

# GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS CUPRIFEROS CHILENOS

Por  
Carlos RUIZ Fuller

## INTRODUCCION



**CHILE** ES probablemente el área del mundo que presenta la mineralización cuprífera más intensa, conteniendo, como país, los mayores recursos de este metal.

Una de las razones que sin duda explican, en parte, la gran abundancia de concentraciones cupríferas en nuestro territorio, radica en las características de la evolución que ha experimentado este sector de la corteza terrestre hasta llegar a conformar su actual constitución geológica. Sin embargo, aparte de esta razón de historia geológica evolutiva, es necesario postular causas subcorticales para explicar esta abundancia. Vale decir, parece muy probable que en la región del "manto" subyacente a la corteza de nuestro país, ha habido y hay una concentración de cobre anómala que explicaría la abundancia de este metal, tanto en extensión como en intensidad de mineralización.

La mayor intensidad de mineralización se expresa cuantitativamente en las cifras

siguientes de leyes medias de los yacimientos de cobre porfídico de varias regiones del mundo ("Grade and Tonnage Relationships Among Copper Deposits" de los autores D. Singer, D. Cox y L. Drew):

—Sudamérica . . . . .	0,99%
—Estados Unidos y México . . . . .	0,59%
—Pacífico Sudoccidental . . . . .	0,52%
—Canadá . . . . .	0,49%

La región Sudamérica comprende los yacimientos de Chile y Perú, estos últimos de leyes más bajas, de modo que para los yacimientos chilenos la ley media sería aún más alta.

Esta mayor abundancia debe manifestarse por otra parte en los procesos ígneos, tanto efusivos como intrusivos, cuya derivación última se encuentra precisamente en los materiales que constituyen el "manto". Cabe mencionar en apoyo de esta hipótesis que, en las rocas efusivas andesíticas, especialmente en las Mesozoicas y Cenozoicas se presentan valores geoquímicos de cobre anómalamen-

te altos (en promedio superior a 200 ppm), en comparación con otras regiones del mundo.

La mineralización cuprífera se encuentra distribuida en Chile desde las rocas más antiguas del Precámbrico o Paleozoico inferior (yacimientos estratiformes, probablemente singenéticos, en esquistos metamórficos) hasta las más modernas del volcanismo actual (yacimientos exhalativos de cobre y azufre en el cordón andesítico de Aucanquilcha). Sin embargo puede notarse que la intensidad de la mineralización cuprífera va aumentando desde los períodos geológicos más antiguos a los más jóvenes, alcanzando aparentemente un clímax durante el Terciario Inferior a Medio con la formación de la mayoría de los grandes yacimientos de cobre porfídico.

## TIPOS DE YACIMIENTOS CUPRIFEROS CHILENOS

La mineralización cuprífera chilena se presenta en lo más variados tipos de yacimientos, tanto desde el punto de vista morfológico como genético. Por razones de mejor comprensión, se hace una relación muy sintética de ellos, agrupándolos de acuerdo a tipos morfológicos.

### Yacimientos Vetiformes

La mayor parte de la actividad minera cuprífera chilena se inició históricamente con la explotación de yacimientos vetiformes, principalmente en las provincias de Coquimbo y Atacama. Estos yacimientos constituyeron hasta comienzos del presente siglo la mayor fuente de producción de cobre del país, alcanzando su máxima importancia en la mitad del siglo XIX, cuando Chile llegó a ser el principal productor de cobre del mundo. Durante esa época la producción provenía casi exclusivamente de numerosas fundiciones pequeñas, que beneficiaban minerales escogidos, extraídos fundamentalmente de yacimientos vetiformes, especialmente de las minas de Tamaya, Carrizal Alto, La Higuera, Las Animas, Quebradita, Brillador, Dulcinea, Gatico, etc.

En la actualidad estos yacimientos se encuentran prácticamente inactivos. Una segunda generación de yacimientos vetiformes entraron en actividad a fines del siglo pasado y se han mantenido en producción durante el presente siglo, como es el caso de las minas de Tocopilla, Collaguasi, Delirio de Punitaqui, La Africana, etc., pero ellos también o están agotados o están en vías de serlo y su importancia como fuentes cupríferas, al igual que en el resto del mundo, se ha hecho casi despreciable. Esta situación se debe por una parte al agotamiento de los minerales de alta ley, y por otra al desarrollo de los yacimientos de cobre porfídico y de los yacimientos estratiformes.

La mayoría de los yacimientos vetiformes de cobre se encuentran en rocas intrusivas de composición variable entre gabrodiorita y granodiorita y cuya edad varía entre el Jurásico y el Cretáceo. Otros tienen como roca huésped rocas volcánicas principalmente andesíticas. Las vetas más importantes tienen longitudes que varían entre varios centenares de metros hasta más de 4.000 m. (Tamaya) y las profundidades alcanzadas varían entre algunos centenares de metros hasta un máximo de 1.000 m. (mina Dulcinea); el espesor de las vetas variaba en la zona de los clavos (ore shoots) entre 1 m. y un máximo de 15 m. Los minerales cupríferos primarios principales consistían en calcopirita y bornita, y solamente en un yacimiento importante (Dulcinea) los procesos de enriquecimiento secundario alcanzaron gran desarrollo. En esta mina el enriquecimiento de calcosina alcanzó hasta una profundidad de 365 m. En los distritos de mayor actividad del siglo pasado, la explotación se concentró principalmente en los minerales primarios, notándose eso sí una definida zonación primaria, que consistió en Tamaya en el paso desde una zona superior de bornita, que se extendió por 400 m. verticales desde la superficie, sucedida hacia abajo por una zona de calcopirita de 200 m. y, finalmente, por un sector pirítico estéril. En Carrizal Alto, en las partes superiores de las vetas predominó la calcopirita, mientras que a mayor profundidad se manifiesta una disminución de ella, siendo sustituida por abundante magnetopirita (pirrotina).

## Yacimientos Estratiformes

Los yacimientos estratiformes de cobre son muy numerosos en el país y su importancia relativa, como fuente de producción de cobre, ha ido creciendo hasta alcanzar en la actualidad el segundo lugar después de los yacimientos de cobre porfídico.

El aspecto más específico de estos yacimientos es que corresponden a cuerpos mineralizados tabulares, en general de posición subhorizontal, que están limitados por uno o más planos de estratificación y que son en su mayoría paralelos a dichos planos.

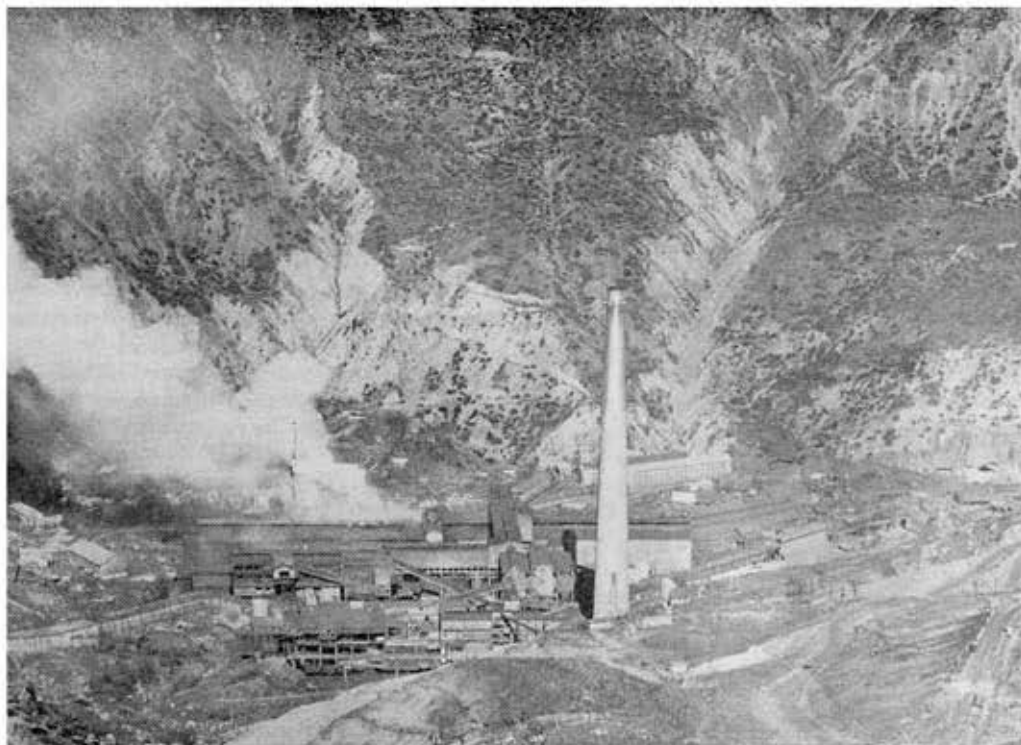
Los yacimientos de esta morfología pueden dividirse claramente en dos grupos principales. Los más numerosos, aunque no los más importantes en la actualidad, se relacionan genéticamente con el

desarrollo del Geosinclinal Andino (\*) Otros yacimientos de este tipo son posteriores al desarrollo mencionado. Son de origen secundario, proviniendo el cobre que se encuentra principalmente en forma de minerales oxidados, del movimiento lateral de soluciones derivadas de la oxidación y lixiviación de yacimientos primarios preexistentes.

### a) Yacimientos secundarios

Los yacimientos secundarios se presentan principalmente en gravas provenientes

(\*) Corresponde a los fenómenos de vulcanismo y sedimentación, tanto marina como continental, y de plutonismo intrusivo que ocurrieron en el país en el lapso comprendido entre el Mesozoico y el Terciario Inferior, en una cuenca elongada marina y continental, que ocupó la mayor parte del territorio nacional.



Vista general de la Fundición de Caletones.

tes de corrientes de barro y también en rocas alteradas subyacentes a estos depósitos. En las gravas, la mineralización está presente en su mayor parte en la matriz en forma de atacamita y crisocola, y en las rocas alteradas subyacentes, en venillas y diseminada, en forma de atacamita, crisocola, copper pitch (crisocola negra) y copper wad. Las rocas sedimentarias en que se encuentra la mineralización son del Terciario Superior (Mioceno o Plioceno), por lo cual la mineralización sería de esa edad o más joven.

Los yacimientos más importantes de este tipo son los de Exótica, Sagasca, Huiniquinta y El Tesoro, ubicados en las provincias de Antofagasta y Tarapacá (\*\*). El yacimiento Exótica se encuentra a unos 3 kms. al sur del cuerpo mineralizado de Chuquicamata y tiene una extensión conocida de 2,2 kms. de largo, por 1,2 km. de ancho medio y espesor medio de 50 mts.; sin embargo, se desconoce su extensión al norte, porque queda cubierto por los rípios de Chuquicamata, así como también se ignora su extensión al sur. En el extremo sur del yacimiento de Chuquicamata existe un afloramiento de cobre exótico que es muy probable tenga continuidad con el cuerpo de Exótica, lo que indica una casi seguridad que la mineralización cuprífera derivó de la oxidación y lixiviación del yacimiento de Chuquicamata. Los yacimientos de Sagasca y Huiniquinta son muy similares aunque su tamaño reconocido es mucho menor; sin embargo, para ambos no se han descubiertos aún los yacimientos primarios de los cuales derivaron las soluciones cupríferas. En el caso de Sagasca, el yacimiento original se encuentra sepultado bajo una cubierta posmineral de rocas volcánicas y sedimentarias.

## b) Yacimientos primarios

Los yacimientos cupríferos estratiformes de origen primario constituyen también cuerpos aproximadamente tabulares limitados por uno o dos planos de estratificación. Su espesor varía entre 1 m. y

varias decenas de metros y sus extensiones laterales conocidas varían entre cientos de metros y varios kilómetros, aunque presentando en este último caso, soluciones de continuidad. La parte de los yacimientos en actual explotación tienen leyes medias comprendidas entre 1,8 y 3% de cobre y constituyen el aporte principal a la producción de la pequeña y mediana minerías de las provincias de Aconcagua, Coquimbo y Antofagasta.

La mayoría de estos yacimientos están contenidos en rocas volcánicas, sean lavas o sedimentos volcánicos. En otros, la roca huésped consiste en calizas marinas o lutitas continentales intercaladas con rocas volcánicas. Las rocas volcánicas, que contienen la mayoría de los depósitos estratificados, son lavas y brechas andesíticas, en las cuales la mayor parte de la mineralización se concentra en los niveles altos amigdaloidales de las coladas y también como diseminación fina en la masa fundamental de las lavas. Algunos depósitos se presentan en rocas volcánicas sedimentarias, en que los fragmentos son de lava andesítica de composición uniforme y los minerales cupríferos se presentan como fina diseminación en los fragmentos, en el cemento calcítico o en ambos. Calizas marinas de color gris negro intercaladas en rocas volcánicas, contienen también mineralización de sulfuros de cobre, finamente diseminados, constituyendo algunos cuerpos de valor comercial; estas rocas representan episodios de sedimentación marina en aguas someras y en ambiente predominantemente volcánico. Finalmente, algunos yacimientos consisten en capas de lutitas carbonáceas intercaladas en secuencias volcánicas en las que se presenta diseminación fina, bandeada, de sulfuro de cobre; el material clástico ha sido depositado en pequeñas lagunas originadas durante períodos de quietud volcánica. Los minerales cupríferos que se presentan en los yacimientos enumerados son principalmente bornita, calcopirita y calcosina. Los minerales de ganga son escasos y consisten en pirita, calcita y cuarzo.

Los yacimientos que se describen están estrechamente relacionados con los episodios volcánicos que ocurrieron durante la evolución del Geosinclinal Andino, desarrollado durante el lapso Jurásico Inferior-Terciario Inferior, cuando la cuen-

(\*\*) Los dos yacimientos principales en actual explotación, Exótica y Sagasca, producen en la actualidad unas 45.000 tons. de cobre fino anuales, lo que representa un 5% de la producción nacional.



ca correspondiente a dicho geosinclinal ocupaba la mayor parte del territorio chileno al norte del paralelo 41° S. Las series volcánicas son de una extraordinaria extensión areal y pueden seguirse longitudinalmente por varios centenares de kilómetros.

Los yacimientos más antiguos son de edad Jurásica y están incluidos en una unidad volcánica de varios miles de metros de espesor, constituida principalmente por la acumulación sucesiva de coladas andesíticas, distribuida en la región de la costa, al norte y al sur de la ciudad de Antofagasta. El yacimiento más típico de este grupo es el de Buena Esperanza, ubicado 10 kms. al sur de Tocopilla, el que ha producido cerca de 3 millones de toneladas de mineral de una ley media de 3% de cobre. La mineralización comercial se presenta principalmente en la mitad superior de la parte alta y amigdaloidal de varias de las coladas andesíticas, habiéndose reconocido 28 de tales estratos mineralizados cuyos espesores varían entre 2 y 25 mts.; la parte basal compacta de las coladas está débilmente mineralizada (0,1 a 0,4% de cobre). También se presenta mineralización cuprífera relacionada con fracturas o con brechas tectónicas. Los principales minerales primarios presentes son calcosina y bornita.

Al norte de Santiago, en la provincia de Aconcagua, existe una gran concentración de yacimientos estratiformes de cobre sulfurado. La mayor parte de ellos están asociados con una secuencia de lavas andesíticas y calizas marinas interestratificadas cuya edad corresponde a la parte media del Cretáceo Inferior (formación Lo Prado). Como en las lavas jurásicas, los cuerpos mineralizados se concentran principalmente en la parte alta amigdaloidal de las coladas; en las calizas la mineralización se presenta como una fina diseminación de sulfuro. La mina Guayacán, ubicada a 110 kms. al NNW de Santiago, es la más característica de un grupo de depósitos cupríferos que se presenta en el mismo horizonte estratigráfico en una franja de dirección norte-sur de 5 kms. de largo. La mineralización está presente en una colada andesítica y en la base de rocas sedimentarias marinas sobrepuestas. En Guayacán, la parte mejor mineralizada de hasta 3

mts. de espesor, se encuentra en la parte alta de la colada de andesita. La mineralización consiste predominantemente de bornita, con cantidades menores de calcopirita y calcosina; ella se presenta como granos finos diseminados en la masa fundamental de la andesita y también como relleno de vesículas.

Durante la época correspondiente al Cretáceo Inferior más joven, en que la depositación en la cuenca geosinclinal consistió en rocas sedimentarias y volcánicas continentales, se formaron también varios yacimientos estratiformes de cobre de variadas características. En la misma provincia de Aconcagua, la mina El Salado, por ejemplo, consiste en varios cuerpos mineralizados, localizados en las partes altas de sucesivas coladas andesíticas, duplicando el marco geológico del yacimiento Buena Esperanza; la mina Veta Negra consiste en una capa de lutita negra mineralizada por calcosina y bornita principalmente. El distrito cuprífero de Talcuna, ubicado en la provincia de Coquimbo, consiste en un cuerpo mineralizado estratiforme (de hasta 15 mts. de espesor) presente en una secuencia compuesta por una alternación de areniscas volcánicas y brechas sedimentarias con clastos andesíticos, cuya edad corresponde también a la parte superior del Cretáceo Inferior; los minerales cupríferos restringidos al cemento calcítico de los clastos son principalmente bornita, calcopirita, calcosina y galena.

Entre los yacimientos estratiformes más jóvenes, relacionados con el desarrollo del Geosinclinal Andino, puede citarse el de Cerro Negro, localizado en rocas volcánicas del Cretáceo Superior. La roca huésped es una brecha de fragmentos de lavas porfídicas andesíticas, angulares a subredondeados y sin matriz. La unidad de brecha es un cuerpo lenticular intercalado en areniscas volcánicas, cuyo espesor máximo es de 200 mts., pero que termina abruptamente hacia el W. Los cuerpos mineralizados, ubicados dentro del cuerpo de brecha, alcanzan un espesor máximo de hasta 30 m. y la ley media es 2,5% de cobre.

Fuera de ellos la brecha contiene 0,1 a 0,2% de cobre. Los minerales cupríferos están presentes principalmente como una fina diseminación en la masa fundamental de los clastos andesíticos y consis-

te en bornita, calcopirita, calcosina, blenda, galena y pirita; no existen minerales de ganga y al igual que en todos los yacimientos de este grupo no existe alteración hidrotermal que pueda atribuirse a procesos mineralizantes.

Un tipo diferente de yacimientos estratiformes de cobre se presenta en la región de Copiapó en ignimbritas riolíticas que en general forman la base de la secuencia volcánica y sedimentaria más joven (Terciario Inferior) del Geosinclinal Andino. Las minas Amolanas y Jardín caracterizan este grupo; en ellas la mineralización consiste en calcosina, bornita y calcopirita, la que se concentra en la parte superior de la capa ignimbrítica.

Otros yacimientos cupríferos estrechamente relacionados con rocas volcánicas o hipabisales andesíticas o traquíticas, originadas durante el desarrollo del Geosinclinal Andino, aunque no son estratiformes, presentan, en muchos aspectos, afinidades con los yacimientos descritos más arriba. Entre ellos se cuentan dos de los más importantes que corresponden al sector de la Mediana Minería: El Soldado y Lo Aguirre.

El yacimiento El Soldado se encuentra a 65 kms. al NE de Valparaíso y está ubicado en la formación Lo Prado ya mencionada, la que en esta región es de un espesor cercano a 500 mts., y está constituida casi enteramente por rocas ígneas, efusivas e hipabisales. La mineralización consiste en una disseminación fina de bornita, calcopirita y pirita, en andesita gris y en una roca designada como pórfido traquítico. El yacimiento está constituido por numerosos cuerpos mineralizados de formas irregulares aunque con ejes mayores verticales, que se distribuyen en dirección norte-sur por más de 1 km., localizados siempre en un mismo nivel estratigráfico de rocas volcánicas las que inclinan unos 25° hacia el E. Del yacimiento se han extraído aproximadamente unas 16 millones de toneladas de una ley algo superior a 2% de cobre.

En el yacimiento Lo Aguirre, ubicado 15 kms. al oeste de Santiago, la roca

huésped consiste en lavas y lavas brechosas de andesita porfídica, que pertenecen a la parte alta del Cretáceo Inferior (la misma serie de la mina El Salado). El cuerpo mineralizado, muy irregular, aparece discordante con respecto a la posición estructural de las lavas andesíticas y está constituido por una disseminación fina de bornita y calcopirita.

### Génesis de los yacimientos estratiformes primarios

Desde un punto de vista genético parece muy probable que todos los yacimientos primarios descritos, estratiformes o irregulares, sean de origen volcánico, hipótesis sostenida por el extraordinariamente alto contenido geoquímico de cobre (200 a 300 g/t.) de las andesitas chilenas. Otras razones que abonan esta interpretación son: la presencia de la mayor parte de los minerales de cobre como partículas separadas, disseminadas en la masa fundamental de las lavas y la ausencia de alteración hidrotermal relacionada con la mineralización; ello indicaría que los sulfuros de cobre estaban presentes en el magma andesítico como una fase dispersa de pequeñas gotas que cristalizaron simultáneamente con las lavas. Además, puede mencionarse la estrecha asociación regional de estos yacimientos con las rocas volcánicas, su falta de relación con batolitos graníticos y la ausencia de control estructural de la mineralización principal.

Como conclusión general puede decirse que los yacimientos de origen volcánico en la actualidad son objeto de una explotación activa, que en el corto y mediano plazos se acrecentará su importancia como fuente nacional de producción de cobre y que no debe dejar de considerarse un eventual papel mucho más importante de la mineralización cuprífera volcánica en el largo plazo, cuando la disminución de las leyes de corte, llegue a niveles que puedan hacer comercialmente explotables volúmenes mucho mayores de andesitas mineralizadas