

Geología del yacimiento Lo Aguirre, Chile

Nicolas Saric

Codelco Chile, Vicepresidencia Negocios y Filiales
Huérfanos 1270, Santiago, Chile
nsaric@codelco.cl

Carlos Kreft

Codelco Chile, División Salvador
Huérfanos 1270, Santiago, Chile
ckreft@codelco.cl

Carlos Huete

Codelco Chile, Gerencia Exploraciones
Teatinos 258, piso 7, Santiago, Chile
chuete@codelco.cl

RESUMEN

Lo Aguirre es un yacimiento estratoligado de cobre, de tamaño mediano, similar a otros de este tipo como El Soldado, Mantos Blancos y Michilla, cuyo origen es todavía controversial a pesar de ser importantes productores cupríferos en Chile. El depósito se emplaza en rocas volcánicas basales de la Formación Veta Negra del Cretácico Inferior, en un ambiente de transición marino continental relacionado al desarrollo de una cuenca extensional. Las rocas huéspedes, caracterizadas por tener contenidos altos de potasio, corresponden a dacitas, andesitas y brechas dacíticas fluidales todas ellas con una débil a media alteración de cuarzo, albita y sericita. Las escasas rocas intrusivas, predominantemente dioríticas, no parecen tener relación genética directa con el depósito excepto en algunos casos en que la deposición de la mineralización está asociada a los contactos con las rocas encajantes. Estructuras NS y NE condicionan la continuidad y forma de los cuerpos mineralizados principales. Algunas de ellas, asociadas al proceso extensional, fueron normales y habrían sufrido una inversión posterior. La mineralización se emplaza en el contacto de un frente redox caracterizado en su techo por la presencia de un halo hematítico, de ca. 4 km de extensión, que sigue aproximadamente la estratigrafía. La mineralización hipógena de bornita, calcosina y calcopirita asociada a cantidades menores de pirita y hematita, se presenta en vetillas y en una fina diseminación, con una zonación característica de sulfuros más ricos en cobre en la parte central gradando a pirita que forma un halo envolvente hacia los márgenes y a profundidad. La mena sufrió un proceso de oxidación supérgena in situ prácticamente sin desarrollo de enriquecimiento secundario. El control de la mineralización es principalmente litológico, siendo las rocas dacíticas brechizadas las más favorable a la depositación de los fluidos mineralizantes. Se considera una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 102 ± 5 Ma para la mineralización, muy similar a la del yacimiento El Soldado. Las inclusiones fluidas indican soluciones salinas de composición variable compatibles con procesos metamórficos mientras que los isótopos de azufre son compatibles con un origen magmático. Se concluye que los fluidos mineralizadores fueron de origen hidrotermal y habrían ascendido por fallas listricas, que sufrieron un proceso de inversión, precipitando la mena en rocas favorables al cruzar un frente de redox.

Palabras claves: Yacimiento, Cu, Estratoligado, Alteración, Cretácico, Historia minera, Chile.

ABSTRACT

Geology of Lo Aguirre copper deposit, Chile. Lo Aguirre is a medium-sized stratabound ore deposit, similar to El Soldado, Mantos Blancos and Michilla, that are still controversial in their origin, in spite of being important Chilean copper producers. The deposit is emplaced at the base of the Veta Negra Formation, in a marine-continental transitional environment related to the development of a Cretaceous extensional basin. The main host rocks are high-potassium dacite, andesite and dacitic breccia affected by weak to moderate alteration by quartz, albite and sericite. Intrusions,

mainly dioritic, are scarce and do not seem to have a genetic relationship with the deposit although, in some cases, they provide favorable contacts for ore deposition. North, and northeast fault control the shape and extent of the mineralized bodies. Some of them, associated with the extensional process, were normal faults that underwent inversion after ore deposit formation. Ore emplacement is controlled by a redox front defined by the development of a hematite halo above the ore bodies that roughly follows the stratigraphy for 4 km. The hypogene ore comprises bornite, chalcocite and chalcopyrite with minor pyrite and hematite, and occurs as veinlets and fine dissemination. Zoning with more copper rich sulfides grading outwards and at depth to a pyritic halo, is characteristic. The ore underwent supergene oxidation in situ and no supergene enrichment developed. Lithology is the main ore depositional control, with dacitic breccias representing the most favorable horizon. A 102 - 5 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age is considered to represent the age of the deposit, very similar to the ages reported for the El Soldado deposit. Highly saline fluid inclusions of variable compositions are compatible with fluids of metamorphic origin whereas sulfur isotopes suggest a magmatic connection. The deposit is believed to be the product of a hydrothermal fluid that rose along listric normal faults and deposited copper and copper-iron sulfides at a redox front, mainly within permeable dacitic breccias.

Key words: Deposit. Copper. Stratabound. Alteration. Cretaceous. Mining History. Chile.

INTRODUCCIÓN

Los depósitos estratoligados conocidos también como tipo manto, han sido después de los yacimientos de cobre porfídico la mayor fuente de la producción de cobre. Estos depósitos, comparativamente poco estudiados, con relación a los porfidos, se encuentran en la Cordillera de la Costa hospedados en unidades volcano-sedimentarias Mesozoicas. Los yacimientos mayores, Mantos Blancos, Michilla, El Soldado, Lo Aguirre, se emplazaron durante el Jurásico a Cretácico Medio, cuando la Cordillera de la Costa de Chile estuvo some-

tida a un régimen extensional.

El objetivo de este trabajo es presentar una síntesis actualizada del conocimiento geológico del yacimiento Lo Aguirre, basado en información contenida, en su mayor parte, en informes inéditos desarrollados durante su explotación.

El yacimiento, explotado entre los años 1980 y 2000 por Sociedad Minera Pudahuel Ltda. y Cía C.P.A. (SMP), se ubica a 30 km al oeste de Santiago, Región Metropolitana, en el margen oriental de la Cordillera de la Costa entre 500 y 700 m s.n.m. (Fig. 1).

HISTORIA MINERA

Lo Aguirre, se conoce antes de 1800, tiempo en que los Jesuitas explotaban óxidos de alta ley que luego fundían. Minerales de 'baja ley' (10-20% Cu) se explotaron desde 1865 a 1875, vendiéndose los productos a fundiciones ubicadas en la costa hasta la caída del precio del cobre en 1881. Posteriormente, en 1914 W. Braden inició los primeros trabajos sistemáticos de exploración y evaluación, lo cual llevó en 1916 a Anaconda, a través de su subsidiaria Santiago Mining Co, a tomar el control de la propiedad y realizar un intenso programa de prospecciones que consistieron en 6.000 m de sondajes diamantinos y 13 km de galerías. Estos trabajos se extendieron hasta 1924, terminando en una evaluación de las reservas del depósito estimadas en 9,4 millones de toneladas. Desde esa fecha

hasta 1969, año en que SMP adquirió la propiedad de Anaconda, no se realizaron nuevos trabajos.

En 1975 se decide poner en marcha el proyecto, considerando su explotación mediante un 'rajo abierto'. En 1978 comienza la construcción de la planta y en 1979 la preparación de la mina y finalmente en Noviembre de 1980 se inicia la producción de cátodos. El inicio de las operaciones marcó un hito en la industria minera chilena, al incorporar la tecnología de lixiviación en pilas (TL), extracción por solventes y electrorecuperación, con innovaciones patentadas por SMP. Posteriormente se logró un importantísimo desarrollo tecnológico al adaptar el proceso al tratamiento de minerales sulfurados con ayuda de bacterias (proceso BTL).

Las reservas iniciales, consideradas para desa-

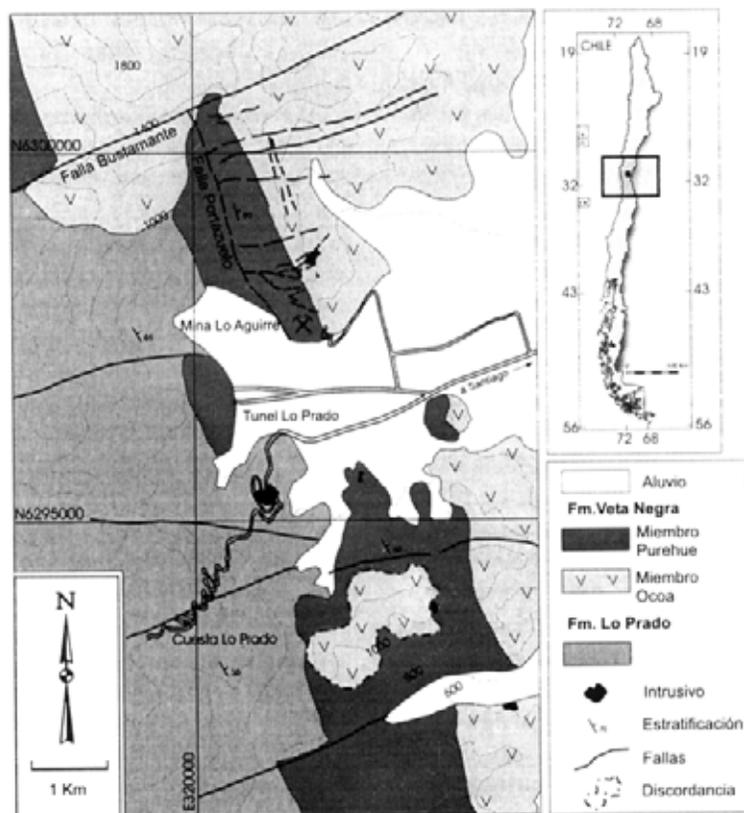


FIG. 1. Marco geológico distrital yacimiento Lo Aguirre.

rollar el proyecto de US\$70 millones de inversión, ascendieron a 11 millones de toneladas con 2,14%CuT- 1,17%CuS. Se planificó un ritmo de producción de 1.4 millones de toneladas anuales de mineral con ley de corte de 0,4% Cu T, permitiendo

producir anualmente alrededor de 17.500 toneladas de Cu fino en cátodos. Hasta la fecha de su cierre en el año 2000, se explotaron cerca de 19 millones de toneladas de mineral con una ley de 1,66% Cu T y 0,98% Cu S.

GEOLOGÍA REGIONAL

En el distrito Lo Aguirre aflora una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas con intercalaciones menores de rocas sedimentarias marinas y continentales, que constituyen un monoclinial de dirección N10°- 40°W e inclinación variable de 25 a 70° al este.

De acuerdo a los primeros estudios de Thomas (1958), posteriores redefiniciones efectuadas por Levi (1968) y trabajos detallados en informes internos de SMP efectuados por Huete y Krefl en 1982, y Torrejón en 1993 y 1994, las rocas estratificadas

se separan en dos grupos formacionales, que incluyen de oeste a este y de piso a techo a la Formación Lo Prado de edad Neocomiana y a la Formación Veta Negra asignada al Aptiano-Albiano (Fig. 1).

Estas unidades formacionales corresponden a los productos distales de un arco magmático de edad entre el Jurásico y Cretácico Superior, depositados en un ambiente transicional de marino continental (Formación Lo Prado) a continental (Formación Veta Negra).

La Formación Lo Prado, está constituida por

una unidad basal en que predominan las rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas, alcanzando una potencia de 2000 m y una unidad superior de calizas, areniscas, conglomerados, ocoitas, tobas y andesitas con una potencia de 500 m. Esta variación vertical muestra una marcada modificación de las condiciones de depositación en el tiempo, sugiriendo que la depositación fue sintectónica. El material clástico proviene mayoritariamente de la erosión de rocas volcánicas en un ambiente continental, durante el cual se depositan principalmente areniscas y conglomerados brechosos de colores rojizos que denotan una fuente cercana de origen. Los sedimentos calcáreos representan el retorno de condiciones marinas, bajo un régimen de estabilidad tectónica e inactividad volcánica, en que la presencia de restos de bivalvos sugiere condiciones de aguas de salinidad normal y profundidad marina fótica. Esta formación que se distribuye desde la entrada oriental del túnel del mismo nombre hacia el oeste, está en contacto concordante bajo la Formación Veta Negra encontrándose su base intruida por un batolito granítico (Batolito Central).

Sobre la Formación Lo Prado se ubica la Formación Veta Negra, una secuencia volcánica de más de 6000 m de potencia, con predominio de flujos lávicos, cuya composición química es afín a las series calco-alcalina y shoshonítica (Oyarzún, 1987), e intercalaciones sedimentarias menores. La Formación Veta Negra se presenta con una disposición homoclinal de rumbo general nor-noroeste e inclinaciones variables entre 55 a 80°E. Se distribuye desde la entrada oriental del túnel Lo Prado hacia el este.

Ha sido dividida en tres miembros que de piso a techo corresponden a:

Miembro Purehue. Conformado por un nivel superior de 200-400 m de potencia, constituido por andesitas afaníticas y porfíricas fuertemente hematizadas y un nivel inferior de 700 a 1.400 m de potencia, compuesto por lavas andesíticas y dacíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas.

Miembro Ocoa. Constituido principalmente por ocoitas y andesitas con intercalaciones menores de tobas, brechas y areniscas volcánicas, que alcanzan una potencia de 2.000-3.000 m.

Miembro Noviciado. Conformado por flujos de

brechas volcánicas con intercalaciones de andesitas, ocoitas y tobas. Su potencia es de 2.000 a 3.000 m.

Hacia el oeste y noroeste de Lo Aguirre, aflora un cuerpo intrusivo de carácter granodiorítico-diorítico que forma parte del Batolito Central y afecta las formaciones Lo Prado y Veta Negra, al cual por sus relaciones de contacto y dataciones radiométricas K-Ar se le asigna una edad Cretácico Superior-Terciario inferior (Gana *et al.*, 1999). Hacia el sur de Lo Aguirre, en el sector de la Cuesta de Barriga, dataciones por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de rocas intrusivas que también forman parte del Batolito Central, reportaron edades de 105 a 106 Ma (F. Munizaga comunicación oral, 1988). Localmente, se exponen pequeños apófisis dioríticos de variados tamaños y numerosos diques andesíticos, sin orientación preferencial, que se desarrollan en su gran mayoría en la Formación Veta Negra.

Las distintas unidades formacionales están afectadas por fallas de rumbo de dirección EW a ENE y desplazamientos hacia el oeste que, en algunos casos, alcanzan varios centenares de metros (2.500 m como máximo). Tanto al norte como al sur de Lo Aguirre afloran rocas asignadas al miembro Ocoa de la Formación Veta Negra, que se apoyan discordantemente sobre rocas de la formación Lo Prado y rocas del miembro Purehue de la Formación Veta Negra (Fig. 1), situación que ha sido interpretada como una discordancia progresiva de valor local.

La evolución estratigráfica y estructural parece estar relacionada al desarrollo de una cuenca extensional de intraarco (Cuenca Marginal Abortada de Chile Central) donde el adelgazamiento de la corteza se asociaría a un elevado flujo calórico que estimuló la circulación de fluidos hidrotermales de baja temperatura, en el Cretácico Inferior.

Es posible reconocer la presencia de estructuras cuya geometría es compatible con fallas listricas (Falla Portezuelo) asociadas a tectónica extensional, y fallas de rumbo transcurrente (Falla Bustamante) que representan probablemente fallas de traspaso y acomodación interna entre distintos segmentos de un sistema extensional. Esta cuenca se invirtió, probablemente en el Cretácico Superior al reactivarse en forma inversa las fallas listricas iniciales.

GEOLOGÍA LOCAL

El yacimiento Lo Aguirre, está emplazado en una secuencia de rocas volcánicas e intercalaciones sedimentarias, constituida fundamentalmente por andesitas, dacitas, riolitas, tobas, brechas y areniscas, dispuestas según un rumbo aproximado N10°-20°W e inclinadas 70° al este. Dicha secuencia, asignada al miembro Purehue de la Formación Veta Negra, presenta en el área un espesor aproximado de 700 m.

Detallar y separar la secuencia estratigráfica del yacimiento es tarea compleja por la gran similitud y gradación entre los distintos tipos de rocas, inexistencia de planos de estratificación definidos y por las numerosas fallas que desplazan los estratos.

ROCAS ESTRATIFICADAS

Las rocas encajadoras que conforman el techo del yacimiento Lo Aguirre corresponden a la denominada 'Unidad Roja', constituida por una secuencia de 230 m de andesitas rojas con textura porfírica fina, tobas liticas gris rojizas, andesitas porfíricas brechizadas gris rojizas y dacitas porfíricas violáceas marcadamente fluidales con alto contenido de hematita metálica diseminada, y que infrayace concordantemente a andesitas finas, grises, de la parte superior del miembro Purehue o a ocoitas de la base del miembro Ocoa de la Formación Veta Negra.

Bajo la unidad roja se encuentra un paquete de 145 m de potencia máxima de rocas andesitas porfíricas finas gris verdoso a gris rojizo que marcan la zona de transición sobreyaciendo en forma gradual o por fallas de bajo ángulo a las rocas huéspedes del yacimiento.

Las rocas huéspedes del yacimiento, con espesor aproximado de 230 m, comprenden mayoritariamente dacitas porfíricas, riolitas porfíricas o fluidales (bandas verdes y rosadas), brechas dacticas y riolíticas de características laháricas. Localmente, aparecen brechas hidrotermales cementadas por sulfuros y andesitas porfíricas. Los contactos entre los diferentes tipos litológicos, son muy difíciles de precisar debido a la irregularidad tanto en la extensión en el rumbo como en la

expresión lateral y en profundidad de los diferentes paquetes litológicos. En parte, esta situación puede explicarse por la acción de fallas de bajo ángulo que producen desplazamientos no identificados.

Las rocas huéspedes sobreyacen concordantemente a rocas andesíticas y dacíticas de color gris verdoso con abundante contenido de pirita, que hacia el oeste del yacimiento tienen color ocre - ocre verdoso, aparentemente debido a procesos supérgenos que alteraron la pirita original produciendo abundante jarosita. Estas últimas rocas que conforman el piso del yacimiento, alcanzan una potencia aproximada de 120 m y no tienen características petrográficas marcadamente diferentes a las rocas huéspedes.

En la parte más occidental y sur del rajo Lo Aguirre, aflora un paquete de tobas bien estratificadas y areniscas cuarzo feldespáticas, aparentemente pertenecientes a la Formación Lo Prado. Su relación de contacto con las rocas del piso de Lo Aguirre no es clara ya que estas rocas se pierden bajo el relleno del valle.

Todas las rocas dacíticas descritas, en especial las que contienen la mineralización, muestran un fuerte carácter alcalino al igual que las traquitas del yacimiento El Soldado, con altos contenidos de K_2O que alcanzan a 10% (Tabla 1), lo cual no se advierte claramente en la mineralogía que se determina al microscopio.

ROCAS INTRUSIVAS

Los cuerpos intrusivos en el yacimiento corresponden a un apófisis diorítico ubicado en el extremo N-W, donde se ubican los cuerpos mineralizados Carretón-Carlos (Fig. 2) y a numerosos diques andesíticos, de hasta 8 m de potencia, direcciones entre NS y NE e inclinaciones subhorizontales a verticales que son pos- minerales y cortan toda la secuencia.

El stock diorítico que controla la ubicación de la mineralización en los sectores Carlos, San Antonio y Carretón, corresponde a un cuerpo cilíndrico elongado en dirección WSW de al menos 1,2 km de largo.

TABLA 1. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS DIVERSAS LITOLOGÍAS EN EL DISTRITO LO AGUIRRE.

Muestra	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	LOI	Unidad (**)
13622	4,36	3,19	17,6	50,2	0,32	5,01	3,49	0,92	0,309	7,9	5,1	Ocoita.
13609	3,57	4,43	17,5	49,6	0,21	7,61	0,62	0,82	0,448	10,8	3,6	Arenisca.
13610	3,08	6,36	16,9	49,4	0,09	6,58	3,29	0,65	0,146	8,6	4	Andesita.
13607	0,62	0,22	19,1	61,2	0,18	10,88	0,23	0,55	0,034	4	1,9	Dacita.
13581	2,89	0,18	17,9	59,4	0,2	8,54	0,25	0,6	0,052	5,2	2,1	Dacita.
13562	3,07	4,67	14,1	50,3	0,17	3,69	4,82	0,75	0,207	8,9	6,9	Andesita silicica
13589	3,15	6,5	16,2	47,3	0,12	3,76	3,86	0,8	0,093	10,1	6,5	Andesita pyrox
13593	2,68	6,1	18,4	49,1	0,09	3,73	4,58	0,76	0,235	8,1	5,2	Andesita alterada
13611	2,6	1,71	16,5	60,9	0,15	6,2	0,3	0,57	0,031	3,2	3,7	Dacita alterada
13552	3,14	1,47	15,7	66	0,05	4,19	0,14	0,5	0,022	3,4	3,2	Brecha dacitica
13587	1,68	2,14	18,6	62,3	0,12	4,71	0,34	0,56	0,017	4,3	3,5	Dacita
13554	7,59	2,35	16,8	51,6	0,07	0,85	0,09	0,83	0,115	9,1	8,8	Andesita brechosa
13570	3,72	3,94	17,1	55,7	0,15	3,62	0,42	0,76	0,077	7,8	4,5	Andesita
13555	2,65	5,06	19,8	47	0,16	3,82	0,52	0,96	0,094	11	7,8	Toba
13575	4,16	4,26	14,8	61,1	0,22	0,22	0,33	0,71	0,043	9,3	3,6	Toba
13574	6,26	4,69	19,5	52,9	0,27	0,21	0,33	0,95	0,093	11,4	3,1	Dacita alterada
13572	3,17	2,66	21,8	49,7	0,14	1,55	0,5	0,96	0,042	10	8,6	Andesita lixiviada
13569	3,53	4,86	15,5	54,1	0,16	2,58	0,3	0,8	0,084	9,7	5,5	Arenisca
13586	1,29	8,72	15,1	50,2	0,03	1,28	6,45	0,75	0,011	8,1	7,9	Dique
N2-41	3,8	1,85	16,8	60,9	0,26	5,5	0,43	0,83	0,04	4,63	2	Riolita
N2-67	3,65	1,3	14,9	64,9	0,25	2,45	0,29	0,57	0,07	4,9	4	Riolita
TA-55	3,5	1,05	12,5	69,1	0,25	4,45	0,88	0,59	0,04	2,58	1,5	Dacita
N1-70	2,4	0,88	11	71,3	0,18	4,5	1,27	0,38	0,04	2,94	1,9	Riolita
N1-49	2,53	1,65	14	65,5	0,24	4,3	0,44	0,55	0,04	5,1	1,6	Dacita

**Pérdida por ignición. Los análisis fueron hechos en el Laboratorio de Geocronología de Sernageomin.

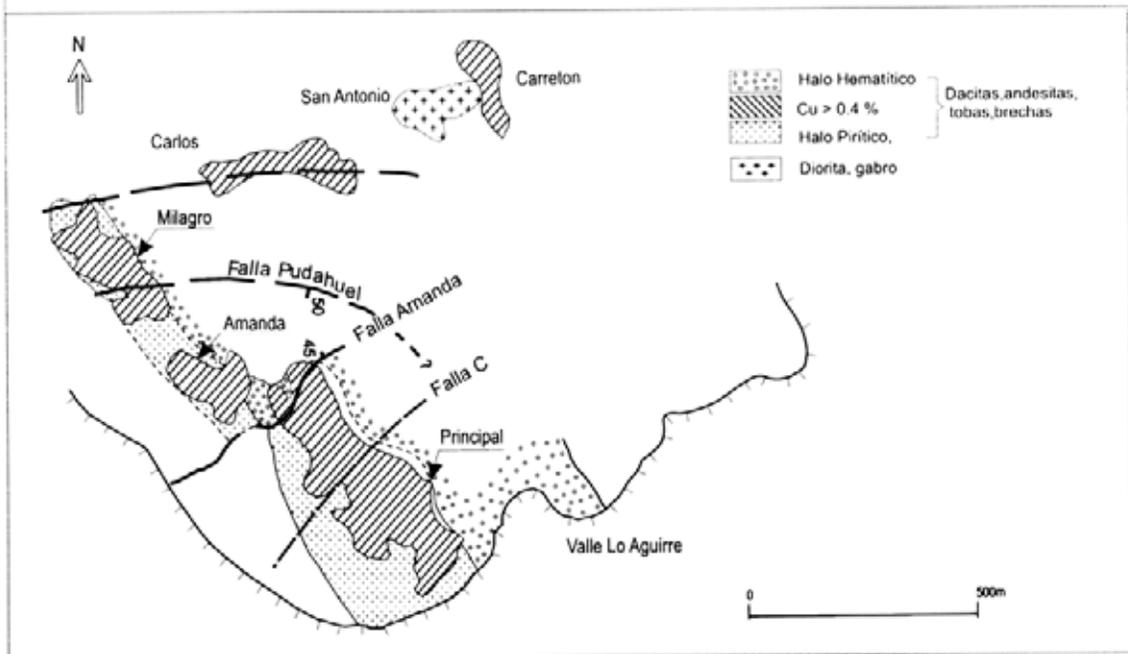


Fig. 2. Geología esquemática del yacimiento Lo Aguirre.

ESTRUCTURAS

En el yacimiento Lo Aguirre existen pocas evidencias claras de estratificación y en aquellos lugares donde se puede apreciar la disposición general de las capas es N10°-20°W con inclinación 70° al este.

Las principales estructuras reconocidas corresponden a fracturas, fallas, diaclasas y diques.

La expresión en terreno de las estructuras no es clara, ya que éstas no tienen mayor continuidad y desarrollo, tanto vertical como horizontal. En todo caso se ha distinguido tres grandes fallas a las que se le asocian fallas y fracturas menores, representando en conjunto un sistema estructural. La importancia de estas estructuras radica en que son indicativas de un cierto control de la mineralización, condicionando la forma y continuidad de los diferentes cuerpos mineralizados al producir segmentaciones, corrimientos y desplazamientos.

Sistema Pudahuel: corresponde a un grupo de fallas discontinuas y anastomósicas, que al interconectarse generan codos dilatacionales, rellenos por material brechoso y con abundantes estrias en los planos de falla. La estructura principal es la falla Pudahuel que tiene un rumbo variable N45°W a EW e inclinación de 45°-60° al SW-S, con una potencia de las zona de falla inferior al metro y una corrida aproximada de 1.000 m (Fig. 2). Su importancia radica en que interrumpe la continuación del cuerpo Principal al norte, poniéndolo en contacto con andesitas rojas del techo del yacimiento. Esta estructura ha sido interpretada de carácter inicial extensional (normal) que habría sido reactivada de modo inverso, produciendo el eventual desplazamiento final del cuerpo mineralizado a una mayor profundidad.

Sistema Amanda: representado por la falla Amanda, de dirección NS a NNE e inclinación variable entre 20 y 40° al oeste (Fig. 2). Presenta un relleno de salbanda ocre acompañado de limonitas, que en general no supera los 20 cm de potencia, salvo en algunos sectores donde alcanza hasta 1 m con relleno brechoso muy arcilloso y forma lenticular. Pone en contacto andesitas rojas del techo con las rocas mineralizadas y produce el desmembramiento del cuerpo Amanda desplazándolo al oeste en 200 metros. Esta falla sugiere un evento de acomodación o de colapso local, producto del emplazamiento de la Falla Pudahuel (J. Skármeta, comunicación escrita, 1989).

Sistema 'C': representado por la 'Falla C' que corta transversalmente toda la secuencia según una dirección N40°E, cambiando el rumbo del yacimiento a ambos lados de ella. Es subvertical, con potencia variable entre 0,3 y 1 m, con relleno de cuarzo, calcita, salbanda y material brechoso. El sistema muestra diaclasas dilatacionales regularmente espaciadas a ambos lados de las fallas.

Estudios aeromagnéticos y de gravimetría terrestre han mostrado en alrededores y al sur del cuerpo Lo Aguirre, en el valle bajo la cubierta de relleno, la existencia de lineamientos que posiblemente correspondan a un conjunto de fallas de rumbo preferencial EW-ENE y NS, todas concordantes con los sistemas estructurales definidos en el área.

ALTERACIÓN

En el distrito la secuencia volcánico-sedimentaria sufrió un proceso de alteración producto de un fenómeno de metamorfismo de carga de bajo grado (Levi *et al.*, 1968, 1982), caracterizado por las facies de esquistos verdes con la asociación de minerales albita-epidota-actinolita-esfeno-calcita-clorita-cuarzo y la facies de prehnita-pumpellita con la asociación albita-adularia-prehnita-pumpellita-calcita-clorita-epidota-cuarzo-muscovita.

El yacimiento se caracteriza por una alteración hidrotermal de intensidad baja a moderada, la que ha borrado y destruido parcialmente las texturas originales de las rocas y obliterado los minerales más característicos del metamorfismo de carga. Los minerales de alteración más comunes son: cuarzo, clorita, calcita, sericita, arcillas y albita, que alteran tanto fenocristales como masa fundamental, matriz y clastos. Estos minerales sugieren aportes de Na, Ca, Mg y CO₂.

La distribución de los productos de alteración esta relacionada directamente con el tipo de rocas afectadas, su ubicación dentro de la secuencia y el grado de mineralización:

Cuarzo-calcita-clorita. Esta asociación se presenta en las unidades de rocas que conforman el pendiente o techo del yacimiento: andesitas gris verdosas, andesitas de transición y andesitas rojas.

El cuarzo y la calcita se presentan en guías y vetillas, asociadas a fracturas y estructuras sigmoidales. La clorita aparece en forma maciza o diseminada afectando la masa fundamental, matriz y fenocristales. Los minerales de arcilla son menos

frecuentes y se encuentran alterando fenocristales de plagioclasas y como pátinas en zonas de fractura. Albita y sericita reemplazan levemente las plagioclasas.

Una característica de las porción superior de la secuencia de Lo Aguirre, es la presencia de especularita finamente diseminada, presentando un incremento de su abundancia relativa desde las andesitas gris verdosas hacia las andesitas rojas.

Cuarzo -albita-sericita. Esta asociación caracteriza a las rocas huéspedes de la mineralización en Lo Aguirre, que en general, presentan colores claros entre gris y verde, a lo que se añade una fuerte coloración rosada de distribución irregular en el cuerpo mineralizado.

El cuarzo se presenta en guías, vetillas, amígdalas o como agregados que constituyen craquelados y conforman pseudobrechas. Es común la presencia de sericita y minerales de arcilla que alteran los fenocristales de plagioclasas y la masa fundamental. Las plagioclasas se encuentran albitizadas. En los niveles inferiores donde hay fuerte mineralización de sulfuros de cobre, es común la presencia de calcita en guías y vetillas de cuarzo. La clorita es escasa a moderada, constituye pseudomorfos de máficos y altera la masa fundamental. En estos niveles, se desarrolla una fuerte coloración rosada, producto de una intensa albitización acompañada por cuarzo, sericita y calcita en vetillas y guías, que afecta a las dacitas, riolitas y brechas, presentando bandeamientos y/o fluidez, sin una orientación definida, que se alternan en muchos casos con bandas verdosas de clorita.

En zonas aún más profundas, bajo el cuerpo mineralizado principal y bajo la Falla Pudahuel, se desarrolla una faja caracterizada por una alteración sericítica que afecta a rocas dacíticas. Esta alteración parece corresponder a una etapa tardía, con circulación de fluidos más ácidos y con una componente importante de aguas meteóricas (R.H. Sillitoe, comunicación escrita, 1989).

Clorita-minerales de arcilla. Esta asociación es típica de las rocas del piso del yacimiento y en ella la clorita y minerales de arcilla afectan tanto a los feldespatos como a la masa fundamental. Estos minerales de alteración están generalmente acompañados por piritita diseminada y en guías, que en algunas partes ha pasado a limonita resultado de la alteración supérgena asociada a los procesos de oxidación del yacimiento, produciendo característicos colores ocre-blanquecinos. En las rocas se han

borrado las texturas originales, siendo común la presencia de cuarzo en guías y amígdalas, y sericita alterando plagioclasas y masa fundamental; en las zonas más frescas se observa sericita y piritita finamente diseminada.

MINERALIZACIÓN

La mineralización se emplaza a lo largo de una faja de aproximadamente 2 km, dispuesta según una dirección de NNW-NW, coincidente con la estratigrafía regional lo que define a Lo Aguirre como 'yacimiento estratoligado'.

La mineralización está controlada por la litología, ya que ésta se emplaza básicamente en las dacitas, riolitas y brechas y en menor cantidad en las andesitas, indicando una permeabilidad y porosidad favorable para la deposición de las soluciones mineralizadoras, la cual podría ser secundaria, inducida por el fracturamiento de estas rocas de comportamiento más frágil y quebradizo que el de las andesitas. Los intrusivos son generalmente estériles sugiriendo que son posminerales o que representaron una barrera a la mineralización.

Los cuerpos mineralizados se ubican en el contacto con las rocas hematizadas, conformándose entre ellos una zona de frente redox que se extiende por aproximadamente 4 km, distinguiéndose un halo hematítico y otro pirítico coincidentes con el rumbo de los estratos que los contiene (Fig. 2). La tectónica post-mineralización es causante de una segmentación del depósito en varios cuerpos desmembrados con desplazamiento sinistral al oeste: Principal, Poderoso, Amanda y Milagro, los cuales tienen dimensiones variables entre 170 y 600 m de longitud, 40-200 m de ancho y 50-200 m de profundidad. Hacia la periferia y como cuerpos satélites se ubican los cuerpos menores: Carlos, San Antonio y Carretón (Figs. 2 y 3) controlados aparentemente por el emplazamiento de un stock diorítico.

El cuerpo Principal de Lo Aguirre tiene dirección norte-oeste e inclinación de 70° al este, conformando un cuerpo de forma tabular prismática que alcanza 600 m de longitud, ancho variable de 100 a 200 m y una profundidad de hasta 200 m en las zonas de mayor desarrollo (Fig. 3). Hacia el norte, se interna en el cerro quedando cubierto por ca. 80 m de estéril, mientras que la parte sur aflora en superficie. Se han detectado evidencias de mineralización continuando hacia al sur bajo el relleno del valle.

Los minerales primarios sufrieron procesos de

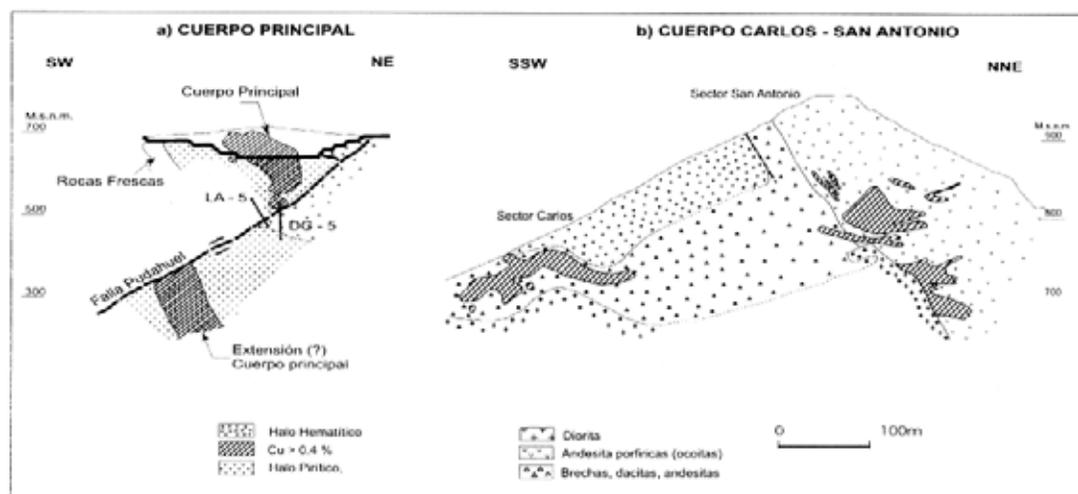


FIG. 3. Secciones transversales esquemáticas del yacimiento Lo Aguirre.

oxidación prácticamente *in situ*, conformándose una zona de óxidos cercana a la superficie, una zona intermedia con mena mixta (óxidos-sulfuros hipógenos) y una zona inferior con sulfuros hipógenos. Al escaso contenido de pirita se le atribuye que no se hubiese desarrollado una zona de enriquecimiento secundario de sulfuros. Los contactos entre los diferentes tipos de mena son horizontales a subhorizontales y subparalelos a la topografía actual.

La zona de óxidos alcanza un desarrollo vertical promedio de 50 m y está constituida principalmente por malaquita (80%) y crisocola (20%), con cantidades subordinadas de cuprita y azurita. Las especies oxidadas se presentan en fracturas, guías, relleno de vesículas e impregnando o reemplazando los feldespatos alterados de las rocas.

Entre la zona de sulfuros y óxidos se desarrolla una zona intermedia de mineral mixto con un espesor medio vertical de 60 m.

La mena hipógena corresponde a bornita-calcosina-calcopirita, y escasa covelina-digenita, acompañados de trazas de pirita y hematita. La zona de sulfuros hipógenos alcanza un espesor medio de 60 m y en ella se ha observado una distribución zonada en la vertical y horizontal con predominio de minerales más ricos en cobre en la parte superior o central del cuerpo: calcosina-bornita, bornita-calcopirita, gradando hacia los márgenes y en profundidad a sulfuros más ricos en hierro: pirita-calcopirita y pirita. Una zonación similar se ha

descrito para el yacimiento El Soldado (Ruge, 1985; Holgrem y González, 1988; Boric *et al.*, 2002). Aparte de cobre, el yacimiento no contiene otro elemento de interés económico, los contenidos de plata son inferiores a 5 ppm en promedio, lo cual también es característico de estos yacimientos.

La cantidad relativa de los principales minerales de mena es aproximadamente: 40% calcosina, 45% bornita y 15% calcopirita. Las asociaciones de minerales opacos más comunes son bornita-calcosina (digenita)-hematita y calcopirita-bornita-calcosina-hematita, minoritariamente pirita-calcopirita-hematita, relacionadas principalmente a una ganga de cuarzo y calcita y, en menor cantidad, a clorita-sericita-minerales de arcilla y albita.

El piso del yacimiento lo constituye un halo pirítico, el cual en la zona oxidada tiene abundante jarosita supérgena y kaolinita. La zona pirítica basal ha sido reconocida extendiéndose bajo el relleno del valle, indicando que el entorno favorable para la mineralización se extiende en esa dirección. En esta parte, las muestras de sondajes son notablemente más ricas en magnetita diseminada que las rocas del cuerpo principal, lo cual es interpretado como una menor oxidación supérgena de la roca basal bajo las gravas aluviales comparada con los cuerpos mineralizados, resultando en una martitización menos avanzada de la magnetita hipógena.

La secuencia paragenética general para la mineralización de sulfuros es: pirita - calcopirita - bornita-calcosina-covelina-calcosina de segunda

generación (digenita)-hematita-óxidos de cobre (F. Henríquez, comunicación escrita, 1986).

Los sulfuros se presentan en forma disseminada con tamaños entre 40 y 300 micrones, relleno de vesículas en la parte alta de los flujos de lava y matriz de cuerpos de brechas, en guías de 0,5 a 2 mm y en vetillas de 0,01-0,2 mm, que cortan fenocristales, masa fundamental, matriz, clastos y líneas de fluidez, indicando claramente ser posterior a cualquier tipo litológico que los contenga. Lo anterior, sumado a la existencia de cristales de

anfíboles y piroxenos, totalmente reemplazados a través de sus clivajes por bornita-calcosina-hematita indicaría que el evento de mineralización es epigenético.

No existe un control estructural evidente de los procesos de mineralización y todas las grandes fallas han sido interpretadas como eventos post mineralización. Sin embargo, es posible reconocer que los movimientos post mineral pueden haber borrado las evidencias de fallamiento premineral.

ORIGEN DE LA MINERALIZACION

ANTECEDENTES DE INCLUSIONES FLUIDAS, ISÓTOPOS DE S Y GEOCRONOLOGÍA

INCLUSIONES FLUIDAS

En nueve muestras correspondientes a la zona de sulfuros del cuerpo Principal (A. Skewes, comunicación escrita, 1987) realizó 190 medidas de termometría a inclusiones fluidas contenidas en cristales de cuarzo y calcita, cogenéticos a la mena de cobre. Las inclusiones son en su mayoría de origen primario, cogenéticas con el cristal que las hospeda y de tamaño promedio entre 8 y 12 micrones.

Las inclusiones se dividen en dos grupos, que coexisten en una misma muestra: unas de composición compleja del sistema $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, con bajo punto de fusión inicial (-32°C a -61°C) y salinidad variable entre 3 y 25% en peso equivalente de NaCl, y otras de composición más simple del sistema $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, con alto punto de fusión inicial (-21°C) y salinidad variable entre 1,5 y 34%. La gran variación en el rango de salinidad total de ambos tipos de inclusiones ha sido interpretado como una posible mezcla de fluidos diferentes, mecanismo que sería responsable de la deposición de la mena. Las fases más comunes en ambos tipos de inclusiones son predominantemente líquido y vapor con volumen inferior al 20% de la inclusión. Sólo se detectó un cristal de halita lo cual estaría indicando soluciones no saturadas con respecto a CaCl_2 ó NaCl. Las temperaturas de homogenización varían entre 140 y 240°C , representando la temperatura mínima de atrapamiento. No se detectaron evidencias de ebullición en ninguna de las inclusiones.

Estos resultados son similares a muestras del yacimiento El Soldado, al cual se le asigna una génesis epigenética hidrotermal relacionada a la etapa terminal de la actividad volcánica asociada a la fase de decaimiento del magmatismo Neocomiano (Holmgren, 1987; Boric *et al.*, 2002). Sin embargo, la similitud de las inclusiones con aquellas descritas por Crawford *et al.* (1979), para una secuencia de rocas metamórficas que evidencian metamorfismo retrogrado y el marco geológico del yacimiento Lo Aguirre en un área bien documentada de metamorfismo de carga, lleva a A. Skewes, comunicación escrita, 1987, a sugerir un origen metamórfico para los fluidos mineralizantes.

ISÓTOPOS ESTABLES DE AZUFRE

En cuatro muestras representativas de las zonas mineralizadas sulfuradas correspondientes a las asociaciones mineralógicas bornita-calcosina, bornita-calcopirita y calcopirita-pirita, se obtuvieron valores $\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}}$ de + 0,5, + 1,4, -0,7, -3,6. Estos resultados con razones isotópicas próximas a 'cero', son comparables a los obtenidos en otros yacimientos estratoligados como Michilla, Mantos Blancos y El Soldado, que muestran variaciones entre -5,2 y $+2,1\text{‰}$ $\delta^{34}\text{S}$ (Sasaki *et al.*, 1984; Munizaga y Zentilli, 1994). Estos valores sugieren un origen magmático primario del azufre.

Dada la estrecha relación con las rocas volcánicas, Munizaga y Zentilli (1994) interpretaron estos resultados como relacionados al magmatismo que da origen a esas rocas, siendo el S de origen magmático, ya sea por lixiviación del azufre de las rocas volcánicas o proveniente de soluciones

hidrotermales de origen magmático, que actuaron como sistemas cerrados, donde los sulfuros precipitan de soluciones de circulación relativamente profunda, a mayor temperatura y principalmente en forma inorgánica.

GEOCRONOLOGÍA

Dataciones radiométricas utilizando el método Rb/Sr en roca total de muestras del cuerpo Principal con alteración penetrativa, dan una isócrona de 113 ± 3 Ma (Munizaga *et al.*, 1988). Las muestras analizadas son representativas del techo (andesitas rojas), piso (andesitas verdes) y rocas huéspedes (dacitas), todas ellas con alteración hidrotermal penetrativa y caracterizada por calcificación, silicificación y silicificación-arcillización. Los valores tienen una distribución lineal indicando que los productos de alteración hidrotermal, en un contexto general, son sincrónicos a pesar que las relaciones texturales indican eventos diferentes. Una muestra de andesita, con alteración regional, correspondiente a la parte alta del Miembro Purehue de la Formación Veta Negra arrojó una edad de 110 ± 4 Ma por el método K-Ar, valor semejante al resultante por el método Rb/Sr, lo que indicaría que la alteración regional es parcialmente sincrónica a la alteración hidrotermal.

Los valores obtenidos son compatibles con las edades asignadas a las formaciones Lo Prado (Neocomiano) y Veta Negra (Aptiano-Albiano). La isócrona representaría, entonces, el término del volcanismo y significa que la actividad hidrotermal

se produjo hacia el final del ciclo volcánico. Adicionalmente, el intrusivo que aflora en Cuesta Barriga arroja una edad de 105 a 106 Ma por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Munizaga *et al.*, 1988).

Es interesante notar que en el yacimiento El Soldado se obtuvo una isócrona que dio un valor de 109 ± 4 Ma, concordante con el obtenido para Lo Aguirre, lo cual indicaría que el fenómeno que produjo la rehomogenización isotópica se habría producido casi simultáneamente en ambos yacimientos (Munizaga *et al.*, 1988).

Dataciones posteriores $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para ambos yacimientos dan edades similares aunque más jóvenes. Para la mina El Soldado se considera una edad de 103 ± 2 Ma como la edad de la mineralización (Boric *et al.*, 2002) y se concluye que ésta se emplazó 20 Ma después de la deposición de las rocas, coincidiendo, en general, con el emplazamiento del batolito cretácico y el metamorfismo regional. En Lo Aguirre arrojan una edad de 102 ± 5 Ma para albita de rocas mineralizadas que indican que ésta es la edad más probable de la mineralización (Maksaev y Zentilli, 2002).

Las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciales obtenidas a partir de la isócronas que datan la alteración hidrotermal, dan valores de 0,7047 lo que sugiere que los fluidos mineralizados habrían tenido un importante componente magmático. Además, estos valores sugieren la participación de materia cortical y demostraría que no hubo participación importante de agua de mar en estos yacimientos, ya que el valor para ésta en el Cretácico Inferior se estima en 0,7073 (Burke *et al.*, 1982).

DISCUSIÓN

El origen de los yacimientos estratoligados es aún bastante controversial, aunque hoy existe consenso que son de origen epigénético y no singenético como se postuló anteriormente (Ruiz *et al.*, 1965). Para explicar la fuente de las soluciones se dan en general dos variantes, por un lado un origen profundo relacionado a una fuente magmática que aportaría la totalidad de los metales (Holgrem, 1987; Vivallo y Henríquez, 1998) y que se habrían depositado, además de los mecanismos normales, como

enfriamiento y cambio de pH, por reacción con materia orgánica y pirita (Wilson y Zentilli, 1999; Boric *et al.*, 2002) o mezclados y enfriado por aguas meteóricas (Maksaev y Zentilli (2002), y otra donde las soluciones son producto de la removilización de rocas adyacentes, transportando y depositando los metales en zonas favorables, todo ello accionado por una fuente caliente de origen magmático (Sato, 1984; G. Westra¹ y Losert, 1973).

¹ 1988. La importancia del metamorfismo de carga en la formación de yacimientos de cobre tipo manto: Keynote Address (Inédito).

En Lo Aguirre los tres cuerpos mineralizados mayores: Principal, Amanda y Milagro, se inclinan suavemente hacia el sur, sugiriendo que los fluidos mineralizantes siguieron un gradiente paleohidrologico de sur a norte. Los núcleos de alta ley, calcosina-bornita, definen el foco del flujo de fluidos cargados con cobre que habrían ascendido a través de la falla Pudahuel durante el movimiento normal y precipitado cobre donde la falla cruza un frente pre-existente (estratigráfico) de redox. Estas zonas (Fig. 4) representarían un conducto o paleoconal de primer orden (R.H. Sillitoe, comunicación escrita, 1987).

Los cuerpos están asociados espacialmente con lentes de brecha lahárica que muestra una característica alteración rosada de feldespato alcalino (-clorita). Estas brechas son interpretadas como conductos de primer orden en el tiempo de la mineralización que proporcionaron la principal permeabilidad primaria en la pila volcano-sedimentaria.

Los cuerpos cupríferos se ubican en los márgenes de una zona de hematización groseramente paralela al rumbo de las rocas volcánicas y sedimentarias, a pesar de ser transgresiva localmente. Esto implica que a lo largo de la zona principal de cuerpos mineralizados se desarrolla un frente de redox que separa volcánicos andesíticos hematíticos y volcánicoclásticos del techo de las rocas mineralizadas incluído el paleoconal en el piso. Los cuerpos

están en la proximidad del frente pero separados por una angosta franja de rocas pobres en sulfuros. La expresión superficial más ancha (600 m) de esta zona hematítica parece coincidir con el principal desarrollo de mineralización de cobre, tanto hacia el noroeste como hacia el sureste ella se angosta y se reduce la presencia de cuerpos mineralizados mayores.

En contraste en los sectores Carretón, San Antonio y Milagro que son cuerpos menores, fluidos similares habrían ascendido a lo largo del contacto del stock microdiorítico, precipitando el cobre en frente redox generado por la intrusión y por consiguiente en disposición paralela al stock mismo. La zona hematizada se interpreta como una adición de hierro por parte de los fluidos que dieron origen a la mineralización (hematización intensa), mientras que la hematización débil representaría el estado original de oxidación de las rocas. Tanto San Antonio como Carretón no tienen desarrollo apreciable de un halo pirítico y techo hematítico, la alteración cuarzo-feldespato alcalino es más débil que en la zona principal y en estos cuerpos la epidota acompaña a los sulfuros de cobre. La mineralización ocurre en paleoconductos de segundo orden relacionados a los de primer orden en profundidad, lo que explicaría el menor tamaño de los cuerpos.

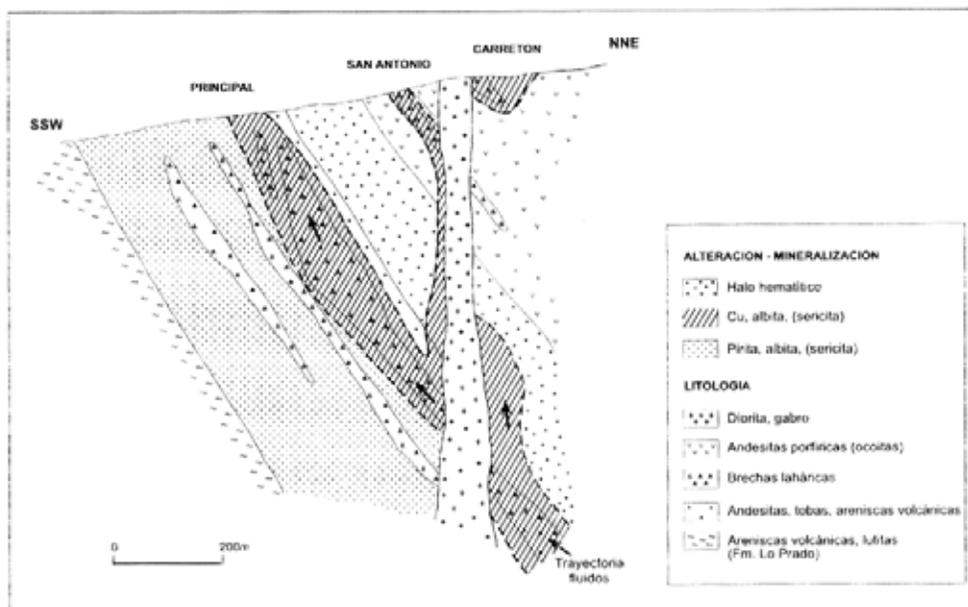


FIG. 4. Modelo de mineralización Lo Aguirre.

En el sector Carlos se presenta una brecha mineralizada semejante a las anteriores. Sin embargo, en este caso, su geometría sugiere un origen hidrotermal pues se localiza inmediatamente sobre la intrusión diorítica y parece cortar la zona hematítica, abriendo así la posibilidad que otras brechas interpretadas como laháricas sean efectivamente de origen hidrotermal producto de la liberación de sobrepresión de los fluidos (R.H. Sillitoe, comunicación escrita, 1990).

Sin bien los sitios favorables en los cuales se depositó la mineralización cuprífera y los conductos por los cuales ascendieron los fluidos hidrotermales parecen estar claros, no sucede igual cosa con el origen de los fluidos mineralizantes.

Los resultados geocronológicos son de gran importancia para ayudar a definir los mecanismos posibles. Munizaga *et al.* (1988) sugirieron que existía un período muy corto entre la extrusión de las rocas volcánicas, el metamorfismo de carga, la intrusión y mineralización.; sin embargo, hoy es claro que hay una separación importante entre estos eventos y que la mineralización es definitivamente posterior a la deposición de las rocas encajantes y, en general, contemporánea con los intrusivos y con el metamorfismo de carga (Boric *et al.*, 2002). La interpretación de Sato (1984) y G. Westra¹, para el origen de este tipo de depósitos, metamórfico diagenético relacionado con la liberación de fluidos y lixiviación del Cu de la pila volcánica producto del enterramiento y su redepósición en niveles más favorables, es atrayente pero en el caso de Lo Aguirre las características sugieren definitivamente un origen hidrotermal.

Los resultados de los estudios de inclusiones fluidas y de isótopos de S, son compatibles con el origen hidrotermal epigenético de la mineralización y con la procedencia del S, ya sea magmática o de lixiviación de las rocas volcánicas. El metasomatismo alcalino y mineralización pueden ser, efectivamente, consecuencia de fases residuales alcalinas de los mismos magmas de los que se originaron (Oyarzún, 1987).

Coincidiendo con Vivallo y Henríquez (1998) y con MaksaeV y Zentilli (2002), se estima que las soluciones hidrotermales están dominadas por un componente magmático de origen en material derivado del manto, las que interactuaron con aguas meteóricas equilibradas isotópicamente con rocas de la corteza. La alta salinidad de los fluidos mineralizantes y los datos de isótopos de S son consistentes con un origen de los sulfuros de Cu relacionado a magmatismo ácido relativamente profundo.

La ocurrencia de calcita sugiere que la caída de temperatura, uno de los más importantes mecanismos de precipitación en muchos depósitos de sulfuros hidrotermales, no jugó un papel importante. Similarmente, la ausencia de una alteración distintiva de la roca de caja, elimina el cambio de pH como una causa mayor de la precipitación de sulfuros. La presencia de albita o feldespato potásico entre los minerales de los halos de alteración sugieren que el pH de las soluciones fue cercano a neutro, o bien, ligeramente alcalino.

Por otro lado, la desaparición de epidota y aumento de calcita y hematita hacia la zona mineralizada sugieren que los cambios de presión (especialmente pCO_2) y/o fugacidad de oxígeno pueden haber jugado un rol importante en la precipitación de la mineralización. En Lo Aguirre, no se ha descrito la presencia de bitumen asociado con la mena como en El Soldado (Wilson *et al.*, 1999) por lo que no se puede invocar para la precipitación de los sulfuros.

Últimamente, se ha asociado este tipo de yacimientos a los denominados óxidos de Fe-Cu-Au, que tienen como principales exponentes a Candelaria y Olympic Dam (Haynes, 2000; Davidson 2002). Sin embargo, las características principales de esos yacimientos, sus variaciones y modelo genético son muy discutibles, por lo que esta asociación parece, al menos por ahora, prematura. Cabe mencionar que Lo Aguirre no contiene como mineralización principal Fe ni Au, siendo, en consecuencia, más las diferencias que las similitudes.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo está dedicado a la memoria de R.M. Haldeman¹, gran impulsor en la aplicación de las ciencias a la minería chilena. Su visión, conocimiento y dedicación benefició a todos los que tuvieron la suerte de laborar a su alero y en especial al grupo minero Pudahuel (SMP). Los comentarios de los revisores F. Henríquez (Universidad de Santiago de Chile), V. Maksaev (Universidad de Chile) y

R.H. Sillitoe fueron de gran utilidad para mejorar sustancialmente este artículo.

Numerosos profesionales contribuyeron a través del tiempo a dilucidar la historia geológica y a optimizar los recursos explotables de Lo Aguirre, ellos pueden considerarse legítimamente participantes de este artículo, aunque los errores sean sólo responsabilidad de quienes aparecen como autores.

REFERENCIAS

- Boric, R.; Holmgren, C.; Wilson, N.S.F.; Zentilli, M. 2002. The Geology of El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. In Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and related deposits: a global perspective (Porter, T.M.; editor). *PGC Publishing*, Vol. 2, p. 163-184. Adelaide.
- Burke, W.E.; Deninson, R.E.; Hetherington, E.A.; Koepnick, R.B.; Nelson, N.F.; Otto, J.B. 1982. Variations of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr throughout Phanerozoic time. *Geology*, Vol. 10, p. 516-519.
- Crawford, M.L.; Filer, J.; Wood, C. 1979. Saline fluid inclusions associated with retrograde metamorphism. *Société Française de Minéralogie et Crystallographie, Bulletin*, Vol. 102, No. 5-6, p. 562-568.
- Davidson, G.J. 2002. The shallow to mid-crustal family of iron oxide copper-gold deposits: size, alteration and mechanism of formation. In Giant Ore Deposits. Codes (Cooke, D.; Pongrats, J.; editors). *Codes*, Special Publication, No. 4, p. 79-102.
- Gana, P.; Selles, D.; Wall, R. 1999. Area Tiltit-Santiago, Región Metropolitana. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos*, No. 11.
- Haynes, D.W. 2000. Iron Oxide Copper (Gold) Deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. In Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits. a global perspective (Porter, T.M.; editor). *Australian Mineral Foundation*, p. 71-90.
- Holmgren, C. 1987. Antecedentes para un modelo genético del yacimiento El Soldado, V Región de Valparaíso. *Revista Geológica de Chile*, No. 30, p. 3-18.
- Holmgren C.; González, F. 1988. Zonación Mineralógico-Metalúrgica del Yacimiento El Soldado, V Región. In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 3, G147-G160. Santiago.
- Levi, B. 1968. Cretaceous Volcanic Rocks from a part of the Coast Range West from Santiago, Chile. A study in lithologic variation and burial metamorphism in the Andean Geosyncline. Ph.D. Thesis (Unpublished), *University of California*, 113 p. Berkeley.
- Levi, B.; Aguirre, L.; Nyström, J.O. 1982. Metamorphic gradients in Burial Metamorphosed Vesicular Lavas: Comparison of Basalt and Spillite in Cretaceous Basic Flows from Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 80, p. 49-58.
- Losert, J. 1973. Genesis of copper mineralization and associated alterations in the Jurassic volcanic rocks of Buena Esperanza mining area. *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, Publicación No. 40, 104 p.
- Maksaev, V.; Zentilli, M. 2002. Chilean strata bound Cu (Ag) Deposits. An overview. In Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and related deposits. A global perspective (Porter, T.M.; editor). *PGC Publishing*, Vol. 2, p. 163-184. Adelaide.
- Munizaga, F.; Holmgren, C.; Huete, C.; Kawashita, K. 1988. Geocronología de los yacimientos de cobre El Soldado y Lo Aguirre, Chile Central. In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 3, G177-G193. Santiago.
- Munizaga, F.; Zentilli, M. 1994. Caracterización Isotópica del Azufre de los Depósitos Estratoligados de Cu en Chile. *Comunicaciones*, No. 45, p. 127-134.
- Oyarzún, J. 1987. Rocas Alcalinas, Alcanilización y Metalogénesis en Formaciones Cretácicas de Chile Nord-Central. In *Congreso Peruano de Geología, No. 6*, p. 18-22. Lima.
- Ruge, H. 1985. Geología y Mineralización del Yacimiento de Cobre El Soldado, V Región, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas*, Vol. 4, p. 854-872. Antofagasta.
- Ruiz, C.; Aguilar, A.; Egert, E.; Espinosa, W.; Peebles, F.; Quezada, R.; Serrano, M. 1971. Strata-Bound Copper Sulphide Deposits of Chile. *Society of Mining Geology of Japan, Special Issue*, No. 3, p. 252-260.
- Sasaki, A.; Ulriksen, C.; Sato, K.; Ishihara, S. 1984. Sulfur Isotope Reconnaissance of porphyry Copper and Manto-Type Deposits in Chile and the Philippines. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, Vol. 35, p. 615-622.

- Sato, T. 1984. Manto-Type Copper Deposits in Chile; a review. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, Vol. 35, No. 11, p. 565-582.
- Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 2, 86 p. Santiago.
- Vivallo, W.; Henríquez, F. 1998. Génesis común de los

- yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, No. 2, p. 199-228.
- Wilson, N.S.; Zentilli, M. 1999. The role of organic matter in the Genesis of the El Soldado Volcanic-Hosted Manto-Type Cu Deposit Chile. *Economic Geology*, Vol. 94, p. 1115-1136.