

DISTRIBUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBONATOS EN MANTOVERDE, PROVINCIA DE CHAÑARAL, TERCERA REGIÓN, CHILE

ASTUDILLO C.

Anglo American Chile – Div. Mantoverde. Chañarillo 840 Copiapó. Castudillo@anglochile.cl

1 GENERALIDADES

El yacimiento Mantoverde es el de mayor relevancia en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Chañaral. Es del tipo brechas de óxidos de hierro – cobre – oro, controladas por la Falla Mantoverde. Es parte del antiguo Distrito Los Pozos, ubicado a unos 100 km al norte en línea recta de la ciudad de Copiapó, y a 23 km al sur de la localidad El Salado, Tercera Región de Atacama – Chile, a una altitud promedio de 900 m s.n.m. (Fig. 1).

La roca huésped de la mineralización de Mantoverde está constituida, principalmente, por rocas andesíticas de la Formación La Negra de edad Jurásico Medio-Superior, intruidas por plutones dioríticos, monzodioríticos y granodioríticos del Jurásico Superior - Cretácico Inferior (107 a 153 Ma) (Lara y Godoy, 1998); (Godoy y Lara, 1998) y (Dallmayer *et al.*, 1996). Estas rocas mesozoicas conforman un bloque controlado por fallas N-S asignadas al segmento El Salado de la Zona Falla de Atacama (ZFA). Entre dos ramas de este segmento se encuentra la Falla Mantoverde (FMV), a lo largo de la cual se concentra la mayoría de los recursos geológicos del Distrito. Esta estructura se extiende 14 km con actitud N 15° 20' W/50° a 60° E.

La mineralización de oxidados de cobre está representada por crisocola, brocantita, malaquita, atacamita y limonitas cupríferas (“almagres”), como diseminación y relleno de fracturas, extendiéndose la zona de oxidación hasta 300 m de profundidad. Tiene como límite inferior, la cota 800 m s. n. m. y es más profunda en el dominio de la FMV. El paso a los sulfuros primarios está marcado, por un delgado horizonte de cobre nativo y pátinas de calcosina sobre calcopirita. La mineralización primaria consiste en calcopirita, pirita y de manera muy subordinada bornita y pirrotina. La calcopirita y pirita ocurren asociadas a specularita, así como a clorita y alteración potásica (Astudillo, 2001; Zamora y Castillo, 2001 y López, 2002). Edades K – Ar de alteración en sericita indican 117 ± 3 y 121 ± 3 Ma para el evento principal de mineralización de cobre (Vila et al. 1996).

Este trabajo responde a la necesidad de estudiar la distribución de los carbonatos en Mantoverde y su relación con la mineralización oxidada de cobre. Si esta ganga ocurre en concentraciones altas que no pueda manejar el proceso de beneficio, los oxidados de cobre son difíciles de explotar, por el alto consumo de ácido sulfúrico y otros problemas operacionales. Incluso reservas mineras con alta ley de carbonato, pueden ser consideradas como estéril.

2 CARACTERIZACION Y DISTRIBUCIÓN DE LOS CARBONATOS EN MANTOVERDE

En la actualidad los recursos geológicos de División Mantoverde se encuentran distribuidos en 3 cuerpos mineralizados de oxidados de cobre denominados de norte a sur como Manto Ruso, Mantoverde y Mantoverde Sur. Morfológicamente los sectores mineralizados en explotación se presentan como brechas y mantos (Manto Ruso), cuerpos de brechas Tectónicas, brechas tabulares y stockwork de specularita (Mantoverde). Brechas tectónicas, cuerpos de brechas irregulares y stockwork de magnetita (Mantoverde Sur). La alteración predominante de las rocas de estos sectores se encuentra representada por cloritización, alteración potásica, silicificación y sericitización.

Además de la cantidad y calidad de los oxidados de cobre que pueda tener un determinado sector, es necesario considerar la ocurrencia y distribución de las especies minerales como de carbonato que presente esta mena, ya que si este se encuentra en abundancia, los oxidados de cobre no se pueden beneficiar de explotar con la tecnología disponible.

La calcita, después de la specularita y magnetita, es la ganga más importante en el distrito. En superficie, la calcita se concentra principalmente en los sectores norte y sur de la mina Mantoverde, donde los cuerpos mineralizados pierden gradualmente consistencia. En profundidad cercano al techo de sulfuros, la presencia de carbonatos sufre un importante aumento en los tres cuerpos mineralizados de Mantoverde. Brecha Tectónica (BT), Brecha Hidrotermal (BH) y Zona de Transición (ZT). (Fig.2).

En Mantoverde, los carbonatos ocurren en todas las unidades geológicas, pero se concentran principalmente en la Brecha Tectónica y en la Brecha Verde (roca estéril). La ocurrencia más importante de carbonatos en la BT es en oquedades y/o rellenando fracturas o conformando guías y vetas de espesores que varían desde centímetros a 2 metros, con orientaciones y disposiciones diferentes y, con mineralización de cobre, formando incluso zonas de vetilleo polidireccional.

La especie principal que ocurre en estas unidades es calcita de color blanco lechoso y brillo cristalino, la que se presenta rellenando diaclasas de espesores entre 1 a 10 cm. La siderita es cuantitativamente subordinada y ocurre en forma muy aislada. Los carbonatos de cobre como la malaquita, ocurren en menor proporción que los oxidados como la crisocola y brocantita.

En las proximidades de la Zona de Falla Mantoverde, hay una variedad de calcita de color pardo oscuro que presenta contaminación de limonitas y hábito en rosetas. Esta variedad ocurre, formando parte del relleno de oquedades y con espesores no superiores a los 5 cm. En la parte norte y sur fuera de los límites del contorno del rajo final de Mina Mantoverde, existen vetas de 1 a 2 m de potencia y corridas de 10 a 40 m formadas por este tipo de calcita. También se observan a lo largo de la traza de la FMV y en la ZFA.

En la parte norte del yacimiento, fuera del límite rajo final, y en las inmediaciones de la traza de la FMV, aflora gran cantidad de calcita con siderita subordinada en vetas o en la matriz y cemento de los clastos y fragmentos de la roca de caja.

Por otro lado, se aprecia en sondajes, que en profundidad en la mina Mantoverde, la calcita aumenta en forma homogénea en los tres cuerpos minerales definidos en Mantoverde. Los sondajes que han atravesado la zona de oxidación muestran un aumento importante de carbonatos, expresado principalmente por vetas de calcitas. En estos sondajes, la calcita se manifiesta como cúmulos,

vetillas y disseminación fina. En algunos casos, acompañan a cuerpos de especularita y también aparecen junto a magnetita.

En superficie, en general en las tres unidades minerales en donde están presentes vetas de calcita, estas se asocian a jarosita, en menor expresión a sílice, siderita, oxidados de cobre como crisocola, brocantita y en menor ocurrencia con malaquita.

La calcita se presenta en forma de cristales romboédricos, aunque también son frecuentes los cristales prismáticos. En algunos casos se aprecia calcita recristalizada en íntima relación con crisocola, brocantita, malaquita y puntualmente con atacamita. En otras muestras se observó acompañando limonitas cupríferas (“almagres”) y jarosita.

Cornejo y Matthew (1999); Cornejo *et al.* 2000 y Astudillo (2001) observan microscópicamente vetillas de calcita tardía, sobrecrecida en otras de feldespato potásico y clorita. En este caso, la calcita es bastante común y ocurre tanto como producto de reemplazo de plagioclasas y minerales máficos alterados a clorita, como relleno de intersticios y propagación de capilares (0.1 - 0.2 mm de ancho) con trazas de especularita y brocantita.

Al microscopio se observa que la calcita se forma guías que son posteriores a las venillas de feldespato potásico, brocantita y clorita. En otros, se observa que la calcita corresponde al componente más abundante y forma guías y ramificaciones laterales (0.2 - 0.5 mm) de las venillas anteriores, donde aún se observa un desarrollo de “halos” con clorita y feldespato (Astudillo, 2001).

En la zona de los sulfuros primarios, se observa que la calcita suele estar acompañada por calcopirita y, en menor proporción, por pirita y escasa pirrotina.

Por otro lado, la calcita puede representar una guía en la búsqueda de mineralización cobre, ya que existe la posibilidad de que esté acompañada de mineralización de cobre.

Las zonas de altas leyes de carbonato se concentran principalmente en el bloque yacente de la Falla Mantoverde (Brecha Tectónica o Manto Verde), en contacto con la zona de sulfuros y en la parte norte del depósito (Fig. 3, 4 y 5). Lo anterior coincide con la geología actual del distrito donde se observa una profundización de la mineralización de cobre hacia el norte y una mayor exposición hacia el sur.

3 HIPOTESIS DEL ORIGEN DE LOS CARBONATOS EN LA MINA MANTOVERDE

Los minerales carbonatados se disuelven o depositan en respuesta a los cambios en la temperatura, en la presión, el pH, P_{CO_2} , estado de oxidación y la salinidad. Por esto la carbonatación / descarbonatación es el resultado de la insolubilidad de los carbonatos en contraste con la solubilidad de los bicarbonatos (Rimstidt 1997).

En ambientes carbonatados, bajo condiciones de alteración hidrotermal tardía, de baja temperatura, los carbonatos pueden ser considerados como minerales de neoformación derivados de la alteración de minerales de calcio en rocas ígneas, como ocurre, en algunos casos, con los feldespatos, piroxenos y anfíboles de estas rocas. Es decir, se forman por la acción de aguas carbonatadas circulantes, sometidas a procesos de movilización, los cuales se depositan en sitios favorables.

En la unidad Brecha Tectónica se observa gran cantidad de oquedades, las que están rellenas parcialmente por carbonatos recristalizados, asociados localmente con malaquitas, limonitas y vetillas de sílice.

Las soluciones carbonatadas, en general, presentan alta movilidad. Ellas migran hacia la superficie depositándose en los espacios abiertos y planos de debilidad estructural, generando incluso brechas de calcita en los cuales estos minerales son la matriz de los clastos de la roca de caja. Ejemplos de lo anterior, se observan principalmente en el sector norte y sur de la mina, en el cuerpo Manto Verde (Brecha Tectónica) y en menor medida en el Manto Atacama (Brecha Hidrotermal de Especlarita) en el sector norte.

Por otro lado, el agua meteórica puede estar cargada de CO₂ y puede disolver los carbonatos pre-existentes, transformándolos en bicarbonatos, los que posteriormente pueden precipitar en espacios abiertos, oquedades, produciendo nuevas acumulaciones de carbonatos, generalmente constituidos por calcita blanda con límites difusos. Este sería uno de los posibles orígenes de gran parte del carbonato asociado con las zonas de oxidación de cobre someras de Mantoverde.

En las inmediaciones de Mantoverde, al norte de la mina y al sur de ésta, se desarrollan brechas de calcita - siderita en superficie (Robles et al., 1996; Castillo, 1998; Díaz, 2000 y Astudillo, 2001). Lo más probable, es que gran parte de este carbonato superficial, se haya acumulado por procesos secundarios, como recristalización, reemplazamiento y no se descarta la posibilidad de que este carbonato sea de origen de una paleovertiente.

Una vez precipitados, los carbonatos pueden sufrir recristalización que se manifiesta en cristales aciculares entrelazados que pueden cristalizar como masas micríticas finas, cristales en hábito de estrella o con textura radial fibrosa. En el caso de reemplazo este se puede dar por la sustitución de silicatos por calcita. El pH alcalino de estas zonas provoca una desestabilización del cuarzo y otros silicatos (especialmente feldespatos y micas) y su sustitución por calcita, debido a la tendencia opuesta en solubilidad del silicio y los carbonatos en función del pH.

Este proceso requiere altos valores de pH que se presentan sólo durante cortos períodos. Requiere una alta concentración de carbonatos y favorecido por la presencia de granos gruesos de carbonatos.

Los dos procesos detallados anteriormente, pueden haber sido los causantes de las grandes acumulaciones de carbonatos en los sectores norte y sur. Debido a la acción de las aguas meteóricas descendentes se habrían removilizado desde sectores más profundos, a través de debilidades estructurales como fallas y diaclasas, provocando que la roca se fragmente en una serie de piezas separadas unas de la otra, pero que generalmente, conserva la forma original.

En el sector de Manto Ruso, Orrego y Zamora, (1991), describen calcita como facies póstuma de mineralización, al igual que en Mantoverde. Mencionan que junto a otras guías de exploración en la búsqueda de nuevos recursos de cobre, se deben considerar la presencia de vetas, vetillas y brechas de calcita con evidencias de oxidados de cobre.

Estudios petrográficos y calcográficos realizados por Cornejo y Matthew (1999); Cornejo *et al.* 2000 y López (2002) en muestras de mena hipógena de Mantoverde, confirman dos etapas principales de

mineralización cuprífera, cada una asociada a un óxido de hierro distinto. Las asociaciones de alteración hidrotermal reconocidas son una etapa temprana de alteración potásica, una etapa mineralizadora de cobre con magnetita, una segunda etapa de cobre con hematita y finalmente una etapa tardía de calcita, cuarzo y cobre.

4 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo observado, existen tres tipos de carbonatos que, en orden de ocurrencia, son calcita, subordinadamente siderita y localmente, carbonatos de cobre como malaquita.

En la zona mineralizada oxidada de cobre, la calcita, después de la specularita y magnetita, es la ganga más importante en el distrito. En superficie, el carbonato se concentra principalmente en los sectores norte y sur donde los cuerpos mineralizados pierden gradualmente consistencia. En profundidad, cercano al techo de los sulfuros, la presencia de carbonatos sufre un importante y homogéneo aumento en los cuerpos mineralizados. Lo anterior coincide con la geología actual del distrito donde se observa una profundización de la mineralización de cobre hacia el norte y una mayor exposición hacia el sur.

La distribución de las leyes altas de carbonatos es distinta a las leyes altas de cobre, principalmente en el cuerpos mineral Brecha Hidrotermal. Lo anterior, es demostrado porque se observa que la distribución de los oxidados de cobre es irregular en sentido transversal y longitudinal a la FMV, sin embargo, se puede observar cierta disminución de leyes en sentido vertical, al aproximarse al techo de los sulfuros. La disminución de leyes es notoria a medida que aumenta la distancia desde la FMV, tanto hacia el este, como al oeste. En cambio los carbonatos en los tres cuerpos minerales tienden a concentrarse principalmente en el sector norte y en menor medida en el sur de la mina.

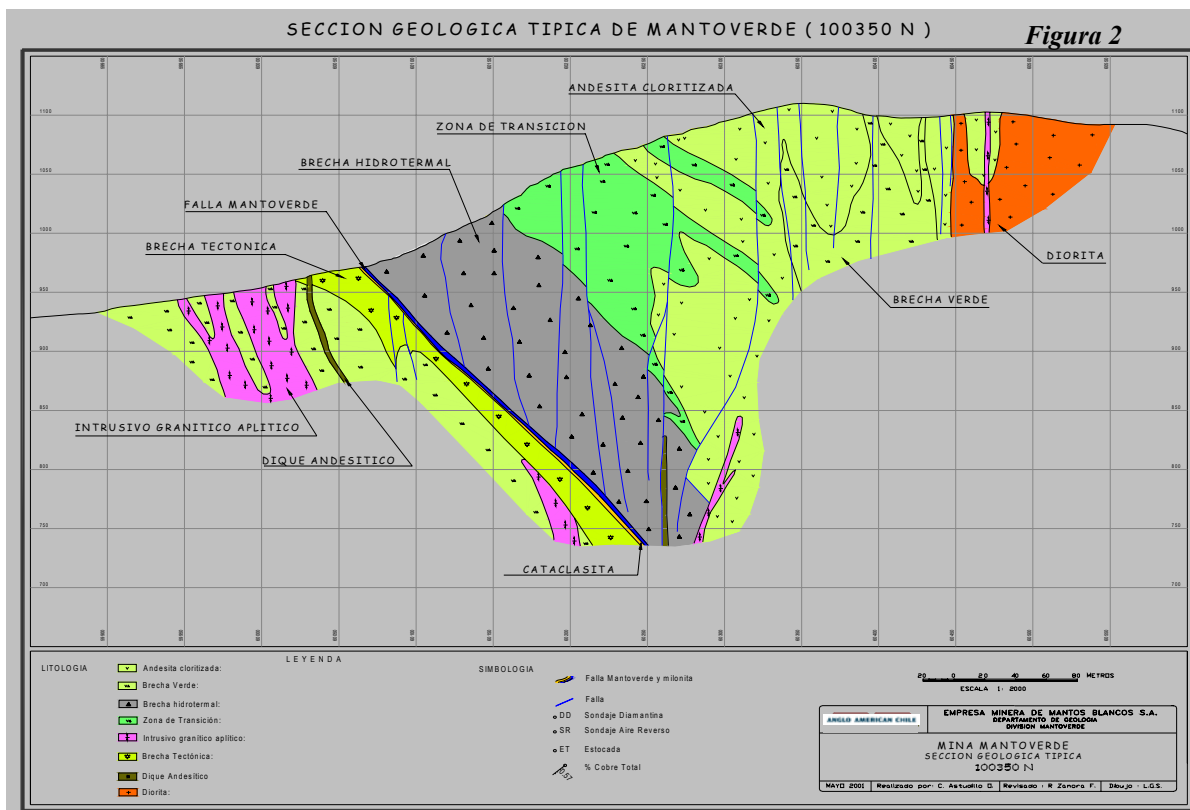
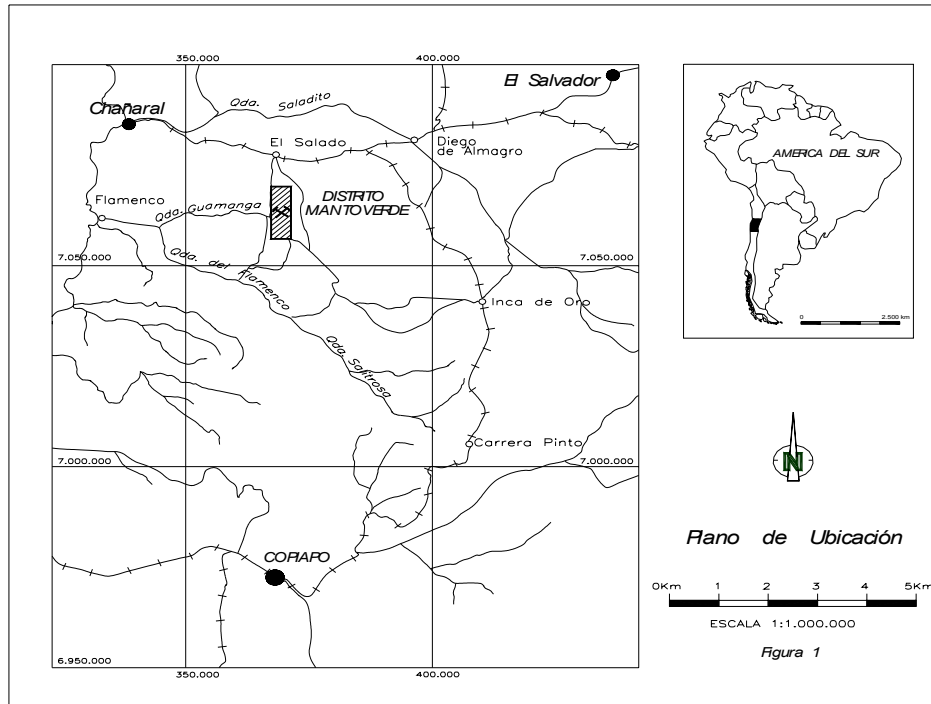
Respecto a los recursos en oxidados de cobre que contienen leyes altas de carbonato, con las actuales tecnologías, sólo son explotables las leyes de cobre que cubran el costo del consumo de ácido sulfúrico en el proceso. Solo si operacionalmente se puede realizar una mezcla de oxidados de cobre que contienen leyes altas en carbonatos con otros de bajos carbonatos, se podría en forma económica explotar estos recursos.

La extracción minera en Mantoverde, a la fecha, ha sido en su mayoría, en las zonas de mineral oxidado de cobre, bajo en carbonatos. Por consiguiente, el mineral que queda se está haciendo cada vez más rico en carbonatos, con una ley media actual mayor que 2% y si se descartan zonas mayores a 5% se obtiene un ley media 1.3%. Se entiende que los contenidos altos en carbonatos, no sólo consumen más ácido sulfúrico durante el proceso de beneficio, sino que generan problemas en las pilas de lixiviación. La planta impone la restricción operacional de procesar minerales que no superen el 3% de carbonatos como ley media de alimentación diaria.

El mineral oxidado de cobre que aporte el sector de Mantoverde Sur (Altavista), y la puesta en marcha de la explotación de Manto Ruso, caracterizados por zonas de importantes tonelajes con contenidos bajos carbonatos ayudará a proporcionar el material requerido para hacer una mezcla de manejo económico adecuado.

El carbonato que existe en Mantoverde junto a la mineralización primaria es de origen hidrotermal. Sin embargo, la presencia de carbonato en la zona de oxidación de cobre corresponde a subsecuentes recristalizaciones y reemplazamientos de otros minerales en respuesta a las removilizaciones a través

de los sucesivos y múltiples procesos de oxidación, originados en respuesta a las reactivaciones de la FMV y sus fallas secundarias.



SECCIONES MODELO DE BLOQUES COMPLETO DE MANTOVERDE LEYES ACTUALIZADAS AL 1º ENERO DEL 2003.

Figura 3

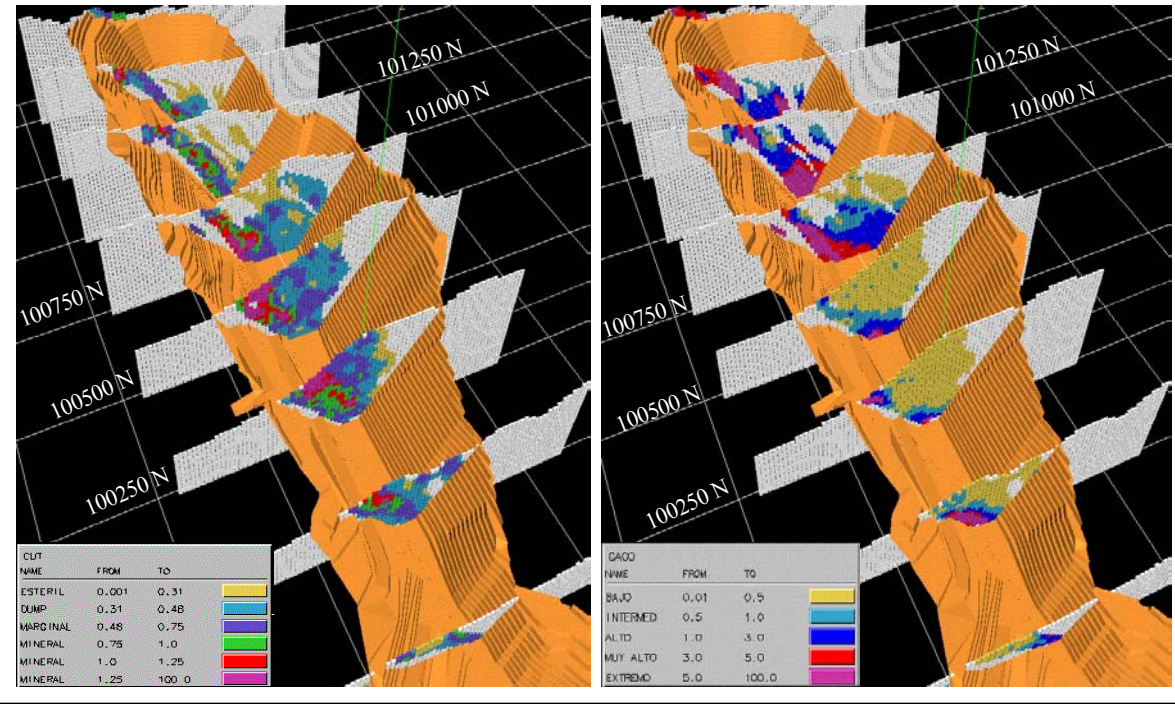
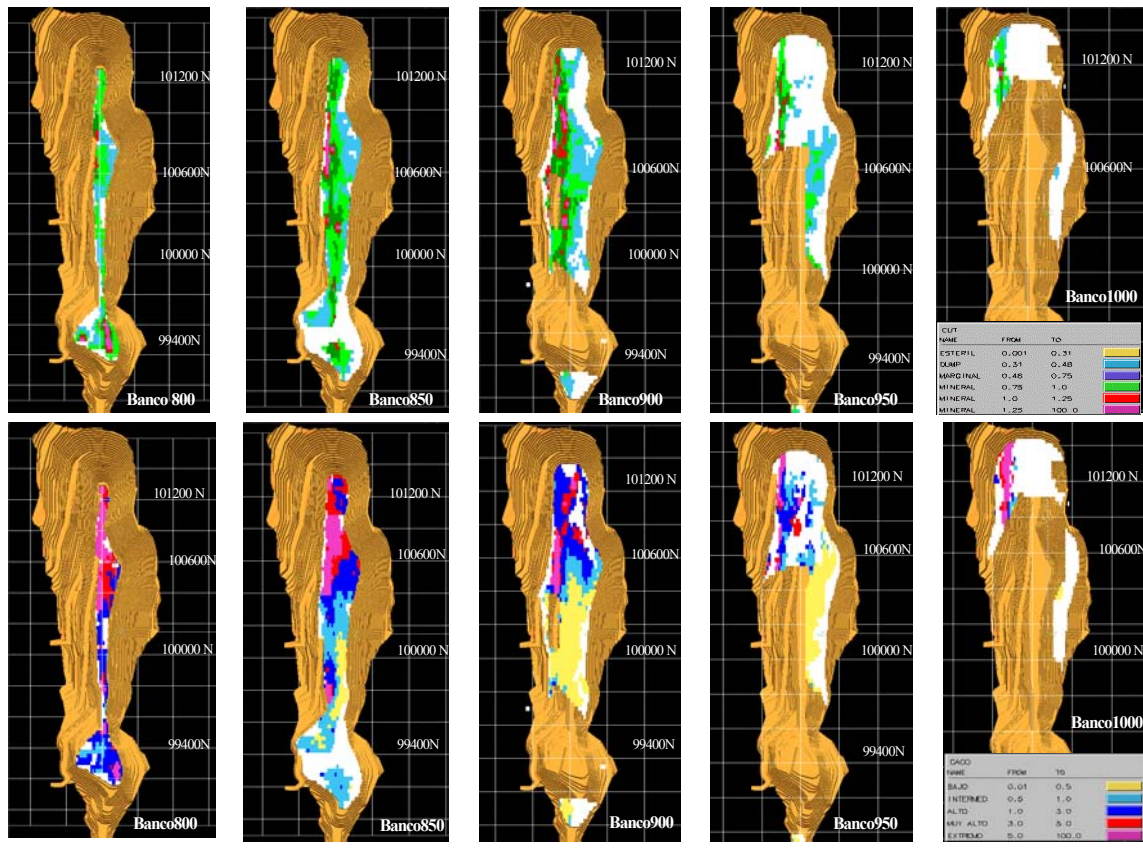
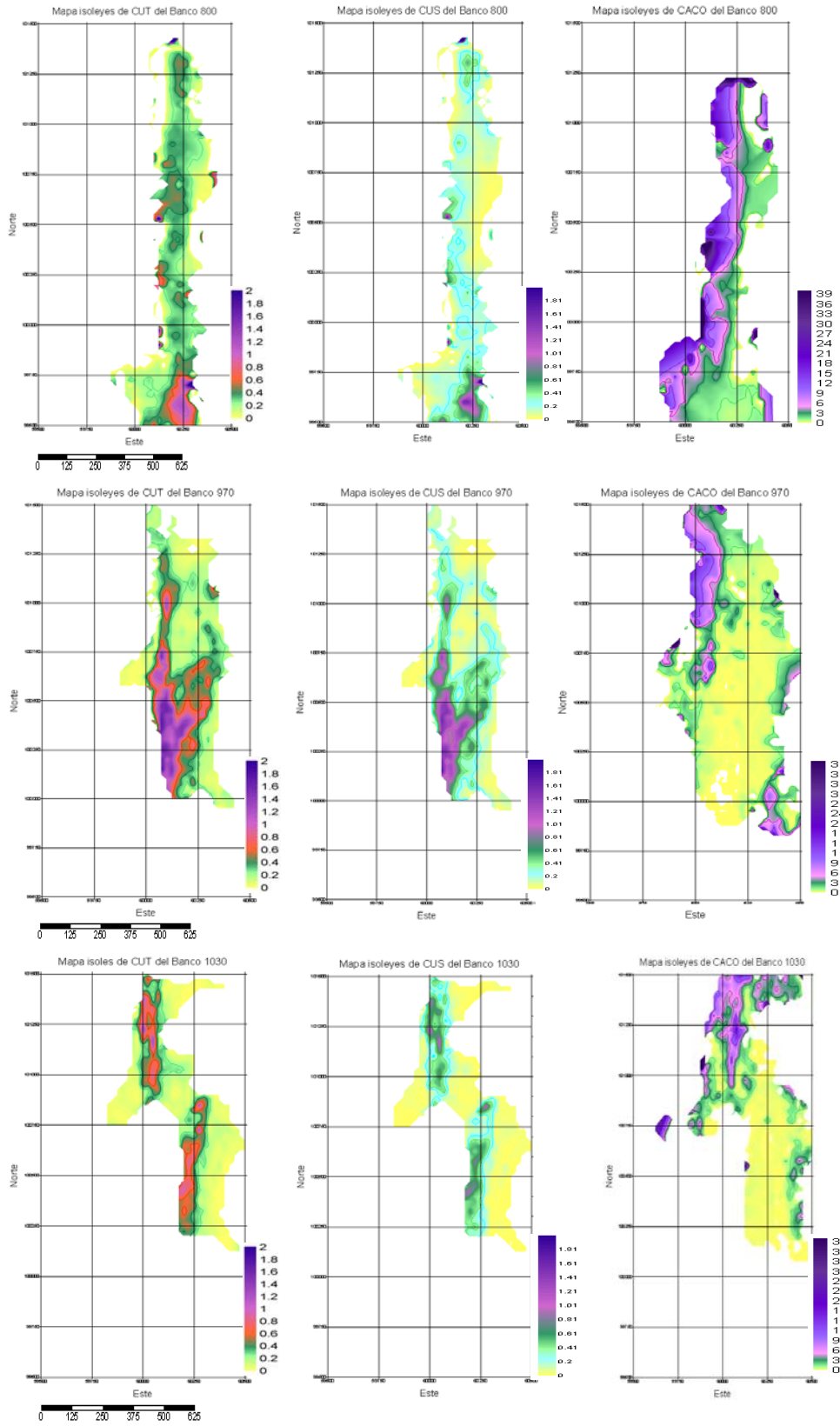


Figura 4 PLANTAS MODELO DE BLOQUES REMANENTES DE MANTOVERDE NORTE AL 1º ENERO 2003



Plantas isopleyas de Mantoverde CuT; CuS y CaCO₃

Figura 5



REFERENCIAS

- Astudillo, C., 2001: Distribución y Caracterización de Carbonatos en Mantoverde. Provincia de Chañaral, Tercera Región, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. *Universidad Católica del Norte*. Antofagasta. 17 figs, 6 tablas, 17 fotog, 3 anexos (Inédito) p 114.
- Castillo, B., 1998: Informe Exploración Proyecto Altavista. Distrito Mantoverde. *Empresa Minera de Mantos Blancos S.A. División Mantoverde*. Departamento de Geología. Informe Interno (Inédito) p 40.
- Cornejo, P., y Matthews, S., 1999: Discusión del estudio petrográfico – calcográfico de muestras de sondajes de la Mina Mantoverde. *Empresa de Mantos Blancos S. A. División Mantoverde* (Inédito) p 20.
- Cornejo, P., Matthews, S., Orrego, M. y Robles, W. 2000: Etapas de Mineralización asociadas a Alteración Potásica en un Sistema de Fe-Cu-Au: Yacimiento Mantoverde, III Región de Atacama, Chile. (Inédito) p 25.
- Dallmeyer, R., Brown, M., Grocott, V., Taylor, G. y Treloar, P. 1996: Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean Plate Boundary Zone, 26°-27° 30', North Chile: Constrains from ⁴⁰Ar-³⁹Ar mineral ages. *Journal of Geology*. Vol. 104, pp. 19-40.
- Díaz, M., 2000: Estimación de Recursos Geológicos del Prospecto Guamanga (Sector Montecristo – Franko). Provincia de Chañaral. III Región, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. *Universidad Católica del Norte*. Antofagasta. 37 fig., 8 tablas, 14 graf, (Inédito) p120.
- Godoy, E. y Lara, L., 1998: Hojas Chañaral - Diego de Almagro. Región de Atacama. Mapas Geológicos Nos. 5 y 6 escala 1:100.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Santiago.
- Lara, L. y Godoy, E., 1998: Hoja Quebrada Salitrosa. Región de Atacama. Mapa Geológicos No. 4, escala 1:100.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*. 1 mapa, Santiago.
- López, E., 2002: Caracterización Petrográfica y estudio de la Alteración Hidrotermal y Mineralización del Distrito Mantoverde, Provincia de Chañaral, Tercera Región, Chile. Memoria (en preparación) para optar al título de geólogo. Departamento de Geología. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. *Universidad Católica del Norte*. Antofagasta. (Inédito).
- Orrego, M. y Zamora, R., 1991: Manto Ruso, un yacimiento de cobre ligado a la Falla Atacama. *VI Congr. Geol. Chileno*, resúmenes ampliados, pp. 174-178.
- Rimstidt, J. D. 1997: Gangue Mineral Transport and Deposition, chapter 10, in Barnes, H. L., “*Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*”; 3rd. Ed John Wiley & Song, New York pp.487-515.
- Robles, W., Castillo, B. y Urrutia, J., 1996: Informe Geológico Sectores Montecristo - Franko, Proyecto Guamanga. *Empresa de Mantos Blancos S. A. División Mantoverde* (Inédito), Mantoverde, (Inédito) p 30.
- Vila, T., Lindsay, N. y Zamora, R., 1996: Geology of the Manto Verde copper deposit, Northern Chile: A Especularite-rich, Hidrotermal-Tectonic Breccia related to the Atacama Fault Zone. In “Andean Copper Deposits: New Discoveries, mineralization styles and metallogeny” (Camus, F.; Sillitoe, R.H. and Petersen, R.; editors). *Society of Economic Geologists, Special Publication*, N° 5, pp.157-170.
- Zamora, R. y Castillo, B., 2001: Mineralización de Fe-Cu-Au en el Distrito Mantoverde, Cordillera de la Costa. III Región de Atacama, Chile. *II Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores*. Lima. Perú. pp. 245-258.