

GENESIS DE LOS DEPOSITOS VETIFORMES METALIFEROS, HOJA CALDERA (27°00' - 27°30' S), III REGIÓN DE ATACAMA, CHILE*Jorge Benavides Rosero*

La vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, en el segmento comprendido entre 27°00' y 27°30'S (Hoja Caldera), está constituida por rocas plutónicas del Jurásico y Cretácico Inferior que intruyen rocas metamórficas del Paleozoico y Triásico. Los intrusivos forman parte del arco magmático del Jurásico-Cretácico y constituyen la roca de caja de yacimientos vetiformes de cuarzo-calcita-sulfuros (Au-Cu), hematita especular (Fe-Cu-Au) y magnetita (Fe). Desde el punto de vista metalogénico el área de estudio forma parte de la Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa.

Basado en la distribución de los distintos tipos de depósitos, el área de estudio puede ser dividida en dos sectores. El sector occidental contiene solamente depósitos del tipo cuarzo-calcita-sulfuros, mientras que el sector oriental está constituido por los tres tipos de depósitos anteriormente mencionados. Los halos de alteración hidrotermal en torno a las vetas son restringidos (< 2 m) y en la mayor parte de los depósitos están dominados por la presencia de sericita. La morfología de los depósitos denota un control estructural, a partir de estructuras generadas bajo condiciones frágiles (fallas y fracturas).

Edades K-Ar en sericita-muscovita de las zonas de alteración de los yacimientos indican una edad Jurásico Medio-Superior para los depósitos del sector occidental y Cretácico Inferior para los del dominio oriental. Los depósitos vetiformes de cuarzo-calcita-sulfuros del sector occidental, con edades comprendidas entre 160 y 172 Ma están alojados en plutones más antiguos (con unas edades mínimas de 188 y 186 Ma, en el caso de los

plutones Puerto Viejo-Caldera y Stock del Añañucal, respectivamente), sugiriendo la existencia de diferencias temporales mínimas entre 28 y 14 Ma. En el sector oriental la edad de los yacimientos es similar a la de los plutones que los hospedan.

Estudios de inclusiones fluidas permitieron definir el predominio de inclusiones bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S), con porcentajes de relleno de líquido superiores a 70%. Análisis microtermométricos de las inclusiones fluidas, permitieron definir condiciones de mineralización mesotermales, con fluidos de salinidad moderada a alta (30-40% NaCl equiv.), sin detectar evidencias de ebullición u otro proceso de inmiscibilidad, ya que no existen inclusiones ricas en vapor y en la mayoría de los casos, la temperatura de disolución de la halita es mayor que la temperatura de homogeneización de la fase de vapor. La alta salinidad de los fluidos sugiere un importante aporte de fluidos salinos de filiación magmática. Para el caso de las vetas de cuarzo-calcita±sulfuros se determinaron temperaturas de atrapamiento mínimas (sin corrección por presión), definidas a partir de las temperaturas de disolución de la halita entre 200 y 460°C (moda entre 200 y 240°C) y salinidad moderada a alta (distribuidas en dos grupos, entre 12 y 24% y entre 30 y 42% NaCl equiv.). Las inclusiones fluidas en las vetas de hematita especular presentan unas temperaturas de disolución de halita entre 190 y 394 °C, con salinidad moderada a alta (>30% NaCl equiv.). Inclusiones fluidas contenidas en fragmentos de cuarzo de una brecha hidrotermal de hematita presentan tempera-

turas mínimas de atrapamiento de entre 160 y 360°C (media de 211°C) y salinidad mayoritariamente moderada (entre 28,6 y 41% NaCl equiv.).

Los datos de inclusiones fluidas, observaciones en terreno y relaciones temporales entre las vetas y plutones, permiten definir que los cuerpos mineralizados en la zona de estudio son el producto de la evolución de fluidos hidrotermales de filiación magmática, sin evidencias de algún proceso de mezcla con fluidos externos. Los fluidos mineralizantes, muy probablemente, son el

producto de la evolución de soluciones exseltas durante los procesos de cristalización de los plutones emplazados a niveles corticales someros. Las edades reportadas sugieren que los procesos mineralizadores son eventos discretos en el tiempo, sin una distribución aleatoria y que guardan una estrecha relación con la actividad magmática del Jurásico Medio-Superior y Cretácico Inferior, respectivamente.

Prof. Guía: Waldo Vivallo

27.11.2000

LA SECUENCIA ESTRATIFICADA VALLE NEVADO DE LA FORMACIÓN FARELLONES (MIOCENO): QUÍMICA Y METAMORFISMO DE MUY BAJO GRADO

Julio Carrasco Muñoz

La Secuencia Estratificada Valle Nevado (SEVN), que corresponde a la Formación Farellones en su localidad tipo, aflora aproximadamente 25 km al este de Santiago, en la Cordillera de los Andes de Chile central. Es de edad miocena y tiene aproximadamente 2 km de espesor. La SEVN está compuesta por 4 unidades estratigráficas; de base a techo estas son: Unidad Cerro El Tollo (UCET; principalmente tobas riolíticas), Unidad Manzanito (UM; principalmente andesitas basálticas), Unidad Cerro La Parva (UCLP; principalmente andesitas basálticas y brechas) y Unidad Cerro Colorado (UCC; principalmente domos riolíticos). La UCET representaría al Miembro Inferior de la Formación Farellones, la UM al Miembro Medio y las unidades restantes representarían al Miembro Superior. Esta secuencia es similar a aquellas desarrolladas en zonas de Caldera. Las rocas de la SEVN son calcoalcalinas y se generaron por procesos de cristalización fraccionada en un ambiente de arco volcá-

nico desarrollado en una zona de subducción. Diferencias establecidas entre los patrones de tierras raras de las andesitas basálticas de la UM y la UCLP reflejarían variaciones del espesor cortical.

La SEVN ha sido afectada por un metamorfismo de muy bajo grado en facies ceolita, que se aprecia nitidamente en la Unidad Manzanito. Los principales minerales metamórficos que se desarrollan son ceolitas calco-sódicas a cálcicas y filosilicatos máficos. Este metamorfismo se caracteriza por su metaestabilidad, por una razón fluido/roca baja a nivel regional, aunque, localmente, en niveles permeables, la interacción fluido/roca es importante, y un gradiente térmico alto para un ambiente de arco magmático (150-175°C/km). Desde el techo a la base de la Unidad Manzanito, las ceolitas varían de heulandita-clinoptilolita (estelerita-estilbita) a mordenita y finalmente a laumontita. Esta distribución mineralógica representa un proceso de deshidratación progresiva, que está acompaña-

do por la transición desde techo a base, de saponita pura a filosilicatos máficos con mayores contenidos de capas de clorita. Este metamorfismo se habría generado a partir de la acumulación de una potente secuencia volcánica en una cuenca volcanotectónica, que habría posibilitado las condiciones de P-T suficientes para la formación de fases metamórficas propias de un metamorfismo de enterramiento. En la zona

de estudio, habrían existido zonas de mayor flujo geotermal, relacionadas espacialmente con centros volcánicos y márgenes de caldera, donde se desarrolló una alteración típica de campo geotermal, con alto gradiente térmico (150-200°C/km).

Prof. Guía: Luis Aguirre
28.08.2000

GENESIS Y ZONACIÓN DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE EN YACIMIENTOS EXOTICOS: DISTRITO EL TESORO Y ZONAS ALEDAÑAS, II REGIÓN, CHILE

Christian Feddersen Welkner

La presente tesis entrega los resultados de un catastro de depósitos cupríferos de tipo exótico y/o de tipo pórfido cuprífero conocidos con enriquecimientos supérgeno, en la franja de Sierra Gorda, II Región. Específicamente se presenta un estudio de la geología del yacimiento exótico El Tesoro y la zonación de su mineralización cuprífera. Se propone un modelo geológico para el distrito El tesoro y la probable dirección de proveniencia de los fluidos que lo originaron.

El catastro de manifestaciones de mineralización cuprífera y de alteración fue realizado en base a levantamiento geológico regional a escala 1:100.000, del área de trabajo. El estudio de la mineralización cuprífera del yacimiento exótico El Tesoro y de las gravas que la albergan, se fundamentó en la descripción macroscópica de 160 sondajes de aire reverso. Con esta información se determinó la configuración tridimensional de la zonación de la mineralización de mena, la cual fue complementada con un mapeo geológico del distrito a escala 1:20.000. Integrando adicionalmente aspectos sedimentológicos, tectónicos y termodinámicos, se modeló la formación del yacimiento

y se propone una probable dirección de los fluidos que lo originaron.

A partir del catastro regional, se concluyó que las gravas piedemontanas del Terciario, adyacentes al costado oeste y noroeste del pórfido cuprífero Centinela, constituyen un blanco para la exploración de depósitos exóticos de Cu.

En el distrito El Tesoro, la mineralización exótica se ubica en dos unidades mineralizadas denominadas Tesoro Oeste y Tesoro Noreste y además, en él se ubican los pórfidos cupríferos Esperanza y Telégrafo. En este distrito se determinó que un sistema de fallas de orientación NE controló la formación de cuencas. Estas se rellenaron con los productos de la erosión y denudación de la Cordillera de Domeyko, la cual habría albergado al depósito tipo pórfido cuprífero "fuente" del cobre precipitado en El Tesoro. El mismo sistema de fallas habría exhumado al depósito "fuente" y controlado el posicionamiento de sus zonas con mineralización de sulfuros de Fe y Cu (primarias y secundarias) por sobre el nivel freático, condicionando su oxidación y lixiviación, con la consecuente migración lateral de soluciones ricas en

Cu. Soluciones ácidas impregnaron a gravas ubicadas al oeste del sistema de fallas antes mencionado, formando la unidad mineralizada Tesoro Oeste. Posteriormente, soluciones menos ácidas, que se habrían generado por la oxidación y lixiviación de mantos enriquecidos con menor cantidad de pirita, en el depósito "fuente", impregnaron las gravas ubicadas al noreste del sistema de fallas, formando la unidad mineralizada Tesoro Noreste. Se propone que la dirección de proveniencia de las soluciones mineralizadoras es principalmente desde el este, para la unidad mineralizada Tesoro Oeste. Para la unidad mineralizada Tesoro Noreste, no fue posible determinar las direcciones de flujo de las soluciones

mineralizadoras que la formaron. Es posible que el término del evento exótico en el distrito El Tesoro sea consecuencia de la inversión tectónica que afectó al sistema de fallas NE, desde movimientos normales con bloque caído al oeste, a normales con bloque caído al este. Se estimó que el proceso de formación de mineralización exótica en el distrito El Tesoro, se ubica en el lapso entre los 30 y los 20 Ma. El conocimiento actual de los pórfidos de cobre Esperanza y Telégrafo sugiere que ellos no habrían formado exóticos de importancia. Por ello el origen del cobre precipitado en El Tesoro sigue siendo una incógnita.

Prof. Guía: Brian Townley
18.12.2000

INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA Y GEOLÓGICA INTEGRADAS, DISTRITO DE CHAÑARCILLO, III REGIÓN, CHILE

Andrés Pavez Alvarado

El área de la Geofísica Aplicada se ha visto complementada en los últimos años por avances tecnológicos que han hecho de la percepción remota de espectroscopía visible e infrarroja una rama importante de las ciencias de la Tierra. Complementadas con métodos geofísicos más tradicionales (como lo son los métodos de potencial), estas técnicas resultan de alta eficiencia en las estrategias de exploración en un país maduro en prospección minera como Chile.

El trabajo realizado consistió en el desarrollo de una metodología de exploración eficiente, haciendo uso de sensores remotos multiespectrales y magnetometría aerotransportada, la cual fue verificada en el Distrito de Chañarcillo, III Región. En esta zona de rocas de edad mesozoica, se alojan yacimientos de plata (vetas de Chañarcillo), cobre-oro, y de hierro.

Mediante el análisis espectral del distrito, se logró obtener mapas diagnósticos de rocas afectadas por alteración propilítica, alteración argílica, alteración filica y de presencia de minerales oxidados de hierro. Empleando bandas del infrarrojo termal se logró obtener mapas índices de silicificación y skarnificación de las rocas. Los sectores anómalos en óxidos de hierro y granates, comprobados en terreno, se encuentran asociados a diques y stocks menores relacionados espacialmente con los yacimientos de la zona.

Mediante el uso de aero-magnetometría, la interpretación cualitativa de los mapas de Campo Total, Derivadas y Señal Analítica revela cuerpos de alta intensidad de magnetización, que coinciden en terreno con cuerpos intrusivos dioríticos y ricos en magnetita, particularmente con los depósitos ferríferos de Ana-Marco y Bandurrias, en

que la magnetita es un componente importante de la mena.

La congruencia de la interpretación integrada de dos métodos geofísicos distintos con la geología del Distrito, sugiere que los depósitos metálicos del distrito representan facies distintas de un mismo evento de mineralización, asignado tentativamente al Cretácico.

El presente estudio provee una metodología de trabajo multidisciplinario que resulta de suma importancia para la exploración minera de depósitos de tipo Fe-Cu-(Au) y de tipo Skarn, y que además, permite contribuir al entendimiento geológico de una región.

Prof. Guía: Emilio Vera
13.09.2000

CONTROLES GEOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ORO EN EL DEPÓSITO DE CERRO CASALE, NORTE DE CHILE

Fabián Sepúlveda Sayen

El oro nativo en sistemas hidrotermales forma una solución sólida completa con Ag, y acepta en menor medida elementos tales como Cu, Fe, As, Hg, Bi y Pt, en cantidades normalmente < 1 % en peso. El objetivo del presente trabajo fue establecer los controles geológicos y geoquímicos en la composición química del oro nativo en el depósito de Cerro Casale. Factores geoquímicos y geológicos de interés fueron temperatura, disponibilidad de los metales en el sistema, fS_2 , fO_2 , pH, salinidad de la(s) fase(s) fluida(s) respectiva(s), modo de transporte dominante de los metales en cuestión, ebullición, y la presencia de fases minerales de Ag y Cu en equilibrio con el oro nativo.

Para el presente trabajo se consideraron 175 análisis de microsonda de cristales de oro, recuperados de 28 muestras, provenientes de las distintas unidades litológicas del depósito, en una sección vertical de aproximadamente 700 m. Los elementos analizados fueron Au, Ag, Cu, As, Fe, Hg y Bi. Los contenidos de Ag y Cu en el oro nativo (Ag: 1-30% en peso; Cu: 0-0,35% en peso) presentaron la más alta correlación con el contenido de Au en el metal

precioso ($r_{Au-Ag} = -0,993$; $r_{Au-Cu} = 0,685$).

El depósito de Cerro Casale es un pórfido de Au-Cu de edad Mioceno (14 Ma), localizado en el extremo sur de la Franja de Maricunga. El depósito contiene cerca de 1.000 millones de toneladas con leyes de 1 g/t Au y 0,3% Cu. Las principales unidades litológicas en el depósito incluyen un pórfido granodiorítico pre-mineral, un pórfido diorítico sin-mineral, y múltiples brechas ígneas e hidrotermales, las cuales cortan a rocas volcano-sedimentarias del Mioceno. Inmediatamente al oeste de Cerro Casale, un sector de vetas polimetálicas marca la transición hacia un ambiente epitermal. La mineralización de Au y Cu en el depósito se asocia a dos etapas de alteración hidrotermal: potásica (400-600°C, 70% en peso NaCl equiv.) y clorita-sericita (200-250°C, 25% en peso NaCl equiv.).

El estudio geoquímico del oro nativo indicó que: (1) el oro asociado a la etapa potásica es más rico en Ag (7-28% en peso) y pobre en Cu (0-0,25% en peso) que el oro de la etapa clorita-sericita (Ag = 1-9% en peso; Cu = 0,05-0,35% en peso); (2) el oro de la etapa potásica hospedado en el pórfido diorítico es más rico en Ag (17-28% en peso)

y pobre en Cu (0-0,08% en peso) que el oro de la etapa potásica hospedado en el pórfido granodiorítico y en la matriz de brechas ígneas e hidrotermales (Ag = 7-17% en peso; Cu = 0-0,25% en peso); (3) el contenido de Ag en el oro de la etapa potásica decrece desde un valor promedio de 20% en peso en las zonas más profundas, hasta un 10% en peso en los niveles más superficiales del depósito; y (4) el contenido de Cu en el oro de la etapa clorita-sericita decrece desde un valor promedio de 0,3% en peso en las partes más profundas del depósito, hasta 0,1% en peso en las zonas más elevadas.

El estudio de las asociaciones minerales indicó que el oro de la etapa potásica precipita en condiciones oxidantes (buffer magnetita-hematita), a partir de fluidos neutros a levemente alcalinos (pH > 6). Las condiciones de temperatura, fO_2 , y salinidad, imperantes durante esta etapa, sugieren que Au, Ag y Cu son transportados como complejos clorurados. El oro de la etapa clorita-sericita precipita en ambiente más reductor (pirita estable), a partir de fluidos neutros a levemente ácidos (pH 4,5-5,5), con $Au(HS)_2^-$, $Cu(HS)_2^-$ y $AgCl_2^-$ como agentes de transporte dominantes.

La composición química del oro [fineza = $1000 * Au / (Au + Ag)$] se modeló a través de la ecuación: $\log[(Ag)/(Au)] = \log K_1 + \log(aAgCl_2^- / aAuCl_2^-)$, para el oro de la etapa potásica; y $\log[(Ag)/(Au)] = \log K_2 + \log(aAgCl_2^- / aAu(HS)_2^-) + 2pH - 2 \log aCl^- + 2 \log aH_2S$, para el oro de la etapa clorita-sericita, donde k_1 = constante de equilibrio de la reacción $(Au) + AgCl_2^- = (Ag) + AuCl_2^-$, k_2 = constante de equilibrio de la reacción $(Au) + AgCl_2^- + 2H_2S = (Ag) + Au(HS)_2^- + 2H^+ + 2Cl^-$, y a = actividad.

Las constantes de equilibrio que rigen la reacción $(Au) + AgCl_2^- = (Ag) + AuCl_2^-$, en el rango de 500-300°C, indican que: (1) las especies $AgCl_2^-$ son más solubles que los complejos $AuCl_2^-$, a todas las temperaturas,

y (2) a medida que la temperatura disminuye, $AuCl_2^-$ reduce fuertemente su solubilidad, en comparación a las especies análogas de Ag. De acuerdo a esto, cuando el transporte de metales preciosos es gobernado por complejos clorurados, el oro nativo en equilibrio con salmueras a alta temperatura (~ 500°C) será más rico en Ag que el oro nativo en equilibrio con salmueras a menor temperatura (~ 400°C). Estas observaciones son consistentes con los menores contenidos de Ag en el oro de la etapa potásica, a cotas más elevadas. Alternativamente, es posible argumentar un sistema deficiente en Ag, en donde la disponibilidad de este elemento está condicionada a los primeros pulsos de mineralización. Sin embargo, valores de Ag > 100 ppm y Au < 1 ppm en el sector de vetas polimetálicas, correspondientes a la extensión más superficial del sistema de Cerro Casale, restan validez a esta última hipótesis. Los bajos contenidos de Cu en el oro de la etapa potásica (relativo al oro de la etapa clorita-sericita) pueden reflejar la alta solubilidad de las especies $CuCl_2^-$ a altas temperaturas (> 400°C), y el escape de Cu a través del vapor.

La presencia de fases minerales de Ag y Cu controlan el contenido de Ag y Cu, respectivamente, en el oro nativo, lo que es compatible con: (1) la disminución en el contenido de Cu con la cota, desde 0,3% a 3320 m hasta 0,1% en peso a 4020 m en los cristales de oro de la etapa clorita-sericita, coincidiendo, aparentemente, con un aumento en la razón calcopirita/pirita hacia los niveles más superficiales del depósito (razón calcopirita: pirita = 1:1 a 3900 m; 1:10 a 3350 m); (2) la menor fineza del oro de la etapa potásica respecto del oro de la etapa clorita-sericita, este último en coexistencia con teluros de Ag en brechas hidrotermales.

Prof. Guía: Carlos Palacios

06.07.2000