

704 9
6

Alcornoque
submontana



RELACIONES ENTRE LA ALTERACION MINERAL SUPERGENICA Y LA GEOMORFOLOGIA
EN LA PARTE MERIDIONAL DEL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE.
UN INFORME PROVISIONAL

por
A.H. Clark, R.U. Cooke, C. Mortimer, R.H. Sillitoe

Departamento de Geología, University College
Londres



El manuscrito lo recibió primero la Institution of Mining and Metallurgy,
el 28 de febrero de 1967; el manuscrito revisado se recibió el 17 de marzo
de 1967. El artículo fue publicado el 10 de mayo de 1967. Para discusión
por correspondencia.

*In Transactions, I. M. M., 1967,
parte B, pp B.89-B.96.*

J. U. A.
JUAN DE MICALHAES-CALVET ARNOLD
TRADUCTOR-INTERPRETE
Asturias 212
Fono 482447 - Santiago

RELACIONES ENTRE LA ALTERACION MINERAL SUPERGENICA Y LA GEOMORFOLOGIA EN
LA PARTE MERIDIONAL DEL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE - UN INFORME
PROVISIONAL

A.H. Clark, B.Sc., A.R.S.M., Ph. D., Stud. I.M.M.
Catedrático de Geología Económica y Mineralogía de Menas
Departamento de Geología, University College, Londres.

R.U. Cooke, B.Sc., M.Sc.
Catedrático de Geomorfología, Departamento de Geografía
University College, Londres.

C. Mortimer, B.Sc.
Estudiante postgraduado
Departamento de Geología, University College, Londres.

R.H. Sillitoe, B.Sc., Std. I.M.M.
Estudiante Postgraduado

Departamento de Geología, University College, Londres.

Resumen
Sinopsis

describen
Se resumen brevemente algunas conclusiones preliminares logradas en un estudio continuado de las relaciones entre la alteración supergénica de los yacimientos de cobre y de fierro y la historia geomorfológica en la parte meridional del Desierto de Atacama, en el norte de Chile. Han sido determinados por lo menos tres períodos de enriquecimiento supergénico en los yacimientos de cobre de esta región, y resulta evidente que la alteración tuvo lugar en diferentes etapas durante el desarrollo de la topografía multicíclica. Hipótesis más antiguas, que relacionan el enriquecimiento con la formación de un "terreno ~~terreno~~ maduro del terciario" ("Tertiary matureland") son insostenibles. Se ponderan las posibles relaciones entre enriquecimiento y pedimentación, el proceso más importante de formación de terreno en el área. Se sugiere a título de ensayo que la mayor parte del enriquecimiento ocurrió en épocas de "pediplain dissection", pero que las partes internas no divididas de los "pediplains" pueden haber permitido el desarrollo y la preservación de las zonas enriquecidas en estos períodos.

Gran parte de la actual producción de ~~Chile~~ cobre de Chile es producida por tres minas de gran tamaño y varias de tamaño mediano; solamente una proporción muy pequeña la contribuye el gran número de pequeñas explota-

ciones diseminadas a lo largo de las partes central y norte del país¹⁾. Estas pequeñas minas fluctúan desde operaciones limitadas, cercanas a la ~~superficie~~ superficie y ejecutadas por algunos pocos obreros, hasta llegar a minas más profundas y comparativamente bien equipadas, que emplean centenares de hombres. Los métodos de extracción y de clasificación del mineral son frecuentemente muy primitivos y la mayor parte de las minas menores carecen de los medios y de la pericia técnica necesaria para incluso la exploración local subsuperficial y el establecimiento de reservas de mineral, ~~ante~~ adelantándose a las exigencias inmediatas.

Las pequeñas operaciones son, sin embargo, de importancia crucial para las economías locales de muchas partes de Chile, proveyendo una fuente considerable de empleo, aunque fluctuante. Por otra parte, su producción sostiene enteramente varias plantas concentradoras y ~~fundiciones~~ hornos de fusión de propiedad estatal y de propiedad privada. Muchas de las minas están ubicadas en áreas mineras anteriormente muy productivas y es posible que pequeños operadoras estén trabajando frecuentemente zonas diferentes de yacimientos extensos y continuos de baja ley, los cuales ~~podrían~~ podrían sostener una explotación en gran escala. Por otra parte, algunos yacimientos individuales actualmente trabajados en pequeña escala han sido muy productivos en el pasado: la veta Dulcinea, por ejemplo, ha sido explotada provechosamente hasta una profundidad de más de 1.000 m.

Junto con el programa de la progresiva "chilenización" de las grandes minas de propiedad ~~extranjera~~ extranjera²⁾, el Gobierno chileno está alentando la expansión y la fusión de pequeñas explotaciones prometedoras con miras a establecer minas de tamaño mediano, más capaces de resistir variaciones en lo referente al precio del cobre y de proporcionar empleo más regular. En forma concomitante se están ampliando las ~~existentes~~ existentes instalaciones centralizadas de tratamiento de minerales y se están estableciendo nuevas plantas de concentración y de ~~fusión~~ fusión. Pero el desarrollo de las pequeñas minas se encuentra, no obstante, obstaculizado por la escasez de la información geológica y mineralógica, digna de confianza, acerca de los yacimientos. Las asociaciones hipógenas de los yacimientos de cobre grandes y pequeños generalmente no pueden ser explotados provechosamente bajo las actuales condiciones geológicas y los procesos superficiales de oxidación

y enriquecimiento supergénicos han sido de importancia fundamental tanto para las ^{explotaciones} operadores grandes como para los pequeños. La evaluación del potencial de producción de las áreas mineras y de las minas y prospecciones individuales depende claramente, en gran parte, de una comprensión rigurosa de la naturaleza y de los controles de la alteración supergénica.

Se considera que
Los controles más significativos de la ~~la~~ alteración los han constituido la mineralogía hipogénica de los minerales, la estructura, la orientación y la litología de las rocas de ^{may} respaldo de los yacimientos y, especialmente, las condiciones geomorfológicas locales y regionales, y los climas pasados y presentes. De entre estos es seguramente la historia geomorfológica, íntimamente vinculada con los cambios climáticos, la más susceptible al estudio regional y a la síntesis, pero en años recientes ha recibido solamente escasa investigación y evaluación en Chile y en otras áreas que producen magnitudes mayores de minerales supergénicos de cobre (véanse referencias 3-5).

Los autores se encuentran actualmente estudiando la alteración supergénica de yacimientos minerales y la evolución topográfica de la parte meridional del Desierto de Atacama, en el norte de Chile, en una tentativa de definir las relaciones precisas entre ambas. Se espera que este trabajo conducirá eventualmente al reconocimiento de los medios ambientes más favorables para la formación de las extensas zonas de alteración supergénica en esta región y a la delimitación de aquellas áreas, en el paisaje actual, en las cuales resulta más probable que hayan sido preservadas extensas zonas de enriquecimiento. Este enfoque puede además posibilitar la predicción del potencial de yacimientos individuales. Este proyecto continuada, iniciado en 1965, es patrocinado como ayuda técnica por el Ministerio de Desarrollo de Ultramar del Reino Unido y el trabajo en el terreno está siendo realizado en estrecha cooperación con el Instituto de Investigaciones Geológicas, ~~Chileno~~ de Chile. El programa de investigación surgió de estudios geológicos y geomorfológicos anteriores, realizados en el norte de Chile⁽⁶⁾ ^{he} por el University College, de ~~Londres~~ Londres, y ha sido propuesto inicialmente por el ya fallecido Profesor S.E. Hollingworth y por el Sr. Carlos Ruiz Fuller, Director del Instituto de Investigaciones Geológicas. El presente informe provisional esboza los métodos empleados en

en este trabajo y resume algunas de las conclusiones preliminares logradas hasta la fecha. Aspectos específicos de la investigación han sido descritos en otra parte.^{7.8)}

El área principal abarcada por el presente estudio ha sido aquella parte del Desierto de Atacama que se extiende desde unos 20 km al sur del Río Huasco hasta unos 10 km al norte del Río Salado (Fig. 1). Después de un reconocimiento preliminar se seleccionó para su estudio esta región, que tiene por centro la antigua ciudad de Copiapó, debido a que constituye una extensa zona representada por mapas geológicos, debido al gran número de pequeña minas de cobre en estado activo y debido a la evidencia preservada de una extensa geomorfología geomorfológica. La parte norte del área queda además incluida dentro de los límites del "terreno maduro del terciario" (Tertiary mature-land), de cual Segerstrom⁹⁾ supone que ~~existen~~ haya controlado la alteración supergénica en gran parte del norte de Chile. Copiapó está ubicada de cobre ~ 150 km al sudoeste de los yacimientos porfídico ~~de cobre~~ de El Salvador y Potrerillos, y debería ser posible correlacionar las relaciones de geomorfología-enriquecimiento, existentes en el área bajo estudio, con aquellas exhibidas por estas grandes minas. La oficina en Copiapó del Instituto de Investigaciones geológicas se encuentra empeñada en la estimación de las toneladas disponibles de minerales supergénicos oxidados y enriquecidos en el área de Copiapó, a fin de evaluar los requisitos de factibilidad y de capacidad de las proyectadas plantas de tratamiento. Las conclusiones del presente proyecto serán inmediatamente relevantes para esta investigación a largo plazo. El grupo ha realizado también trabajos en el terreno en varios distritos mineros al sur de la región de Copiapó y particularmente en el área de Andacollo, en la Provincia de Coquimbo⁸⁾.

NOTA DEL TRADUCTOR: Aquí corresponde intercalar Fig. 1

- Grandes yacimientos ~~porfídicos~~ de cobre porfídico.
- Distritos más pequeños de minería del cobre en ~~en~~ estudio.
- Yacimientos de fierro en estudio.
- Ciudades.

Fig. 1 Mapa en croquis del área del estudio

Los yacimientos de la región de Copiapó incluyen disseminaciones, masas irregulares de filones que se entrecruzan (stockworks), mantos, vetas simples y complejas y chimeneas de brechas cementadas por turmalina^{10,11)}

Los yacimientos individuales muestran transiciones abruptas de un tipo estructural a otro y, en vista que raras veces se dispone de instalaciones de sondaje de diamante, puede resultar difícil el desarrollo sistemático incluso de zonas de mineral enriquecido de alta ley. La mineralización se encuentra relacionada en el espacio, y probablemente en forma genética, con intrusiones graníticas de dimensiones batolíticas, del cretáceo superior (90-110 millones de años) y del Terciario (45-64 millones de años), que fueron emplazadas en la plegada sucesión volcánico-sedimentaria geosinclinal del mesozoico andino.¹⁰⁾ La intrusión estuvo seguida por la erupción de volcánicas ácidas del Cerro La Peineta, de la época miocénica o plio-pleistocénica. La fase más tardía de la actividad ígnea en el área está representada por capas de ignimbritas (ignimbrite sheets) de la Formación de la Quebrada de San Andrés, posiblemente de la época plio-pleistocénica, preservadas como remanentes erosionales por sobre los 1.500 m en los Andes.

Generalmente no se dispone de estadísticas dignas de confianza para la producción de cobre del pasado, de la región minera de Copiapó, pero el horno de fusión de Paipote, que trata concentrados provenientes de toda el área, produjo en 1960 22.246 toneladas de cobre blister (99,3 por ciento de Cu) y 0,5 toneladas de oro como subproducto.¹²⁾ Actualmente, sin embargo, el producto mineral más importante de la zona es mineral de magnetita de alta ley, derivado de cuerpos lenticulares de magnetita maciza, posiblemente de origen de contacto metasomático,¹⁰⁾ localizados en una faja de disyunción regional en metavolcánicas a lo largo del borde oriental del batolito granítico (Jurásico superior, que forma el núcleo de la Cordillera de la Costa. Las minas ubicadas en el área en estudio contribuyeron con más de la mitad de los 12.000.000 de toneladas de mineral de fierro producidas en Chile, en 1965, y la expansión ulterior de la minería de fierro (en esta región) está garantizada por el desarrollo de los yacimientos de Bandurrias y de Boquerón Chañar.¹³⁾ La magnetita en estos yacimientos ha sufrido una extensa hematitización ("martitización") que reviste una significación económica

considerable en la evaluación de los racizes de mineral, debido a que la hematita de grano grueso es actualmente rechazada durante la concentración. La naturaleza, la extensión y las relaciones geomorfológicas de la martitización están siendo estudiadas en detalle. Las minas más productivas en el área de Copiapó han sido las ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~ del gran campo de plata de Chañarillo, el cual debió su extraordinaria riqueza a los procesos de enriquecimiento supergénico.^{10.14)} En esta región no se explotan ahora yacimientos de plata, y los afloramientos subterráneos en el área de Chañarillo son en gran parte inaccesibles, esperándose empero que será posible interpretar los perfiles conocidos de enriquecimiento, en estos yacimientos, a la luz del presente estudio.

Métodos y campo de aplicación de la investigación.

Estudios geomorfológicos.

En la parte sur del Desierto de Atacama se encuentran, por lo general, ~~se~~ insuficientemente definidas las tres unidades topográficas más importantes - la Cordillera de la Costa, el Valle Longitudinal y la Cordillera de los Andes - que en otras partes de Chile están bien desarrolladas; el Valle Longitudinal está representado por una serie de depresiones tectónicas dentro de una topografía ~~XXXXXXXXXXXX~~ ininterrumpidamente montañosa, que se extiende de los Andes hasta el mar.

La clarificación de la historia geomorfológica de la región está esencialmente basada en una ~~cartografía~~ ^{levantamiento detallado} ~~XXXXXXXXXXXX~~ de terreno de los accidentes topográficos y de los yacimientos superficiales, con utilización de fotografías aéreas verticales ~~a una~~ ^{de} escala aproximada de 1:60.000. La determinación de una ~~cronología~~ ^{de} ~~evolución de~~ ^{de} las formas del terreno (landform) ha sido iniciada en dos áreas, proporcionando una clara evidencia de las ~~etapas~~ ^{etapas} ~~de~~ ^{de} las ~~formas~~ ^{formas} más recientes y mejor preservadas en el desarrollo topográfico: el valle del Río Huasco (previamente estudiado por Cooke¹⁵⁾) y la región costera entre Caldera y Puerto Viejo, junto a la desembocadura del Río Copiapó. En esta última área, ~~se registran~~ ^{están registrados} los cambios del nivel del mar por una sucesión transgresiva de depósitos marinos fosilíferos, ~~cortados en~~ ^{en los cuales están} una serie notable de terrazas marinas, recubiertas por más depósitos fosilíferos producidos durante una ~~XXXXXXXXXX~~

*U) NOTA DEL TRADUCTOR: "Stage" también puede ser etapa, fase, período, etc

regresión intermitente ulterior. Tierra adentro, los efectos de estos movimientos del nivel de mar fueron investigados cartografiando depósitos de agradación ~~del~~ valle y terrazas fluviales en el valle del Río Copiapó. La contemporaneidad de las formas y ~~los~~ depósitos marinos y fluviales fue establecida en el terreno en base a su continuidad y a través del examen del grado de meteorización de los depósitos y de los perfiles de suelo que se desarrollaron en ellos. Las relaciones en esta área son similares a las determinadas en el valle del Río Huasco. 15)

se siguieron las huellas de ~~encontraron~~
Aguas arriba de Copiapó, los depósitos y las terrazas ~~del~~ valle al interior de los profundos cañones del Río Copiapó y de su principal tributario, la Quebrada Paipote, que se han encajonado en una serie de por lo menos tres extensas superficies de "pediplain". Estas superficies, localmente cubiertas por depósitos aluviales ~~distintivos~~, dominan el paisaje de ~~las~~ partes más elevadas de la región. El levantamiento cartográfico sistemático de las superficies y de los depósitos ~~está~~ adelantando en el área al sur y al este de Copiapó, en donde existe la mayoría de los distritos mineros productivos de cobre (Fig. 1). Allí en donde su continuidad lo permite, los "pediplains" están siendo rastreados hacia el este, a altitudes superiores a 4.000 m en los Andes. Se está prestando una atención especial a las relaciones entre los "pediplains" más bajos y la sucesión de terrazas fluviales en los valles principales, y a la geomorfología detallada de las áreas que circundan minas individuales ~~en forma~~ inmediata, a fin de permitir ~~una~~ correlación precisa del desarrollo topográfico local con los perfiles de alteración supergénica, expuestos en las minas. Las interrelaciones entre ~~los~~ movimientos tectónicos y la historia erosional constituyen factores claramente significativos en la rigurosa correlación de los remanentes de superficies de ~~planación~~ y en la reconstrucción de topografías pasadas. Las superficies de "pediplain" (más antiguas) en el área sufrieron probablemente una deformación comparativamente intensa, pero un estudio de los recientes movimientos de fallas no ha revelado dislocación significativa alguna de los "pediplains" más jóvenes en el área de Copiapó. 7)

de más de 1.500 m (Fig. 1). Se dispuso de planos subterráneos para varias de las minas más profundas, pero en las explotaciones más pequeñas resultó generalmente necesario realizar una cartografía topográfica de los afloramientos, a fin de determinar las relaciones en el espacio entre las asociaciones de minerales y la topografía de superficie. En cada mina o prospección se examinaron detalladamente las zonas hipógenas y supergénicas, en caso de que existan, y se ubicaron las superficies inferiores de las zonas alteradas. Siempre que fuera posible, se determinaron las asociaciones de minerales dentro de las zonas supergénicas y fueron registrados en secciones verticales, en gran escala, los límites entre las zonas enriquecidas, oxidadas y lixiviadas. Se hizo incapié, en el terreno en evidenciar la superposición de paragénesis de alteración, que difieren entre sí, lo que constituye un fenómeno frecuente allí en donde las zonas de enriquecimiento han sido afectadas por oxidación posterior. ~~XXXXXXXXXX~~

La observación de las zonas de menor penetración del enriquecimiento supergénico se facilita por la simplicidad comparativa de las asociaciones de minerales de las menas hipógenas. Calcopitita y, localmente, bornita ocurren tan sólo en menas inalteradas, y los sulfuros binarios de cobre (^{calcosina} calcocita, djurleita digenita, covelina blaubleibender y covelina) se encuentran enteramente confinados a las zonas de enriquecimiento. Se estudio la distribución de la pirita y de otros minerales de ganga hipógena (como ser hematita, calcita), ^{los cuales se supone} ~~la cual se supondría~~ que tenga un efecto significativo sobre el curso de la alteración supergénica.

Las zonas oxidadas de los yacimientos están generalmente caracterizadas por complejas asociaciones de minerales y, aunque cuprita, malaquita, paratacamita, crisócola y otras fases supergénicas forman localmente agregados de grano grueso, estos minerales se presentan persistentemente en interpenetraciones íntimas, de grano muy fino, tanto entre sí como con óxidos hidratados de fierro. En tales menas ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~ (que son clasificadas por los mineros con una serie de términos locales, cuyo significado varía incluso dentro de campamentos mineros individuales) result

resulta que

en minas individuales generalmente no se descubren perfiles ~~generales de estas zonas~~ completos a ~~traves~~ ^{de largo trazo} de las zonas de alteración supergénica y resulta necesario reconstruir, en base a una gran cantidad de perfiles parciales, un cuadro completo del desarrollo en el espacio de la alteración en las diferentes áreas mineras. En la mina Dulcinea, y en otras explotaciones más profundas, la alteración supergénica se encuentra expuesta de modo más extensivo. Salvo unas pocas excepciones, se ha encontrado que la mayoría de las descripciones publicadas ~~de~~ ^{sobre} la naturaleza y ~~de~~ la extensión de la alteración supergénica en los yacimientos en estudio han sido simplificadas en exceso o resultan no ser dignas de confianza, desalentando cualquier extrapolación de las relaciones observadas a minas que no han sido abarcadas por el presente trabajo y a las partes inaccesibles de las minas que han sido visitadas. Los informes más antiguos evidencian, no obstante, las posiciones del nivel de aguas freáticas en muchas minas, acrecentando provechosamente las observaciones efectuadas en este estudio acerca de niveles de agua actuales o recientes (anteriores a la mina).

Un gran número de muestras representativas provenientes de las zonas hipógenas y supergénicas de los yacimientos de cobre han sido recolectadas para su examen de laboratorio. La frecuente complejidad de las asociaciones de minerales hace que ^(amplios) los análisis ~~por~~ difracción de rayos X y por microsonda electrónica ~~sean~~ constituyan un agregado esencial a los estudios microscópicos normales. Esta labor se encuentra aún en sus primeras etapas, pero la mineralogía de las zonas de enriquecimiento de sulfuros ha sido aclarada y se ha logrado un avance considerable en lo referente a la determinación de las relaciones entre minerales en las menas oxidadas. La interpretación de los sulfuros binarios de cobre, formados por enriquecimiento, se facilita mediante la reciente demostración de Roseboom de los equilibrios de fases ^{en el} sistema Cu-S, ¹⁶⁾ pero los datos disponibles acerca de las relaciones de fases a baja temperatura en los sistemas Cu-Fe-O y Fe-O-H ^{son insuficientes para} proporcionar un esquema satisfactorio para una comprensión de las asociaciones oxidadas.

Se están realizando análisis químicos de las muestras de los enigmáticos tipos de minerales ~~oxídicos~~, en la esperanza de que será posible desarrollar un sistema rápido para la identificación y la evaluación en el terreno de estas importantes asociaciones, basándose en su color, textura y peso específico.

La distribución del mineral "martitizado" en los yacimientos de fierro de Algarrobo, Huantemé, Boquerón Chañar, Cerro Imán, Bandurrias y Cerro Negro Norte ha sido estudiada en el terreno y se han recolectado amplias series de muestras de mineral. El examen microscópico de las muestras de mineral se encuentra en marcha a fin de determinar la naturaleza textural y el tamaño de grano de las interpenetraciones de magnetita y hematita, que constituyen factores de importancia en el tratamiento de estos minerales. También se han llevado a cabo estudios preliminares acerca de la distribución y del grado de alteración del "mineral acarreado" - acumulaciones aluviales de bloques y de guijarros de mineral macizo de fierro - que constituye una fracción significativa de las reservas de la mina Algarrobo, y ^(el) ~~la~~ cual está siendo explotado en pequeña escala en varias áreas al norte de Quebrada Paipote.

Conclusiones preliminares

Las conclusiones a que se ha llegado en esta fase del presente estudio pueden resumirse como sigue:

(1) Se ha deducido la evolución geomorfológica de la región, ~~ya~~ aun cuando los accidentes topográficos formados en las etapas ~~de~~ más recientes de la cronología puedan ser interpretados con mayor precisión de lo que resulta posible con respecto a remanentes de topografías más antiguas. La siguiente cronología relativa ha sido establecida:

(A) Formación de una topografía sobre la cual ^{extruyeron} ~~fueron~~ extruidas las ^{rocas} volcánicas del Cerro La Peineta. La determinación, por medio del K-Ar, de la edad de los miembros ~~de~~ inferiores, intermedios y superiores de la sucesión volcánica debe demostrar la edad mínima de la topografía ^{pre-vol} ~~pre~~ volcánica, la duración del episodio extrusivo y de los períodos ~~siguientes~~

*) NOZA DEL TRADUCTOR: "Stage" también puede significar "piso", "fase", "período", etc.

de erosión reflejados en discordancias interestretales y, en forma altamente significativa, la edad máxima de las formas del terreno (landforms) que siguen inmediatamente al vulcanismo. Movimientos tectónicos de intensidad desconocida ocurrieron probablemente durante e inmediatamente después de la extrusión de las volcánicas.

(B) Desarrollo de una serie de "pediplains" a lo largo de la región. Se pueden rastrear por lo menos tres períodos de formación de "pediplains" y éstos fueron probablemente separados por períodos de división y de desarrollo de cañones. Los "pediplains" se conservan en muestras de las áreas mineras de cobre y existen a lo largo de amplios tramos al oriente de Copiapó, pero no ha sido confirmada en detalle su continuidad hacia el norte de Inca de Oro. Una capa de ignimbrita de la Formación Quebrada San Andrés ha sido extruida sobre el "pediplain" más bajo y más reciente de los "pediplains" más importantes.

(C) Corte de cañones a lo largo de los Ríos Huaşco, Copiapó y Salado, y de sus tributarios, durante un período de regresión marina.

(D) Transgresión marina, acompañada por agradación en valles y a lo largo de la costa: los sedimentos muestran facies fluviales, estuáricas y marinas.

(E) Meteorización localmente intensa de los depósitos aluviales.

(F) Regresión marina que causa división de los depósitos de agradación y desarrollo local de nuevas rocas de respaldo de cañones, modificando frecuentemente los cañones producidos en la etapa C. Durante esta etapa se formaron terrazas fluviales y marinas y depósitos asociados.

La duración del período más importante de la pediplanación (etapa B) quizás haya sobrepasado considerablemente la de las fases posteriores (etapas C-F). Esto puede ser confirmado por la determinación de la edad de las volcánicas, por medio del K-Ar, y por la determinación de la edad de las faunas conchíferas en las terrazas regresivas, por medio del C¹⁴.

(2) Dos tipos importantes de enriquecimiento supergénico se han formado en esta área. Se les menciona como "calcocita maciza" y

^{pulverulenta}
 "calcocita fuliginosa", basándose en el aspecto megascópico de las asociaciones del enriquecimiento supergénico, si bien la calcocita propiamente tal sea solamente uno de los distintos sulfuros de cobre que se presentan en estas zonas. De entre los dos tipos de enriquecimiento, las zonas de calcocita maciza son ^{lejos} ~~mucho~~ las más extensas y económicamente las más importantes en el área en conjunto y están caracterizadas por el desarrollo de agregados gruesos, de color gris-acero, de granos de uno o más de los sulfuros binarios de cobre: calcocita, djurleita (cuantitativamente el más importante en la mayoría de las áreas), digenita y blaubleibender (covelina). La calcocita pulverulenta forma revestimientos superficiales de un material pulverulento de color negro o azul intenso sobre minerales hipógenos más antiguos, y particularmente pirita, y sobre calcocita maciza. Calcocita, djurleita, covelina blaubleibender y covelina han sido identificadas por medio de examen microscópico y análisis por rayos X de muestras de calcocita fuliginosa. Allí en donde se presenta la covelina ~~en asociación~~ ^{junto} con asociaciones de calcocita maciza, resulta que aparentemente ha sido formada en una etapa posterior a la de los sulfuros más ricos en cobre.

El enriquecimiento de calcocita maciza ha resultado, ~~como es posible demostrarlo,~~ ^{resultado} en un marcado mejoramiento de la ley de las asociaciones hipógenas, mientras que la calcocita fuliginosa refleja únicamente una redistribución local y cuantitativamente menor del cobre. Esto ha sido, sin embargo, suficiente para permitir la explotación provechosa de una cantidad de pequeñas minas en zonas de mineral hipógeno, de otro modo antieconómicas.

(3) Dentro de áreas limitadas, las asociaciones de sulfuros constituyentes de las zonas de calcocita maciza se ajustan a los equilibrios de fase en el sistema Cu-S, a ^{aproximadamente} 25°C, tal como lo determina Roseboom. Las interfases de reemplazo entre calcopirita hipógena o pirita y los sulfuros de cobre supergénicos presentan sin embargo, ocasionalmente, zonas restringidas de solubilizaciones de la fase sólida (ferroan)* digenítica, bornítica y calcopirítica, comparables a las descritas

*)NOTA DEL TRADUCTOR: "ferroan" no sale en los diccionarios consultados. Vendría a significar algo como "férreo"

del área de Andacollo, en la Provincia de Coquimbo. 8) Estas fases intermedias subordinadas se han formado presumiblemente durante el reemplazo supergénico y han persistido en forma metaestable sin exdisolverse en conformidad con las relaciones de fases a baja temperatura en el sistema Cu-Fe-S. 17)

(4) A lo largo de toda el área, ^{los} minerales enriquecidos han sido afectados por una oxidación posterior parcial o completa o bien, incluso, por lixiviación durante períodos de niveles descendentes de aguas freáticas. Esto ha resultado ^{común} en el desarrollo de tipos complejos de ^{minerales} minerales, formados por interpenetraciones de minerales oxidados de grano fino con inclusiones microscópicas de sulfuro de cobre, que contribuyen notoriamente a la ley ^{de} de cobre la mena. Los minerales ^{más} importantes ~~de cobre~~ de las menas con leyes económicas en la zona oxidada son la malaquita, paratacamita, crisócola y cuprita, mientras que la brocantita, azurita y el cobre nativo son ^{su} localmente importantes. El análisis por microsonda electrónica ha revelado la presencia difundida de varias ^{difundida} fases de óxidos de cobre-ferro, posiblemente nuevas, que forman interpenetraciones íntimas con óxidos hidratados de fierro. Los sulfuros, que constituyen la ^{calcocita pulverulenta} calcocita fuliginosa, han sufrido similarmente una oxidación ^{intensa} amplia en muchas minas, con la formación de tenorita, malaquita y otras fases.

(5) Las zonas principales de ^{calcocita maciza} calcocita maciza no muestran relación alguna en el espacio con niveles presentes o recientes de aguas freáticas, pero la ^{calcocita pulverulenta} calcocita fuliginosa se encuentra muy concentrada en la vecindad inmediata de tales niveles de agua y constituye claramente un fenómeno muy reciente y efímero. La formación de la ^{calcocita} calcocita fuliginosa, actualmente preservada, ha seguido invariablemente a la formación de la ^{calcocita maciza} calcocita maciza.

(6) ^{Solo una zona continua de calcocita maciza se expone en la mayor parte de las labores.} Solamente ha sido descubierta, en la mayoría de las explotaciones, generalmente superficiales, una sola zona esencialmente continua de ^{calcocita maciza} calcocita maciza, en una sección vertical de 1.000 m. Sin embargo, ^{la}

mina Dulcinea ha explotado dos zonas probablemente distintas de calcocita maciza. Estas están ahora muy fuertemente oxidadas y se encuentran separadas por ^{mina} ~~mineral~~ hipógeno oxidada, encontrándose debajo de ellas ^{mina} ~~mineral~~ hipógeno de calcopirita-pirita. En esta mina ha sido precipitada calcocita fuliginosa en la vecindad de la zona inferior de calcocita maciza y representa una tercera etapa de enriquecimiento supergénico. Estas relaciones proporcionan la mejor evidencia disponible para la existencia de por lo menos tres períodos de enriquecimiento en la región de Copiapó, aunque la zona ^{masiva} maciza superior haya sido removida por erosión en la mayor parte de esta área.

(7) La alteración supergénica de estos yacimientos minerales a nivel elevado puede haber iniciado luego después de su formación, pero ^{la} ~~la~~ ^{referencia} ~~referencia~~ más antigua en la cronología provisional de la alteración la constituye el subpaisaje de la Formación Cerro La Peineta. Poca evidencia de una alteración tan antigua puede haber sido preservada, pero hay estudios detallados en marcha acerca de la mineralogía de los yacimientos en el área del Cerro Blanco, y en otras áreas en la vecindad inmediata de los enclaves (out liers) de las volcánicas del Cerro La Peineta, en una tentativa para descubrir si algún enriquecimiento ha precedido la extrusión de estas rocas. El enriquecimiento ^{masivo} macizo superior, y posiblemente más antiguo, descubierto a una altitud de ≈ 2.000 m, en la mina Dulcinea, puede haber sido formado durante esta etapa en la historia erosional, pero se considera más probable que las fases del enriquecimiento más importante ocurrieran durante la etapa B.

(8) La zona más persistente de calcocita maciza en la región, explotada extensamente en el distrito de Cabeza de Vaca, Zapallar, Checo de Cobre y otros distritos mineros, se presenta junto a la superficie, o muy cerca a ella, del "pediplain" inferior más importante. Resulta claro que este "pediplain" truncó la zona de enriquecimiento, sin ser asociado con un marcado enriquecimiento a niveles inferiores. A lo largo de toda la región de Copiapó hay minerales enrique-

cidos de alta ley, descubiertos sobre o ~~junto a~~ superficies de "pediplain", un aspecto que ha ~~xx~~ sido de primordial importancia para operaciones de explotación minera en pequeña escala.

Es evidente que el enriquecimiento supergénico generalmente no ha sido contemporáneo con períodos de pediplanación ininterrumpida, pero probablemente haya estado relacionado con los intervalos erosionales entre estos períodos. La forma laminar, a grosso modo horizontal, de las zonas de enriquecimientos sugiere, sin embargo, que dichas zonas fueron controladas por accidentes topográficos de declives suaves; es probable que las áreas menos divididas de las superficies de ~~aplanaación~~ ^{aplanaamiento} puedan haber permitido tanto el desarrollo como la conservación de las zonas de enriquecimiento.

(9) Los períodos principales de enriquecimiento supergénico precedieron claramente el desarrollo de cañones de la etapa C, y las fases geomorfológicas más recientes (C-F) han tenido un efecto comparativamente insignificante sobre los perfiles de alteración supergénica. El corte de cañones causó un descenso marcado del nivel de agua freática en gran parte de la región y una oxidación consiguiente de las partes superiores de las zonas de enriquecimiento descubiertas. El depósito de los gruesos guijarros de agradación en los cañones elevó posteriormente los niveles de agua freática adyacentes a los valles inferiores y aparentemente ^{Produjo} resultó en la formación de la ^{más antigua} calcocita fuliginosa más antigua reconocible en una zona por encima del actual nivel de agua. Finalmente, la erosión descendente a los actuales niveles fluviales estuvo acompañada por una renovada oxidación de las asociaciones supergénicas más antiguas (y en particular de la ^{zona oxidada} calcocita fuliginosa) mientras que la ^{calcocita oxidada} calcocita fuliginosa siguió formándose en la vecindad de niveles más bajos de agua freática.

El depósito de cantidades considerables de calcocita y de sulfatos de hierro en las explotaciones más bajas de ^{las} minas, en zonas que recientemente se tornaron accesibles por medio de bombeo, indica que una apreciable cantidad de cobre ha sido transportada hacia abajo, en ~~dis~~ solución, durante los últimos diez años. Se puede suponer que

tales soluciones ricas en sulfatos están generando ahora calcoocita fuliginosa junto a nuevos niveles de agua bombeada, pero es probable que el enriquecimiento en gran escala se está realizando sólo muy lentamente bajo las actuales condiciones áridas en esta parte del Desierto de Atacama.

(10) De las observaciones arriba mencionadas resulta claro que el concepto de Segerstrom ⁹⁾ del "terreno maduro terciario" contemporáneo y de la alteración mineral supergénica no es válido para el área de Copiapó, en donde se pueden distinguir varios períodos de enriquecimiento relacionado con una topografía multicíclica. En áreas restringidas, no obstante, el enfoque de Segerstrom ~~aplicado~~ a este problema produciría coincidentemente conclusiones similares a las logradas en el presente estudio.

(11) Sobre la base de las relaciones esbozadas en la presente discusión, se pueden proponer algunas pautas de prueba para la exploración en esta área. Es probable que los yacimientos descubiertos dentro de cañones cortados durante la etapa F tengan erosionadas sus zonas de enriquecimiento y que por lo tanto tengan, generalmente, poco potencial como fuentes de minerales de alta ley. En forma similar, los depósitos erosionados durante el corte del cañón, perteneciente a la más antigua etapa C, deben ser considerados como no prometedores, si bien puedan presentarse zonas oxidadas y enriquecidas en aquellas partes en que los cañones aún se encuentran enterrados debajo de depósitos aluviales más jóvenes de la etapa D (como ser el distrito de Punta del Cobre). Los yacimientos de cobre ubicados por debajo de remanentes comparativamente no divididos del "pediplain" más bajo (como ser el distrito de Cabeza de Vaca) representan el blanco más prometedor para la búsqueda de zonas de minerales enriquecidos. Calcoocita maciza ha sido preservada ^{en estado} junto o cerca de la superficie de este "pediplain" en varias áreas, si bien la pedimentación pueda haber truncado localmente todo el perfil de alteración supergénica para descubrir el mineral hipógeno de baja ley. Los enclaves (out liers) de los "pediplains" a nivel elevado también pueden tener debajo de ellos extensas zonas

enriquecidas pero será necesario realizar un trabajo mucho mayor ~~en~~
~~xxxxxxx~~ sobre el particular para clarificar las relaciones existen-
tes entre ~~entre~~ estas superficies de planación más antiguas y los pe-
ríodos de alteración supergénica.

(12) La ^{zona de oxidación} prevalencia de minerales "mixtos", que refleja la frecuente
superposición de una oxidación posterior sobre zonas de calcocita ma-
ciza, ^{implica} no evita únicamente una estimación realista de las toneladas dis-
ponibles de minerales oxidados y enriquecidos, sino que implica que
las plantas de tratamiento de minerales en el área deben ser diseña-
das de manera que recuperen el cobre tanto de los minerales oxídicos
como de los sulfuros.

(13) La "martitización" de los minerales de magnetita constituye cla-
ramente un fenómeno supergénico, tal como lo demuestra la distribución
de la hematita en los yacimientos de Algarrobo y de Boquerón Chañar.
Los yacimientos de fierro se presentan en áreas con topografías domi-
nadas por las fases geomorfológicas recientes y generalmente junto a
los bordes de depresiones tectónicas, de manera que sus historias ero-
sionales ~~se~~ ^{han estado} hayan sido probablemente complicadas por actividad tectó-
nica. No obstante, no existe evidencia alguna que la martitización
haya estado ^{asociada} relacionada con cualquier topografía que no sea la super-
ficie actual y, en la mina Algarrobo, el límite inferior de una alte-
ración grave coincide aproximadamente con el actual nivel del agua
freática.

El examen microscópico de los minerales de Algarrobo ha demos-
trado que las zonas martitizadas, cercanas a la superficie, están for-
madas por ^{interpenetraciones} interpenetraciones de grano grueso de hematita y magnetita,
mientras que las zonas alteradas inferiores están caracterizadas por
interpenetraciones de grano muy fino de ambos óxidos, en las cuales
la hematita forma laminillas ^{microscópicas} orientadas microscópicamente en los
granos de magnetita. Si las interpenetraciones laminares se compor-
taran como una sola fase magnética durante la concentración, tal como
parece ser probable, estas relaciones sugieren que la recuperación
mejorará notoriamente en las zonas martitizadas más profundas de los

macizos de minerales. La delimitación del límite probablemente irregular entre los dos tipos texturales de mineral alterado puede constituir un factor significativo en el planeamiento de una disposición a tajo abierto y en lo referente a la evaluación de otros yacimientos martitizados.

Agradecimientos

El trabajo en el terreno, en Chile, es financiado por el Ministerio de Desarrollo de Ultramar del Reino Unido y el Sr. E. H. Becraft del Ministerio ha proporcionado ayuda generosa para la superación de problemas logísticos. Los autores agradecen la continua cooperación del Sr. Carlos Ruiz Fuller, Director del Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, que nos ha alentado constantemente y ha puesto a nuestra disposición los recursos del Instituto. El Sr. F. Ortiz, de la oficina del Instituto en Copiapó, ha ~~dado~~ brindado mucha hospitalidad y ayuda práctica y, junto con el Sr. M. Zentilli, ha contribuido al progreso del trabajo a través de discusiones en el terreno. El trabajo en el terreno no podría haber sido realizado sin la ayuda de los Sres. R. Morales, A. Cuevas y O. Faría del Instituto. Administradores de minas y mineros individuales, demasiado numerosos para ser mencionados, nos proporcionaron acceso ilimitado a sus minas y prestaron su asistencia en la recolección de las muestras representativas.

El Dr. S.H. Shaw, Director de Overseas Geological Surveys (ahora el Institute of Geological Sciences) ha patrocinado con energía el proyecto desde sus comienzos y ha seguido proporcionando consejo y medios, mientras que el Dr. N.J. Snelling, de IGS Age Determination Unit ha sido tan amable de empezar a trabajar con nuestras muestras. Entre aquellos que en el University College han alentado y contribuido a la realización del trabajo, deberían ser mencionados los Drs. M.K. Wells, R.W.R. Rutland, A.J. Lloyd y D. Sutor. Los fondos para la adquisición de fotografías aéreas fueron donados por el University of London Central Research Fund.

- 20 -

Ante todo, sin embargo, estamos en deuda con el fallecido Professor S.E. Hollingworth, cuya energía y visión proveyeron el empuje necesario para ésta y anteriores expediciones del University College al norte de Chile y quien dirigió hábilmente, bajo condiciones difíciles, el año inicial de este proyecto.

Referencias

NOTA DEL TRADUCTOR: Copiar bibliografía.