



RELACION ENTRE MAGMATISMO-TECTONICA Y SU IMPLICANCIA EN LA FORMACION DE SISTEMAS DE PORFIDOS CUPRIFEROS: YACIMIENTO EL SALVADOR, III REGION, CHILE

Cornejo, P¹, Matthews, S. J.¹

INTRODUCCION

Los pórfidos cupríferos, de mayor importancia económica del norte de Chile, se formaron en el Eoceno-Oligoceno inferior, durante un periodo de magmatismo sincrónico o subsecuente a la fase de deformación incaica (1, 2). Esta produjo un importante engrosamiento tectónico de la corteza, debido a fenómenos de compresión y transcurrencia a lo largo del Sistema de Fallas de Domeyko (SFD). Los pórfidos Cu-Mo, con edades comprendidas entre 42 y 31 Ma (Collaguasi, La Escondida, Chuquicamata, El Abra, Sierra Exploradora, El Salvador y Potrerillos) se emplazaron, de acuerdo a los datos geocronológicos disponibles, a la fecha, tanto durante la fase incaica (Eoceno medio-superior), como con posterioridad a ésta, en el Oligoceno inferior (3, 4). Los complejos intrusivos portadores de mineralización cuprífera se agrupan, generalmente, a lo largo de las trazas mayores del SFD formando "clusters" junto a intrusivos más antiguos, en zonas que muestran una recurrente actividad magmática y que se encuentran separadas por zonas, donde el magmatismo terciario es escaso o ausente (5). En la zona de El Salvador-Potrerillos, incluyendo el Distrito Indio Muerto, el rasgo estructural más distintivo corresponde a la Falla Sierra Castillo, falla subvertical de rumbo norte-sur, que habría registrado movimientos sinistral durante el Eoceno (2). Al norte de Quebrada Asientos, la falla Sierra Castillo, está acompañada, hacia el este, por un sistema de cabalgamientos, de rumbo NNE de vergencia oriental (2). Un heterogéneo grupo de intrusivos epizonales y subvolcánicos, con edades comprendidas entre los 49-32 Ma, ocurre en estrecha relación espacial con las fallas mayores y estructuras secundarias del SFD.

El estudio detallado de la geocronología y geoquímica de los diferentes eventos magmáticos, presentes en la zona de El Salvador-Potrerillos, que comprenden desde el Cretácico superior al Oligoceno inferior (70-32 Ma), y de su integración con la evolución tectónica de este segmento de la Cordillera de Domeyko, nos han permitido formular un modelo en el cual la formación de los sistemas de pórfidos cupríferos eocenos sería consecuencia directa de ésta relación entre "tectonismo y magmatismo". Para efecto de este trabajo se considera que las secuencias volcánicas del Triásico al Cretácico (Fm. Quebrada del Salitre, Sierra Fraga y Llanta) y los granitoides del Paleozoico Superior (batolitos Sierra Castillo y Pedernales) de la zona, representan "basamento efectivo". Además, para efecto de completar el registro geoquímico se han incluido, en esta presentación, datos inéditos de rocas del Cretácico Superior y Paleoceno de la zona de Inca de Oro (6), ubicada al SW de El Salvador.

HISTORIA MAGMATO-TECTONICA DE LA ZONA (70-32 Ma)

Las secuencias mesozoicas presentes en la zona están intruida por un conjunto de plutones monzodioríticos de piroxeno y biotita, con edades K-Ar entre 70 y 64 Ma, que representan la última actividad magmática del Cretácico (e.g. plutones de Río de La Sal, Sierra Miranda y cerro La Tuna; 6, 7). Ambos muestran efecto de deformación (plegamientos y fallas), sellada por la discordancia con las rocas volcánicas del Paleoceno inferior. Esta relación ha permitido acotar ese evento de deformación cercano al límite Cretácico-Paleoceno (65-63 Ma) (Hornitos unconformity; 4, 8). La actividad magmática del Paleoceno inferior (63-58 Ma) representa un evento regional en el norte de Chile, muy bien documentado en la zona de El Salvador, Potrerillos e Inca de Oro (9), que incluye principalmente ignimbritas y domos riolíticos asociados a grandes estructuras de calderas y, en menor proporción, secuencias volcánicas andesíticas a dacíticas (9). Relaciones geológicas indican que estos productos se formaron bajo un régimen extensional (4, 9). Esta actividad extrusiva cesó alrededor de los 57 Ma, seguida de la intrusión de complejos plutónicos pequeños, expuestos en la zona de Inca de Oro, con edades entre 57-52 Ma (eg. Cerro La Campana y

¹Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile.

Sierra Chinchilla; 6). El reinicio de la actividad magmática, en la zona de El Salvador-Potrerrillos, solo ocurrió alrededor de los 49 Ma, aunque, en la zona más occidental (Inca de Oro) y hacia el norte (Sierra Exploradora), existe registro de secuencias volcánicas con edades entre 57y 50? Ma. Este periodo se caracteriza por un heterogéneo grupo de intrusivos epizonales y subvolcánicos, con edades comprendidas entre el Eoceno medio al Oligoceno inferior (49-32 Ma), entre los cuales se encuentran desde stocks de granodioritas-granitos, intrusivos monzodioríticos, hasta pórfidos andesíticos y dacíticos, junto a domos y diques riolíticos, que ocurre en estrecha relación espacial con las fallas mayores y estructuras secundarias del SFD. Estos intrusivos considerando su edad relativa de emplazamiento, en relación con la fase incaica, se han agrupado en intrusivos pre, sin y postectónicos (10).

GEOQUIMICA DE PRODUCTOS MAGMATICOS REGIONALES (70-32 Ma)

La geoquímica (elementos mayores y trazas, y tierras raras) de los productos magmáticos de los tres periodos mencionados (Cretácico Superior, Paleoceno, Eoceno-Oligoceno inferior) muestra importantes cambios que reflejan los diferentes ambientes tectónicos y condiciones imperantes en la corteza y el manto. Los plutones del Cretácico superior (70-64 Ma) tienen un amplio rango composicional desde gabros a monzogranitos, con una impronta "calcoalcalina normal" (contenido relativamente bajo de Zr, Nb, Rb, Ti y tierras raras livianas) indicando su formación en un arco magmático, con características de subducción. Después del evento de deformación del límite Cretácico-Terciario, se observa el mayor cambio en el comportamiento geoquímico de los productos magmáticos. El gran volumen de rocas silíceas en la etapa temprana de este periodo (ignimbritas y domos riolíticos) con alto contenido de K, Rb y Ba y bajo Sr y Zr, es indicativo de procesos de fusión de la corteza superior. Además, las composiciones de los productos máficos e intermedios (alto contenido de Zr, Nb, Ti, P y tierras raras livianas y bajo Sr y Fe), son típicos de un arco de "alta madurez" interpretado como producto de fusión del manto subcontinental, con escasa influencia de subducción (11). Este comportamiento es característico de un régimen extensional, el cual se habría instalado debido a un retiro de la placa subductada hacia el oeste y consecuente aumento en el ángulo de subducción y descompresión del manto subcontinental. Este régimen coincide con el periodo de subducción paralela al margen continental entre los 65-50 Ma (12). Los patrones de tierras raras de los productos paleocenos (Sm/Yb 2-5) son consistentes con una evolución de los magmas más básicos del grupo, en presencia de una corteza continental engrosada por la deformación del límite Cretácico-Terciario, hasta el nivel necesario para estabilizar anfíbola en sus niveles basales (e.g. 13).

Los productos magmáticos del Eoceno medio al Oligoceno inferior (49-32 Ma) muestran un retorno a comportamiento geoquímico característico de condiciones normales de subducción y pérdida de la impronta "intraplaca" de los magmas paleocenos. Los intrusivos preectónicos (49-44Ma), calcoalcalinos, presentan una geoquímica de elementos mayores y trazas similar a la rocas del Cretácico Superior. Sin embargo, mantienen las razones Sm/Yb relativamente altas, tal como las rocas paleocenas, indicando aún la presencia de anfíbola estable en la corteza inferior (fase anfíbolítica). Los intrusivos sintectónicos, asociados al yacimiento El Salvador (43-41 Ma), muestran empinados patrones de tierras raras medianas a pesadas (Sm/Yb = 4-9), un contenido más alto de Sr y Al y una significativa ausencia de anomalías negativas de Eu. Estas características se atribuyen a la transición desde anfíbolita a eclogita en la corteza inferior, con destrucción de anfíbola y plagioclasa y formación de granate y clinopiroxeno. Este proceso produce líquidos tonalíticos (tipo TTG) y volátiles, mediante la "fusión parcial por deshidratación de anfíbola" (e.g. 14). Esta eclogitización de la corteza inferior refleja el engrosamiento tectónico ocurrido durante la fase incaica. Los líquidos tonalíticos que contaminaron los magmas basálticos mantélicos "en tránsito" habrían contribuido a la formación de magmas híbridos, ricos en volátiles, capaces, por lo tanto, de transportar metales y ascender hasta niveles subsuperficiales a través de zonas estructuralmente debilitadas, por la deformación incaica o fases tectónicas previas. La ausencia de anomalía de Eu, a pesar de control evolutivo dominado por plagioclasa, se atribuye a una alta fugacidad de oxígeno de los magmas, debido su enriquecimiento en fases volátiles. La transferencia de los magmas, sintectónicos, eocenos hacia niveles altos de la corteza, ocurrió, en El Salvador, en forma muy rápida y probablemente a través de estructuras corticales, sin que existan evidencias de una interacción (contaminación) mayor con la corteza media-superior durante el ascenso. Ello se ve reflejado por las bajas razones isotópicas de $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ y $143\text{Nd}/144\text{Nd}$ disponibles para los intrusivos de El Salvador y otros sistemas de pórfidos cupríferos eocenos (15, 16). Pequeñas variaciones en las razones isotópicas caracterizadas por una disminución de $143\text{Nd}/144\text{Nd}$ con leve incremento de $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indican un cierto grado de contaminación con la corteza inferior.

La evolución magmática en la zona de Potrerillos-El Salvador habría culminado en el Oligoceno inferior (33-

32 Ma) con el emplazamiento, al sudeste de Potrerillos, de intrusivos posttectónicos. Estos muestran razones todavía más altas de Sm/Yb (10-13), que sugieren la total desaparición de anfíbola y una evolución temprana de los magmas en presencia de eclogitas granatíferas, en una corteza inferior anhidra, engrosada por la deformación incaica.

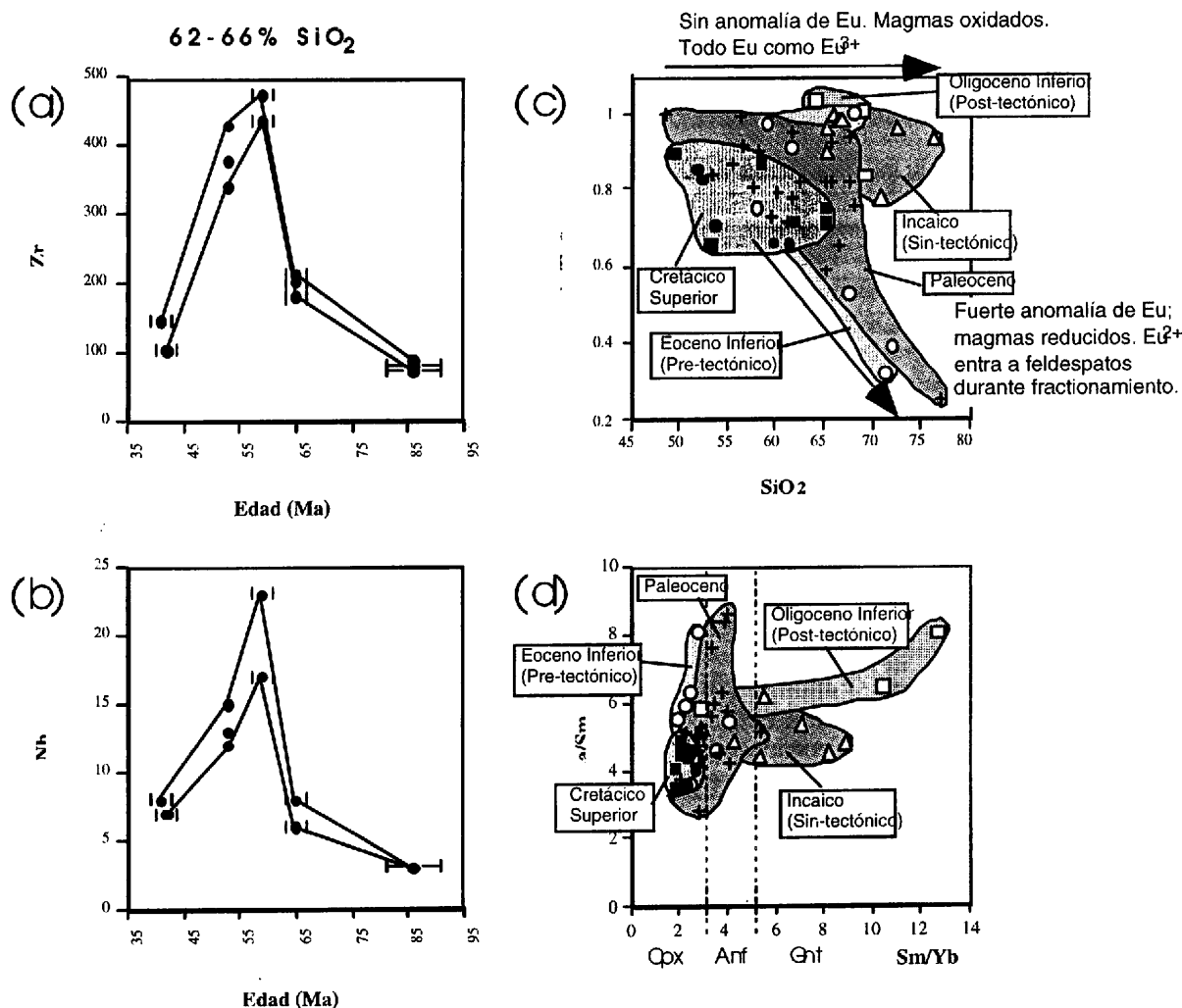


Figura 1. Evolución geoquímica temporal de la zona de El Salvador y Inca de Oro. Evolución temporal del contenido de Zr (a) y Nb (b) en rocas intermedias en la zona de Inca de Oro. (c) Diagrama mostrando la ausencia de anomalías negativas de Eu en productos magmáticos del Eoceno medio y Oligoceno inferior. (d) Diagrama mostrando la evolución temporal de patrones de tierras raras, y aproximados campos de Sm/Yb indicando la presencia de fases de minerales en la corteza inferior.

EVOLUCION MAGMATICA DEL SISTEMA DE PORFIDO CUPRIFERO EL SALVADOR (43-41 Ma)

El complejo de intrusivos asociados al yacimiento de El Salvador está formado por conjunto de intrusivos epizonales y subvolcánicos, orientado sobre una franja de dirección NNE, de 6 km de largo. Las numerosas edades radiométricas disponibles (4) y las relaciones con la mineralización permiten identificar un evento magmático temprano (43-42 Ma) representado por intrusivos subvolcánicos (pórfidos) riolíticos y, en menor volumen, granodioríticos, que presentan escasa mineralización asociada. El evento magmático principal (41 Ma), responsable de la mayor parte de la mineralización, está representado por un complejo de intrusivos múltiples, granodiorítico-dacíticos de anfíbola y biotita y cuerpos tardíos daci-andesíticos y andesíticos. Dentro de este grupo, las intrusiones más tempranas de pórfidos granodioríticos finos (Pórfido X; 8), son las portadoras de la mineralización Cu-Mo, asociada a alteración potásica (K-fd-bt-cp-bo-nt) y formación de un

gran volumen de anhidrita. La sucesión de intrusivos posteriores consiste pórfidos en pórfidos dacíticos y daci-andesíticos, ricos en plagioclasa y anfíbola ("Pórfidos Feldespáticos") y un sistema de diques "latíticos" tardíos de composición daci-andesítica, de dirección NNW, corta, finalmente, a la totalidad de las fases de pórfidos.

Los datos petrológicos del conjunto de intrusivos (43-41 Ma) indica que evolucionaron bajo control de plagioclasa a baja presión, en cámaras magmáticas de reducido volumen y en un sistema abierto, en condiciones de elevada f_{O_2} tal como lo indican la ausencia de anomalías de Europio y la ocurrencia de anhidrita magmática. La concentración de azufre, metales y volátiles en estos magmas, altamente oxidados, se puede explicar a través de un modelo de "mezcla de magmas" ligado a la repetida inyección de líquidos basálticos, enriquecidos en volátiles, en la base de una cámara magmática de composición "andesítica" en estado sólido o semisólido. La inyección de magmas basálticos en la base de la cámara habría producido una fusión parcial de ésta. Los primeros productos fundidos, de composición ácida, corresponderían a los pórfidos riolíticos tempranos del yacimiento El Salvador (Fase Temprana). En etapas más avanzadas, la continuada inyección de magma basáltico causa un cada vez más alto grado de fusión, generando magmas híbridos, progresivamente más máficos (e.g. "trend dacítico-andesítico" de los pórfidos mineralizados de El Salvador). El entrampamiento y enfriamiento de magmas basálticos en la base de la cámara, estuvieron acompañados por la exsolución de volátiles en forma de un gas comagmático (S, Cl, H₂O). El equilibrio SO₂-H₂S genera condiciones de alta fugacidad de oxígeno (17), estabilizando anhidrita en el magma e inhibiendo la cristalización de fases sulfuradas, con la consecuente incompatibilidad de Cu-Mo-Au y su transferencia al fluido. Estos son transportados y depositados, finalmente, en los subsecuentes pulsos intrusivos derivados del sistema magmático (Fase de Mineralización).

REFERENCIAS

1. Boric, R.; Díaz, F.; Maksaev, V., 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 40, 246 p., Santiago.
2. Tomlinson, A. J.; Mpodozis, C.; Cornejo, P.; Ramírez, C. F.; Dimitru, T., 1994. El sistema de fallas Sierra Castillo-Agua Amarga. transpresión sinistral eocena en la precordillera de Potrerillos-El Salvador. In Congreso Geológico Chileno No.7, Actas, Vol. 2, p. 1459-11463, Concepción.
3. Maksaev, V.; Zentilli, M. 1988. Marco metalogénico de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile. In Congreso Geológico Chileno No.5, Actas, Vol. 1, p. 181-218. Santiago.
4. Cornejo, P.; Tosdal, R.M.; Mpodozis, C.; Tomlinson, A.J.; Rivera, O.; Fanning, C.M. 1997. El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited. Geological and geochronologic framework. International Geology Review, Vol. 39, p. 22-54.
5. Cornejo, P.; Mpodozis, C., 1996. Geología de la Región de Sierra Exploradora (25°-26°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-96-09, 330 p., 9 mapas escala 1.50.000, Santiago.
6. Matthews, S.J. y Cornejo, P., 2000. K-Ar age constraints on the emplacement of Sierra Chinchilla pluton and associated Cu-Au - bearing breccia pipes, San Pedro de cachiyuyo, Copiapó Region. Congreso Geológico Chileno, IX (Este volumen).
7. Cornejo, P.; Mpodozis, C.; Matthews, S. 1999. Geología y evolución magmática del distrito Indio Muerto y yacimiento El Salvador. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Informe Registrado IR-98-14, 99 p., 1 mapa escala 1:25.000. Santiago.
8. Gustafson, L.B.; Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, Vol. 70, p. 857-912.
9. Cornejo, P.; Mpodozis, C.; Kay, S.M.; Tomlinson, A.J., 1994. Volcanismo bimodal potásico en régimen extensional del Cretácico superior-Eoceno en la región de El Salvador (26°-27° S), Chile. In Congreso Geológico Chileno No. 7, Actas, Vol. 2, p. 1306-1310. Concepción.
10. Mpodozis, C.; Tomlinson, A.J.; Cornejo, P., 1994. Acerca del control estructural de intrusivos eocenos y pórfidos cupríferos de la Región de Potrerillos-El Salvador. In Congreso Geológico Chileno No. 7, Actas, Vol. 2, p. 1596-1600, Concepción.
11. Pearce, J.A., 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate boundaries. In: Andesites: orogenic andesites and related rocks, R. S. Thorpe (ed.), 525-548. Chichester: Wiley.
12. Pilger, R.H., 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism. South American Andes. Journal of the Geological Society of London, Vol. 141, p. 793-802.
13. Kay, S.M.; Mpodozis, C.; Coira, B., 1999. Neogene Magmatism, Tectonism, and Mineral Deposits of the Central Andes (22° to 33° S Latitude). Society of Economic Geologist, Special Publication No. 7. Skinner B. (ed), p. 27-59.
14. Rapp, R.P.; Watson, E.B.; Miller, C.F., 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. Precambrian Research, Vol. 51, p. 1-25.

15. MaksaeV, V., 1990. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits. Ph.D. Thesis (unpublished), 554 p. Dalhousie University, Canada.
16. Rogers, G., 1985. A geochemical traverse across the North Chilean Andes. Ph.D. Thesis, (Unpublished), 333 p., Open University, U. K.
17. Matthews, S.J.; Jones, A.P.; Beard, A.D., 1994. Buffering of melt oxygen fugacity by sulphur redox reactions in calc-alkaline magmas. *Journal of the Geological Society, London*, Vol. 151, p. 815-823.