



Valeria E. Simón

Geóloga

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Universidad Nacional de Córdoba

Realizó su Doctorado en Ciencias Geológicas en la escuela de postgrado de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta

Dirección: Dr. Marcelo Arnosio (IBIGEO, UNSa-CONICET)

Codirección: Dr. Robert Trumbull (GFZ-Potsdam)

Codirección beca CONICET: Dr. Souza Valmir Da Silva (IG-Brasilia)

## Petrología, alteración hidrotermal y mineralización del sistema porfídico (Au-Cu) Lindero, Puna Austral, Provincia de Salta, Argentina

El pórfido de oro Lindero ( $25^{\circ}04'55''\text{LS}$ ,  $67^{\circ}46'45''\text{LO}$ ) está ubicado en la Puna Austral, en el noroeste de Argentina. El depósito se centra en un complejo magmático formado por seis intrusiones subvolcánicas emplazadas en el margen sur de la cuenca de Arizaro, en la Formación Vizcachera. De acuerdo con las relaciones estratigráficas, el nivel de emplazamiento fue poco profundo, probablemente  $<1,5$  km. El complejo comprende una unidad temprana-mineral (FPD), cuatro unidades inter-minerales (CPD1, Pbfd, CPD2 y DDP) y una unidad post-mineral (PMI).

Se reconocieron tres tipos de alteraciones: (i) alteración calco-sódica, la cual se restringe al área central del depósito y se caracteriza por la presencia de clinopiroxeno + magnetita + feldespato potásico + cuarzo + calcita  $\pm$  plagioclasa (albita y oligoclasa), (ii) alteración potásica, está ampliamente distribuida y es el principal tipo de alteración, se define por la ocurrencia de feldespato potásico + cuarzo + magnetita  $\pm$  biotita  $\pm$  anhidrita, y (iii) alteración clorita-calcita que se caracteriza por un arreglo simple de esos dos minerales.

Varios tipos de venillas típicas de los sistemas de pórfido están presentes en Lindero. A la alteración calco-sódica solo se asocian venillas de clinopiroxeno + magnetita  $\pm$  cuarzo, mientras que la alteración

potásica muestra una mayor variedad de venillas, las cuales varían desde venillas tempranas magnetita (tipo-M) y biotita (tipo-EB), pasando por diferentes generaciones de venas de cuarzo, hasta venas tardías de anhidrita. Las venas de cuarzo en Lindero incluyen tres generaciones de venas tipo-A y venas de cuarzo bandeado. De acuerdo con la proporción de magnetita, sulfuros (principalmente calcopirita y, en menor medida, pirita y escasa bornita) y anhidrita, las venas de cuarzo tipo-A se dividen en: (A1) cuarzo + magnetita, (A2) cuarzo + sulfuros y (A3) cuarzo + anhidrita + sulfuros. Las venas de cuarzo bandeado son características de los depósitos tipo pórfido de oro, y se distinguen por una alternancia simétrica de bandas claras y oscuras. Las mayores leyes del depósito se correlacionan muy bien con la distribución de la alteración potásica y de sus venillas asociadas de cuarzo. Las reservas probadas más probables de Lindero son 84.226 t con leyes promedio de 0,63 g/t Au y 0,11 % Cu.

Estudios previos asignaron a Lindero como un depósito tipo hierro-cobre-oro (iron oxide-copper-gold; IOCG) pero muchas características del yacimiento sugieren que es un depósito tipo pórfido de oro, las cuales incluyen: (i) la relación espacial y temporal entre los cuerpos intrusivos y la alteración, (ii) el patrón de distribución de la alteración, particularmente el pequeño volumen de roca afectada por alteración calco-sódica, y (iii) el estilo de mineralización rico en Au y pobre en Cu.

Las dataciones in-situ U/Pb SIMS en circón, tanto de la unidad más antigua (FPD), la intermedia (Pbfd) y la más joven (DDP), confirman la edad miocena del depósito. Las edades medias ponderadas de FPD y DDP son indistinguibles entre sí, con  $15,36 \pm 0,13$  Ma y  $15,47 \pm 0,11$  Ma, respectivamente. Las edades individuales de cada unidad varían en  $\sim 1$  m.a. y el rango completo de edades es de  $15,92 \pm 0,23$  a  $14,44 \pm 0,33$  Ma, dentro del cual, las edades más jóvenes son consideradas como la mejor estimación de la edad de emplazamiento ( $14,97 \pm 0,30$  Ma y  $14,98 \pm 0,21$  Ma), por lo que se sugiere una corta duración del magmatismo de Lindero en torno a los 15,0 Ma. Dos edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en biotitas hidrotermales de la alteración potásica ( $14,99 \pm 0,16$  Ma y  $14,93 \pm 0,12$  Ma) indican que la alteración hidrotermal se inició prácticamente de manera simultánea con el emplazamiento de las unidades porfídicas.

Todas las unidades intrusivas son similares en mineralogía y geoquímica. Estas poseen textura porfídica de grano fino a medio (1 - 4 mm) con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, clinopiroxeno y escaso cuarzo (40-55 vol % de fenocristales) en una mesostasis microcristalina de cuarzo  $\pm$  feldespato potásico (0,02-0,07 mm), excepto en la unidad post-mineral, la cual tiene mesostasis criptocristalina. Los análisis de roca total de las muestras inalteradas revelan un estrecho rango de composición diorítica (58,6–61,9 %  $\text{SiO}_2$ ) de la serie calco-alkalina rica en K para todas las unidades. Las características de los elementos traza (baja relación Ba/Nb, alto Nb) de los magmas de Lindero, indican una afinidad de retroarco, similar a los de la Puna Austral y distinta a la del arco de la Zona Volcánica Central (ZVC). Las

relaciones isotópicas de Sr y Nd ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,706042$  a  $0,706607$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0,512501$  a  $0,512582$ ) de los intrusivos de Lindero son también similares a las rocas volcánicas del retroarco de la Puna Austral. Las relaciones de isótopos de Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,79$  a  $18,83$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15,60$  a  $15,63$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38,66$  a  $38,74$ ) se superponen con magmas tanto del retroarco como de la ZVC. El estrecho rango de edades, la asociación espacial y la uniformidad en la composición química e isotópica de las unidades de pórfido de Lindero, sugieren que todas derivaron de una fuente de magma común; la cual fue sometida a fraccionamiento y asimilación de corteza antes del emplazamiento, como lo sugieren las bajas concentraciones de Mg, Cr, Ni y Sr. Las unidades porfídicas de Lindero muestran similitudes geoquímicas e isotópicas con las de los depósitos tipo pórfido de oro en el Faja de Maricunga, Chile, y con los depósitos de pórfido de cobre ubicados en el retroarco de Argentina; sin embargo, difieren notablemente de los depósitos de pórfido de cobre dispuestos en el arco frontal de Chile, fundamentalmente por la falta de la firma tipo adakítica (alta relación Sr/Y).

El sistema de alimentación magmática de Lindero está definido por tres niveles de estancamiento principales emplazados a diferentes profundidades: (i) cámara magmática a nivel de corteza inferior ( $\sim 28$  km), caracterizada por temperaturas y presiones altas (medias ponderadas de  $1100 \pm 17$  °C y  $8,3 \pm 1,2$  kbar, respectivamente), (ii) cámara magmática intermedia a nivel de corteza media ( $\sim 14$  km) con temperaturas y presiones entorno a los  $972 \pm 17$  °C y  $3,7 \pm 0,6$  kbar, respectivamente, y (iii) cámara magmática a nivel de corteza superior ( $\sim 7$  km), en donde la temperatura ( $860 \pm 8,6$  °C) y presión ( $2,0 \pm 0,16$  kbar) del magma son menores. La fugacidad de oxígeno indica un magma relativamente oxidado ( $f\text{O}_2$  media  $-11,0$  con  $\Delta\text{NNO}$  entre  $+0,1$  y  $+2,1$ ). El contenido de agua del magma aumenta desde la cámara profunda ( $\sim 1,5$  %) hacia la superficial ( $3,7$  % a  $6,2$  %). Las texturas de desequilibrio (e.g., zonación inversa, escalonada, parches, superficies de reabsorción-disolución) que se observan en los fenocristales magmáticos primarios (plagioclasa, anfíbol y clinopiroxeno), indican la existencia de múltiples pulsos de recarga de magma menos evolucionado en Lindero. Estos pulsos favorecieron el ascenso de magmas de alta temperatura, relativamente oxidados y enriquecidos en agua, hasta niveles subvolcánicos ( $< 5$  km) lo que contribuyó en la formación del yacimiento.

A partir de las diferencias geoquímicas entre las rocas porfídicas inalteradas y alteradas de Lindero, se observa un trend de alteración desde las rocas menos modificadas hasta rocas afectadas por alteración potásica intensa ( $\sim 60$  % minerales neoformados). El balance de masa de las rocas alteradas indica ganancias de Si, Fe, Al, Mg, Ca y K, con conservación del Na, que implican un cambio de masa general de  $\sim 8$  vol % en la alteración calco-sódica y un cambio de entre  $\sim 8$  y  $10$  vol % en la alteración potásica debido a considerables ganancias de Si, Fe, Na y K. El estilo de mineralización rico en Au y pobre en Cu de Lindero es reflejado por la presencia de escasos sulfuros primarios ( $< 1$  vol %; calcopirita + pirita  $\pm$  bornita),

los cuales frecuentemente están asociados con magnetita (promedio=2,3 vol %; máximo=10 vol %) y oro nativo. El Au es el principal mineral de mena de Lindero, el cual ocurre como granos anhedrales (2 a 10  $\mu\text{m}$ ) comúnmente en aleación con Ag. La mayor parte del Au se relaciona con la alteración potásica, en donde está presente como: (i) granos libres en la mesostasis alterada, (ii) inclusiones dentro de cristales de calcopirita y (iii) como mineral constituyente en venas tipo-A. Una proporción menor de Au se asocia a la alteración calco-sódica.

Cuatro tipos de inclusiones fluidas están presentes en las venas de cuarzo (tipo-A y venas de cuarzo bandeado) asociadas a la alteración potásica en Lindero: (i) inclusiones hipersalinas anhidras, las cuales se caracterizan por un denso empaquetamiento de minerales hijo (principalmente cloruro de Fe, silvita, halita, anhidrita y hematita), una burbuja deformada y por la ausencia de fase líquida, (ii) inclusiones con halita que contienen líquido, una burbuja de vapor y un cristal hijo de halita, (iii) inclusiones acuosas bifásicas que incluyen una fase líquida y una vapor, y (iv) inclusiones ricas en vapor (>90 vol % de vapor). Cada tipo de inclusión está vinculado con una etapa única dentro de la evolución hidrotermal del depósito, las cuales pueden resumirse en tres etapas principales. La etapa 1 es la fase principal de mineralización y se caracteriza por la presencia de inclusiones ricas en vapor que coexisten con inclusiones hipersalinas anhidras. El fluido atrapado por este último tipo de inclusión era una salmuera altamente salina (~90 % NaCl eq.), caliente (temperatura de homogeneización a líquido,  $Th_L > 680\text{ }^\circ\text{C}$  y comúnmente  $Th_L > 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ), rica en Na, K, Fe y Cl, de origen predominantemente magmático, la cual era portadora de mineralización de Au (+ Cu  $\pm$  Ag  $\pm$  Mo). Las dos etapas posteriores, que involucran fluidos más fríos ( $Th_L < 300\text{ }^\circ\text{C}$ ) y salinidades gradualmente más bajas (desde 36,1 hasta 0,2 % NaCl eq.), están representadas por las inclusiones con halita e inclusiones acuosas bifásicas (etapas 2 y 3, respectivamente). Las inclusiones hipersalinas anhidras representan el fluido parental de formación más probable de la alteración potásica de Lindero. La formación de este tipo poco común de inclusión desempeñaría un papel clave en el transporte y la precipitación del Au en los depósitos de pórfido poco profundos.



Vista general del depósito porfídico Lindero, Puna Austral, Salta