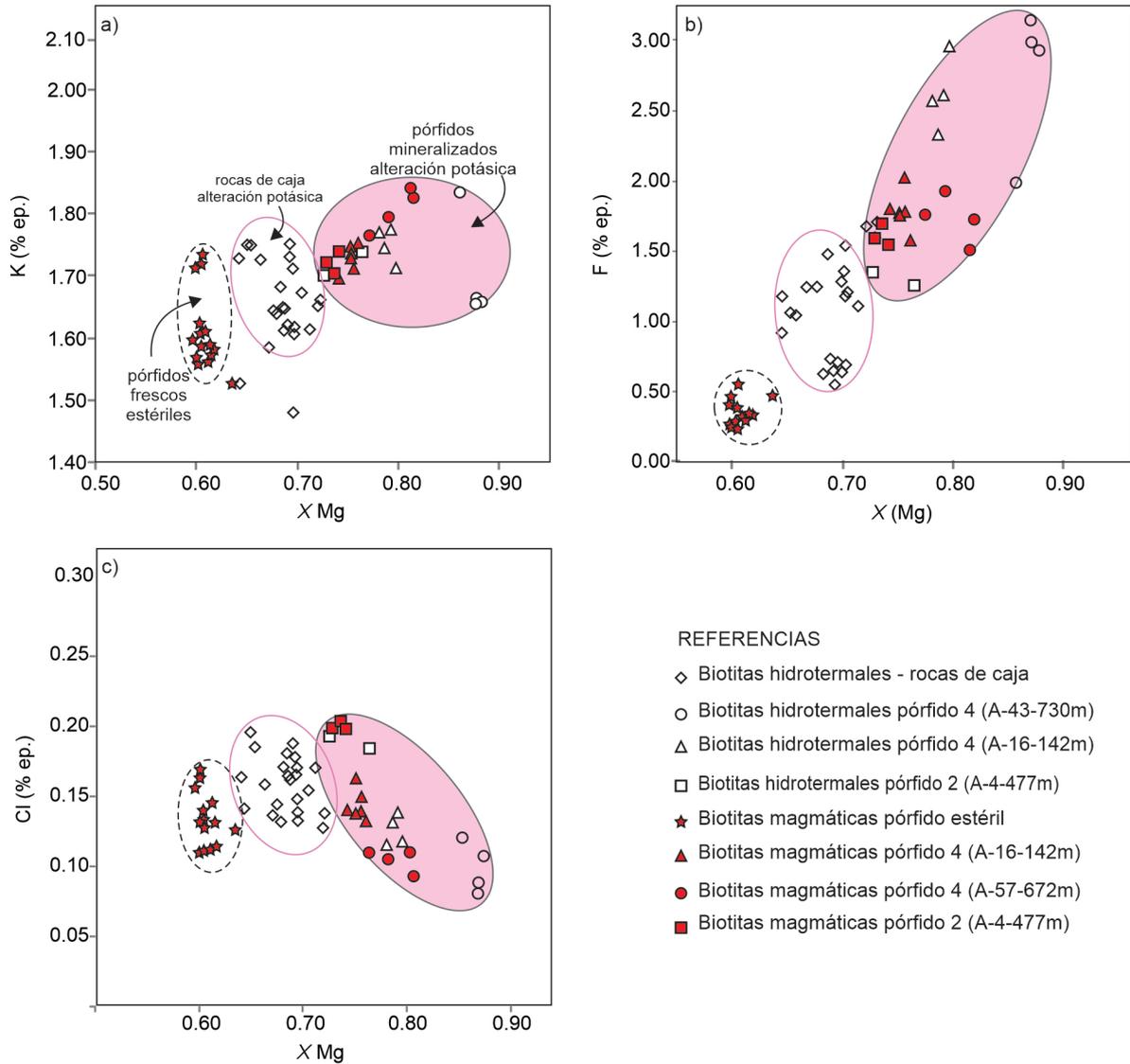


2

3 **Figura. 3.** a) Mapa geológico de QDM con la distribución de alteraciones hidrotermales,
 4 vetillas de cuarzo, y la ubicación de la sección 6517600 N. b) Secciones 6517600 N con

1 distribución de litologías, tipos de alteración hidrotermal, zona rica en Au y muestras
 2 estudiadas mediante sección delgada, difracción de rayos X, microsonda electrónica y AL-
 3 ICPMS. Modificado de Maydagán et al. (2018).

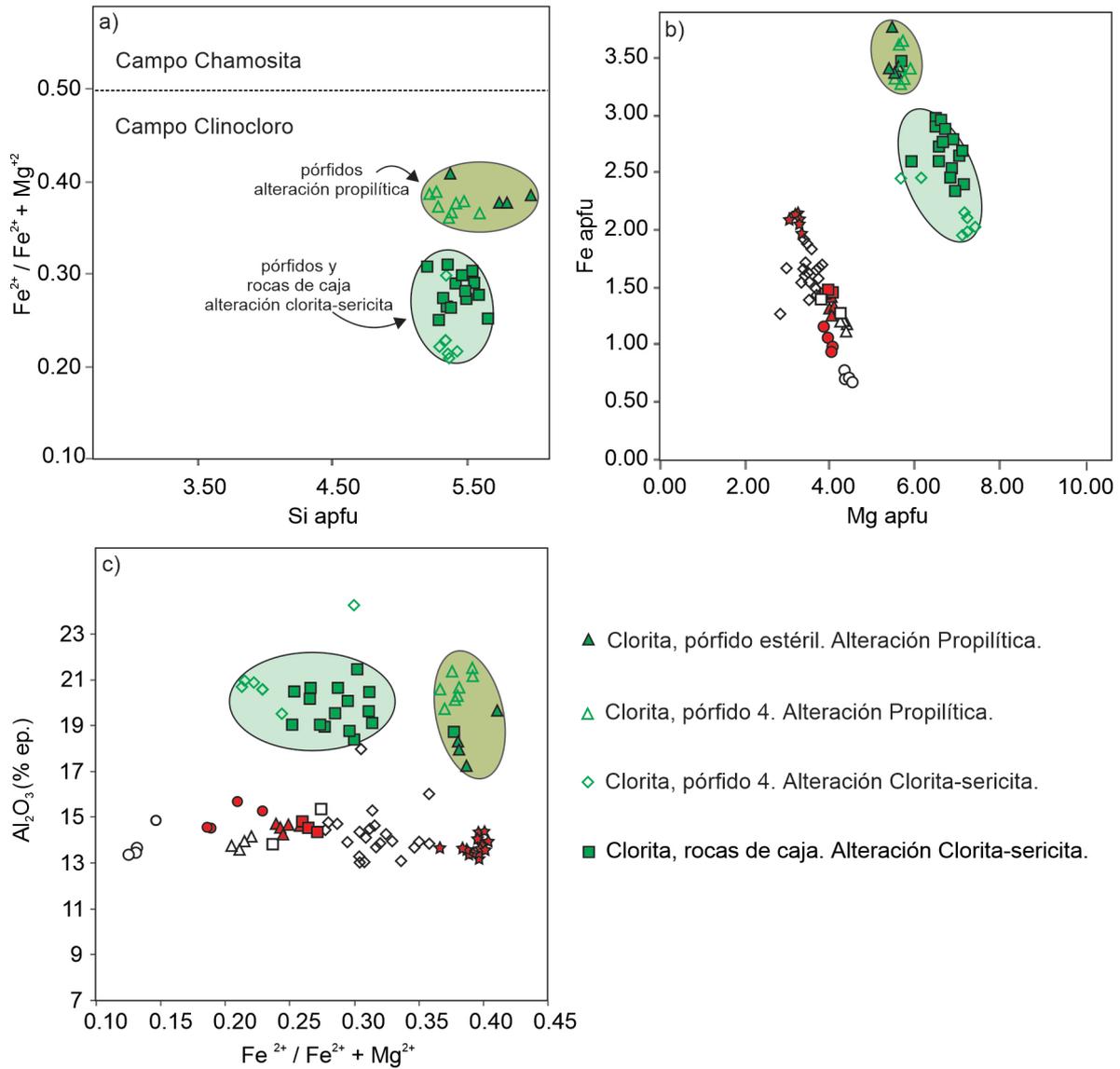
4



5

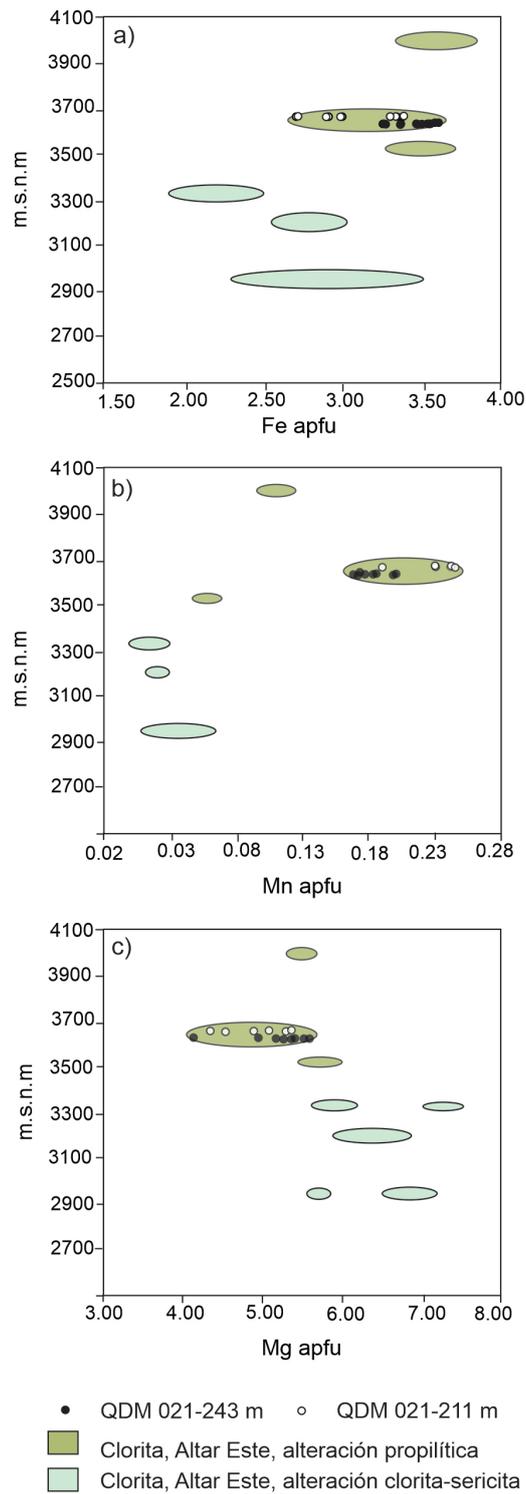
6 **Figura. 4.** Composiciones de biotita magmática e hidrotermal de Altar Central y Altar Este.
 7 a-c) K, F, Cl (% en peso) versus XMg en biotitas. Se destacan los campos correspondientes
 8 a biotita magmática de pórfidos frescos estériles y los campos correspondientes a alteración
 9 potásica en rocas de caja, y de pórfidos mineralizados. Modificado de Maydagán et al.
 10 (2016). XMg: $Mg / (Mg + Fe)$ en base a átomos por fórmula unidad.

1
2
3
4



5
6 **Figura. 5.** Composiciones de cloritas. a) Fe/(Fe + Mg) versus Si (apfu), b) Fe versus Mg
7 (apfu), c) Al_2O_3 (% en peso) versus Fe/(Fe + Mg) en cloritas de Altar Central y Altar Este
8 correspondientes a alteraciones propilítica y clorita-sericita. Modificado de Maydagán et al.
9 (2016).

1

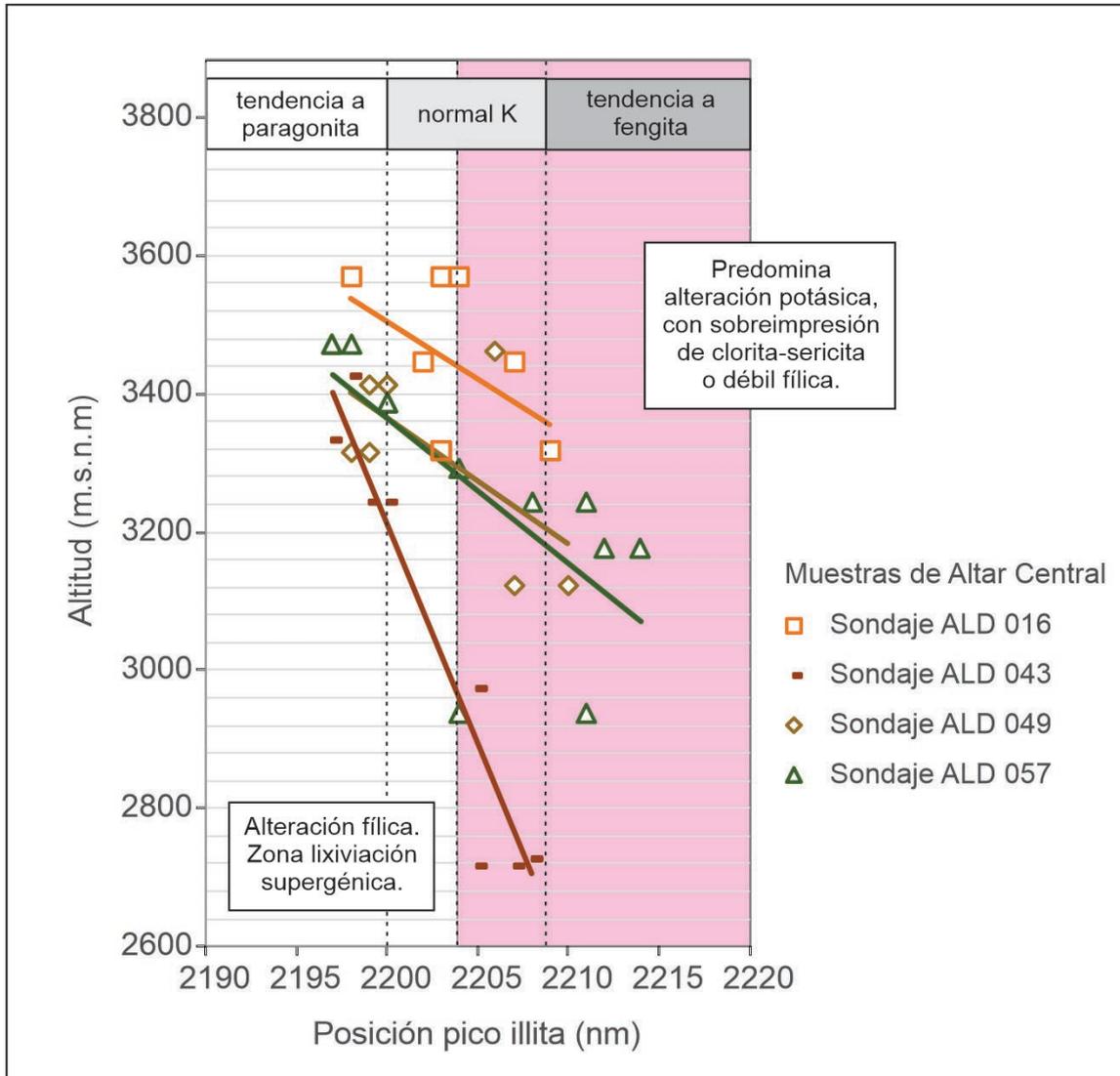


2

3 **Figura. 6.** Variación composicional de las cloritas. Fe, Mn y Mg (% en peso) en cloritas de
4 QDM se grafican versus m s.n.m (metros sobre el nivel del mar). Se incluyen las
5 composiciones de las cloritas del depósito Altar correspondientes a alteraciones propilítica y
6 clorita-sericita. Modificado de Maydagán et al. (2018).

1

2



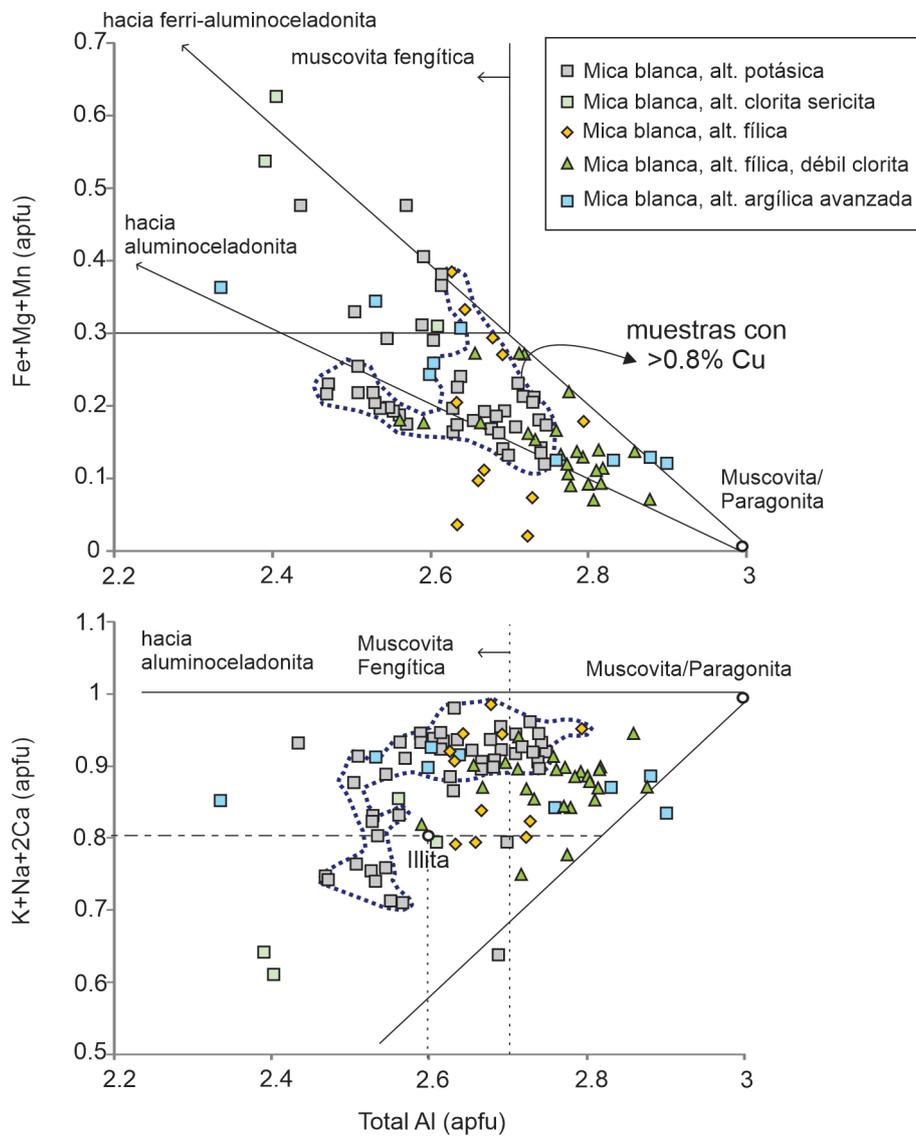
3

4 **Fig. 7.** Posición del pico de illita (nm) obtenido mediante espectroscopia de infrarojo (SWIR)
5 versus altitud (m s.n.m) para muestras con micas blancas correspondientes a Altar Central.

6 El campo de color rosa refleja el predominio de las asociaciones de alteración hidrotermal
7 potásica con sobreimpresión de alteración clorita-sericita y débil alteración filica, y que a su
8 vez coincide con altas leyes de cobre en cotas correspondientes a mineralización
9 hipogénica.

10

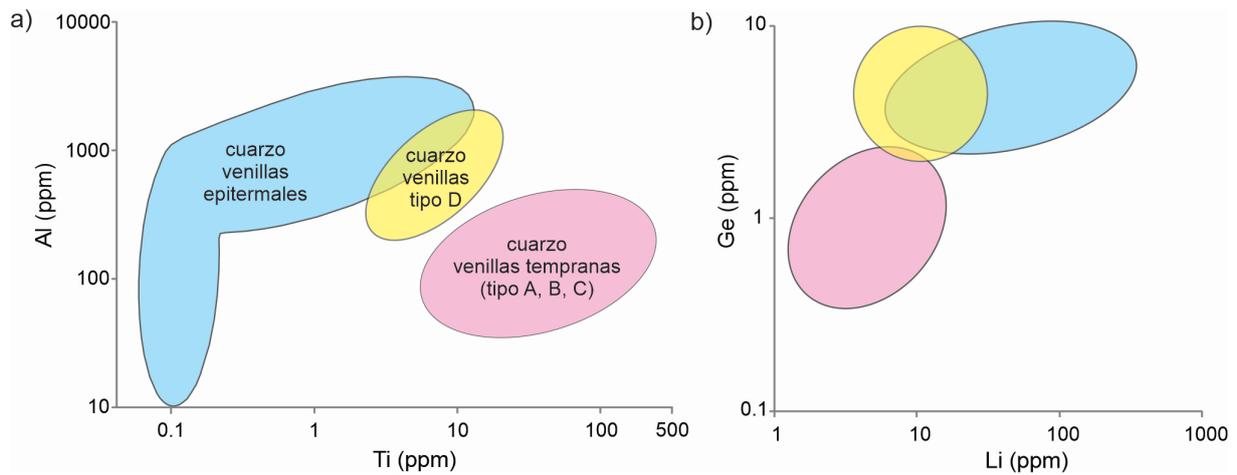
1
2



3
4
5
6
7
8
9
10

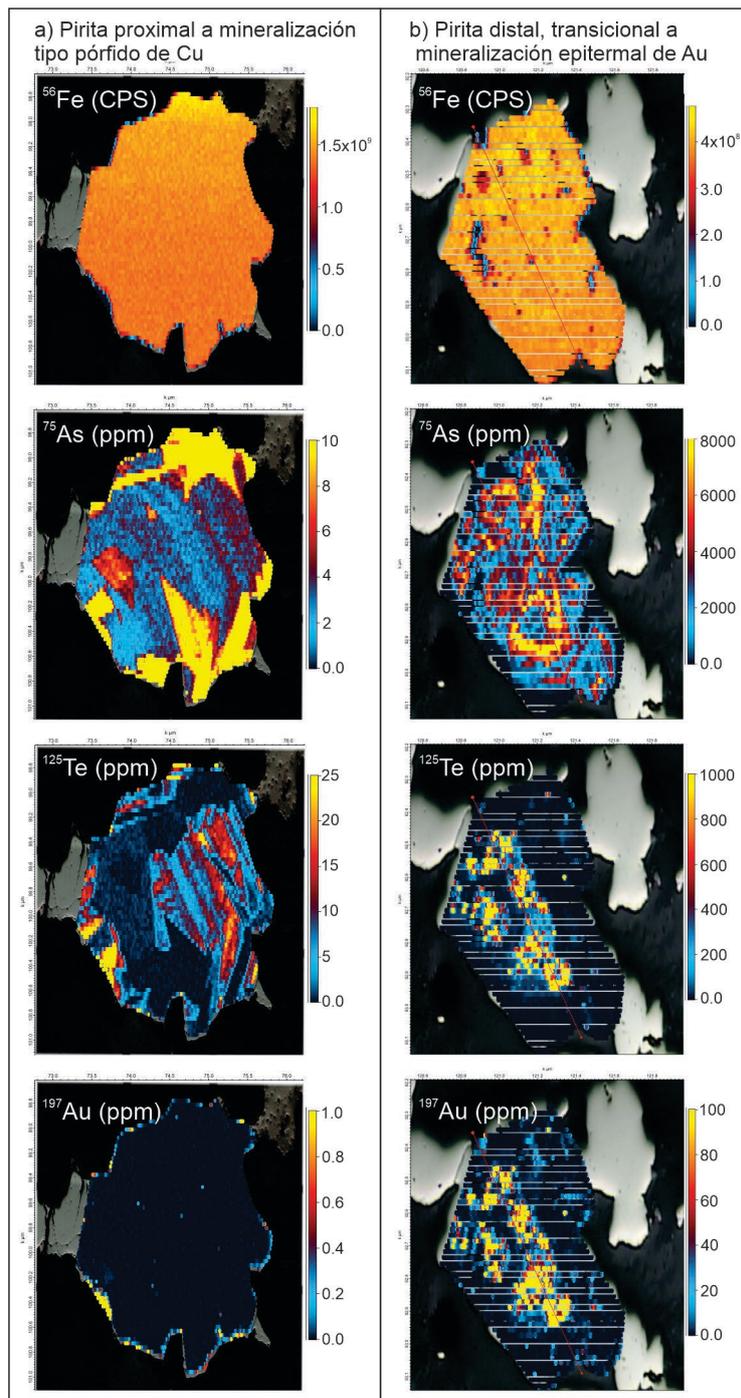
Fig. 8. Diagramas de variaciones composicionales en micas blancas correspondientes a AC y AE de Al (apfu) versus Fe+Mg+Mn (apfu) y de Al (apfu) versus K+Na+2Ca (apfu) (modificado de Cohen, 2011). Las flechas representan composiciones de vectores de los principales mecanismos de sustitución. Modificado de Maydagán et al. 2016.

1
2
3
4
5



6
7
8
9
10

Figura. 9. Concentraciones de Ti, Al, Ge y Li en el cuarzo de diferentes generaciones de vetillas de cuarzo correspondientes a Altar Central y Altar Este. Los campos reflejan las composiciones de las vetillas tempranas (tipos A, B y C), las vetillas tipo D, y las vetillas epitermales. Modificado de Rusk (2012) y Maydagán et al. (2015).

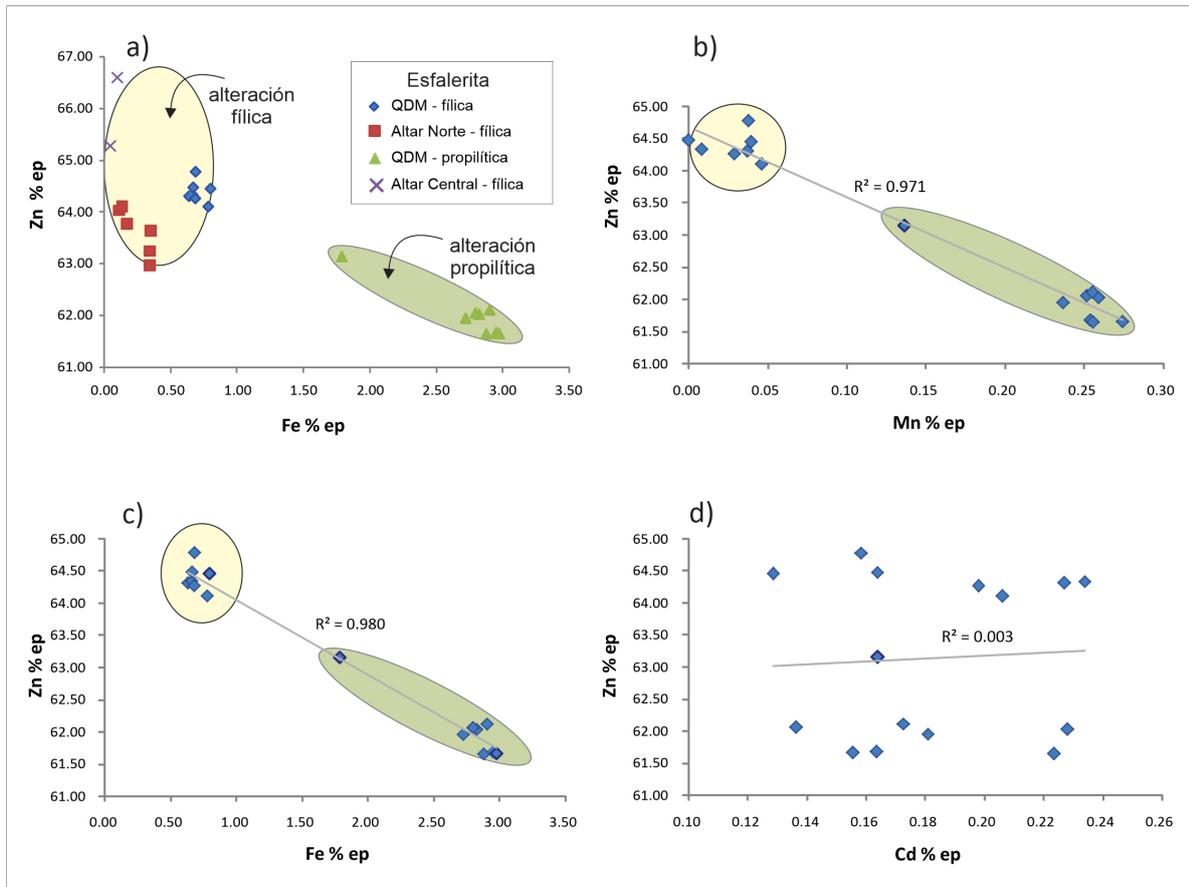


1

2 **Fig. 10.** Mapas de elementos trazas obtenidos mediante AL-IPMS en piritas de QDM. Se
 3 comparan los contenidos de Fe, As, Te y Au de un cristal de pirita representativa de un
 4 sector proximal a la mineralización de Cu tipo pórfido y un cristal de pirita representativa del
 5 ambiente distal transicional a una mineralización de Au epitermal. CPS: cuentas por
 6 segundo.

7

1



2

3 **Figura. 11.** a) Contenido de Zn versus Fe de esfalerita correspondiente a QDM, AN y AC. b-
4 d). Gráficos binarios de Zn (% en peso) versus Mn, Fe y Cd (% en peso) de esfaleritas de
5 QDM (R²: coeficiente de correlación).

6

7

8

9

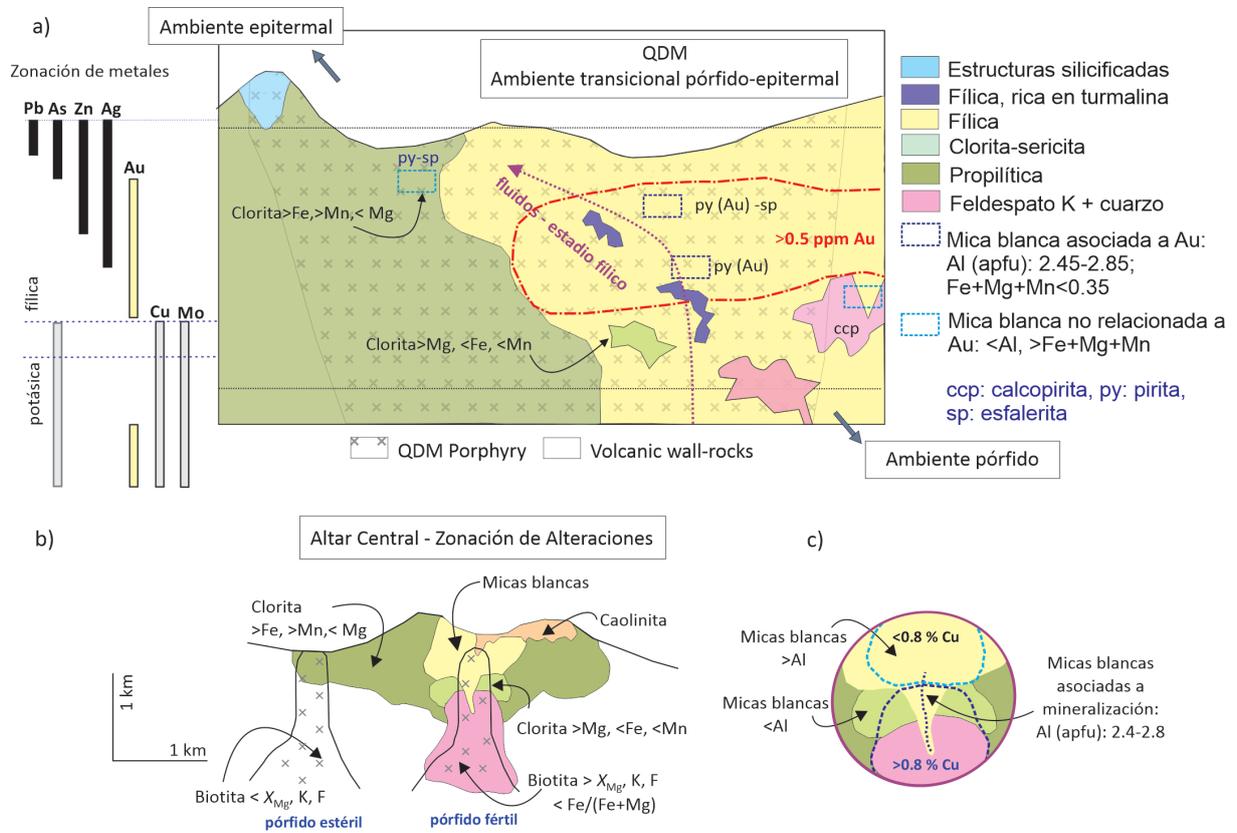
10

11

12

1

2



3

4 **Figura 12.** a-b-c) Modelos esquemáticos de la distribución de litologías, tipos de alteración
 5 hidrotermal, zonación de sulfuros y metales en los niveles someros de Quebrada de la Mina
 6 (modificado de Maydagán et al. 2018), y en los niveles someros y profundos de AC y
 7 AETambién se muestra la variación en la composición de la mica blanca, clorita, biotita,
 8 junto a la distribución de pirita y esfalerita en los centros mineralizados estudiados.

9

10

11