

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA MINERA Y METALURGICA



**“MODELAMIENTO GEOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE
RECURSOS MINERALES EN TOQUEPALA”**

INFORME DE INGENIERIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

PRESENTADO POR:

WALTER NÚÑEZ PARIAHUAMAN

2007

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

“En reconocimiento al inmenso sacrificio, que representó para ellos mi formación profesional”

A MIS HERMANOS:

“Que supieron comprender mis inquietudes y me apoyaron espiritualmente”

A MI ESPOSA E HIJAS:

“Que son mi inspiración continua para seguir fortaleciendo mi desarrollo profesional”

A MIS MAESTROS:

“Que me supieron brindar sus grandes enseñanzas en mis años de estudiante”

INDICE

RESUMEN

CAPITULO 1: PRESENTACION DE LA ZONA DE ESTUDIO.

| | |
|--------------------------------|---|
| 1.1 Ubicación y Accesibilidad. | 1 |
| 1.2 Fisiografía. | 3 |
| 1.3 Trabajos Previos. | 3 |
| 1.4 Objetivo del Estudio. | 4 |
| 1.5 Método de Trabajo. | 4 |
| 1.6 Agradecimientos. | 4 |

CAPITULO 2: GEOLOGIA REGIONAL Y LOCAL.

| | |
|---|----|
| 2.1 Geología Regional. | 5 |
| 2.1.1 Grupo Toquepala. | 5 |
| 2.1.1.1 Formación Toquepala. | 5 |
| 2.1.1.2 Formación Inogoya. | 5 |
| 2.1.1.3 Volcánicos Paralaque. | 6 |
| 2.1.1.4 Volcánicos Quellaveco. | 6 |
| 2.1.2 Formación Moquegua. | 6 |
| 2.1.3 Volcánicos Huaylillas. | 6 |
| 2.1.4 Formación Capillune. | 7 |
| 2.1.5 Volcánicos Barroso. | 7 |
| 2.1.6 Rocas Intrusivas. | 8 |
| 2.1.6.1 Diorita – Granodiorita. | 8 |
| 2.1.6.2 Dacita – Monzonita Cuarcifera. | 8 |
| 2.1.7 Depósitos Morrénicos y Aluviales. | 8 |
| 2.2 Geología Local. | 8 |
| 2.2.1 Grupo Toquepala (Volcánico Quellaveco). | 9 |
| 2.2.1.1 Pórfido Cuarcifero Quellaveco (Qq). | 9 |
| 2.2.1.2 Serie Toquepala. | 9 |
| 2.2.1.2.1 Dolerita Toquepala (Td). | 9 |
| 2.2.1.2.2 Pórfido Cuarcifero Toquepala (Tq). | 9 |
| 2.2.1.2.3 Andesita Toquepala (Ta). | 11 |
| 2.2.1.2.4 Riolita Toquepala (Tr). | 11 |
| 2.2.1.3 Serie Alta. | 11 |
| 2.2.2 Rocas Intrusivas. | 12 |
| 2.2.2.1 Diorita (Di). | 12 |
| 2.2.2.2 Dacita Porfirítica (Dp). | 12 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2.3 Dacita Aglomerada (Da). | 12 |
| 2.2.2.4 Latita Porfirítica (Lp). | 13 |
| 2.2.3 Brechas. | 13 |
| 2.2.3.1 Brecha Angular (Bx). | 13 |
| 2.2.3.2 Brecha de Guijarros (Px). | 14 |
| 2.2.3.3 Brecha de Turmalina (BxT). | 15 |
| 2.2.3.4 Brechas de Colapso (SBx). | 15 |
| 2.3 Geología Estructural. | 16 |
| 2.3.1 Fracturamiento. | 16 |
| 2.3.2 Fallamiento. | 16 |
| 2.3.2.1 Falla Incapuquio. | 16 |
| 2.3.2.2 Falla Micalaco. | 16 |
| 2.3.2.3 Alineamiento Toquepala. | 17 |
| 2.3.3 Diatrema. | 18 |
| 2.4 Geología Histórica | 18 |
| | |
| CAPITULO 3: GEOLOGIA ECONOMICA. | |
| 3.1 Alteraciones Hidrotermales. | 21 |
| 3.1.1 Alteración Propílica. | 22 |
| 3.1.2 Alteración Argílica. | 23 |
| 3.1.3 Alteración Fílica. | 24 |
| 3.1.4 Alteración Potásica. | 25 |
| 3.1.5 Silicificación. | 25 |
| 3.1.6 Turmalinización. | 25 |
| 3.2 Zonas de Mineralización. | 26 |
| 3.2.1 Zona de Encape Lixiviado (Leach Capping). | 26 |
| 3.2.2 Zona de Oxidos. | 27 |
| 3.2.3 Zona de Enriquecimiento Secundario. | 28 |
| 3.2.4 Zona Transicional. | 29 |
| 3.2.5 Zona Primaria. | 30 |
| 3.3 Domo de Yeso. | 30 |
| 3.4 Mineralogía. | 32 |
| 3.5 Secuencia Paragenética y Génesis del Yacimiento. | 32 |
| | |
| CAPITULO 4: ANALISIS GEOLOGICO DE LA PERFORACION EXPLORATORIA. | |
| 4.1 Exploración con Sondajes. | 35 |
| 4.1.1 Campañas de Exploración. | 35 |
| 4.1.2 La Malla de Perforación. | 36 |

| | |
|---|----|
| 4.1.3 Desviación de Taladros. | 36 |
| 4.1.4 Logueo Geológico de Testigos. | 37 |
| 4.2 Muestreo. | 38 |
| 4.2.1 Importancia del Muestreo. | 38 |
| 4.2.2 Muestreo de Taladros Diamantinos. | 39 |
| 4.2.3 Muestreo de Blastholes. | 40 |
| 4.2.4 Muestreo Superficial. | 40 |
| 4.3 Cálculo de otras variables geológicas. | 41 |
| 4.3.1 Cálculo del Peso específico. | 41 |
| 4.3.2 Cálculo de la Recuperación Lineal. | 41 |
| 4.3.3 Cálculo del RQD. | 41 |
| 4.4 Mapeo Geológico. | 42 |
| 4.4.1 Mapeo Geológico de Bancos. | 42 |
| 4.4.2 Mapeo Geológico de Detritos de Perforación. | 42 |
| 4.5 Validación de Datos. | 43 |
| | |
| Capítulo 5: MODELAMIENTO GEOLOGICO. | |
| 5.1 El Modelo de Bloques Tridimensional. | 44 |
| 5.2 Base de datos de Taladros. | 47 |
| 5.3 Metodología de Interpretación Geológica. | 50 |
| 5.3.1 Interpretación por tipo de Roca. | 51 |
| 5.3.2 Modelamiento de la superficie Yeso/Anhidrita. | 53 |
| 5.3.3 Interpretación por tipo de Mineralización. | 54 |
| 5.3.4 Interpretación por tipo de Alteración. | 56 |
| 5.3.5 Índice de Dureza de Roca (RHI). | 57 |
| 5.3.6 Definición de Zonas Geometalúrgicas. | 59 |
| 5.4 Construcción del Modelo Topográfico. | 60 |
| | |
| Capítulo 6: ESTADISTICA Y GEOESTADISTICA. | |
| 6.1 Composición. | 62 |
| 6.2 Análisis Estadístico de Compósitos. | 62 |
| 6.3 Análisis Geoestadístico de Compósitos. | 63 |
| 6.4 Interpolación de Leyes en el Modelo de Bloques. | 65 |
| 6.4.1 Evaluación e Interpolación de leyes de cobre. | 66 |
| 6.4.1.1 Procesamiento de leyes de cobre. | 66 |
| 6.4.1.2 Composición. | 67 |
| 6.4.1.3 Estadística. | 67 |
| 6.4.1.4 Análisis Variográfico. | 70 |

| | |
|--|----|
| 6.4.1.5 Interpolación de bloques. | 71 |
| 6.4.2 Evaluación e Interpolación de leyes de molibdeno. | 71 |
| 6.4.2.1 Procesamiento de leyes de molibdeno. | 71 |
| 6.4.2.2 Compositación. | 71 |
| 6.4.2.3 Estadística. | 71 |
| 6.4.2.4 Análisis Variográfico. | 73 |
| 6.4.2.5 Interpolación de bloques. | 73 |
| 6.5 Evaluación del Peso Específico y Asignamiento al Modelo de Bloques. | 74 |
| 6.5.1 Procesamiento de Prueba. | 74 |
| 6.5.2 Compositación. | 74 |
| 6.5.3 Estadística. | 74 |
| 6.5.4 Asignamiento de Peso Específico a Bloques. | 75 |
| | |
| Capítulo 7: Estimación y Clasificación de Recursos Minerales. Reconciliación. | |
| 7.1 Estimación y Clasificación de Recursos Geológicos. | 76 |
| 7.1.1 Método de Clasificación. | 76 |
| 7.1.2 Clasificación de Recursos usando el índice RCB. | 77 |
| 7.2 Reconciliación del Modelo. | 78 |
| | |
| CONCLUSIONES | 79 |
| RECOMENDACIONES | 79 |
| | |
| Bibliografía | 79 |
| Apéndice A. | 82 |
| Apéndice B. | 85 |
| Apéndice C. | 86 |

RESUMEN

Los modelos geológicos, son representaciones gráficas de los cuerpos geológicos in situ. Estos modelos se obtienen a partir de las interpretaciones geométricas que el geólogo de campo hace a partir de los logueos de la perforación exploratoria.

El presente informe muestra la metodología de diseño empleada para construir el modelo geológico del pórfido de cobre y molibdeno de la mina Toquepala y su evaluación de recursos.

Este conocimiento geológico tiene como principal soporte a la bondad del software minero MineSight, que nos permite integrar toda la información geológica recopilada de los taladros de exploración (numérica y gráfica).

La elaboración de un modelo consta de varias etapas de trabajo:

El primer paso, en la elaboración de un modelo geológico, es la OBTENCION DE DATOS. Esto es, se realizan campañas de perforación exploratoria en el área de interés definida, para lo cual se emplea una malla regular de sondajes. La información de los taladros diamantinos es obtenida por el geólogo a través del logueo de testigos. Las variables geológicas (geology) como tipo de roca, tipo de alteración, tipo de mineralización, yeso, ya están definidas y codificadas para toda la mina.

Paralelamente, al logueo de testigos, el muestrero realiza el spliteo longitudinal de los testigos, por cada 3 metros se obtiene una muestra para su ensaye químico de leyes. Los resultados de leyes (assay) y las desviaciones (survey) forman parte de la base de taladros diamantinos (collar).

El segundo paso, es el MODELAMIENTO Y ESTIMACION DE RECURSOS. Acá, mediante el software minero se composita por banco, las leyes y las variables geológicas. Las variables geológicas nos permite interpretar mediante polilíneas cerradas y en secciones verticales (direcciones E-W, N-S), los modelos geológicos: Tipo de roca, tipo de alteración, tipo de mineralización, yeso. Combinando estos modelos obtenemos el modelo de dureza y el modelo geometalúrgico. Estos modelos se utilizan como controles geológicos durante la interpolación de leyes de compósitos.

Teniendo los compósitos de leyes, hacemos un tratamiento estadístico a los altos erráticos de cada elemento: Cobre, molibdeno, y demás elementos. Luego, con los

compósitos se obtienen modelos variográficos omnidireccionales para estudiar las tendencias de mineralización en tres direcciones ortogonales entre si, teniendo como dominio geoestadístico el tipo de roca y tipo de mineralización.

Se crea el modelo de bloques de leyes, definiendo los límites mínimos y máximos: Coordenada Este, coordenada Norte y Cota, y los ítems necesarios para almacenar toda la información útil para la valoración económica de cada bloque de 20x20x15. Se llevan los modelos geológicos que están en secciones al modelo de bloques.

Para la interpolación de leyes se emplean el Kriging ordinario para los elementos importantes como el cobre, molibdeno, plata, y el método inverso de la distancia para los demás elementos. En ambos casos se tiene como restricción geológica: El tipo de roca y tipo de mineralización que ya están en el modelo de bloques.

La topografía actual y el pit final también deben ser llevadas al modelo de bloques, para el cálculo de reservas.

También, al modelo de bloques se le asigna el peso específico y la dureza del material obtenidos de un promedio estadístico por tipo de roca y tipo de alteración.

Finalmente, para la categorización de los bloques krigeados, se emplea el índice RCB, que mide el grado de variabilidad en el calculo de la ley del bloque, se tiene bloques probados, probables y posibles. Para efectos de reservas no se considera el mineral posible.

Se hace necesario elaborar procedimientos de trabajo, que regulen la actualización de datos los taladros, personal responsable y hacer el trabajo en equipo.

Antes que el modelo de mina entre en vigencia para los planes de minado anuales, se hace necesario medir su grado de confianza con la herramienta más confiable hasta hoy en día: LA RECONCILIACION, esto se hace mensualmente para los últimos 5 años. Se contrasta los resultados obtenidos de los cortes minados de diferentes niveles vs. Producción de Planta Concentradora.

Lo que sigue a esto, y cuyo alcance escapa al presente informe, es la PLANIFICACION MINERA. Que son temas elaborados por el área de Ingenieria, donde introducen al modelo de bloques los parámetros económicos para la valorización de cada bloque y se optimiza el tajo, obteniéndose finalmente la Estimación de Reservas Minerales.

CAPITULO 1

PRESENTACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1 UBICACION Y ACCESIBILIDAD.

La mina Toquepala está situada en las estribaciones del flanco Oeste de la cordillera occidental de los andes, al sur de Perú siguiendo un alineamiento con los principales pórfidos cupríferos del norte de Chile. Geográficamente, el complejo minero Toquepala se ubica en el distrito de Ilabaya, provincia Jorge Basadre y departamento de Tacna.

Las coordenadas geográficas que delimitan la zona estudiada son (Fig. 1.1-1):

Longitud: 70°34' W - 70°36' W
Latitud: 17°13' S - 17°14' S
Cotas: 2,190 msnm - 3,700 msnm

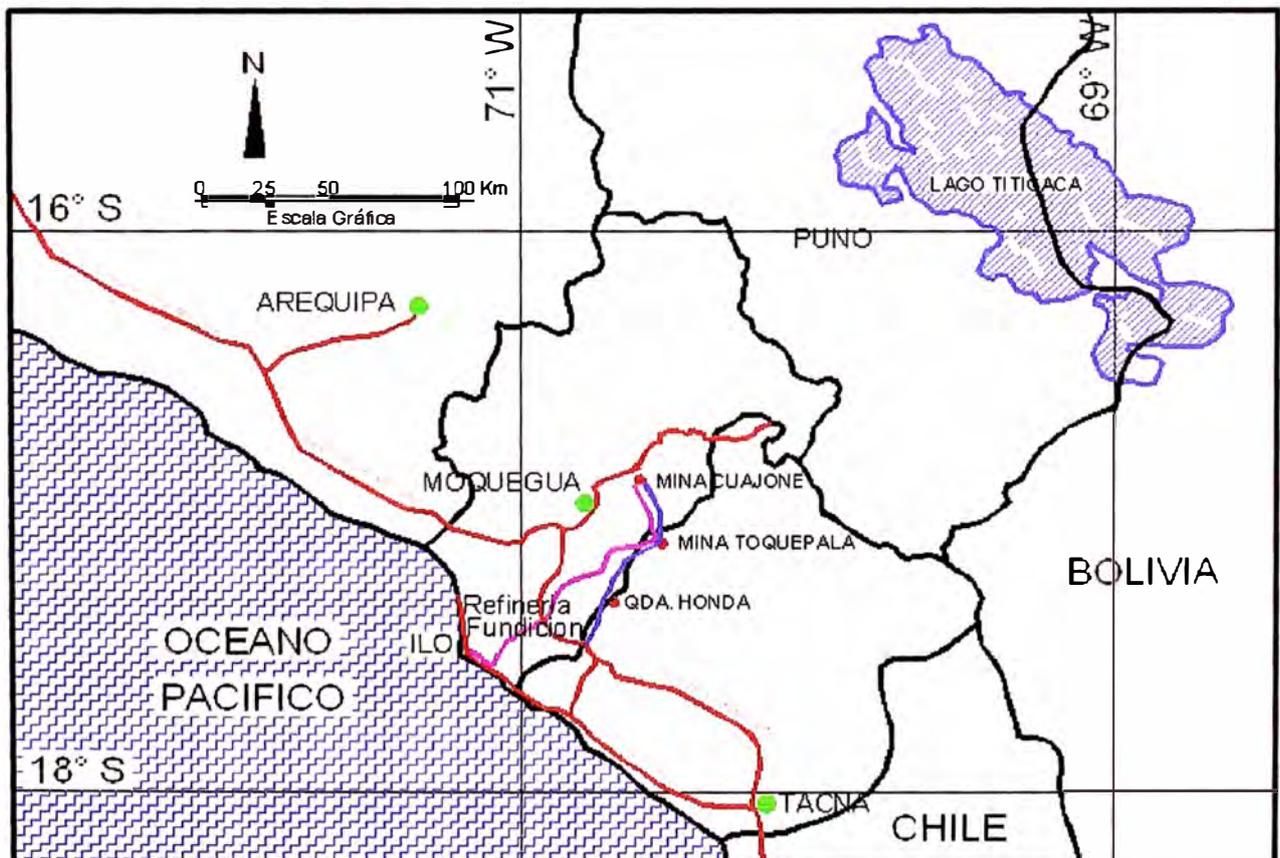


Fig. 1.1-1: Ubicación de la mina Toquepala.

La mina Toquepala es de fácil acceso desde las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna e Ilo, mediante la carretera Panamericana hasta la localidad de Camiara, de donde parte

una carretera asfaltada que nos lleva a los campamentos de Staff y Plaza. De allí se toma la ruta que llega a la mina de aproximadamente 10 Km. El acceso es por vía terrestre o por vía aérea. Por carretera las distancias relativas a Toquepala son:

Cuadro de Distancias

| <u>Lugar</u> | Distancia | Carretera |
|----------------------|-----------|-----------|
| Toquepala - Lima | 1,305 Km. | Asfaltada |
| Toquepala - Arequipa | 430 Km. | Asfaltada |
| Toquepala - Moquegua | 135 Km. | Asfaltada |
| Toquepala - Tacna | 142 Km. | Asfaltada |
| Toquepala - Ilo | 115 Km. | Asfaltada |
| Toquepala - Camiara | 55 Km. | Asfaltada |

Además existe una carretera de 73 Km. que une directamente la ciudad de Moquegua con la mina. Un ferrocarril de 167 Km., también lo conecta con la ciudad de Ilo y una distancia de 17 Km. lo une con la fundición.

Por vía aérea, se realiza el viaje desde Lima hasta el aeropuerto que esta cerca al campamento de Staff. Este aeropuerto tiene una pista de aterrizaje asfaltada y ha sido construido por la compañía para su uso exclusivo.



Fig. 1.1-2: Instalaciones de la mina Toquepala.

El área industrial del centro minero-metalúrgico de Toquepala (Fig. 1.1-2), esta comprendido principalmente por el tajo abierto, la línea férrea por donde se transporta el mineral a Planta Concentradora, también se observa el botadero de lixiviación donde se recupera el cobre por el sistema de riego por aspersión. Además se pueden observar las oficinas de ingeniería, geología, geotecnia y operaciones mina, y los talleres de mecánica.

1.2 FISIOGRAFIA.

La topografía es muy variada. En la parte meridional muy al SE de la mina en el poblado de Camiara y Pampa Sitana, los terrenos son llanos y áridos, estos forman parte de la **Llanura Costanera**. Conforme vamos dirigiéndonos a Toquepala a la altura de la relavera Qda. Honda, se notará un cambio muy brusco en la pendiente del terreno con rumbo NW-SE, es el **Flanco Andino** que se extiende al NE de las pampas costaneras, constituyendo un terreno escabroso y muy disectado que se desarrolla entre 2000 y 4000 metros de altitud y en la que se localizan las minas de Toquepala y Cuajone. Más al NE de la mina Toquepala, en la mina Quellaveco se tiene el flanco de la cadena de conos volcánicos cuyas cimas alcanzan los 5100 m. de altitud.

Las variaciones de temperatura en el flanco andino y en la zona de conos volcánicos están influenciadas por la altura, con cambios de temperatura marcados durante el día y la noche. Durante el día es caluroso pudiendo llegar a 18 °C para descender bruscamente a una temperatura mínima de 4 °C. En los meses de abril a diciembre el clima es árido y frígido, y en los meses de enero a marzo es húmedo con eventuales lloviznas y neblina. La vegetación es escasa, pudiéndose observar algunas áreas muy susceptibles de transformarse en terrenos de cultivo mediante irrigaciones.

1.3 TRABAJOS PREVIOS.

Existen muchos trabajos publicados acerca de la Geología de Toquepala, de ingenieros que trabajaron en SPCC, y entre los que podemos citar:

"Geología y Mineralización del Yacimiento Cuprífero de Toquepala" de F. Stevenson.

"Interpretación Estructural del Depósito de Toquepala" de O. Damiani - F. Stevenson.

"Exploración de Yacimiento de Cobre Diseminado" de F. Stevenson.

"Geología y Explotación de Toquepala" de J. Manrique.

Respecto a trabajos de Modelamiento de la mina Toquepala, no se tiene publicaciones sobre la Evaluación de Recursos del depósito antes de la actual administración (Grupo México). En la actualidad, se han elaborado Procedimientos para la Estimación de Reservas

y se ha homologado dichos procedimientos con los de la mina Cuajone. Este trabajo se ha hecho de manera conjunta entre los departamentos de Geología e Ingeniería.

1.4 OBJETIVO DEL ESTUDIO.

Es mi deseo presentar en este informe, el rol preponderante que cumple la Geología como ciencia interpretativa, para realizar el Modelamiento Geológico de un depósito mineral y en función a las restricciones de estos modelos, aplicar las técnicas geoestadísticas para analizar y encontrar la dirección preferencial del flujo mineralizante en el depósito. Con estos parámetros geoestadísticos hallados se interpola los compósitos en el modelo de leyes, y se estima finalmente, los recursos minerales del depósito porfirítico de Cobre y Molibdeno.

1.5 METODO DE TRABAJO.

Mi labor como "Geólogo de Mina" en la empresa SPCC-Toquepala se remonta a Julio del 2000 en el Dpto. de Geología, teniendo a mi cargo las labores de operación mina como: Mapeo Geológico de Taludes, Control de Mineral, Logueo de Ripios, Logueo de Testigos de Perforación Diamantina, Muestreo, Modelamiento, Estimación de Recursos Geológicos, Reconciliación. Como iré detallando progresivamente en este informe, la información geológica sigue múltiples procesos. En lo posible, procuro seguir un orden lógico hasta llegar a evaluar el yacimiento: Pasando por la Geología Regional y Local, la Caracterización de los Modelos Geológicos, Estadística y Geoestadística de Compósitos, la Interpolación de Leyes, y la Categorización en el modelo de bloques. Y finalmente la prueba de nuestro Modelo: La Reconciliación.

1.6 AGRADECIMIENTOS.

Sirva este informe como un reconocimiento a la participación de todos aquellos geólogos, cuyos conocimientos y experiencia han sido refrendadas en interesantes publicaciones, en su paso por la unidad de producción Toquepala. Agradezco también a la Gerencia de Operaciones Mina y a la Superintendencia de Geología, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en el Departamento de Geología Toquepala.

CAPITULO 2

GEOLOGIA REGIONAL Y LOCAL

2.1 GEOLOGIA REGIONAL.

La geología regional se caracteriza por un basamento cretácico-terciario de rocas volcánicas homoclinales ligeramente buzando al W y compuestos por derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados en las capas superiores, que posteriormente fueron intruidas, fracturadas y alteradas por un batolito y stocks de roca de composición intermedia a ácida (Fig. 2.1-1).

La secuencia estratigráfica de la roca más antigua a la más joven es como sigue:

2.1.1 Grupo Toquepala.

Denominada así por Bellido (1963) porque gran parte de las rocas que lo componen se encuentran presentes en Toquepala. Consiste en una gruesa secuencia interestratificada de rocas volcánicas andesíticas y riolíticas, más antiguas que la formación Moquegua, que afloran a lo largo de la margen andina, desde el Cerro la Caldera (Arequipa) hasta la frontera con Chile. Las unidades superiores de este grupo están presentes en las minas de Toquepala, Cuajone y Quellaveco.

A este grupo se le asigna una edad entre cretáceo superior a terciario inferior y esta compuesto por las siguientes cuatro formaciones, que de la más antigua a la más reciente, son:

2.1.1.1 Formación Toquepala.

Nombre propuesto por J. Wilson (1962) en la "Hoja de Pachia y Palca", consiste en la secuencia de flujos andesíticos y riolíticos. Los afloramientos se ubican en las vecindades del pueblo de Torata al NE del Cerro Baúl. En esta hoja, sobreyace en discordancia paralela y angular a la formación Yura, e infrayace a la formación Moquegua. En el sector de la "Hoja de Punta de Bombón y Clemesí" sobreyace a la formación Guaneros e infrayace a la formación Moquegua. En la "Hoja de Locumba" sobreyace al volcánico Chocolate e infrayace a la formación Moquegua.

2.1.1.2 Formación Inogoya.

Son delgados flujos de rocas riolíticas y andesíticas intercalados con algunos tufos blancos y verdosos, ubicados en un área muy pequeña cerca a la localidad de Torata, sobreyace a la formación Toquepala.

2.1.1.3 Volcánicos Paralaque.

Consiste en delgados tufos andesíticos y riolíticos con intercalaciones de aglomerados, de color blanco rosáceo. Aflora según la "Hoja de Moquegua" al E del pueblo de Torata, al W de la falla Incapuquio y al S de Toquepala.

2.1.1.4 Volcánicos Quellaveco.

Formación de rocas volcánicas intermedias y acidas en composición y ha sido dividida en cinco miembros, de acuerdo a su posición estratigráfica y características litológicas:

- **Pórfido Cuarzófero Quellaveco.**
- **Serie Toquepala** (Dolerita Toquepala, Pórfido Cuarzófero Toquepala, Andesita Toquepala, Riolita Toquepala).
- **Serie Alta** (Andesitas, Riolitas y Aglomerados).
- **Riolita Yarito.**
- **Riolita de Tinajones.**

2.1.2 Formación Moquegua.

Nombre propuesto por Adams (1908) y Steinmann la dividió por vez primera en 2 miembros separados por una leve discordancia angular. Aflora en la parte S y SW de la "Hoja de Moquegua", encontrándose bien expuesta en las quebradas al W de la mina Toquepala. El miembro inferior esta compuesta de areniscas y conglomerados. El miembro superior esta formado por conglomerados basales cubiertos por areniscas, este miembro esta localizado en muchas áreas al SW de la falla Incapuquio.

La parte superior de la secuencia de areniscas es una capa gruesa de arenas finas intercaladas con algunas capas de ceniza volcánica. La mayor parte del miembro inferior es de color canela a marrón claro, que contrastan con los colores blancos o grises del miembro superior.

2.1.3 Volcánicos Huaylillas.

Formación compuesta por tufos volcánicos ácidos de composición dacítica y riolítica (Wilson & García, 1962), con diferencias de color, textura y mineralogía. Es suprayacente a la formación Moquegua y otras formaciones más antiguas, mediante discordancia paralela y angular en diferentes lugares, e infrayacente al volcánico Barroso y Capillune con discordancia paralela. Por las relaciones estratigráficas generales, se asigna a la formación Huaylillas una edad plioceno inferior y medio, se correlaciona con los tufos riolíticos de la base del volcánico Chachani de Arequipa (Jenks, 1948), con la formación riolítica del norte de Chile (Bruggen, 1950) y con la formación Sillapaca de la región del lago Titicaca (Newell, 1949).

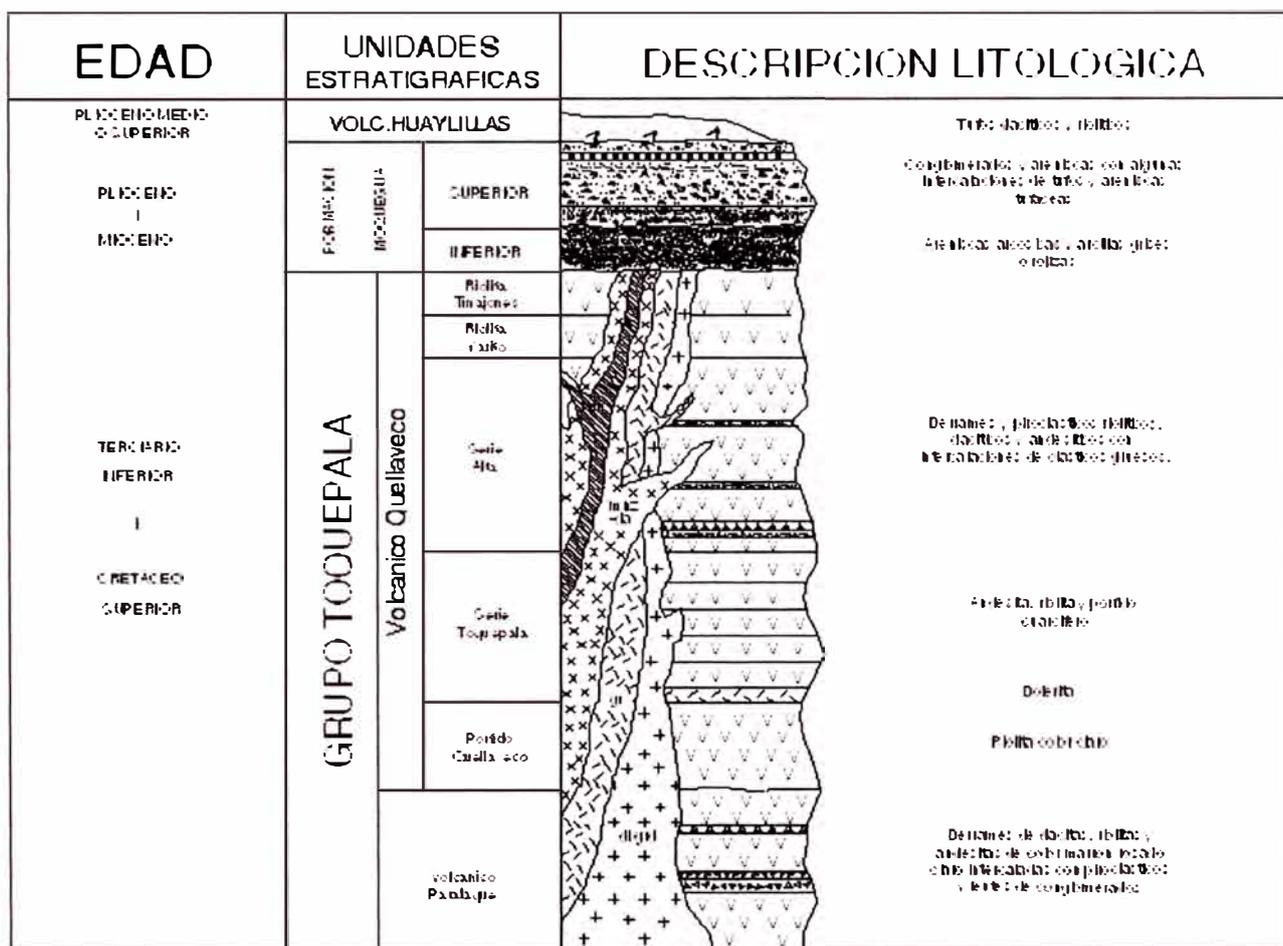


Fig. 2.1-1: Columna Estratigráfica Regional (E. Bellido-1979, Boletín INGEMMET Geología del Cuadrángulo de Moquegua)

2.1.4 Formación Capillune.

Aflora hacia el NE de la "Hoja de Moquegua" en el valle del río Asana, donde se encuentra una franja correspondiente a los sedimentos de la formación Capillune, que consiste de una heterogénea mezcla de rocas sedimentarias intercaladas con tobas claras y una andesita gris. Se presentan arcillas finamente intercaladas con arenas, conglomerados y aglomerados hechos de material de origen volcánico. En su parte superior ocurren secuencias de arcillas marrones y verdes. Potencia de 10 a 500 metros.

2.1.5 Volcánicos Barroso.

Nombre propuesto por Wilson (1962) para todas aquellas rocas que conforman la Cordillera del Barroso, sobreyace a la formación Capillune. Mendivil divide a estos volcánicos en tres unidades: Chila, Barroso y Purupurine, las que no se han podido diferenciar en el Cuadrángulo de Moquegua. Están caracterizados por numerosos conos volcánicos y planicies de relleno fluvio-glaciares, ubicados al E de Cuajone y al NE de Quellaveco. Consiste en tufos y lavas de composición traquítica con cantidades menores de andesita, donde los tufos predominan sobre las lavas, la edad asignada es del plio-pleistoceno.

2.1.6 Rocas Intrusivas.

Las formaciones volcánicas y sedimentarias han sido intruidas por rocas pertenecientes al batolito andino y pequeños stocks. El cuerpo principal y más antiguo corresponde al batolito de diorita-granodiorita, también se tienen pequeñas intrusiones posteriores de dacitas y monzonitas cuarcíferas emplazadas como pequeños stocks y que se les encuentra asociados a la mineralización de Toquepala, Quellaveco y Cuajone. Por determinaciones radiométricas, método K/Ar de muestras tomadas en Toquepala se le asigna al batolito una edad cretáceo superior a terciario inferior.

2.1.6.1 Diorita – Granodiorita.

En Toquepala están los cuerpos más apreciables y también forma parte del cuerpo mineralizado. Generalmente es una roca de grano medio a fino de colores que varían de gris a rosado verdoso. La determinación radiométrica hecha en 1968 por M. Laughlin y otros dio como resultado una edad de 58 MA para la diorita de Toquepala.

2.1.6.2 Dacita - Monzonita Cuarcífera.

Un cuerpo relativamente grande de monzonita fue mapeado al W de Toquepala entre las quebradas Cimarrona y Huancané. Cuerpos de dacita se encuentran también en Toquepala y Quellaveco. Se ha determinado la edad radiométrica para el pórfido dacítico de Quellaveco por el método K/Ar arrojando una edad de 54 +/- 2.1 MA.

2.1.7 Depósitos Morrénicos y Aluviales.

Formaciones cuaternarias que cubren a otras más antiguas, al N y NE de Quellaveco se encuentran en forma de morrenas laterales y terminales, y cuerpos externos de grava y arenisca que se han depositado por aguas provenientes del deshielo de los glaciares.

El material de los depósitos aluviales es reciente y cubren superficies erosionadas de antiguas formaciones. Se componen esencialmente de cantos rodados de composición volcánica, arenas y arcillas depositadas en forma irregular. La mayor parte de los cursos de los valles contienen acumulaciones de aluvión, que son utilizados como terrenos de cultivo en la mayoría de los casos.

2.2 GEOLOGIA LOCAL.

La geología esta caracterizada por la presencia de afloramientos de rocas extrusivas e intrusivas, pertenecientes al "Grupo Toquepala" (Volcánico Quellaveco) y al intrusivo del batolito andino (Fig. 2.2-1). A las rocas volcánicas se les ha asignado una edad cretáceo superior a terciario inferior y están formadas por flujos de naturaleza andesítica y

riolítica, las intrusiones son tentativamente restringidas al terciario inferior, presentándose en forma de stocks y diques de distinta naturaleza (Fig. 2.2-2).

2.2.1 Grupo Toquepala (Volcánico Quellaveco).

En el área de Toquepala (Mina) el grupo Toquepala esta representado por el volcánico Quellaveco, este a su vez esta representado por los siguientes miembros.

2.2.1.1 Pórfido Cuarzífero Quellaveco (Qq).

Son rocas de composición riolítica, de textura porfirítica, altamente fracturada. Su masa es afanítica, densa, dura y silicificada, de color blanco lechoso, presenta pequeños fenocristales de cuarzo (1 a 3 mm) constituyendo un 10 % en volumen. En la parte superior presenta estructura bandeada y es extremadamente quebradiza. Es la roca más antigua que aflora en el yacimiento de Toquepala. Esta intruida por apófisis de diorita y dacita porfirítica. Infrayace a la serie Toquepala en discordancia angular.

2.2.1.2 Serie Toquepala.

Tiene una potencia mínima de 300 metros, esta formado por mantos o derrames intercalados de andesitas y riolitas con espesores que varían entre 50 y 175 metros, de textura afanítica a porfirítica y casi siempre con textura fluidal (flujo bandeado). A cada derrame sigue una pequeña etapa de erosión. Se le considera de edad terciario inferior. En Toquepala esta serie esta formada por los siguientes miembros:

2.2.1.2.1 Dolerita Toquepala (Td).

Son andesitas y se dividen en tres unidades: La unidad superior e inferior son andesitas de grano medio a fino de color verde, melanocrática y magnética. La unidad central es una andesita con matriz tufácea, y algunas capas de brechas volcánicas y aglomerados de similar composición. Existe un horizonte caracterizado por la presencia de fenocristales de feldespato plagioclasa en una matriz densa. Su máxima potencia expuesta es de 75 metros.

2.2.1.2.2 Pórfido Cuarzífero Toquepala (Tq).

Es una riolita blanca a beige, con abundantes fenocristales de cuarzo en una matriz blanca o marrón, usualmente afanítica, pero algunas veces aglomerádica y con flujo bandeado. La roca es dura y los fenocristales de cuarzo son bastantes irregulares en tamaño y distribución. También se advierte la presencia de fenocristales de feldespato. Por estas dos últimas características se le diferencia del Pórfido Cuarzífero Quellaveco. Su potencia máxima es de 100 metros.

2.2.1.2.3 Andesita Toquepala (Ta).

Sus miembros son delgados y de color gris claro a oscuro. Su textura es de grano medio a fino, masiva, melanocrática, magnética. Es una roca densa y posee flujo bandeado.

2.2.1.2.4 Riolita Toquepala (Tr).

Caracterizado por tener un flujo bandeado fino buzante al sur, a menudo contiene fenocristales de feldespato muy pequeños y cuarzo en una matriz fina. La roca presenta una amplia gama de colores entre el blanco, gris a marrón. Su potencia es de 75 metros.

2.2.1.3 Serie Alta.

Con una potencia de 900 metros, consiste en una secuencia intercalada de flujos andesíticos y riolíticos y capas de aglomerados volcánicos y piroclásticos, predominando las andesitas. De la observación en el campo se puede deducir que están formadas de capas duras alternando con blandas, con el resultado de una competencia variable. Su característica más notable es la gran variación en tipos de rocas y las capas individualmente varían de 10 a 50 metros de espesor.

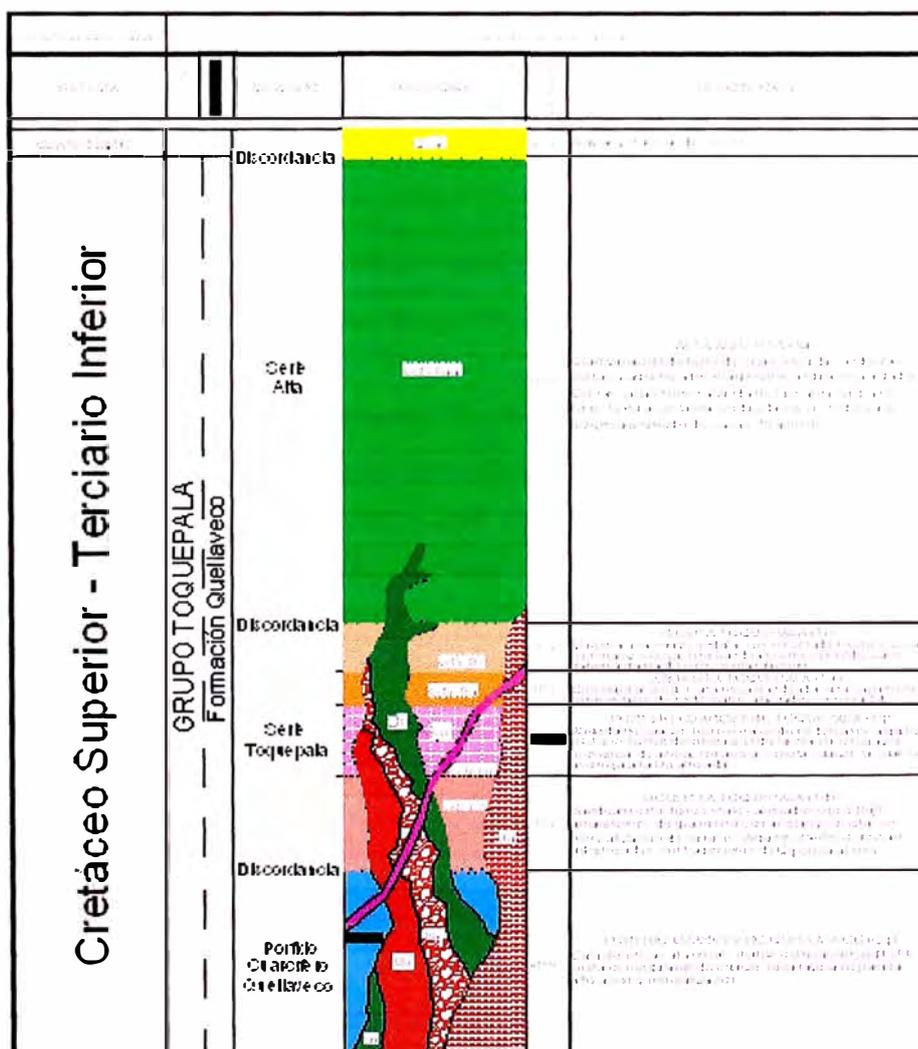


Fig. 2.2-2: Columna Estratigráfica Local.

2.2.2 Rocas Intrusivas.

Los flujos pertenecientes al grupo Toquepala, y más concretamente los del volcánico Quellaveco, fueron posteriormente fracturados e intruidos por stocks de composición ácida a intermedia de edad cretácica-terciaria pertenecientes al batolito andino. El complejo de rocas intrusivas es como sigue:

2.2.2.1 Diorita.

Dentro del complejo de rocas intrusivas, el batolito de diorita es el más antiguo y el más extenso. Es una roca de grano medio a fino, cuarzo relleno intersticios y en intercrecimientos con ortosa, dentro de los ferromagnesianos están la biotita y la hornblenda, también es notorio observar turmalina en rosetas en ciertas caras de fracturas. Los afloramientos presentan un color gris verdoso a verde claro, y en superficie el color es de gris claro a gris. En toda la zona se presenta parcialmente alterada y reemplazada con clorita, pero en el área de la mina se le encuentra bastante alterada, los feldespatos han sido alterados a arcillas, también a sericita, el cuarzo no se puede distinguir solo en zonas fuertemente sericitizadas y argilizadas, donde se observa pequeños fenocristales. La biotita y hornblenda ha sido reemplazada por clorita, dándole una coloración verdusca a la roca. Según determinaciones radiométricas efectuadas en 1968 por M. Laughlin y otros, dió como resultado 58 MA.

2.2.2.2 Dacita Porfirítica (Dp).

Esta asociado a los procesos de alteración y mineralización del depósito y pertenecen al stock dacítico. Su textura es Porfirítica, de grano fino y los fenocristales ocurren en una matriz finamente granulada. Los feldespatos (plagioclasas sódicas, anortoclasas y sanidina) en fenocristales. Entre los máficos figuran la biotita y algo de anfíboles. El color de su afloramiento es marrón parduzco a pardo, en fractura fresca es blanca a gris claro. La textura Porfirítica que muestra sugiere dos momentos de cristalización: El primero tiene una cristalización lenta, resultando cristales subhedrales y anhedrales de anfíboles, biotita, plagioclasa y cuarzo, luego devino un enfriamiento rápido, característico de poca profundidad y en donde la presión hidrostática y litostática es considerable, haciendo el emplazamiento más rápido, lo que dió origen a una matriz microgranular. También se ha determinado la edad radiométrica por el método K/Ar, resultando una edad de 54.1 MA.

2.2.2.3 Dacita Aglomerada (Da).

En el límite N del yacimiento existe un diatrema o cuello volcánico de forma groseramente cilíndrica, con el eje vertical. Se piensa que su origen se debe por la acción de una ventana explosiva (fuga explosiva de magmas cargados de gas). A este cuello volcánico cayeron fragmentos de brechas en su mayor parte y también otros tipos de

rocas, los que fueron englobados y alterados por una matriz fundida provenientes de magma residual al final del proceso de intrusión, esta intrusión fue de dacita. A este tipo de roca así formada en Toquepala se le ha denominado "Dacita Aglomerada". Se ha considerado como inter o postmineral, por esta razón contiene poca cantidad de mineral.

2.2.2.4 Latita Porfirítica (Lp).

Se presenta como una de las últimas intrusiones en el sistema hidrotermal. Está en forma de diques delgados y poco inclinados intruyendo a la Dacita aglomerada y otras rocas. Su textura es porfirítica, siendo los fenocristales de ortosa y feldespatos plagioclasas en una matriz muy fina. Con la formación de esta roca se termina la actividad intrusiva en el área de Toquepala.

2.2.3 Brechas.

El fracturamiento y la mayor o menor rotación de los fragmentos así fracturados, englobados en una matriz que puede ser muy variada, determina la existencia de los diferentes tipos de brechas.

En forma generalizada, las brechas de Toquepala se pueden agrupar en dos tipos: Brechas Angulares y Brechas de Guijarros.

Los primeros investigadores del yacimiento, llamaron a las angulares "Brechas de Mena" (Ore Breccia), pues los abundantes espacios interfragmentales se encuentran rellenos con minerales de ganga y sulfuros cupríferos. Tal denominación se escogió con el objeto de diferenciar las brechas angulares de aquellas brechas compuestas por fragmentos redondeados, de tamaño heterogéneo y cementado por una matriz de roca sólida, las cuales no contienen mineralización económica y las que se denominan "Brechas de Guijarros" (Pebble Breccia).

Toquepala se caracteriza por la distribución de gran parte de mineral en cuerpos de brechas tectónicas que ocupan la parte central del yacimiento (25 % aproximadamente). Estas estructuras han contribuido significativamente a la concentración de valores de cobre al ofrecer gran permeabilidad a las soluciones hidrotermales y mineralizantes. También existen, dentro o colindante con las brechas mineralizadas, cuerpos extensos de brechas estériles.

2.2.3.1 Brecha Angular (Bx).

Recibe varias denominaciones, como "Shater Breccia", "Fracture Breccia", "Crackle Breccia" o más comúnmente "Stockwork", donde se observa un intenso fracturamiento,

los fragmentos son angulares, de diversos tamaños y sin aparente movimiento, probablemente causados por la presión de los magmas ascendentes.

En Toquepala esta brecha ocupa la parte central del depósito y se encuentra ampliamente mineralizada con sulfuros. Estas brechas son pre-minerales, y están constituidas por una matriz de cuarzo-turmalina y sulfuros.

El tamaño de los fragmentos es variable y va desde unos pocos milímetros hasta 20 cm. La distribución de los cuerpos de brecha es periférica al stock de pórfido dacítico. Los fragmentos de roca en las brechas corresponden al pórfido dacítico y a la roca de contacto con el stock, y por tanto la composición petrográfica de la brecha varía según su ubicación. En todos los casos existe una transición gradual en la proporción de fragmentos de cada tipo de roca dentro de la brecha. Cerca al contacto con el stock, los fragmentos de pórfido dacítico constituyen el 100 % de la brecha, pero van disminuyendo hacia el contacto con la roca intruida hasta que esta predomina totalmente. El cuerpo de brecha angular más extenso se encuentra ubicado en la zona central norte del yacimiento y tiene una forma irregular y alargada en dirección N-S, mide aproximadamente 600 x 400 metros y se ha desarrollado entre el stock de pórfido dacítico y los dos tipos de diorita (de grano fino y medio). Existen además numerosos cuerpos pequeños de configuración irregular que se hallan ubicados en todo el cuadrángulo del yacimiento y todas se encuentran en contacto con cuerpos de pórfido dacítico o en proximidad a ellos.

Las brechas angulares no poseen paredes definidas ya que en su formación pasan gradualmente desde roca sólida hasta brecha angular bien desarrollada. Sin embargo, los límites generales son irregulares en vista de planta, y tienden a ser verticales en profundidad, con una aparente reducción de tamaño en los niveles inferiores.

2.2.3.2 Brecha de Guijarros (Px).

Son de extensión menor que las brechas angulares y se pueden dividir en dos tipos predominantes en base a su conformación externa: Diatremas o Chimeneas de Brecha y Diques de Brecha. En ambos tipos el material que constituye el cuerpo está compuesto de fragmentos heterogéneos de roca, redondeados causados por una continua rotación y traslación de los mismos, en amplia variación de tamaños y cementados en una matriz fina generalmente constituida por la misma roca pulverizada.

Los clastos están constituidos por una mixtura de rocas, donde el tamaño varía desde dimensiones submicroscópicas hasta varios centímetros de diámetro. La matriz tiene una

textura que varia entre arenosa y limosa. En textura y color las brechas de guijarros han sido descritas acertadamente como una superficie de concreto recién fracturada. La brecha de guijarros no contiene mineralización económica.

Esta brecha ha sido llamada "Brecha Intrusiva", "Milled Breccia" o más comúnmente "Pebble Breccia" y es ampliamente conocida en los depósitos de cobre porfirítico. Su origen se ha tratado de explicar de la siguiente manera: El fenómeno de atrición que presenta la matriz de estas brechas implica una continua rotación y traslación de los fragmentos. Los diferentes autores de teorías que explican su origen coinciden en señalar que son aglomerados de roca fragmentada heterogénea englobados en una matriz de roca pulverizada y que han sido transportadas a distancias considerables, y emplazados finalmente a su actual posición, adquiriendo gran movilidad a través de fracturas pre-existentes, tomando formas geométricas similares a diques o a intrusivos en la intersección de fracturas. Se ubica al N del tajo, de forma ovalada en dirección NE.

2.2.3.3 Brecha de Turmalina (BxT).

A este tipo de brecha también se le considera asociado a las últimas manifestaciones hidrotermales, y parecen tener cierta relación con la mineralización de molibdeno. Esta constituida por fragmentos angulosos alterados hidrotermalmente de rocas cementadas en una matriz de cuarzo y turmalina. Estos cuerpos están confinados a las vecindades de los depósitos de origen hidrotermal.

2.2.3.4 Brechas de Colapso.

Se conocen también con el nombre de brechas de "Subsidencia" o de "Caída", se caracterizan por el ensanchamiento de las fracturas causadas por la alteración y el movimiento de los fragmentos donde el carácter anguloso de los fragmentos no ha tenido mayores variaciones. Kents y Perry, sugieren que estas brechas se originaron por la caída de fragmentos de roca hidrotermalmente alterados, por pérdida de presión o contracción del magma ascendente. Locke, sugiere que su formación fue causada por un mecanismo de "Mineralization Stopping". Briner, trata de explicar el origen del fracturamiento proponiendo varias causas, como la contracción del magma por enfriamiento, caída de la presión por disminución de la actividad intrusiva, lo que conduce a la caída de la cámara magmática. En Toquepala esta brecha es conocida como "Slump Breccia". El termino se aplica a pequeños cuerpos discontinuos de roca fragmenta, los que se dirigen en dirección NW del tajo y se extienden entre los 3580 y 3100 m.s.n.m. Las rocas afectadas por la fragmentación en discusión, incluyen granodiorita-monzonita (Zweng, 1984), dacita porfirítica y localmente cuerpos de brecha

de formación temprana cementados con turmalina. La brecha de colapso esta asociada con un dique evidentemente radial conformado de típica brecha de guijarros.

2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.

La actividad tectónica regional esta relacionada con la formación de la Cordillera de los Andes, ya que las principales estructuras siguen la orientación NW-SE de la cordillera de los Andes, y están definidas por grandes fallas de carácter regional que, en la zona de Toquepala, cortan las rocas del cretáceo-terciario. Las fallas son de cizallamiento produciendo gran fracturamiento, también se produjo fracturamiento de rocas cuando se produjo la intrusión.

El brechamiento se produjo en las zonas periféricas a las intrusiones, debido a la fragmentación de la roca de contacto.

2.3.1 Fracturamiento.

El fracturamiento varia de intenso, moderado y débil, en el área del yacimiento es intenso y del tipo "stockwork" y es producido principalmente por la falla regional Micalaco, y también en el proceso de intrusión por las presiones y tensiones.

La zona de fracturamiento intenso se encuentra a lo largo de la falla Micalaco, en los contactos intrusivo diorítico-falla, andesita Porfirítica-falla o brazos de falla, riolita-falla.

2.3.2 Fallamiento.

En la zona de estudio se puede advertir dos fallas principales: Incapuquio y Micalaco, ambas con orientación predominante NW a SE y buzamiento cercano a la vertical, dirección paralela a las estructuras regionales existentes:

2.3.2.1 Falla Incapuquio.

Es la mas extensa, va desde las inmediaciones de la ciudad de Moquegua hasta la frontera con Chile, pasa a 6.5 Km. al SW del yacimiento de Toquepala. Tiene un ancho de 500 a 1000 metros, y el material encajonado esta altamente triturado y alterado. La falla es del tipo transcurrente, habiéndose determinado en la zona de Pachia-Palca, un movimiento de los bloques tierra adentro hacia el NW. Esta falla es vertical y de rumbo N50-70W paralelo a la dirección de la cordillera andina.

2.3.2.2 Falla Micalaco.

Aproximadamente a 6 Km. al NW de la falla Incapuquio, y paralelamente a esta, se encuentra la falla regional Micalaco, reconocida en un largo de 21 Km. Y constituida por

una ancha faja de fracturamiento, brechamiento y cizallamiento de 200 a 500 metros de ancho. La falla Micalaco constituye el límite SW de la mina, sin embargo una ancha faja de mineralización en esta parte SW del yacimiento se encuentra dentro de la falla Micalaco. Las rocas involucradas son Diorita y Pórfido Cuarzífero Quellaveco, las que están afectadas por un intenso cizallamiento. De esta manera pues la falla Micalaco cruza la quebrada de Toquepala en dirección NW, y siguiendo en esa dirección el cizallamiento decrece gradualmente y da lugar a una falla vertical compleja, con muchos ramales entrelazados, constituidos por rocas intensamente fracturada y con ligera alteración hidrotermal y que contiene numerosas pero pequeñas brechas con rellenos débiles de cuarzo turmalina y algo de pirita.

La formación de la falla Micalaco antecede a la época de mineralización y ha sido una estructura principal en el desarrollo y formación del depósito de Toquepala.

2.3.2.3 Alineamiento Toquepala.

Los cuerpos intrusivos de pórfido dacítico, brechas, aglomerados y diques del yacimiento se encuentran alineados con un rumbo aproximado de N15°-20°E y coinciden con una faja de cizallamiento paralela que afecta el Pórfido Cuarzífero Quellaveco y a bloques de Diorita en la parte SE del depósito. Esta estructura inferida ha sido denominada "Alineamiento Toquepala", y es posible que su constitución original haya sido la de una zona de ancha faja de fallamiento o cizallamiento de más de tres kilómetros de longitud, que posteriormente fue ocupado y rellenado por los stocks, diatremas y brechas. Esta estructura ha sido reconocida solamente hacia el lado N de la falla Micalaco, pero es posible que también se extienda hacia el S. De ser una estructura tipo falla, es probable que el bloque E, haya sido levantado en relación con el bloque W. Una posible evidencia de este levantamiento sería la presencia del Pórfido Cuarzífero Quellaveco a mayor elevación en el lado E y la parte S Y SW de la mina. Además la Diorita del lado E cuya alteración hidrotermal es la cloritización principalmente, no se encuentra en el lado W del alineamiento, siendo en el lado W la principal alteración la cuarzo-sericita.

Cualquiera que fuere la causa de la formación del Alineamiento Toquepala, esta estructura representó una faja de debilitamiento profundo que sirvió de canalización para el emplazamiento de stocks y la posterior alteración hidrotermal y mineralización. Y es también permisible suponer que el área de intersección de ambas estructuras: La falla Micalaco y el Alineamiento Toquepala constituyó una zona de debilitamiento fundamental que sirvió para la canalización y conducción de soluciones hidrotermales y mineralizantes.

2.3.3 Diatrema.

Con este nombre se ha definido a estructuras brechosas que forman chimeneas o ventanas perforadas, a través de las rocas como consecuencia de la fuerza explosiva de magmas saturados de gas, es decir tienen un origen dinámico (volcánico) asociadas a las últimas manifestaciones hidrotermales, son inter o post-minerales, pudiendo contener pequeñas cavidades de mineral (sulfuros), en algunos depósitos tiene cierta relación con la mineralización de molibdeno. Es probable que muchas de las brechas con matriz de cuarzo-turmalina tengan este origen. K. Richard definió el Pipe de Toquepala (Brecha de Mena) se originó por la fuga de gas a lo largo de las fallas causando una explosión y formando la diatrema o cuello volcánico rellena por material de las paredes, explosiones sucesivas, erosión parcial y derrumbamiento aumentaron las dimensiones de esta, donde los fragmentos están cementados en una matriz de cuarzo-turmalina y sulfuros.

2.4 GEOLOGIA HISTORICA.

El evento geológico más antiguo que se tiene como evidencia en el área de Toquepala, es un periodo de intensa actividad ígnea, que abarca gran parte del cretáceo y probablemente abarca hasta principios del terciario.

A continuación explicamos la evolución y formación del pórfido de cobre:

Evolución 1: Esta actividad ígnea incluye también gran variedad de fenómenos eruptivos, los cuales se registraron hace 70 millones de años (Cretáceo-Terciario), dicha actividad produjo enormes cantidades de material volcánico, que se fue acumulando hasta completar una serie de mantos de lava que llegaron a alcanzar un espesor de 1500 m. de derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados inclinados ligeramente hacia el Oeste que formaron el GRUPO TOQUEPALA, que constituye el basamento regional. Posteriormente la actividad ígnea, fue principalmente intrusiva, de composición ácida a intermedia. Estas grandes masas de roca en fusión intrusieron, rompieron y fundieron las lavas enfriadas del grupo Toquepala. El complejo de rocas intrusivas constituyen apófisis del gran batolito andino, que fueron emplazadas en diferentes etapas. Debido a que provinieron de un magma de composición química variable, resultaron diferentes tipos de roca por diferenciación como: Dioritas, Dacitas Porfiríticas, Brechas, etc.

Evolución 2: La actividad tectónica regional se relaciona a la formación de la Cordillera de los Andes, y estructuralmente en el área de Toquepala está representada por las fallas Micalaco y Alineamiento Toquepala, a las que se suma la falla regional Incapuquio, las

que produjeron una amplia zona de debilitamiento. Luego, soluciones hidrotermales de alta temperatura, resultantes de una etapa de diferenciación magmática, fluyeron a través de las rocas existentes debilitadas tectónicamente, destruyendo y alterando su composición química y haciéndolas más permeables. Estas soluciones favorecidas por un intemperismo pre-existente produjeron la alteración y mineralización primaria de pirita y calcopirita.

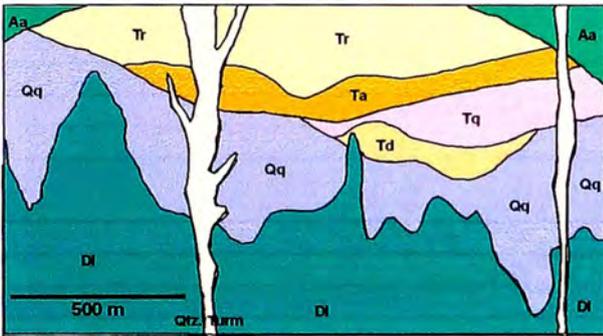


Fig 2.4-1: Evolución 1.

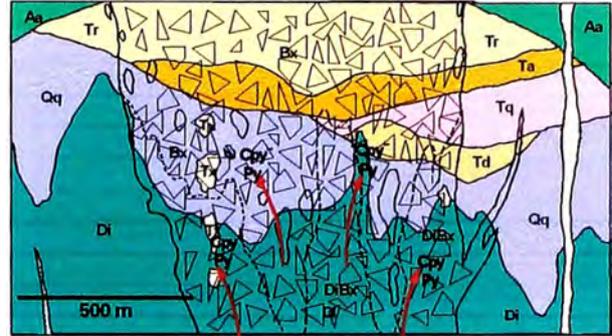


Fig 2.4-2: Evolución 2.

Evolución 3: Continúan las intrusiones, esta vez se destacan diferentes eventos intrusivos de Dacita Porfírica que dan origen a un sistema de estructura de Brechas Pipe parcialmente mineralizadas con calcopirita, molibdenita y anhidrita.

Evolución 4: Se produce un brechamiento de colapso (brechamiento secundario) provocando una subsidencia o pérdida de presión en el sistema, esto trae consigo mineralización de calcopirita, molibdenita y anhidrita.

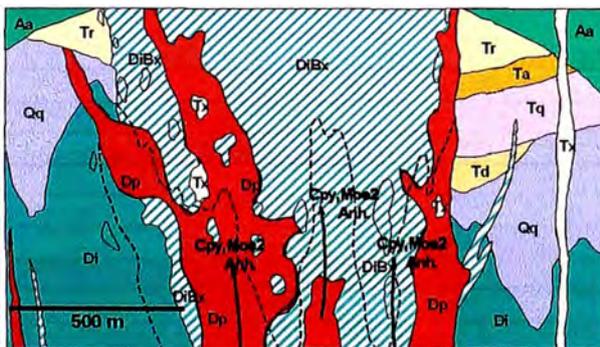


Fig. 2.4-3: Evolución 3.

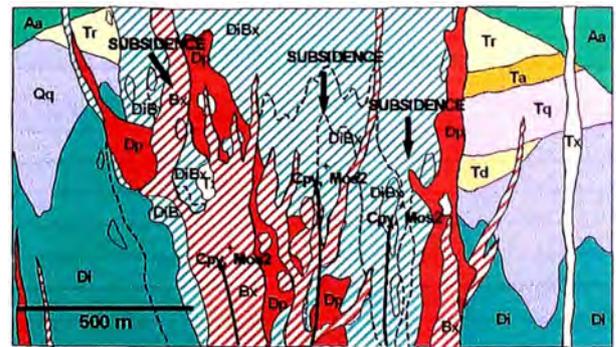


Fig. 2.4-4: Evolución 4.

Evolución 5: Un evento ígneo tardío tuvo lugar inmediatamente al norte del yacimiento, caracterizado por una violenta explosión eruptiva que formó un cráter volcánico (diatrema), que probablemente destruyó parte de la zona mineralizada, ocasionando derrumbe de las paredes del cráter.

Evolución 6: Continuaron las inyecciones de un magma dacítico que fue engullendo a los fragmentos de diversos tamaños y formas de rocas pre-existentes de las paredes del cráter, por lo que se denomina Pórfido de Dacita Aglomerada. Seguidamente la Pebble Brecha se desarrolla en la zona de debilidad bordeando el cráter, acompañado de una mineralización de cuarzo-turmalina.

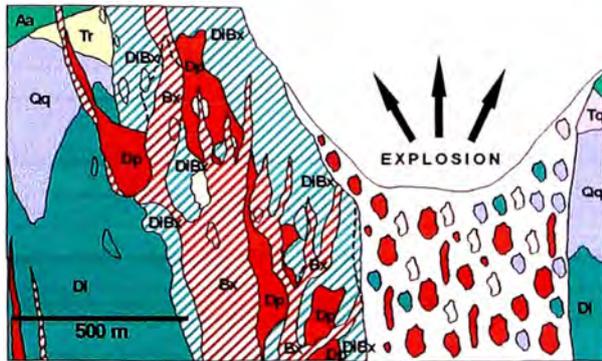


Fig. 2.4-5: Evolución 5.

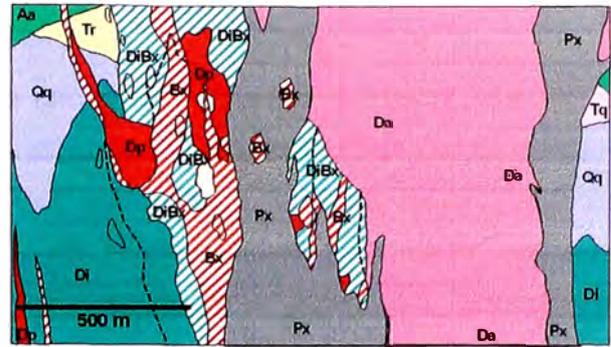


Fig. 2.4-6: Evolución 6.

Evolución 7: Las últimas etapas de intrusión de las fases de volcanismo en Toquepala, las representan intrusiones de diques porfíricos (latita porfírica). Después de estas etapas de actividad ígnea, le siguieron etapas de intensa erosión, asociadas a variaciones en el nivel de las aguas subterráneas, que ocasionaron el lavado (lixiviación) de la parte superior de la zona mineralizada y que dieron como resultado una zona de concentración natural de minerales en profundidad (Zona de enriquecimiento secundario).

Evolución 8: Los principales agentes de erosión fueron el agua superficial y los glaciares, los que al actuar dieron como resultado la actual topografía. Esta topografía en el área del depósito ha sido totalmente modificada por las labores de minado, y en sus alrededores por rellenos con material estéril. La edad estimada para el depósito de Toquepala es alrededor de 52 a 58 m.a.

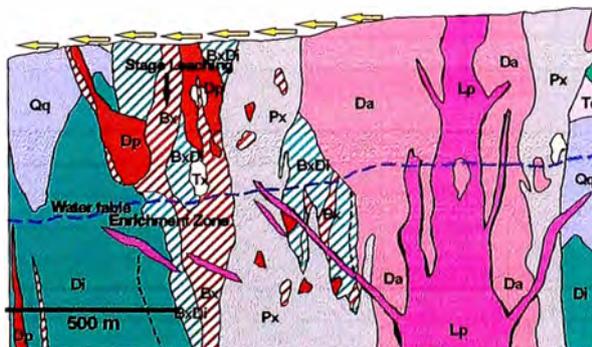


Fig. 2.4-7: Evolución 7.

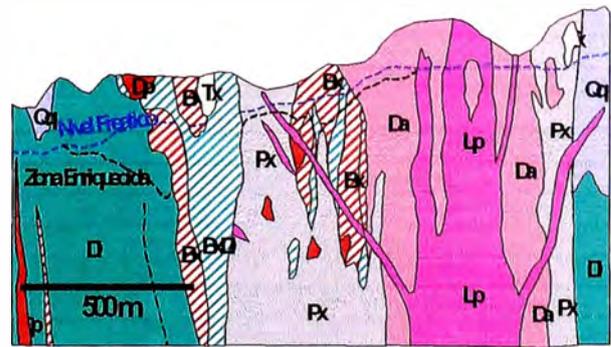


Fig. 2.4-8: Evolución 8.

CAPITULO 3

GEOLOGIA ECONOMICA

3.1. ALTERACIONES HIDROTERMALES.

Por alteración hidrotermal, se entiende a las transformaciones mineralógicas producidas en las rocas huéspedes de los yacimientos por efecto de las soluciones hidrotermales que las atraviesan. En Toquepala, después de la principal actividad intrusiva, se hicieron presentes soluciones fluidas a elevada temperatura resultantes de una etapa de diferenciación magmática que atravesaron todas las rocas existentes destruyéndolas y alterando su composición química, haciéndolas más permeables. Estas soluciones favorecidas por el debilitamiento pre-existente produjeron la alteración hidrotermal y mineralización primaria.

La alteración hidrotermal disminuye a medida que se aleja del área de depósito, siendo de naturaleza intensa en el depósito mismo, y a afectado a todas las rocas tanto extrusivas como intrusivas, a excepción de la latita porfírica, en el área. Los fluidos hidrotermales han contribuido al desarrollo del zonamiento horizontal y vertical siguiendo un modelo concéntrico que generalmente no se observa en el campo, debido a la presencia de varios cuerpos intrusivos que rompen la simetría (Fig. 3.1-1).

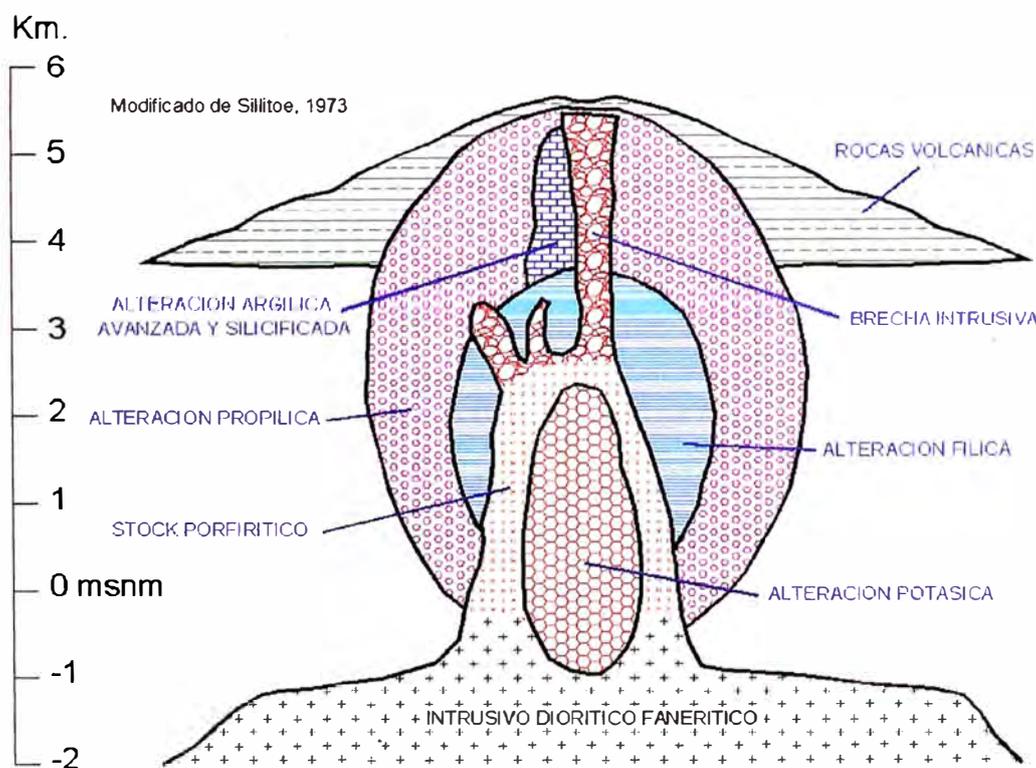


Fig. 3.1-1: Sección vertical del modelo de alteración del pórfido de cobre de Toquepala.

En Toquepala, se puede observar que como producto de las alteraciones se han producido asociaciones mineralógicas que se han distribuido en zonas concéntricas alrededor del tajo. Cada zona de alteración se caracteriza por una asociación mineralógica determinada que refleja el grado de intensidad de la alteración que afectó a la roca caja, desde el yacimiento hasta la roca no alterada en la periferia del sistema hidrotermal. Un rasgo del zonamiento de alteración hidrotermal es su carácter gradacional, es decir no se puede hablar de límites entre una y otra zona de alteración, ya que en realidad estas se traslapan por varios metros de distancia. En líneas generales, el proceso hidrotermal comienza por la formación de dos tipos de alteración: potásica, en el yacimiento, y propilítica a la periferia, a las que se superponen las otras alteraciones.

Los factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas son: 1) Composición de las soluciones, 2) Composición original de la roca, 3) Temperatura y Presión de las soluciones, 4) Duración de la interacción agua/roca, 5) Permeabilidad. De acuerdo a ello, en el depósito de cobre porfirítico Toquepala se han reconocido 4 tipos principales de alteración. Existe además la alteración a sílice o silicificación que afecta mayormente al Pórfido Cuarzífero Quellaveco.

- Alteración Propílica (clorita, epidota, calcita, pirita).
- Alteración Argílica (cuarzo, caolinita, montmorillonita).
- Alteración Fílica (cuarzo, sericita, pirita).
- Alteración Potásica (feldespato K, biotita).

La distribución de estos tipos de alteración se pueden observar en el plano superficial de alteraciones de la mina (Fig. 3-1.2).

3.1.1 Alteración Propílica.

Es la más extendida y normalmente se encuentra en los bordes de la mina, circundando a la zona argílica y fílica, exteriormente grada hacia roca fresca. Este tipo de alteración fue producida por soluciones deutéricas calientes e hidratadas, ricas en bióxido de carbono. Las rocas alteradas están compuestas de minerales como: Clorita, calcita, epidota, pirita y otros. Esta alteración afecta al cuerpo de diorita fina y dacita porfirítica, y fuera del yacimiento a la andesita, donde principalmente las biotitas, plagioclasas y otros ferromagnesianos son reemplazados por clorita y epidota, dándole una coloración verdusca a la roca. En las proximidades a la zona argílica la propilitización es más avanzada y las plagioclasas se encuentran parcialmente argilizadas o sericitizadas, a través de los planos de clivaje o macla. A este tipo de alteración se le conoce también con el nombre de Cloritización.

3.1.2 Alteración Argílica.

Es una alteración supérgena, en las cercanías a la superficie, dentro de las zonas de mineralización: Encape lixiviado, Oxidos y Sulfuros enriquecidos. Aunque no se descarta que el sector más profundo de esta alteración, haya sido producida por acción hidrotermal.

No se considera como una zona independiente, sino dentro de la zona filica. Se caracteriza por la formación de minerales de arcilla (caolinita-motmorillonita-illita) asociados a la lixiviación del calcio (ausencia de epidota y carbonatos). Esto sugiere un tipo de alteración ácida con temperaturas máximas de 400-500 °C (máxima temperatura a la que es estable la caolinita). Los minerales originales de las rocas son alterados (plagioclasas), la Silicificación es más importante que en la zona externa y los minerales acompañantes son cuarzo, sericita y pirita. Hacia la periferia grada a la zona propílica y hacia el centro la argilización y sericitización se encuentran normalmente interdigitadas de tal manera que sus límites no son muy claros y usualmente son difíciles de establecer. Está poco difundido en la mina, presentándose mayormente en el Pórfido Cuarzífero Quellaveco. Los feldespatos son atacados por sustancias volátiles tales como el boro, flúor y bióxido de carbono, con la formación del mineral llamado Caolín. En Toquepala se presentan en forma de vetillas o núcleos arcillosos, relleno de las fracturas del Pórfido Cuarzífero Quellaveco.

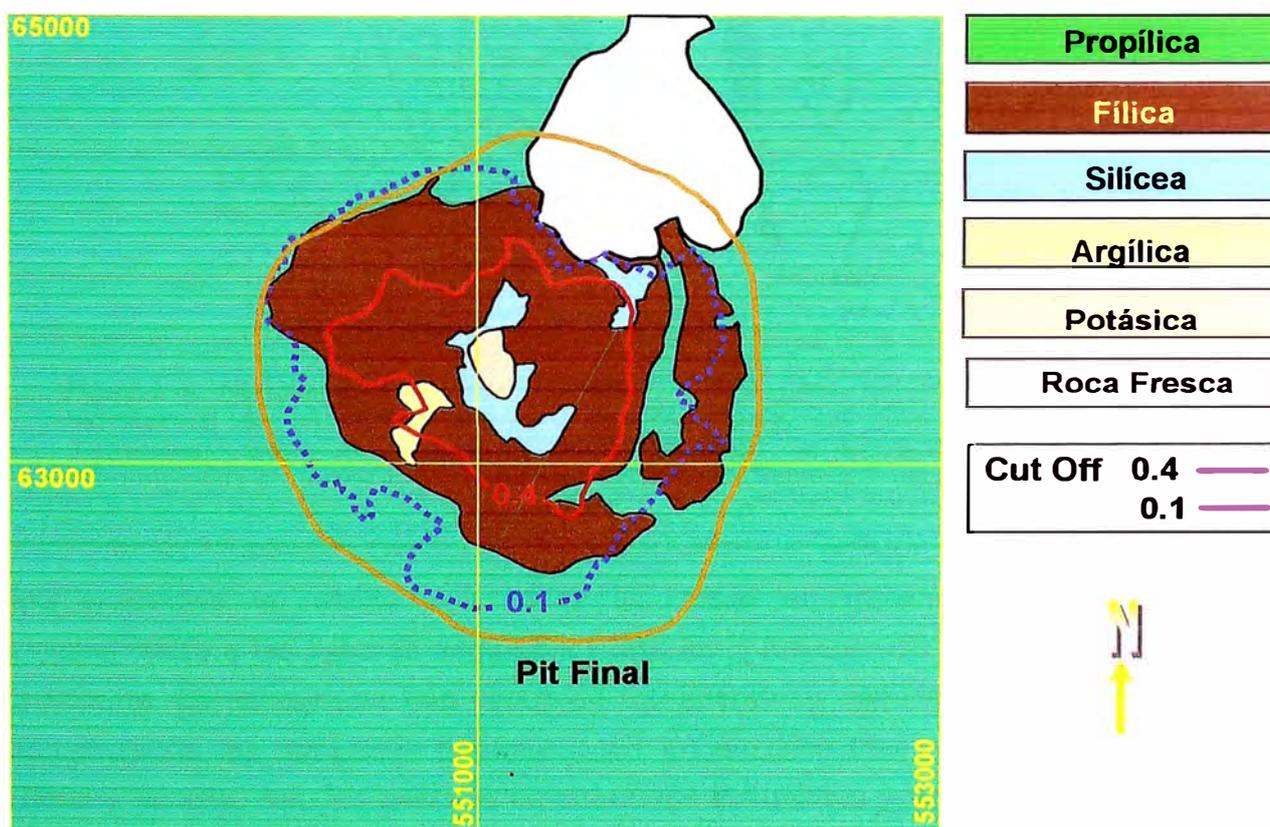


Fig. 3.1-2: Plano superficial de alteraciones, en Toquepala, modelado con taladros al 2004.

3.1.3 Alteración Fílica.

Llamada también Sericitización, es la fase de alteración más intensa y la más importante por estar asociada con la mineralización económica del depósito (Fig. 3.1-3). Esta circundada por la zona propílica o argílica y rodea a la zona potásica, donde las asociaciones típicas de cada zona se traslapan. Los ensambles característicos son el resultado de la introducción de potasio, destrucción de los feldespatos y precipitación de la sílice formando cuarzo que no participó en los nuevos minerales formados. Como consecuencia de estos procesos, se forman las asociaciones: cuarzo-sericita-arcilla y sericita-cuarzo-ortosa, que se ubican hacia la zona argílica y potásica respectivamente, hacia la parte central de esta zona se observa frecuentemente la asociación sericita-cuarzo exclusivamente. El rasgo característico de la zona fílica, es la alteración de los silicatos con aspecto de finas hojuelas (moscovita equigranular).

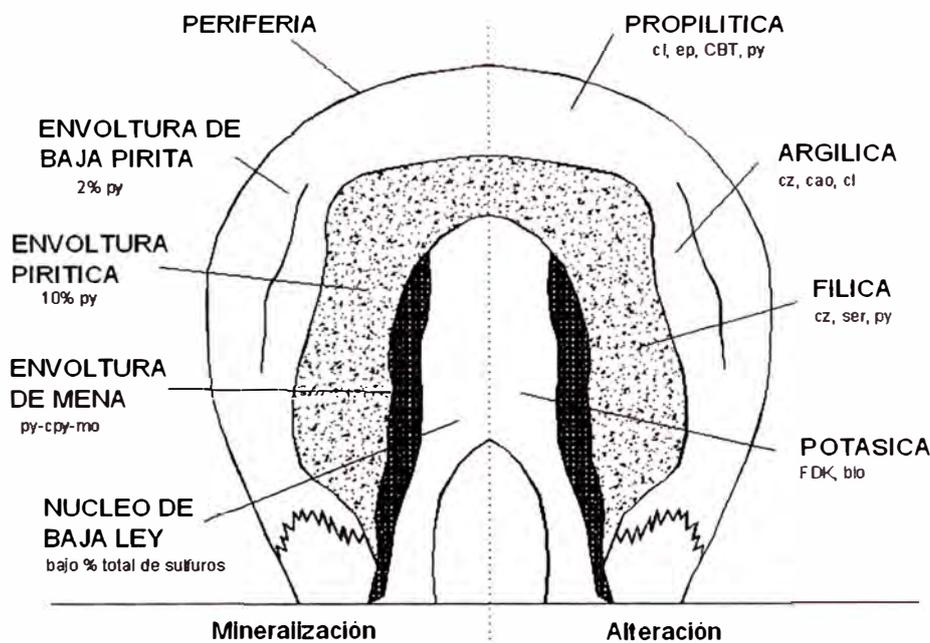


Fig. 3.1-3: Modelo ideal de Lowell y Guilbert (1970) para representar la alteración hidrotermal de un Pórfido cuprífero. En Toquepala, los tipos de alteración se distribuyen desde el núcleo del yacimiento en la alteración más intensa, disminuyendo en intensidad hacia la periferia hasta llegar a la roca fresca.

Esta alteración ha afectado a todas las rocas en mayor o menor grado, pero principalmente a las brechas angulares centrales y los cuerpos de Diorita del lado W del yacimiento. En estas rocas han destruido totalmente su textura original convirtiendo y/o reemplazando los minerales originales con un mosaico fino constituido por granos de cuarzo y sericita. Así, los cristales de cuarzo de las dacitas y riolitas se presentan total o parcialmente corroídos y sustituidos por cuarzo y sericita, igualmente los feldespatos totalmente alterados a cuarzo-sericita o sustituidos por arcilla en menor grado. K.

Richard y J. Courtright (1958) en su estudio del yacimiento de Toquepala, asocian a este grado de alteración con la mineralización del depósito, y con la mayoría de los depósitos minerales, especialmente en los pórfidos de cobre.

3.1.4 Alteración Potásica.

Constituye el núcleo de la alteración de los desarrollos hidrotermales asociados a depósitos porfiríticos. Se presenta como una asociación temprana, más interna y profunda. Esta representada por el ensamble cuarzo-feldespato potásico-biotita-sericita, debido a la introducción del potasio a temperaturas superiores a los 480 °C. Además están presentes cloritas, anhidrita, yeso, carbonatos, turmalina, rutilo como minerales accesorios, cabe destacar dentro de este grupo la presencia abundante de anhidrita diseminada o en venillas frecuentemente asociada con sulfuros. El cuarzo se presenta en forma microgranular y en finas venillas, asociado con ortosa, que ocurre en la misma forma. La biotita es microgranular y en venillas intercrecida con ortosa, también se presenta formando "nidos" en asociación con minerales metálicos. En la mina se ha observado un ligero incremento del contenido de ortosa y biotita hacia la parte central y profunda de la zona fílica.

3.1.5 Silicificación.

Consiste en la invasión de sílice en la roca y reemplazamiento de los minerales por ella, ha afectado únicamente el Pórfido Cuarzífero Quellaveco. La penetración de la sílice se realizó principalmente a través de las fracturas de la roca y en varias zonas el reemplazamiento es total y la roca así silicificada adquiere un tinte vítreo y emite un sonido muy característico al ser golpeado con un martillo.

3.1.6 Turmalinización.

La turmalina es un mineral de formación tardía y sus cristales más grandes se encuentran comúnmente enclavados en granos de feldespato y cuarzo. Son bien frecuentes los "soles radiados" en la Diorita (lado W) y con menor frecuencia en el Pórfido Cuarzífero Quellaveco al W, que se forman a expensas del feldespato. Durante las etapas postmagmáticas, ciertas rocas (Diorita y QQ) son alteradas por líquidos y sustancias volátiles residuales que sustituyen a los minerales originales (principalmente feldespato) para producir minerales como turmalina, fluorita, moscovita y cuarzo. En Toquepala se formaron las brechas de turmalina y cuarzo.

Vemos pues, que la alteración hidrotermal que afecta al yacimiento se encuentra restringida al área mineralizada de tal manera que las rocas estériles situadas a corta distancia del yacimiento no muestran efectos de alteración. Esta es una característica

peculiar del yacimiento de Toquepala ya que en la mayoría de los pórfidos de cobre se distinguen por tener zonas amplias de alteración rodeando a los cuerpos mineralizados. Sin embargo, existen zonas pequeñas y aisladas en las cercanías del yacimiento que presentan alteración hidrotermal y mineralización de cuarzo-turmalina en conjunción con cuerpos de brecha y ramales de falla.

3.2 ZONAS DE MINERALIZACION.

El depósito de Toquepala es un yacimiento de cobre diseminado porfirítico, de origen hidrotermal, tipo mesotermal (entre 225 °C a 475 °C, según la clasificación de Lindgren). Las soluciones mineralizantes encontraron una zona de debilitamiento expresada en las estructuras como son la falla Micalaco y el alineamiento Toquepala, rellenando las fracturas y diseminándose en granos. La mineralización metálica es sencilla y la distribución de valores de cobre es uniforme, tanto lateralmente como en profundidad. La mineralización al igual que la alteración, se ha centrado en el área del yacimiento, encontrándose tan sólo pequeñas cantidades de óxidos fuera de él.

Como es de conocimiento, el proceso de alteración se complementa con la mineralización, aunque esto no implica necesariamente, que el proceso de alteración traiga consigo el que origine depósitos minerales económicos. Los fenómenos de alteración y mineralización, actúan desde la superficie hasta profundidades variables.

Posteriormente a la formación del yacimiento se produjo una intensa erosión siendo su principal agente las aguas, que erosionaron y meteorizaron los minerales juntamente con las rocas. Las aguas superficiales oxidan a muchos minerales metálicos (En Toquepala: pirita, calcopirita y bornita en menor cantidad, de origen primario), produciendo disolventes que disuelven a su vez a otros minerales. El yacimiento metálico queda de este modo oxidado y desprovisto de casi todos sus minerales valiosos, hasta el nivel de la capa de aguas freáticas o hasta una profundidad donde no puede producirse ya la oxigenación. La parte oxidada se denomina Zona de Oxidación. Al producirse la erosión, con la consiguiente modificación de la topografía, varió también el nivel freático, incrementándose de este modo la zona de oxidación.

A continuación, se explica cada una de las zonas de mineralización definidas en el pórfido de Toquepala, descendentemente, tal como se presenta en la mina (Fig. 3.2-1):

3.2.1 Zona de Encape Lixiviado (Leach Capping).

Superficialmente se puede observar esta zona en la parte superior del yacimiento, extendiéndose un poco fuera del mismo, con colores pardo rojizo-amarillento por la

presencia de limonitas. También ha sido reconocida verticalmente por los taladros diamantinos, donde se muestran rocas volcánicas (andesitas y riolitas) intensamente fracturadas y alteradas, con espesores de hasta 300 metros y abarca en su totalidad a la Serie Toquepala, y esta invadida por óxidos de hierro, siendo la limonita y hematita los más abundantes, pero hay también goethita y jarosita, los que le dan a la zona una coloración entre amarillo y rojo oscura.

El origen de la zona lixiviada, se atribuye a la infiltración en el terreno de las aguas de lluvia, que al atacar y disolver la pirita y otras sales de las rocas, se acidificó, aumentando gradualmente su poder disolvente en esta zona vadosa. Aunque el ataque fue lento, esta agua acidificada llevó un trabajo continuo y prolongado que disolvió todos los minerales económicamente valiosos, para después acarrearlos hacia abajo y redepositarlos a cierta profundidad. De este modo, se produjo en el depósito, una redistribución de su riqueza metálica. En esta capa lixiviada, solo han quedado minerales inatacables o compuestos insolubles como: Limonita, hematita, goethita, jarosita, pirolusita. La ley de cobre es nula, por lo que debió ser desbrozada como desmonte. En la actualidad, la cubierta lixiviada ha sido extraída del yacimiento, quedando aun enormes cantidades de este material en los bordes y niveles superiores de la mina, sobretodo hacia el lado de la pared W.

3.2.2 Zona de óxidos

La zona de óxidos de cobre es la comprendida entre el encape lixiviado y la franja de enriquecimiento secundario. Esta zona no se ha desarrollado en Toquepala, alcanzando apenas la altura de un banco como espesor promedio.

Los remanentes pequeños que se pueden observar en los afloramientos fuera del tajo, corresponden a óxidos, carbonatos, sulfatos y silicatos de cobre, que no constituyen mena de interés económico industrial. La ocurrencia de estos minerales en la zona oxidada varía según sean los metales primarios, y se da principalmente en fallas y fracturas. Los principales minerales de óxidos de cobre reconocidos son: Malaquita, crisocola, calcantita, azurita, brocantita, tenorita y cuprita. El cobre nativo es encontrado muy esporádicamente en los diques de latita porfirítica.

La presencia de estos compuestos oxidados se debe a un incompleto ataque de las aguas sobre los sulfuros primarios del yacimiento. Así por ejemplo, la malaquita y la azurita serian resultado de la carbonatización de la calcopirita.

Las observaciones de campo, nos indica que los procesos de oxidación han dado lugar a que el protomineral antes inexplorable haya adquirido un enriquecimiento natural por debajo de esta zona de oxidados, como veremos enseguida.

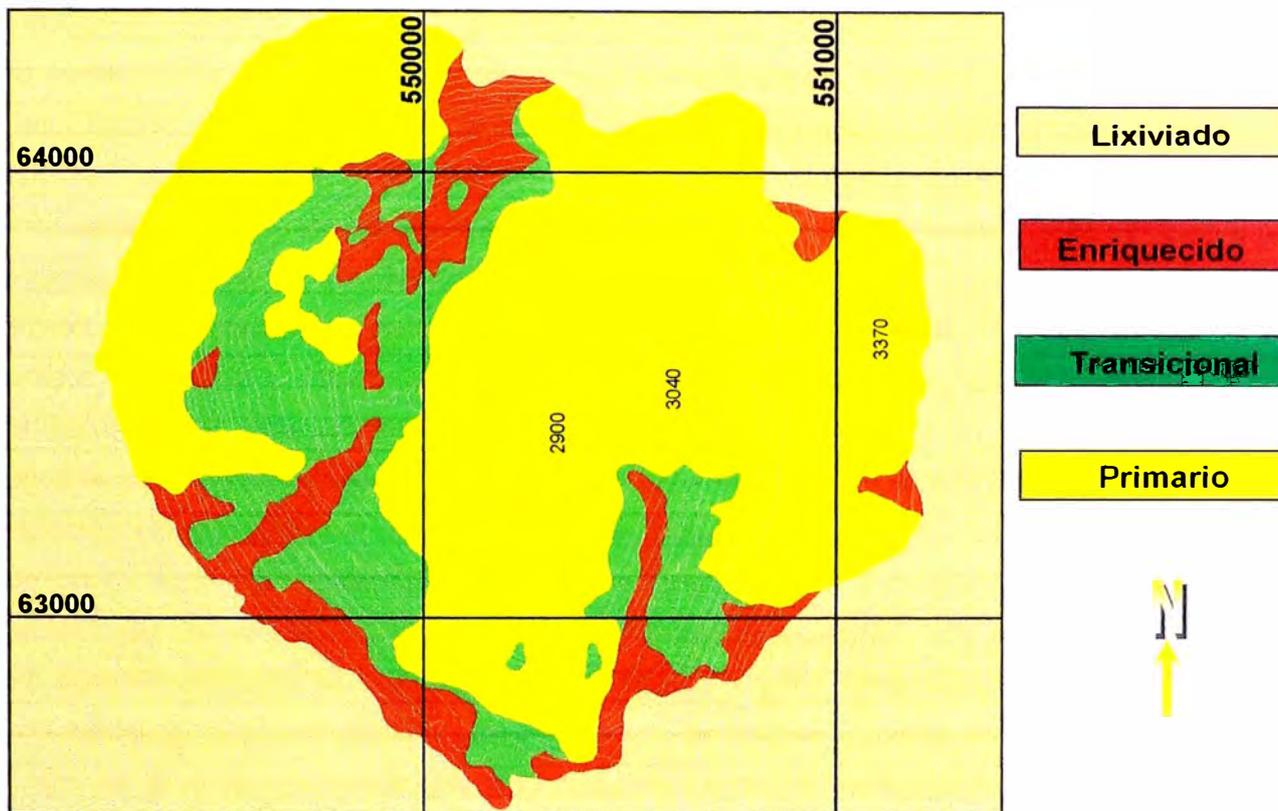


Fig. 3.2-1: Plano de mineralización (Toquepala).

3.2.3 Zona de Enriquecimiento Secundario

Si las soluciones que se filtran hacia abajo penetran en la capa de aguas freáticas y pasan por debajo de ellas, su contenido metálico puede precipitarse en forma de sulfuros secundarios (calcosita y covelita) y dar origen a una zona de enriquecimiento secundario o enriquecimiento supergénico.

El agua con oxígeno disuelto y entremezclado es el reactivo más poderoso para la oxidación, aunque también el anhídrido carbónico desempeña un papel de importancia. Estas sustancias reaccionan con ciertos minerales dando disolventes poderosos tales como el sulfato férrico y ácido sulfúrico.

Toquepala, como la mayoría de los yacimientos metálicos contiene pirita. Este mineral al ser atacado, dió fácilmente azufre con el que se forma sulfato de hierro y ácido sulfúrico: El sulfato ferroso se oxida fácilmente, convirtiéndose en sulfato férrico e hidróxido férrico, además el sulfato férrico se transforma en varios sulfatos básicos. Es muy

importante la presencia de pirita, como ya hemos explicado, nos da los disolventes principales: Sulfato férrico, ácido sulfúrico, hidróxido férrico y sulfato férrico básico. Además el sulfato férrico se regenera continuamente, no solo a partir de la pirita, sino también de la calcopirita y otros sulfuros. El hidróxido férrico se transforma en oligisto y goethita, y forma la limonita siempre presente que caracteriza las zonas de oxidación. Los sulfatos férricos básicos, de los cuales existen varios, pueden ser depositados como tales: Estas soluciones frías y diluidas se filtran lentamente hacia abajo a través del depósito hasta que se producen las condiciones apropiadas para su deposición. Si la pirita está ausente en los yacimientos que experimentan oxidación, solo se forma una pequeña cantidad de disolventes, se produce poca solución, y los sulfuros tienden a convertirse in situ en compuestos oxidados, y los sulfuros hipógenos no se enriquecen. El mineral primario debe también contener metales que puedan experimentar enriquecimiento supergénico. Es condición indispensable también la permeabilidad del depósito para permitir que el goteo de las soluciones penetre por debajo de la zona de oxidación (el depósito de Toquepala cumple con esta condición). También es importante que en la zona de oxidación esté libre de precipitantes que puedan fijar el contenido metálico de las soluciones para formar compuestos oxidados. Los sulfuros supergénicos solo pueden depositarse cuando no hay oxígeno, y esto generalmente ocurre debajo del nivel freático, pero en ciertas circunstancias, el oxígeno puede estar ausente también dentro de la zona de oxidación, y la deposición de sulfuros puede tener lugar allí. Los minerales enriquecidos se depositan a partir de soluciones de sulfato, y solo a expensas de otros sulfuros o minerales similares, sustituyéndolos. Por lo tanto, los minerales hipogénicos subyacentes, son esenciales para la deposición de sulfuros supergénicos. En Toquepala, los sulfuros hipogénicos sobre los que se produce la deposición son la calcopirita y pirita, y en menor grado la bornita, y los minerales secundarios que resultan son la calcosita y la covelita, predominando ampliamente la primera. Los minerales supergénicos predominan en las brechas angulares.

3.2.4 Zona Transicional

Esta zona es considerada como su nombre lo indica una transición entre la mineralización primaria y la zona de enriquecimiento supérgeno, la calcosita va disminuyendo conforme se profundiza en el yacimiento, pudiéndose encontrar más pirita y calcopirita, e incluso en algunas muestras de roca se puede observar minerales de calcopirita que están pasando progresivamente a calcosita rellenando espacios en las brechas, diseminado y en venillas, asociado al cuarzo.

El límite superior o inferior de esta zona es muy complicado e inestable.

El ensamble característico de esta zona es el de pirita-calcopirita-calcosita.

3.2.5 Zona Primaria

Se encuentra ubicada en la parte inferior del depósito y esta zona no ha sido afectada por procesos secundarios en cuanto a mineralización. Esta representada por pequeñas diseminaciones de pirita y calcopirita, y afecta a todas las variedades de roca menos al pórfido de latita. En esta zona, el sulfuro económico principal es la calcopirita, estando su mayor concentración en diseminaciones y rellenando angostas vetillas. Existe también molibdenita, siendo su distribución bastante irregular y la mayor concentración de este mineral se encuentra en relación con cuerpos pequeños de brechas angulares, pero en algunas zonas no brechadas la molibdenita se presenta en forma de pequeños núcleos o pátinas finas en vetillas abiertas.

La mineralización primaria que constituye mena es de reducida extensión y esta supeditada y restringida a la zona de brecha angular y algunos sectores de Diorita, y también a los niveles más profundos de la mina.

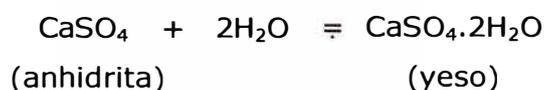
3.3 DOMO DE YESO.

La casi nula porosidad y permeabilidad del yeso/anhidrita ha sido una barrera impenetrable para el movimiento descendente de las aguas meteóricas. De este modo impidió el proceso de enriquecimiento secundario, en algunos sectores del tajo, que tienen como límite inferior el tope de yeso/anhidrita.

Estudios petrográficos muestran que la anhidrita ocurrió junto con la mineralización primaria, siendo de origen hidrotermal, y se la encuentra asociada a la alteración cuarzo-sericitita. La anhidrita típicamente ocurre en venillas, diseminado y/o como reemplazamiento mineral en las paredes. Se ha reconocido tres generaciones de anhidrita, y posiblemente representa a las múltiples actividades hidrotermales del centro intrusivo de Toquepala.

En la mina, el yeso se encuentra distribuido en todos los tipos de roca que están por debajo del nivel 3145, incluyendo la Dacita Aglomerada y los diques de Latita Porfirítica.

Dentro del tajo, la ocurrencia de la anhidrita se da como un producto de alteración potásica o en rocas intensamente sericitizadas. Al hidratarse la anhidrita se convierte en yeso y viceversa, y podríamos suponer que lo hace del siguiente modo:



Respecto a la formación de esta anhidrita de origen hipógeno, se postula que las soluciones hidrotermales cargadas excesivamente por sulfatos precipitaron preferentemente en la zona potásica, con un suministro abundante del calcio procedente de la alteración de las plagioclasas.

La anhidrita al hidratarse con la presencia de agua, puede llegar a removilizar y precipitar a mayores profundidades, al yeso resultante. A temperaturas ordinarias el yeso es ligeramente menos soluble, pero a temperaturas altas lo es la anhidrita; alta temperatura y baja humedad favorece a la formación de la anhidrita.

La presencia de estos dos sulfatos de calcio: anhidrita y yeso, se manifiesta en la mina con un incremento marcado de la competencia de la roca que lo alberga, por ejemplo se presenta como cementante en las brechas, o como relleno de cavidades y fracturas de algunas rocas, de esta manera el RQD experimenta un incremento de hasta 100%.

Ambos sulfatos se presentan esencialmente en las zonas de alteración fílica y argílica, en trazas en la zona propílica, siendo sus relaciones con la mineralización de cobre y molibdeno irregulares.

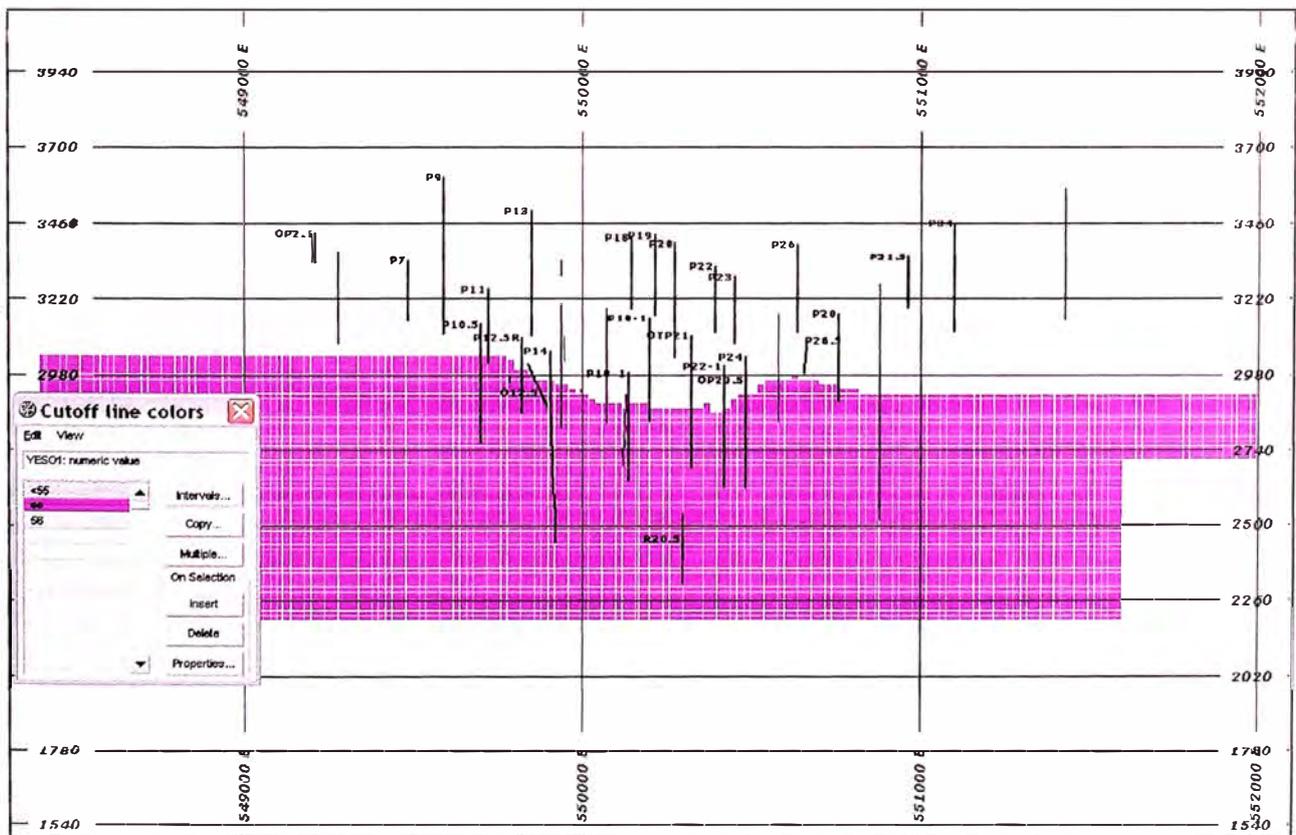


Fig. 3.3-1: Sección vertical "P" del cuerpo dómico de yeso (color fucsia), modelo 2005

3.4 MINERALOGIA.

Los minerales metálicos que se presentan en el depósito de Toquepala son simples, siendo la distribución de leyes casi uniforme, tanto horizontal como verticalmente. Los minerales económicos se encuentran como sulfuros, diseminados a través de toda la roca, en pequeñas venillas, rellenando vacíos o en pequeños agregados. La mineralogía principal esta compuesta por calcopirita, calcosita, molibdenita, pirita. Ocasionalmente y con carácter de trazas se ha encontrado marcasita, pirrotita, bornita, covelita, galena y esfalerita. La molibdenita se encuentra en pequeñas cantidades, generalmente en asociación con las brechas angulares. Los minerales secundarios muy ocasionales en la parte superior del tajo son: Crisocola, malaquita, calcantita, azurita y sulfatos de cobre. Entre las limonitas: Hematita, goethita, jarosita y especularita. Los minerales no metálicos principales son: Yeso, calcita, turmalina, cuarzo, caolín.

En la Tabla 3.4-1, podemos observar la distribución de la ocurrencia mineralógica por zonas de mineral.

| ZONA MINERAL | MINERALES PREDOMINANTES | OCURRENCIA |
|---------------|--|---|
| Leach Capping | Limonita, jarosita 30%, hematita 60%, goethita 10%. | Diseminado mayormente en fracturas |
| Oxidos | Prácticamente no existe | |
| Enriquecido | Calcosita 90% y otros 10% Digenita, pirita, covelita, bornita, Cu nativo | Rellenando espacios en las brechas, diseminado y como vetas |
| Transicional | Calcopirita 60%, calcosita 25%, otros 15%, molibdenita, pirita, bornita | Rellenando espacios en las brechas, diseminado y en venas, asociado al cuarzo |
| Primario | Calcopirita 90% y otros 10%, pirita, bornita, molibdenita, tetraedrita, enargita, galena | Rellenando espacios vacíos de las brechas, diseminado y en vetas |

Tabla 3.4-1: Minerales que definen la zona de mineralización en Toquepala.

3.5 SECUENCIA PARAGENETICA Y GENESIS DEL YACIMIENTO.

Clark et al (1990), Cobbing (1982) e Sánchez (1995) consideran que las rocas sedimentarias no jugaron un rol muy importante en la formación de los depósitos minerales de la región, dando un mayor énfasis a los procesos magma-tectónicos. En efecto, la distribución de franjas metálicas paralelas a la Cordillera de los Andes, ha llevado a pensar a muchos investigadores en su relación con las zonas de subducción

activas durante el mesozoico y cenozoico inferior (Arwater, 1970; Hamilton, 1969), y, que aún permanecen activas debajo del borde occidental del continente americano.

Se ha propuesto que los metales contenidos en los depósitos magmatógenos post-paleozoicos del borde occidental de América del Sur, se derivaron del manto existente en la Cordillera del Pacífico Este, y que están asociados con el magmatismo básico. Por los procesos de expansión de los fondos marinos, los metales fueron transportados hacia la margen continental a manera de una gran faja transportadora, como componentes de la corteza oceánica basáltica y de los sedimentos pelágicos suprayacentes, y que se subducieron por debajo de los continentes siguiendo el plano inclinado de Benioff. Los metales fueron después desprendidos de la corteza oceánica y de los sedimentos, que se habían deslizado por debajo, debido a las altas presiones y temperaturas, e incorporados en cuerpos ascendentes de magma calco alcalino (Fig. 3.5-1).

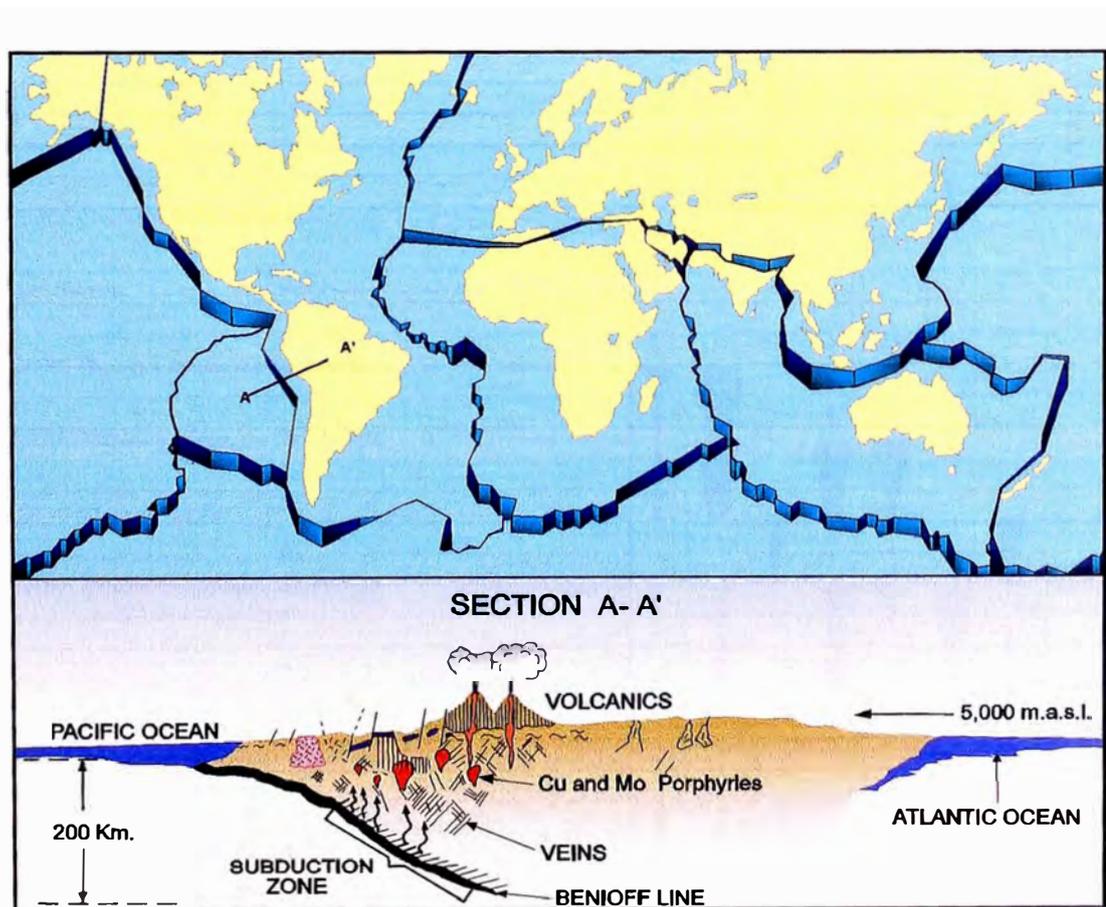


Fig. 3.5-1: Tectónica de placas: Zona de subducción y magmatismo calco-alcalino.

La evolución del yacimiento de Toquepala está genéticamente relacionada a dos tipos de eventos magmáticos, el primero de naturaleza volcánica con la deposición de derrames intercalados de andesitas y riolitas que pertenecen al grupo Toquepala, el segundo de

tipo intrusivo con emplazamientos sucesivos de cuerpos mayores de diorita – grano diorita, seguida de pequeños stocks de dacitas, cuarzo monzonitas y latitas, ocurridos en el terciario inferior y ubicados a pocos kilómetros de la superficie, responsables de la alteración hidrotermal y la mineralización hipógena del depósito.

Los movimientos de la segunda fase de la orogenia andina ocurridos en el Eoceno Tardío a comienzo del Oligoceno (Bellido) constituyen el marco tectónico regional que afectó y modeló el yacimiento de Toquepala. Richard y Courtright (1955) establecieron la primera secuencia de la formación del yacimiento Toquepala que se describe en la Fig. 3.5-2.

INTERPRETACION Y EVOLUCION DEL MODELO GEOLOGICO DE TOQUEPALA
EVENTOS ESTRUCTURALES Y PARAGENESIS

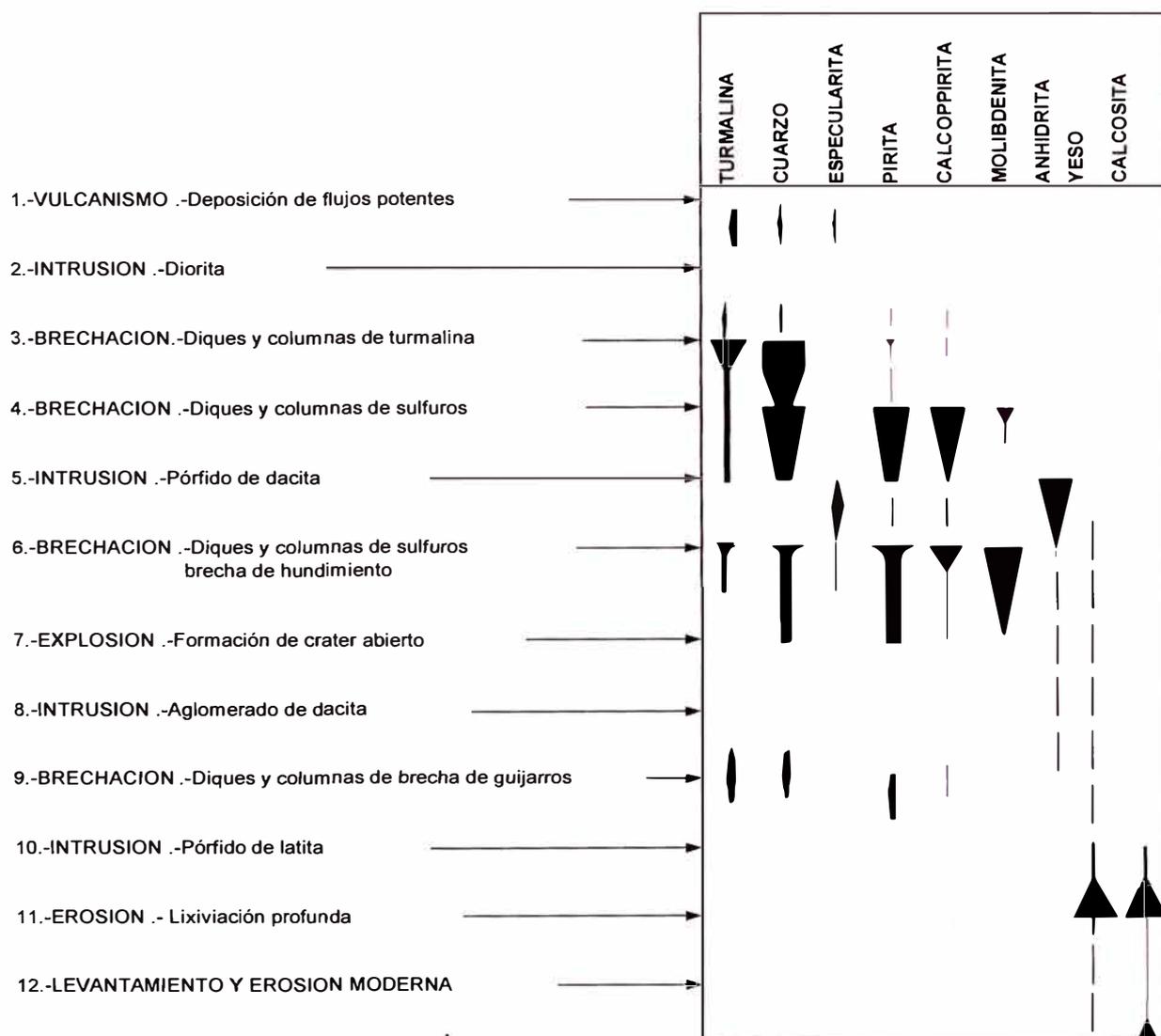


Fig. 3.5-2: Secuencia Paragenética de la formación de Toquepala.

CAPITULO 4

ANALISIS GEOLOGICO DE LA PERFORACION EXPLORATORIA.

4.1 EXPLORACION CON SONDAJES.

Los datos que se obtienen de los taladros exploratorios (muestreo y logeo de cores) nos dan la información básica necesaria para el modelamiento del pit. Los objetivos de un programa de taladros deben servir para:

1. Determinar la geometría (forma, tamaño) del depósito mineral.
2. Determinar la ley, tonelaje y contenido fino.
3. Obtener muestras para las pruebas metalúrgicas.
4. Obtener datos geotécnicos para el diseño del minado.

Se lograrán estos objetivos solo si el programa de perforación incluya: el número de taladros necesarios, el espaciamiento y orientación de los huecos que permitan obtener la mejor información posible.

4.1.1 Campañas de Exploración.

Con las campañas de perforación exploratoria se ha definido la extensión horizontal y vertical del pórfido de cobre de Toquepala. Adicionalmente en los alrededores de la mina, se han realizado un grupo de taladros llamados condenatorios, los que tienen como objetivo explorar la existencia de cuerpos minerales. De no haber indicios de mineralización, estas zonas que generalmente son quebradas, sirven como futuros botaderos del material de desmonte/lixiviable que sale de la mina. En la actualidad, se preparan programas de taladros diamantinos anuales, con el fin de ir rellenando las zonas sin información geológica, sea para definir contactos litológicos, definir las zonas de elementos minerales no deseables como el Fe, Zn, As, OxCu, OxFE, Fe que afectan la recuperación del mineral (Cu, Mo) en planta Concentradora, confirmar la ley de mineral, extraer muestras para pruebas metalúrgicas y determinación de dureza de roca, definir límite de mineral/lixiviable/desmonte, etc.

Los taladros principalmente han sido verticales y se han ubicado en la intersección de las cuadrículas (Fig. 5.2-1). Las campañas de taladros se han extendido en todo el tajo.

En general, las campañas de perforación dentro del tajo nos permitieron:

- Explorar por reservas.
- Delimitar la zona de mineral, lixiviable y desmonte.
- Limitar los contactos geológicos.
- Obtener información geotécnica.

4.1.2 La Malla de Perforación.

Las campañas de perforación exploratoria se realizan sobre una malla cuadrada de 61 metros (200 pies). Esta malla de perforación nos permite obtener muestras de testigos a intervalos regulares y extensivos en todo del tajo (Fig. 5.2-1).

La malla de perforación consiste en líneas de corte hechas en planta con una declinación magnética de 6.5° E, y que nos generan los dos juegos de secciones geológicas de la mina: El juego de secciones verticales en la dirección E-W (Mirando al Norte) y el juego de secciones verticales en la dirección N-S (Mirando al Este). El juego de secciones E-W tiene codificación alfabética, y el juego N-S tiene codificación numérica. Se tienen 49 líneas de corte alfabéticas en la dirección E-W y 48 líneas de corte numéricas en la dirección N-S.

Cada hueco se identifica de acuerdo a su ubicación en la malla de perforación: Se anota el valor de la coordenada Este (letra/letras), seguido de la coordenada Norte (Número). Por ejemplo, un taladro que esta ubicado en la intersección de las líneas P y 15 recibe el nombre P15. La ubicación es aproximada y el nombre siempre dependerá del levantamiento topográfico que se hace del collar. En caso de programar otro taladro, con el collar en la misma intersección de líneas, pero a diferente cota o inclinado se utiliza un número correlativo empezando del numero 1. Por ejemplo, podríamos tener los taladros P15-1, P15-2, etc.

4.1.3 Desviación de Taladros.

Lo ideal, es que un taladro vaya en línea recta, siguiendo su azimut e inclinación. Sin embargo en la práctica, sobretudo en los taladros profundos, estos tienden a desviarse, más aún si son inclinados, esto debido al peso de la columna de tubería y a que en su trayectoria puede atravesar zonas de mucha discontinuidad como fallas y fracturas. En los últimos años de perforación, en la mina se han usado las líneas: HQ y NQ. Se empieza perforando los primeros 150 metros con tuberías HQ, y luego se hace el cambio a NQ. Aunque no hay una regla estricta, se recomienda que para taladros de longitud mayores a 200 metros, se mida la desviación de taladros a intervalos regulares de 50 metros. En todo caso queda a criterio del geólogo definir en que taladros se debe tomar la medida de desviación, por ejemplo si un taladro tiene inclinación -55° y va a atravesar zonas de debilidad con marcado cizallamiento, se recomienda en este caso realizar el control de desviaciones. Se ha dado el caso, en la reconciliación de taladros con blastholes, que si no se controlan adecuadamente las desviaciones, los taladros pueden llegar a dar leyes de interpolación incorrectas en todos los niveles que este atraviese.

4.1.4 Logueo Geológico de Testigos.

El Logueo o Registro Geológico, es un trabajo rutinario, que consiste en hacer una descripción geológica macroscópica de los testigos de taladros. La información levantada del logueo se hace cada 3 metros, en un formato de logueo establecido por Geología (Fig. 4.1-1), en donde se incluye: Intervalo, Nivel, Nro. Muestra, Diámetro del núcleo, Yeso, Mineralización, Roca, Alteración, RQD, Densidad, Intensidad de minerales (py, cpy, mo, cc, bn, cv), intensidad de alteración, descripción macroscópica, recuperación, peso específico. Para el llenado se utilizan las tablas 4.1-1 y 4.1-2.

| Alteración | | |
|--------------------|---------------|----------|
| Descripción | Abrev. | % |
| No Data | Nd | - |
| Unaltered | Ual | 0 |
| Traces | Tr | 0-10 |
| Very Weak | VWk | 10-20 |
| Weak | Wk | 20-30 |
| Weak/Moderate | Wk/Md | 30-40 |
| Moderate | Md | 40-60 |
| Moderate/Strong | Md/St | 60-70 |
| Strong | St | 70-80 |
| Very Strong | VSt | 80-90 |
| Massive | Mss | 90-100 |

Tabla 4.1-1: Abreviaturas utilizadas para indicar la intensidad (porcentaje) de mineral típico de alteración.

| Mineralización | | |
|-----------------------|---------------|-------------------|
| Descripción | Abrev. | % Sulfuros |
| No Data | Nd | - |
| Nil | Nil | 0 |
| Traces | Tr | Tr |
| Very Weak | VWk | <1 |
| Weak | Wk | 1 |
| Weak/Moderate | Wk/Md | 1-2 |
| Moderate | Md | 2 |
| Moderate/Strong | Md/St | 2-4 |
| Strong | St | 4-6 |
| Very Strong | VSt | 6-12 |
| Massive | Mss | >12 |

Tabla 4.1-2: Abreviaturas que describen la intensidad (porcentaje de sulfuros) de mineral en la zona de mineralización.

El muestreo es un control que se lleva en las diferentes etapas de una mina, como podemos exponer a continuación:

Exploración:

1. El muestreo de los testigos de sondajes, nos permite hacer un reconocimiento a profundidad de la continuidad de mineral potencialmente económica.
2. Realizar los contornos de isoleyes y cocientes metálicos para orientar los taladros exploratorios según las tendencias de los flujos mineralizantes.
3. Evaluar los recursos minerales, y definir la geometría del depósito.

Explotación:

4. El muestreo de los detritos de perforación (blastholes), se realiza para establecer un control de leyes en el área de explotación. Dado un cutoff se agrupan los blastholes en áreas ricas, pobres y estériles de mineral. Este cutoff permite diferenciar lo que es: Mineral, Lixiviable y Desmonte de cada bloque del modelo de corto plazo.
5. Con el muestreo de blastholes, también controlamos el tonelaje y leyes del mineral enviado a Planta Concentradora y hacer el balance de fin de mes (Reconciliación Mensual).
6. Definir zonas dentro del tajo, que contienen alta concentración de elementos contaminantes y que son perjudiciales para Concentradora. Con el conocimiento de estas zonas se hace una adecuada mezcla de mineral (Blending) y se dosifica su envío a planta.

Concentradora:

7. Controlar la eficiencia de los procesos metalúrgicos, mediante pruebas metalúrgicas y estudios de ensambles mineralógicos mediante secciones pulidas, que permitan identificar la presencia y la distribución de los minerales que afectan a la recuperación metalúrgica.

Frecuentemente se utiliza dos tipos de muestreo en sondeos: Muestras de testigos diamantinos y muestras de detritos.

4.2.2 Muestreo de Taladros Diamantinos.

El testigo es esplitado o partido longitudinalmente a lo largo del taladro con el cortador de muestras (Core Splitter). La toma de muestras se realiza en una de las porciones esplitadas, la otra mitad queda como contra muestra (Stock Core) debidamente identificada en su respectiva caja de cartón, para cualquier consulta que se quiera realizar a posteriori.

El muestreo de testigos es sistemático y se realiza cada 3 metros. Se debe hacer coincidir la cota de la muestra a niveles conocidos, en promedio se extraen 5 muestras por banco. Las muestras son empacadas en bolsas plásticas cada una con su respectiva tarjeta codificada. Las muestras son chancadas, pulverizadas, cuarteadas y analizadas por 21 elementos, en las que se incluye Cu, Mo principalmente.

A veces, se hace necesario chequear los ensayos en laboratorios externos para contrastar resultados.

4.2.3 Muestreo de Blastholes.

Durante la fase de explotación existe un muestreo que se hace a diario en los huecos barrenados para la voladura (blastholes), este muestreo más conocido como Control de Leyes, sirve para pronosticar la ley del mineral que será enviado a Concentradora en todos los frentes de mineral. Debido a que los blastholes tienen un espaciamiento entre huecos perforados mucho menores que la de los taladros exploratorios, darán una ley más consistente y asertiva para el plan de minado del día.

El muestreo de blastholes se obtiene a partir de los detritos evacuados durante la perforación primaria. En efecto, estos ripios forman un cono de detritos, que es la representación geológica de un banco de 15 metros. Lo que se hace es extraer con el tubo saca testigos muestras en lados opuestos del cono en un peso aproximado de 3 Kg. Cuando la malla de perforación es de 7x7 metros, significa que la distancia entre blastholes es de 7 metros. Debido a la sobre perforación de 1.5 m, es que antes de la toma de muestra se hace necesario dar una limpieza previa encima del cono de detritos, la toma se realiza perpendicular al lado del cono, atravesando hasta el piso del cono.

4.2.4 Muestreo Superficial.

De vez en cuando se hace necesario extraer muestras de mineral, como control complementario a las leyes de blastholes, o como un refuerzo a la información de dureza del mineral o para hacer pruebas metalúrgicas por si existe alguna zona con elementos perjudiciales para la Planta Concentradora que influyen en la reducción de la recuperación del cobre, ejemplo de estas sustancias no deseadas son: Altas concentraciones de Zinc, Arsénico, Oxidos de Cobre, Hierro. Generalmente este muestreo se hace en los frentes de minado de mineral, y nos ayuda a efectuar un mejor blending en el minado diario del mineral.

4.3 CALCULO DE OTRAS VARIABLES GEOLOGICAS.

4.3.1 Cálculo del Peso Específico.

El peso específico o densidad relativa de una roca, es un número que expresa la relación entre el peso de la muestra y un volumen igual de agua a 4 °C (Método de Arquímedes). Se expresa en gr/cc, TM/m³. El peso específico se realiza por banco y para cada tipo de roca.

Para calcular el peso específico se siguen tres pasos:

- a) Tomar una muestra de testigo representativa de un banco de peso aproximado de 70 gr., y se pesa en el aire (Wa).
- b) Sumergir el testigo en agua y pesarlo nuevamente (Ww).
- c) El peso específico (Pe) está dada por la relación: $Pe = Wa / (Wa - Ww)$

4.3.2 Cálculo de la Recuperación Lineal.

Es el porcentaje que se recupera del testigo diamantino por cada tramo perforado. Para encontrar la recuperación de testigos se empaca previamente los tramos de testigos dentro de su caja, luego se procede a medir por corrida. Se calcula mediante la relación:

$$\text{Recuperación} = (\text{Longitud del testigo recuperado} / \text{Longitud de la Corrida}) * 100$$

4.3.3 Cálculo del RQD.

El RQD (Rock Quality Designation) es un índice de Designación de Calidad de Roca. Para hacer este cálculo tomamos los testigos sin esplitar para no crear fracturas inducidas, tal como viene del campo. El cálculo de RQD se determina para los diámetros NQ y HQ, del modo siguiente: Se suman las longitudes de tramos de testigos de roca competente, sin fractura; mayores o iguales al doble del diámetro del core según sea el caso. Luego se divide la suma total entre la corrida (TO – FROM), y se multiplica por 100.

$$RQD = (\text{Suma de longitudes de tramos competentes} / \text{Longitud de la Corrida}) * 100$$

Este índice nos permite clasificar la calidad de una roca según los siguientes intervalos:

| <u>RQD</u> | Clasificación |
|------------|---------------|
| 0 – 25 | Muy mala |
| 25 – 50 | Mala |
| 50 – 75 | Regular |
| 75 – 90 | Buena |
| 90 – 100 | Excelente |

4.4 MAPEO GEOLOGICO.

Habitualmente la información geológica obtenida en superficie se trabaja en gabinete. El plano geológico que se trabaja en campo es por niveles a escala 1:1000, donde se anota Tipo de Roca, Mineralogía, Alteración, Yeso, Mineralización, Estructuras, y que nos permita llegar a formular interpretaciones y proyecciones con mayor criterio. La recolección de muestras superficiales se ubica a partir de puntos topográficos marcados en las paredes de los bancos con GPS.

En gabinete, el trabajo consistió en recolectar, identificar, analizar, verificar, controlar y almacenar las fuentes de datos de leyes de taladros diamantinos. También se ha interpretado en secciones geológicas verticales los dos juegos de secciones en las direcciones E-W y N-S y posteriormente se ha digitalizado.

4.4.1 Mapeo Geológico de Bancos.

Antes de empezar con el mapeo, el geólogo evalúa visualmente las condiciones de seguridad que ofrece la pared del banco a mapear. El mapeo geológico de bancos es un trabajo de campo que se hace en todos los niveles de la mina, sobretodo donde hay avance de minado de las palas. La metodología consiste en colocar puntos topográficos a 1/5 de la altura del banco. Para el mapeo se utiliza el plano topográfico a escala 1/1000 ó 1/2000, la topografía consiste en la representación grafica de las curvas de nivel de las crestas, toes y rampas de acceso, así como los contactos del Plano de Dureza. Para empezar con el mapeo se extiende la wincha de 50 metros a partir de la referencia topográfica, y se hace un levantamiento geológico superficial a detalle cada 10 metros. El mapeo consiste en describir principalmente: Roca, Alteración, Mineralización, Yeso, Estructuras, Mineralogía.

4.4.2 Mapeo Geológico de Detritos de Perforación.

En el punto anterior, se describió el mapeo geológico como técnica visual para obtener información geológica in situ. Sin embargo, esto a veces es imposible hacerlo, cuando la pared esta cubierta completamente con spill (material suelto caído de la voladura del banco superior). En este caso se recurre a la técnica del logueo de detritos, que consiste en chequear visualmente los conos de detritos formados en la evacuación constante de un taladro de perforación primaria. De esta manera, aunque bajo ciertas restricciones podemos conocer lo que se oculta debajo del banco. Para esto es necesario emplear lápices de colores, y tener un código de colores para cada tipo de roca. Esta técnica aunada al Mapeo Geológico de Taludes nos proporciona información valiosa para el control de la fragmentación y control de leyes del banco a disparar y el inmediato inferior. En realidad, se han visto casos en los que con este método, se logran determinar

los cambios de textura, contactos litológicos horizontales, discontinuidades del macizo como fallas, fracturas, oxidados, etc.

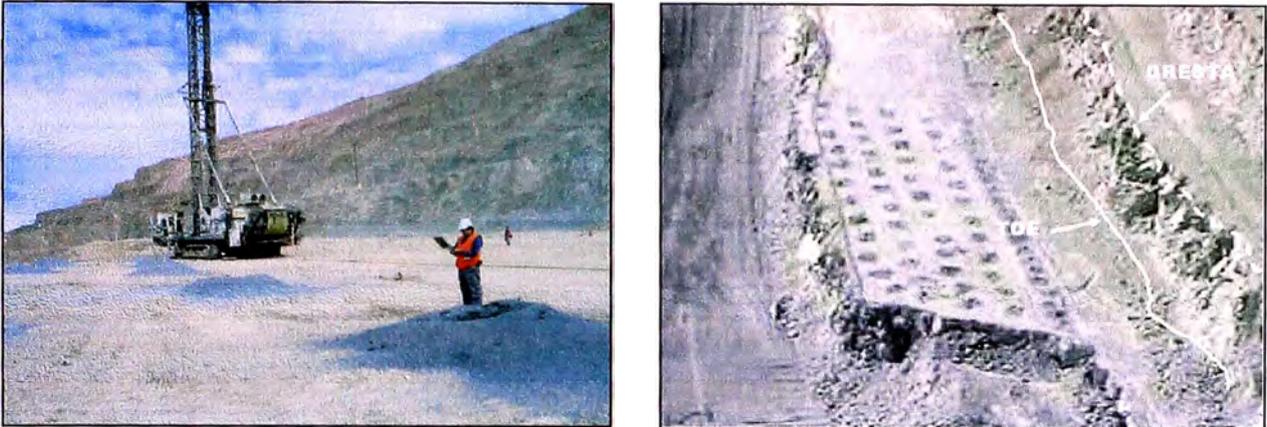


Foto 4.4-1: **Izq.** Geólogo logueando detenidamente los detritos de perforación primaria.

Der. Proyecto de voladura, mostrando los conos de detritos de donde se puede obtener información del tipo de roca, mineralogía, etc. También se indica la cresta y toe (Borde superior e inferior del talud del banco).

4.5 VALIDACION DE DATOS.

Por lo general, se suele aceptar los datos que se almacenan en la base de datos. Esto puede introducir errores que lamentaríamos más tarde si es que no se toman las acciones correctivas del caso. Por eso, debe estar normado que antes de transferir la información al archivo maestro de datos, este debe ser validada.

En la actualidad, existen muchos softwares gestores de bases de datos que permiten validar aunque de manera limitada los datos ingresados. Esto obliga a que la persona maneje la información en función a procedimientos de trabajo. He aquí algunas reglas que pueden ser útiles para validar los datos de ingreso:

1. La persona que valida, debe ser distinta a la persona que ingresa la información. Y si no lo cree, haga una prueba: Ingrese la información, luego pida a otra persona que valide su información.
2. Los errores recurrentes se detectan rápidamente y las correcciones pueden ser hechas durante la codificación de los datos.
3. Para validar datos numéricos usar rangos. Las coordenadas, ángulos, leyes deben ser testeadas en sus límites. Los códigos geológicos deben validarse con el diccionario de datos (códigos validados y aceptados).
4. Se deben graficar los códigos geológicos de los taladros en las secciones. Los huecos desviados son fácilmente detectados en un plano.

CAPITULO 5

MODELAMIENTO GEOLOGICO.

5.1 EL MODELO DE BLOQUES TRIDIMENSIONAL.

El modelo tridimensional de bloques se construye para los cálculos del recurso mineral. Las dimensiones de este modelo, cubre un área de 5.0 Km. en la dirección E-W, 5.0 Km. en la dirección N-S y 1.5 Km. verticalmente, los límites de las coordenadas se muestran en la tabla 5.1-1. Este modelo hace un total de: $250 \times 250 \times 100 = 6'250,00$ bloques.

| | Mínimo | Máximo | Tamaño bloques | Nº bloques |
|------------------|---------|---------|----------------|------------|
| Este | 548,000 | 553,000 | 20 | 250 |
| Norte | 61,000 | 66,000 | 20 | 250 |
| Elevación | 2,200 | 3,700 | 15 | 100 |

Tabla 5.1-1: Dimensiones del modelo tridimensional de bloques.

De acuerdo a las necesidades de planificación a largo plazo, se construye el modelo tridimensional de bloques unitarios. A cada uno de estas unidades se le asocian variables como: Topografía, Leyes, Roca, Yeso, Alteración, Mineralización, Dureza, Zona Geometalúrgica, Peso Específico, Índice de Solubilidad, Ratio Py/Cpy (Fig. 5.1-1 y Tabla 5.1-2), y que sirven para calcular el recurso geológico y posteriormente las reservas minerales del depósito dentro de estos límites. Cada bloque unitario es un paralelepípedo de base cuadrada de 20 metros de lado con una altura de 15 metros.

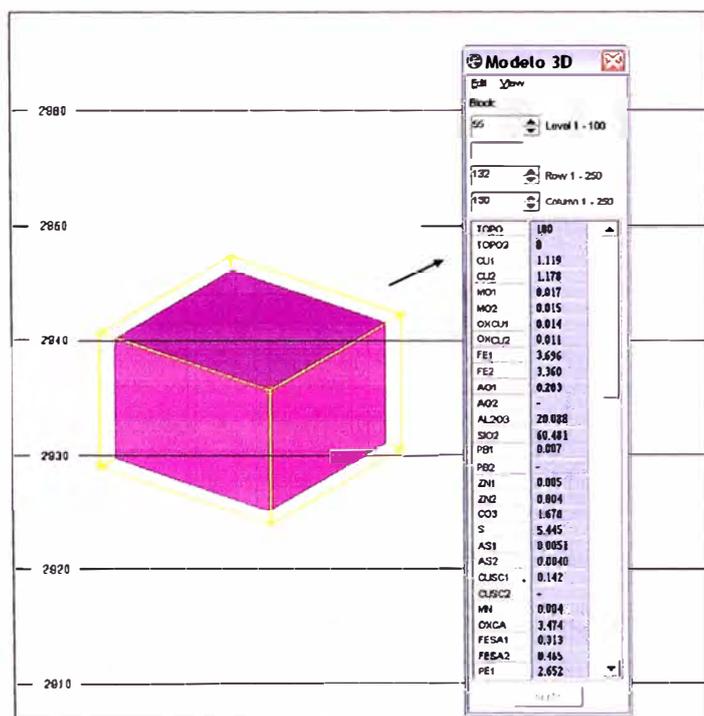


Fig. 5.1-1: Un bloque unitario del modelo de bloques, mostrando sus leyes, geología, peso específico, etc. Este modelo tiene un peso "W" de: $W=20*20*15*2.652=15,912$ TM.

| ITEM | MIN | MAX | PREC | DESCRIPCION |
|-------|-----|-----|--------|---|
| TOPO | 0 | 100 | 1 | Porcentaje sólido del bloque (Topo actual). |
| TOPO1 | 0 | 100 | 1 | Porcentaje sólido del bloque (Pit Final). |
| CU | 0 | 15 | 0.001 | Cobre krigeado (%). |
| MO | 0 | 5 | 0.001 | Moly krigeado (%). |
| OXCU | 0 | 10 | 0.001 | Oxido de cobre krigeado (%). |
| FE | 0 | 50 | 0.001 | Hierro interpolado con ID (%). |
| AG | 0 | 15 | 0.001 | Ag krigeada (oz/TC). |
| AL2O3 | 0 | 100 | 0.001 | Alúmina interpolado por ID (%). |
| SiO2 | 0 | 100 | 0.001 | Silica interpolado por ID (%). |
| Pb | 0 | 10 | 0.001 | Plomo interpolado por ID (%). |
| Zn | 0 | 10 | 0.001 | Zinc interpolado por ID (%). |
| CO3 | 0 | 30 | 0.001 | Carbonato interpolado por ID (%). |
| S | 0 | 50 | 0.001 | Azufre interpolado por ID (%). |
| AS | 0 | 10 | 0.0001 | Arsénico interpolado por ID (%). |
| CUSCN | 0 | 5 | 0.001 | Cobre soluble en cianuro krigeado (%). |
| MN | 0 | 15 | 0.001 | Manganeso interpolado por ID (%). |
| OXCA | 0 | 20 | 0.001 | Oxido de Calcio interpolado por ID (%). |
| FESA | 0 | 30 | 0.001 | Hierro sol. en ácido interpolado por ID (%). |
| PE | 0 | 5 | 0.001 | Peso específico de roca krigeado (TM/m3). |
| RQD | 0 | 100 | 0.01 | Calidad de roca. |
| ROCK | 1 | 16 | 1 | Tipo de roca. Código 16=Relleno. |
| ETP | 310 | 313 | 1 | Tipo de mineralización. |
| YESO | 55 | 56 | 1 | 55=Con yeso 56=Sin yeso. |
| ALTE | 301 | 307 | 1 | Tipo de alteración. |
| GEOM | 201 | 216 | 1 | Zona geometalúrgica. |
| IS | 0 | 100 | 0.01 | Ind. de Solubilidad calculado (%). |
| ISAC | 0 | 100 | 0.01 | Ind. de Sol soluble en ácido calculado (%). |
| ISCN | 0 | 100 | 0.01 | Ind. de Sol soluble en cianuro calculado (%). |
| RHI1 | 0 | 60 | 0.01 | Dureza de roca (Tabla). |
| RHI2 | 0 | 60 | 0.01 | RHI1 + Interpolación poligonal de taladros. |
| RHI3 | 20 | 57 | 0.01 | Código de dureza de roca. |
| PY | 0 | 100 | 0.001 | Cálculo de pirita (%). |
| CPY | 0 | 100 | 0.001 | Cálculo de calcopirita (%). |
| PYCPY | 0 | 100 | 0.001 | Ratio pirita/calcopirita |

Tabla 5.1-2: Ítems del modelo de bloques.

Para interpretar los modelos geológicos, primeramente se establecen sus límites, que debieran estar dentro del modelo 3D de bloques. La creación de un modelo de mina se puede resumir en tres etapas (Fig. 5.1-2):

Etapas 1: Obtención de Datos.

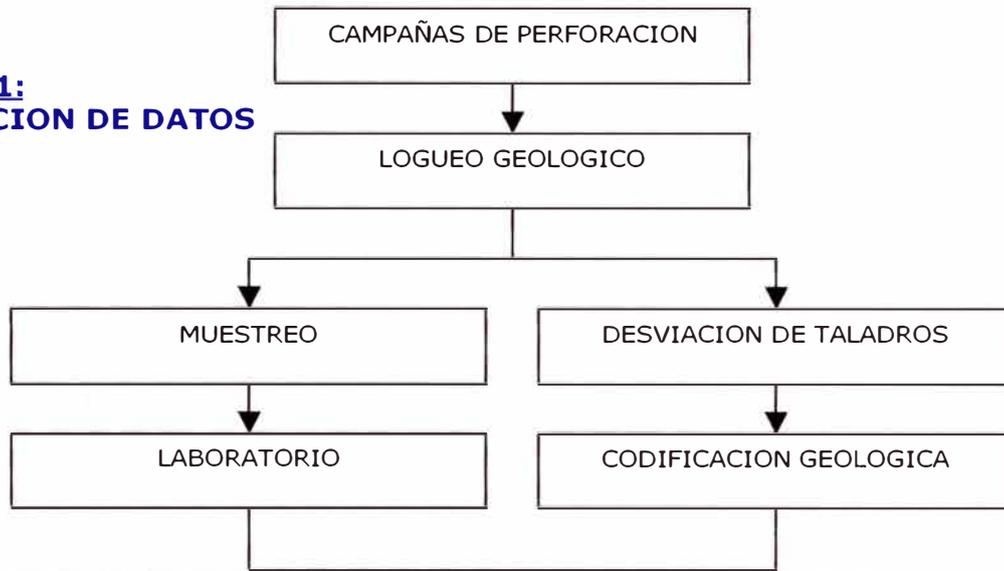
Etapas 2: Modelamiento y Estimación de Recursos.

Etapas 3: Planificación Minera.

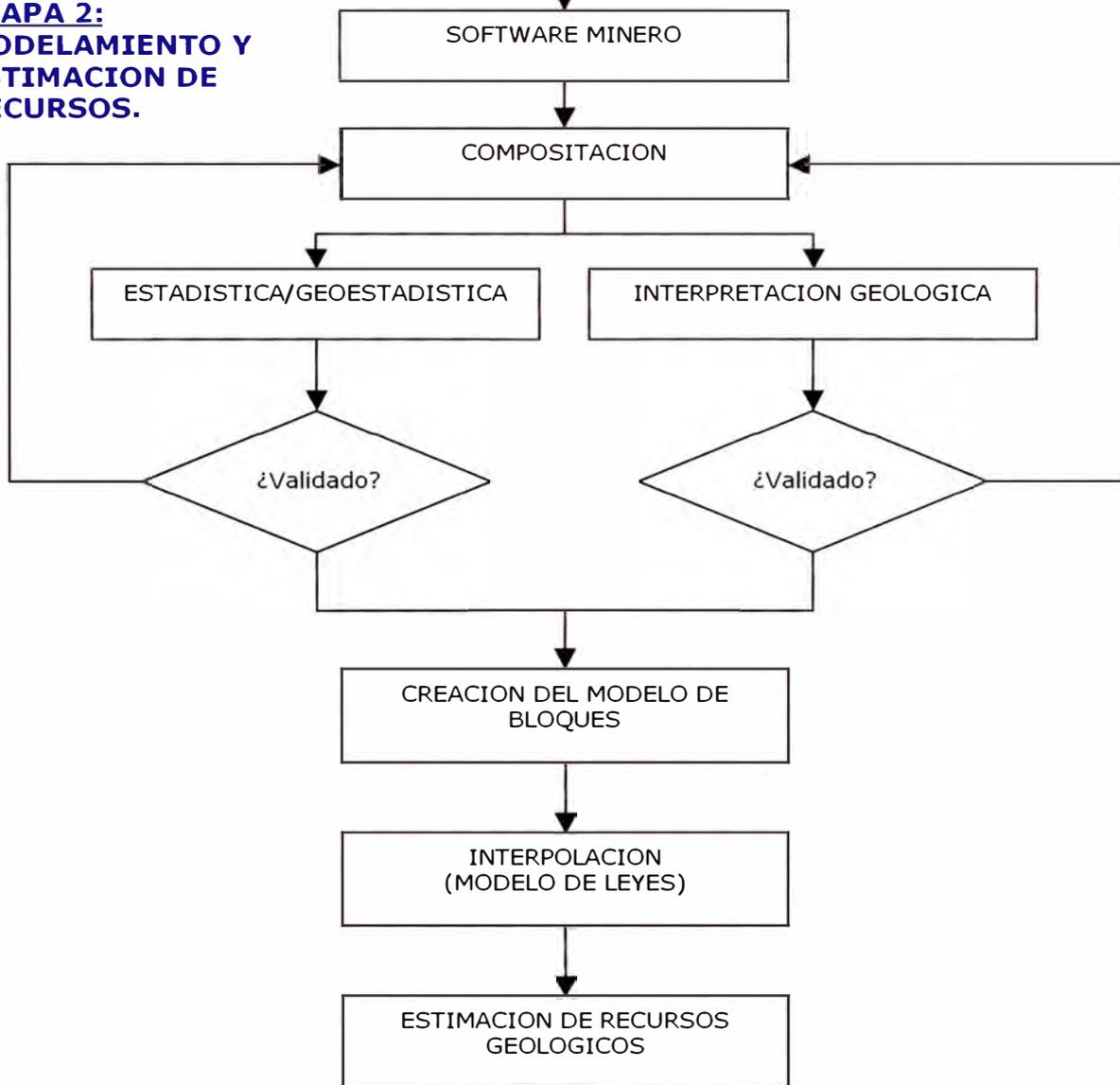
La primera etapa, consiste en reunir tres tipos de información (Fig.5.1-2):

- a) Los datos topográficos: La cresta, toe y rampa actualizados del tajo.
- b) Las leyes: Se analizan 21 leyes por cada muestra, cada uno tiene ubicación X, Y, Z.
- c) Las variables geológicas: Son los códigos de roca, alteración, mineral, yeso.

**ETAPA 1:
OBTENCION DE DATOS**



**ETAPA 2:
MODELAMIENTO Y
ESTIMACION DE
RECURSOS.**



1

**ETAPA 3:
PLANIFICACION
MINERA.**

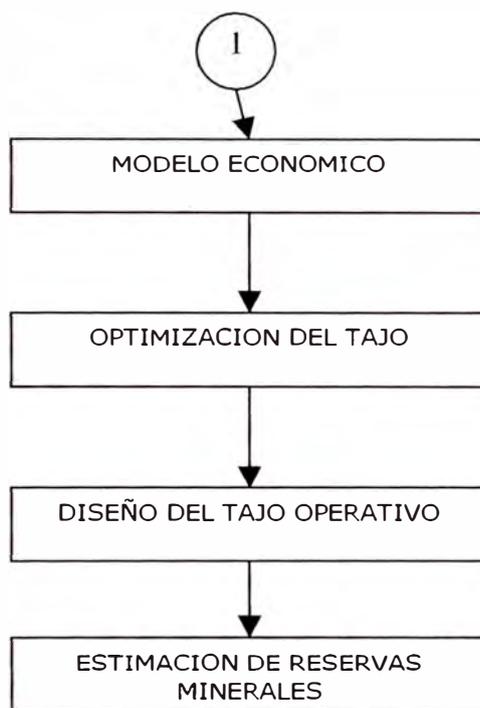


Fig. 5.1-2: Diagrama de flujo para la creación del modelo de mina.

En este informe, solo veremos las dos primeras etapas, la tercera es la que corresponde al Planeamiento de Minado propiamente dicho, y que corre por cuenta de Ingeniería.

Siguiendo con el flujo de la Fig. 5.1-2, veamos como se obtiene los datos.

5.2 BASE DE DATOS DE TALADROS

La información relacionada a los sondajes de exploración es almacenada en una base de datos, su estructura de datos obedece al principio tradicional que siguen las bases de datos relacionales, es decir su estructura esta compuesta por tablas, las cuales, a la vez están conformadas por campos, donde cada campo representa y almacena las características propias del taladro como: Coordenadas, ensayos químicos y controles geológicos.

En general, los taladros exploratorios realizados en Toquepala son de tres tipos: Churn Drill (CD), Reverse Circulation (RC) y Diamond Drill Hole (DDH). La ubicación de estos taladros exploratorios se muestra en la figura 5.2-1.

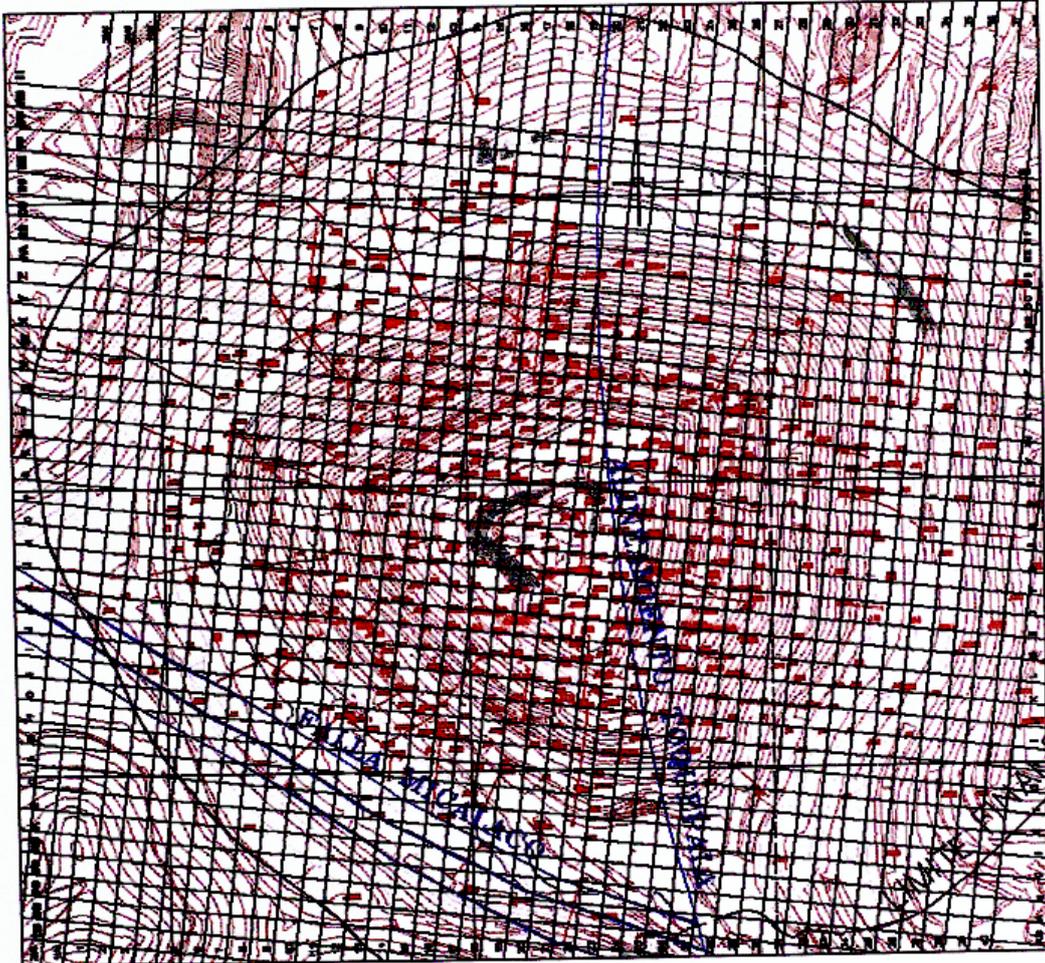


Fig 5.2-1: Topografía y ubicación de taladros exploratorios.

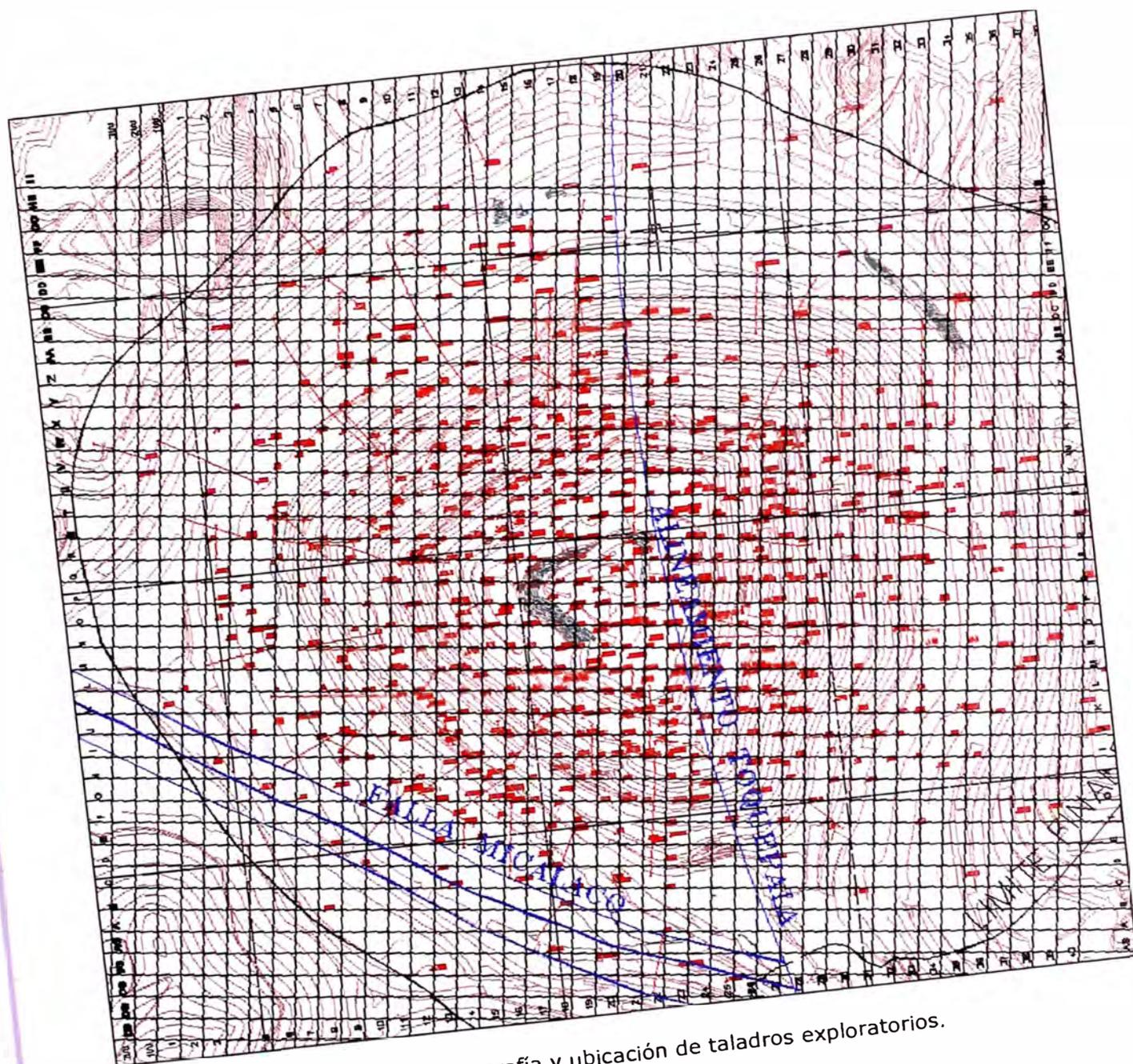


Fig 5.2-1: Topografía y ubicación de taladros exploratorios.

Toda la información de los taladros ubicados dentro del tajo esta almacenada en un archivo ASCII. Esta base de datos de taladros contiene los ítems que se muestran en la tabla 5.2-2.

| N | ITEM |
|-----------|--------------|
| 1 | ID-DH |
| 2 | REF |
| 3 | FROM |
| 4 | TO |
| 5 | TRAMO |
| 6 | CU |
| 7 | MO |
| 8 | OXCU |
| 9 | FE |
| 10 | AG |
| 11 | AL2O3 |
| 12 | SIO2 |
| 13 | PB |
| 14 | ZN |
| 15 | CO3 |
| 16 | S |
| 17 | AS |
| 18 | CUSCN |
| 19 | MN |
| 20 | OXCA |
| 21 | FESAC |
| 22 | PE |
| 23 | ROCK |
| 24 | ORET |
| 25 | YESO |
| 26 | RQD |

Tabla 5.2-2: La base de datos de taladros consta de estos ítems. Además de las leyes cada 3 m. y peso específico por bancos, se consideran las variables geológicas como roca, mineralización, yeso y RQD, codificadas previamente.

Esta base de datos de taladros (ASCII) es la unión de los archivos principales: Collar, Survey, Assay y Geología. **Collar**, que contiene las coordenadas, azimuth, inclinación y profundidad de los taladros, **Survey** que contiene las desviaciones tomadas en los taladros largos; **Assay** conteniendo cada 3 metros los resultados de leyes; **Geología** conteniendo los códigos geológicos que sirven para establecer restricciones en la interpolación de leyes.

Esta información de taladros, se ha complementado con el mapeo geológico de paredes de los diferentes niveles o bancos. También se ha considerado el logueo de detritos de los blastholes en sectores donde no se tiene suficiente información geológica por carencia de taladros de exploración.

5.3 METODOLOGIA DE INTERPRETACION GEOLOGICA.

Para interpretar cada modelo geológico, se toma la información proporcionada por: Los logueos de los taladros, el mapeo geológico de superficie y los logueos de detritos.

Para su procesamiento, las variables geológicas deben ser codificadas. El proceso de interpretación geológica a partir de taladros, se hacen en secciones verticales. Para estas secciones, se utilizan líneas de corte cada 61 metros (200 pies) con influencias de 30.5 m hacia delante y hacia atrás. Estas líneas conforman dos juegos de planos en las direcciones N-S y E-W. Para la interpretación, se digitaliza una línea limitante (boundary), por ejemplo, por cada tipo de roca. Luego se cruzan las dos secciones verticales N-S y E-W para luego llevarlo al tercer set de secciones horizontales por niveles. En total, las secciones verticales interpretadas suman 235, y las horizontales suman 554 (Tabla 5.3-1).

Tabla 5.3-1: Las interpretaciones geológicas utilizadas para la estimación, se agrupan en tres sets de secciones verticales y horizontales.

| Modelo | Nº Plantas | Nº Verticales | Orientación |
|--------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| 1. Roca | 98 | 78 | N-S y E-W |
| 2. Yeso | 98 | 34 | E-W |
| 3. Mineralización | 98 | 33 | E-W |
| 4. Alteración | 64 | 57 | N-S y E-W |
| 5. Dureza | 98 | 33 | E-W |
| 6. Geometalúrgico | 98 | - | E-W |
| TOTAL | 554 | 235 | |

Estos modelos geológicos tienen las siguientes dimensiones: 3.5 Km. de largo en la dirección Este-Oeste, 3.0 Km. de ancho en la dirección Norte-Sur y 1.5 Km. de profundidad. Es decir, no cubre con información geológica, todo el modelo de bloques.

Para cada uno de los modelos geológicos, se considera solo el material in situ. Esto significa, que el material de relleno (botaderos antiguos) ó cuaternario, deben ser considerados muy aparte de la topografía actual. Este material inconsolidado, debe ser identificado y se les debe asignar un código, para su buen control de minado. Cuando es relleno reciente, la identificación se logra sustrayendo a la topografía actual, la topografía original. Esta separación del relleno, se hace necesario para manejarlo como material esponjado, con un peso específico menor que la del mismo material in situ. Veamos: Estudios estadísticos realizados en muestras de material de relleno de botaderos, nos

arrojan un factor de esponjamiento de 0.65. Eso quiere decir que si la roca in situ, tiene un peso específico de 2.686 gr/cc, después de la voladura tendrá 2.686 gr/cc por 0.65, esto es 1.746 gr/cc.

Los 6 modelos geológicos que veremos a continuación son: 1) Modelo de Roca, 2) Modelo de Yeso, 3) Modelo de Mineralización, 4) Modelo de Alteración, 5) Modelo de Dureza y 6) Modelo Geometalúrgico. Los 4 primeros se obtienen por interpretación geológica pura, y los dos restantes resultan de combinar modelos.

5.3.1 Interpretación por tipo de roca.

En la mina Toquepala, se han reconocido 15 tipos de rocas (Ver tabla 5.3-2), que han sido diferenciadas en rocas pre-minerales (Alta Andesita, Riolita Toquepala, Andesita Toquepala, Pórfido Cuarzífero Toquepala, Dolerita Toquepala, Pórfido Cuarzífero Quellaveco). Rocas intrusivas mineralizadas (Diorita, Dacita Porfirítica). Brechas mineralizadas (Brecha Angular, Brecha Diorita, Brecha Turmalina, Pebble Brecha), intrusivos post-minerales (Dacita Aglomerada y Latita Porfirítica). El código 16 es reservado para el material suelto.

Tabla 5.3-2: Codificación de Roca.

| N | ROCA | ABREVIATURA | CODIGO |
|----------|-------------------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Alta Andesita | Aa | 1 |
| 2 | Riolita Toquepala | Tr | 2 |
| 3 | Andesita Toquepala | Ta | 3 |
| 4 | Pórfido Cuarzífero Toquepala | Tq | 4 |
| 5 | Dolerita Toquepala | Td | 5 |
| 6 | Pórfido Cuarzífero Quellaveco | Qq | 6 |
| 7 | Latita Porfirítica | Lp | 7 |
| 8 | Dacita Aglomerada | Da | 8 |
| 9 | Dacita Porfirítica | Dp | 9 |
| 10 | Diorita | Di | 10 |
| 11 | Slump Brecha | SBx | 11 |
| 12 | Brecha Diorita | DiBx | 12 |
| 13 | Brecha Angular | Bx | 13 |
| 14 | Brecha Turmalina | BxT | 14 |
| 15 | Pebble Brecha | Px | 15 |
| 16 | Relleno | Fl | 16 |

Para actualizar los contactos del modelo de roca se utiliza la información siguiente:

1. Secciones geológicas verticales con información de taladros antiguos.
2. Mapeo geológico de bancos (taludes y detritos).
3. Nuevos taladros diamantinos.

Como ejemplo de esta interpretación por tipo de roca, se muestra la sección geológica vertical P (Fig. 5.3-1 y Fig. 5.3-2), en donde se incluyen los taladros situados a una influencia de 30 m. a cada lado de la línea de corte para los propósitos de interpretación.

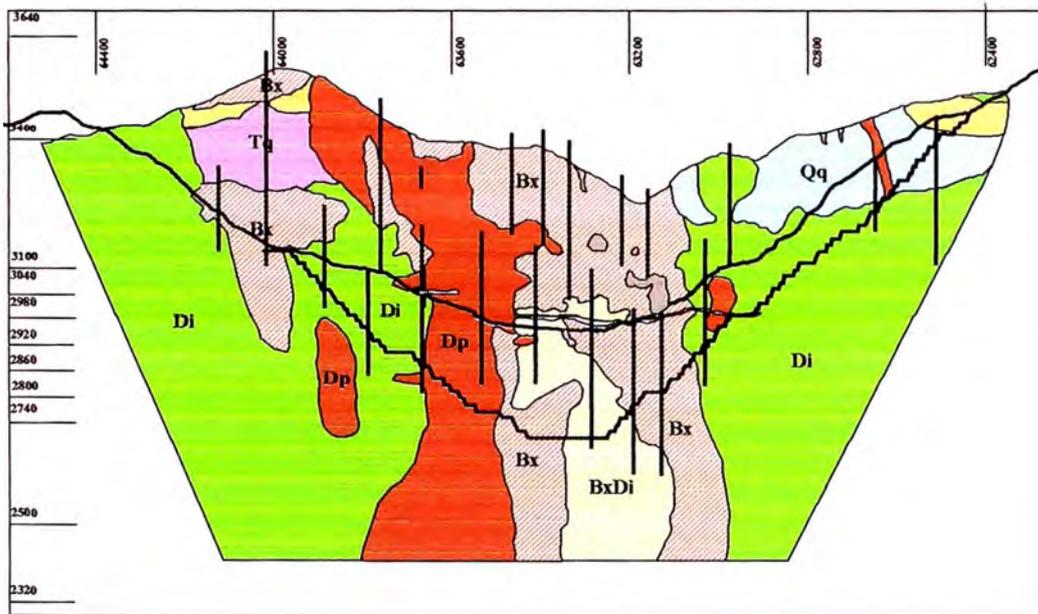


Fig. 5.3-1: Sección vertical "P" (Roca), en la dirección E-W, mirando al N, donde se muestra la litología digitalizada y los taladros exploratorios. Con topografía original. Modelo 2004.

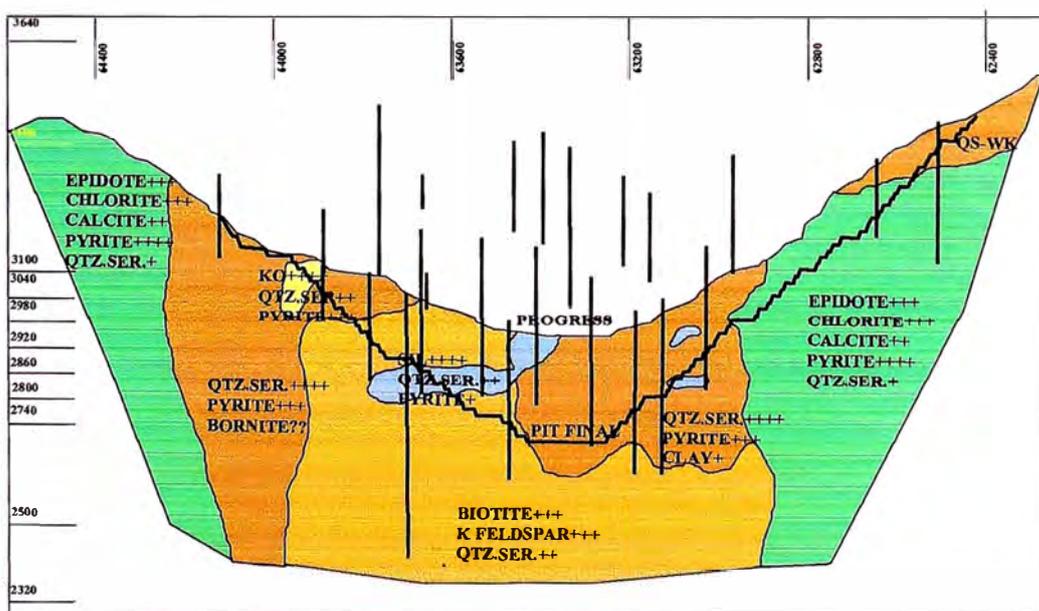


Fig. 5.3-2: Sección vertical "P" (Alteración). Verde=Propilítica, Marron=Fílica, Amarillo=Argílica, Celeste= Silicificación, Anaranjado=Potásica. Sin topografía original. Modelo 2004.

La interpretación de las secciones geológicas horizontales se hace por banco, es decir cada 15 metros cruzando la información de las secciones geológicas N-S y E-W. Por banco se imprime el compósito obtenido en los taladros para cada tipo de roca.

Los contactos litológicos interpretados de todos los bancos, sirven como controles geológicos para la interpolación de leyes, por lo que su codificación debe ser transferida al modelo de bloques de largo plazo.

La Fig. 5.3-1 muestra el modelo 3D litológico expuesto en el tajo, y el diseño de pit final. Hacia la parte superior volcánicos, intruidos por Diorita, Dacita Porfírica y Brechas. Notar la posición de la falla Micalaco y el alineamiento Toquepala.

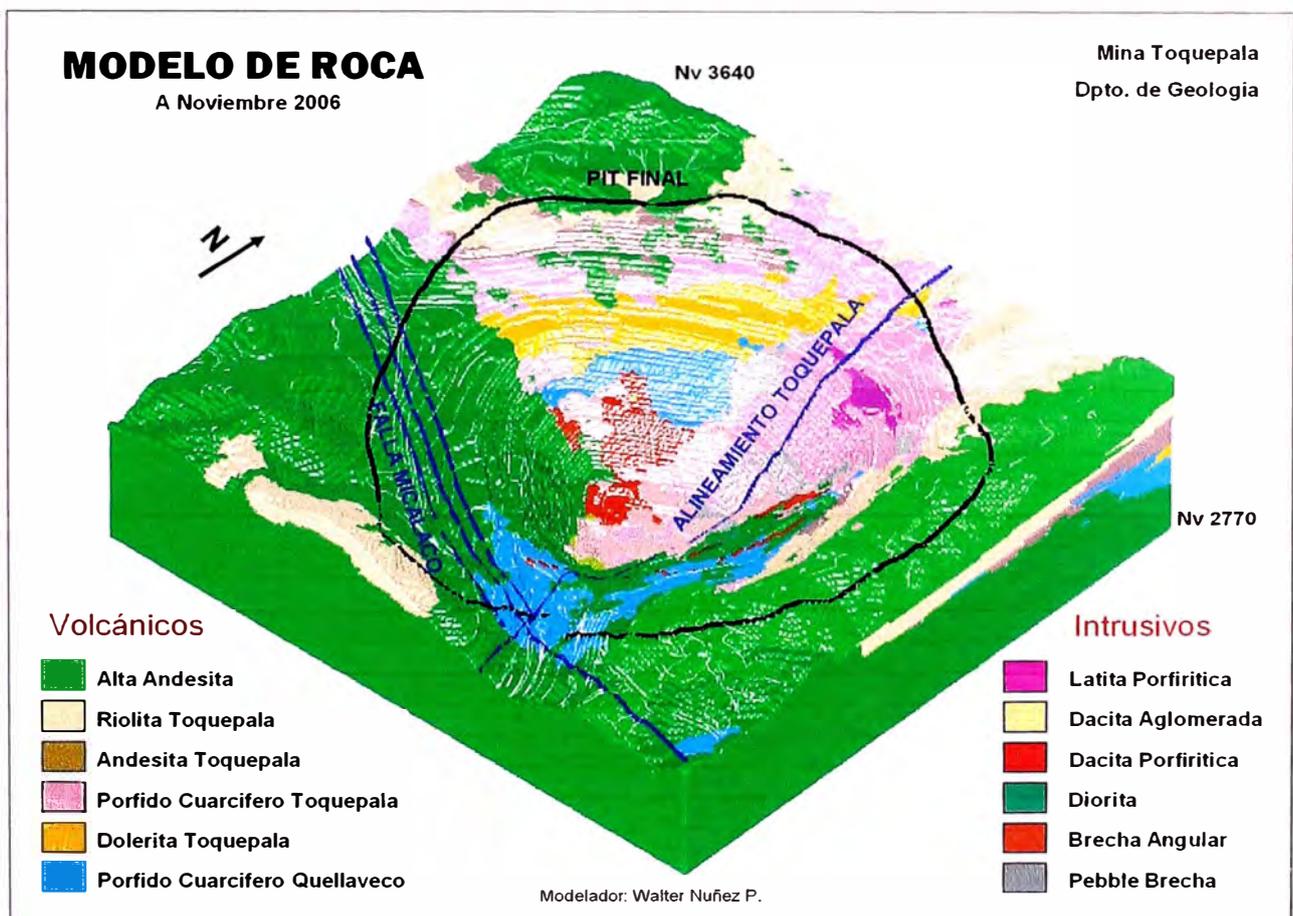


Fig. 5.3-1: Visualización Tridimensional del Modelo de Roca.

5.3.2 Modelamiento de la superficie de yeso/anhidrita.

Este cuerpo de sulfato de calcio (yeso/anhidrita) es un domo cuyo ápice fue reconocido por el taladro vertical P17 en la cota 3156.53 m. del nivel 3145, ubicándose cerca al centro del tajo (actualmente ya minado). Este cuerpo profundiza y se ensancha hacia los niveles inferiores del tajo.

El modelo de este cuerpo, divide a la mina en dos grandes zonas: La zona que es afectada por la presencia de yeso/anhidrita y las que no tienen yeso/anhidrita. Sus features son: 55=Con yeso y 56= Sin yeso (Ver tabla 5.3-3 y Fig. 5.3-2).

La actualización del modelo de yeso consiste en ajustar los bordes de yeso, con logeo de detritos, mapeos de campo, y con información de los nuevos taladros diamantinos.

Tabla 5.3-3: Codificación del Yeso.

| N | YESO | ABREVIATURA | CODIGO |
|---|------------------|-------------|--------|
| 1 | Sin Yeso | - | 56 |
| 2 | Yeso / Anhidrita | G/A | 55 |

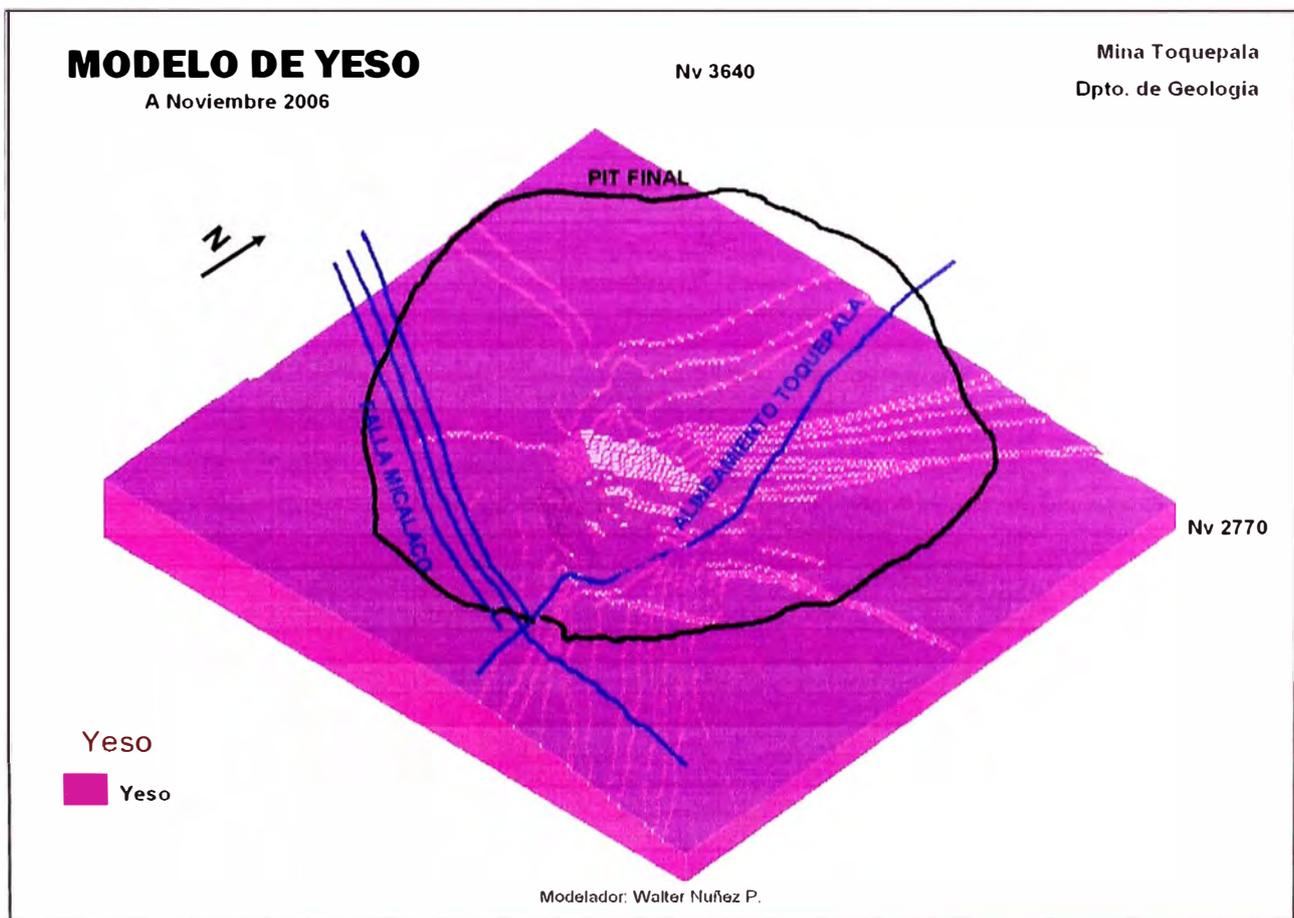


Fig. 5.3-2: Visualización Tridimensional del Modelo de Yeso.

5.3.3 Interpretación por tipo de mineralización.

Se ha diferenciado las franjas de mineralización en base a la presencia de minerales económicos, que se encuentran como sulfuros diseminados, en venillas o como relleno de roca. La mineralogía principal lo compone la calcopirita, calcosita, molibdenita y piritita.

La mina Toquepala esta demarcada por 4 tipos de mineralización principales y cuya codificación se muestra en la Tabla 5.3-4 y Fig. 5.3-3.

La zona de leach capping esta compuesta mayormente por oxidos de hierro en las fracturas. La zona de mineral enriquecido compuesta por más de 90 % de calcosita, relleno las cavidades de las brechas. La zona transicional, con un 25 % de calcosita y la zona primaria con más predominio de calcopirita.

En este modelo se deben ajustar el contacto de material insitu/relleno en concordancia con el modelo de rocas. También se debe mantener actualizado el leach capping según mapeo de campo en los niveles superiores del tajo.

Tabla 5.3-4: Codificación de Mineralización.

| N | MINERALIZACION | ABREVIATURA | CODIGO |
|---|----------------|-------------|--------|
| 1 | Primario | P | 310 |
| 2 | Transicional | T | 311 |
| 3 | Enriquecido | E | 312 |
| 4 | Leach Capping | Lc | 313 |

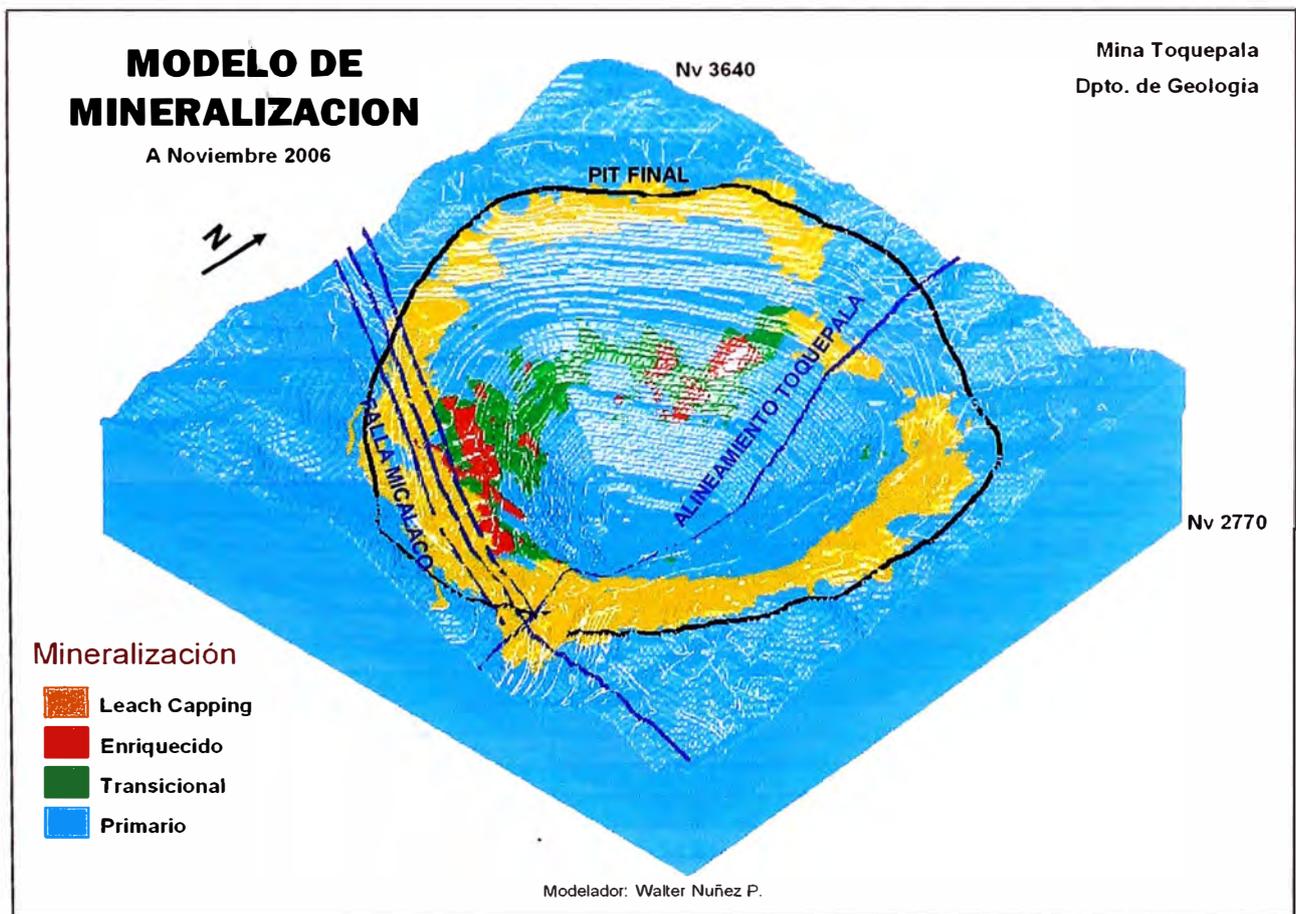


Fig. 5.3-3: Visualización Tridimensional del Modelo de Mineralización.

5.3.4 Interpretación por tipo de alteración.

Las alteraciones son de origen hipógeno y parcialmente de origen supérgeno. Se ha reconocido entre los principales tipos de alteración comunes (Tabla 5.3-5 y Fig. 5.3-4): Alteración propílica presente en la Diorita, Argílica presente en la Diorita y rocas volcánicas, Fílica presente en la Dacita y Brechas, Potásica presente en la Dacita y Brechas. Todas las rocas a excepción de la Dacita aglomerada y Latita porfirítica han sido alteradas.

Tabla 5.3-5: Codificación de Alteración.

| N | ALTERACION | ABREVIATURA | CODIGO |
|---|---------------------------|-------------|--------|
| 1 | Fresco | Fsh | 301 |
| 2 | Propilítica | Prop | 302 |
| 3 | Argílica | Arg | 303 |
| 4 | Fílica | Fil | 304 |
| 5 | Cuarzo Sericita Turmalina | Qs-T | 305 |
| 6 | Silicificada | Sil | 306 |
| 7 | Potásica | Qs-K | 307 |

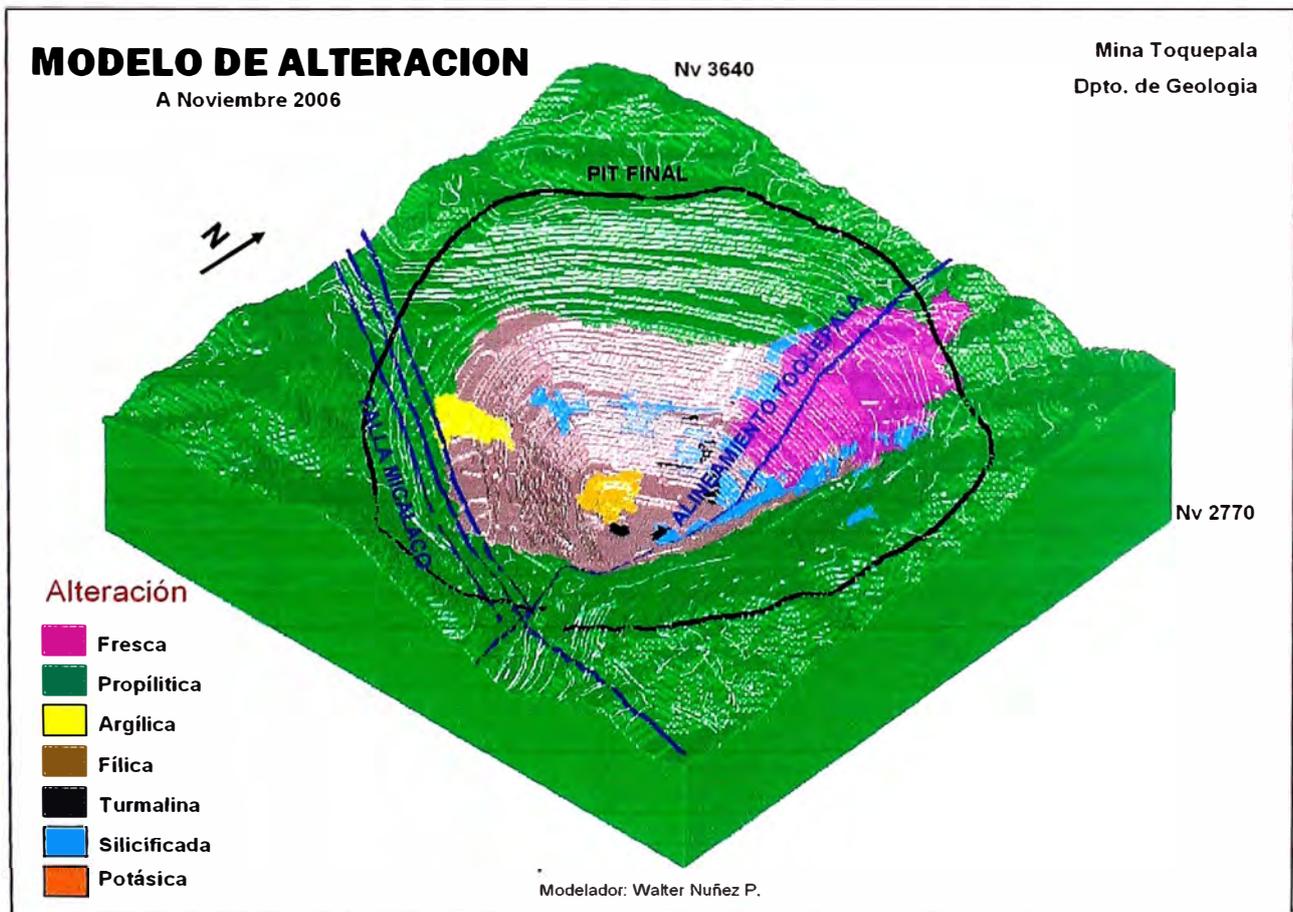


Fig. 5.3-4: Visualización Tridimensional del Modelo de Alteración.

Hasta acá tenemos 4 modelos geológicos, obtenidos de pura interpretación. También se pueden combinar modelos, en cuyo caso en el mismo modelo de bloques, se asigna a cada bloque unitario, el código del nuevo modelo si cumple las condiciones requeridas. Y esto lo veremos en los modelos de Dureza y Geometalúrgico.

5.3.5 Índice de Dureza de Roca (RHI).

Para obtener este modelo se ha combinado los modelos de Yeso, Roca y Alteración. La determinación de las durezas se ha realizado con pruebas de laboratorio de testigos diamantinos, con lo que se ha determinado e identificado desde rocas muy duras como la Dacita porfirítica en la zona de yeso hasta rocas muy suaves como la Brecha sericita. Pese a esto, son contados los taladros a los que se ha hecho esta prueba y que no logran cubrir todos los bloques del modelo. Por esta razón la obtención del modelo de dureza ha seguido tres pasos que se detallan a continuación:

Primero, se construyó una matriz geológica de dureza (Tabla 5.3-6) a partir de los códigos de dureza de la tabla 5.3-7, que sirve para hacer el asignamiento de códigos de dureza sin considerar el yeso y el respectivo valor de RHI. Este es un valor de RHI de fondo (Background) que se asigna a todos los bloques unitarios del modelo de dureza.

Segundo, se hace una sobreescritura del valor RHI en los bloques unitarios, esta vez solo para la zona de yeso.

Tercero, se utilizan los valores de dureza de los taladros diamantinos, sobrescribiendo sobre el modelo de bloques de dureza.

Matriz Geológica de Dureza

| | | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 55 | |
|------|-----|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----------------------|
| Roca | Cod | Fresco | Prop | Arg | Fil | T | Sil | K | Yeso | <=== Alteracion, Yeso |
| Aa | 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| Tr | 2 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | |
| Ta | 3 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | |
| Tq | 4 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | |
| Td | 5 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | |
| Qq | 6 | 26 | 51 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 49 |
| Lp | 7 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Da | 8 | 28 | 56 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 57 |
| Dp | 9 | 31 | 55 | 29 | 29 | 31 | 31 | 31 | 31 | 45 |
| Di | 10 | 32 | 33 | 32 | 32 | 33 | 33 | 33 | 33 | 46 |
| SBx | 11 | 35 | 38 | 35 | 35 | 38 | 37 | 38 | 38 | 43 |
| DiBx | 12 | 32 | 32 | 32 | 34 | 33 | 33 | 33 | 33 | 47 |
| Bx | 13 | 35 | 38 | 35 | 35 | 38 | 37 | 38 | 38 | 43 |
| BxT | 14 | 35 | 35 | 35 | 36 | 38 | 39 | 38 | 38 | 44 |
| Px | 15 | 56 | 56 | 56 | 40 | 52 | 41 | 56 | 56 | 48 |

Tabla 5.3-6: Matriz geológica de Dureza.

La tabla 5.3-7, muestra los 38 tipos de materiales reconocidos en la mina de Toquepala. Cada material tiene un código de dureza, además de su valor respectivo de RHI. Estos valores de RHI fueron obtenidos a partir de pruebas de dureza hechos en muestras superficiales para cada tipo de material. Notar que estos materiales resultan de combinar los modelos: Roca + Alteración + Yeso.

Tabla 5.3-7: Codificación de Dureza.

| N | DUREZA | ABREVIATURA | CODIGO | RHI |
|----------|-------------------------------------|--------------------|---------------|------------|
| 1 | Alta Andesita | Aa | 20 | 13.8 |
| 2 | Riolita Toquepala | Tr | 21 | 13.8 |
| 3 | Andesita Toquepala | Ta | 22 | 13.8 |
| 4 | Andesita Toquepala Sil. | Ta-Sil | 23 | 22.0 |
| 5 | Pórfido Cuarzífero Toquepala | Tq | 24 | 13.8 |
| 6 | Dolerita Toquepala | Td | 25 | 12.3 |
| 7 | Pórfido Cuarzífero Quellaveco | Qq | 26 | 13.8 |
| 8 | Latita Porfírica | Lp | 27 | 12.8 |
| 9 | Dacita Aglomerada | Da | 28 | 12.4 |
| 10 | Dacita Porfírica Ser. | Dp-Qs | 29 | 9.6 |
| 11 | Dacita Porfírica Sil. | Dp-Sil | 30 | 11.6 |
| 12 | Dacita Porfírica Qtz. | Dp-Qtz | 31 | 18.4 |
| 13 | Diorita Ser. | Di-Qs | 32 | 10.2 |
| 14 | Diorita Prop. | Di-Prop | 33 | 16.6 |
| 15 | Brecha Diorita Ser. | DiBx-Qs | 34 | 8.9 |
| 16 | Brecha Angular Ser. | Bx-Qs | 35 | 11.0 |
| 17 | Brecha Angular Sil. | Bx-Sil | 36 | 14.2 |
| 18 | Brecha Angular Qtz. | Bx-Qtz | 37 | 15.8 |
| 19 | Brecha Turmalina | BxT | 38 | 14.7 |
| 20 | Brecha Turmalina Qtz. + | BxT-Qtz | 39 | 24.0 |
| 21 | Pebble Brecha Ser. | Px-Qs | 40 | 10.4 |
| 22 | Pebble Brecha Sil. | Px-Sil | 41 | 15.5 |
| 23 | Pebble Brecha Qtz. | Px-Qtz | 42 | 15.0 |
| 24 | Brecha G/A | Bx-G/A | 43 | 14.1 |
| 25 | Brecha Turmalina G/A | BxT-G/A | 44 | 17.7 |
| 26 | Dacita G/A | Dp-G/A | 45 | 17.6 |
| 27 | Diorita G/A | Di-G/A | 46 | 13.1 |
| 28 | Brecha Diorita G/A | DiBx-G/A | 47 | 13.1 |
| 29 | Pebble Brecha G/A | Px-G/A | 48 | 17.9 |
| 30 | Pórfido Cuarzífero Quellaveco G/A | Qq-G/A | 49 | 22.0 |
| 31 | Dacita Aglomerada G/A | Da-G/A | 50 | 22.0 |
| 32 | Pórfido Cuarzífero Quellaveco Prop. | Qq-Prop | 51 | 22.0 |
| 33 | Pebble Brecha Turmalina | Px-T | 52 | 24.0 |
| 34 | Brecha Dacita G/A | DpBx-G/A | 53 | 17.7 |
| 35 | Brecha Angular Qtz ++ | Bx-Sil | 54 | 15.6 |
| 36 | Dacita Prop. | Dp-Prop | 55 | 19.6 |
| 37 | Pebble-Dacita Aglomerada | Px-Da | 56 | 14.2 |
| 38 | Pebble-Dacita Aglomerada G/A | Px-Da G/A | 57 | 14.2 |

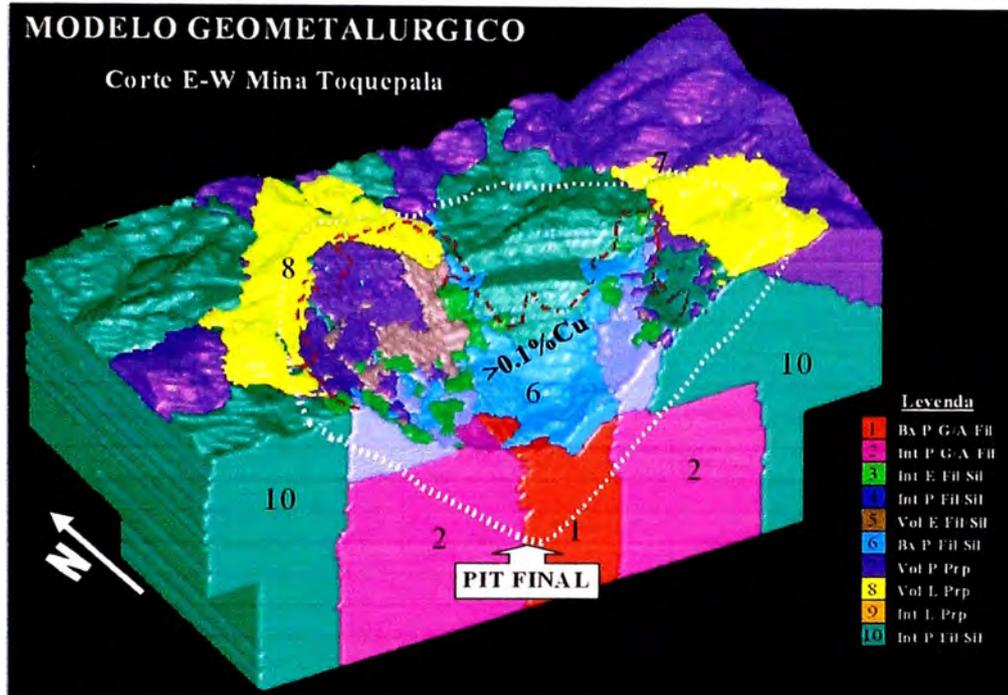


Fig. 5.3-5: Visualización Tridimensional del Modelo Geometalúrgico.

5.4 Construcción del Modelo Topográfico.

El modelo topográfico es una representación 3D de la superficie de la mina. En efecto, a partir de las curvas de nivel de las crestas, toes (incluido rampas), se hacen triangulaciones para obtener la superficie topográfica actual (Fig. 5.4-1). Esta superficie sirve para generar cotas de grids que después deben ser transferidas al modelo de bloques en el ítem TOPO. La conversión de la topografía en cada bloque del modelo se realiza del modo siguiente: El programa calcula la intersección de la línea vertical que pasa por el centroide del bloque y la superficie topográfica (Fig. 5.4-2). Toma la altura vertical respecto a la altura del banco (15 metros), y lo expresa en porcentaje. Este valor quiere decir, que este porcentaje del bloque esta por debajo de la superficie topográfica (material insitu que aun resta minar). Una topografía de valor 0 en un bloque significa que este ya ha sido minado completamente y solo queda aire, y un valor 100 significa que el bloque esta intacto.

Manejar las topografías actual y de la fase final de minado, se hace necesario para manipular el modelo de bloques en el cálculo de tonelaje y ley. Por ejemplo, para conocer el tonelaje y ley existente de la fase 3, se requiere conocer la topografía actual y la topografía final después de minar toda la fase 3.



Fig. 5.4-1: Superficie topográfica actual visto en 3D.

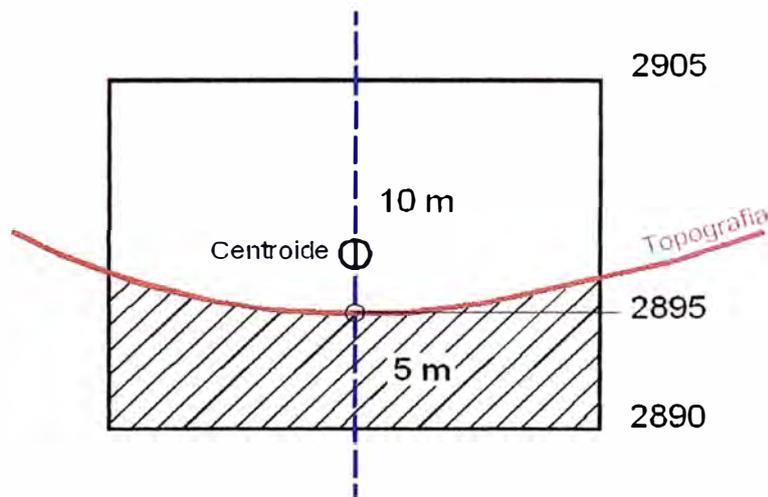


Fig. 5.4-2: Un bloque unitario de 20x20x15, mostrando la intersección de la línea vertical que pasa por el centroide del bloque y la superficie topográfica. La cota de este punto de intersección es 2895, el programa toma esta diferencia de cotas y lo expresa en %. Es decir, el item $TOPO=5*100/15=33.3\%$ del bloque es material insitu (achurado).

CAPITULO 6

ESTADISTICA Y GEOESTADISTICA.

6.1 COMPOSITACION.

Como el minado en el tajo se realiza por niveles, se hace indispensable tener los bancos promediados por leyes. Es por eso, que los ensayos de los taladros se compositan a una altura de banco de 15 metros. Estas leyes promediadas (compósitos) son las que reciben después, un tratamiento estadístico-geoestadístico y se usan en el proceso de estimación de leyes del Modelo de Bloques.

De manera algo diferente, la compositación de los códigos geológicos: Litología, Yeso, Mineralización, Alteración, se hace por asignamiento del código que tiene mayor predominio en el banco.

6.2 ANALISIS ESTADISTICO DE COMPOSITOS.

Las interpretaciones de las secciones verticales se basaron en los sondajes diamantinos. Los códigos de los controles geológicos: Litología, Yeso, Zonas de Mineralización, y Alteración hidrotermal fueron asignados al modelo de bloques.

Antes de realizar el proceso de interpolación de leyes para estimar los recursos minerales, se debe desarrollar un análisis estadístico y geoestadístico de los compósitos. El análisis estadístico ayuda a determinar las restricciones o controles geológicos que debemos usar en el proceso de interpolación. Así, los bloques con un mismo tipo de litología, mineralización y alteración hidrotermal deben ser interpolados con compósitos del mismo tipo de control geológico.

Los parámetros estadísticos como: Número de Compósitos, media, desviación estándar y coeficiente de variación son calculados por el software. Los histogramas para su mejor estudio geológico, deben ser generados por Litología, Zona de Mineralización y Alteración Hidrotermal para las variables definidas en la Base de Datos.

En la mina Toquepala, el análisis estadístico ayudó a definir las poblaciones que pudieran ser utilizadas como control geológico, aún las medias de la ley de cobre fueron muy similares para cada tipo de control geológico.

Tablas de estadística cruzadas fueron generadas para definir los dominios a ser usados como controles geológicos en el proceso de interpolación. Los dominios fueron definidos

comparando los valores de las medias, examinando los histogramas y chequeando que el grupo que compone al dominio fuera correcto desde el punto de vista geológico.

El propósito de los dominios fue agrupar aquellos datos que fueran geológica y estadísticamente similares para obtener el mejor análisis de los variogramas y el mejor control para la interpolación de leyes.

6.3 ANALISIS GEOESTADISTICO DE COMPOSITOS.

Este estudio nos permite analizar la continuidad espacial de la mineralización, por tanto conoceremos el comportamiento anisotrópico de los trenes de mineralización de cada elemento estudiado (Fig. 6.3-1, Fig. 6.3-2). El análisis variográfico de los compósitos se hizo para cada dominio geoestadístico, que a su vez estuvieron basados en el tipo de roca y tipo de mineralización (Tabla 6.4-2). Por ejemplo, para el cobre se determinaron 9 dominios geoestadísticos, y para cada dominio se estudiaron: Variogramas en las direcciones dadas por la combinaciones de 12 ángulos horizontales cada 30° (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330°), y 4 ángulos verticales cada 30° (0°, 30°, 60°, 90°), es decir, en total 12x4=48 variogramas unidireccionales para el cobre, la combinación de estos ángulos cubren todas las direcciones necesarias para chequear la continuidad de la mineralización en el depósito. Se utilizó una ventana Windowing Angle de 15° (bisectriz de 30°), así como también, 15 intervalos (lags) de 30.5 metros de distancia para cada uno (Malla de taladros = 30.5 metros).

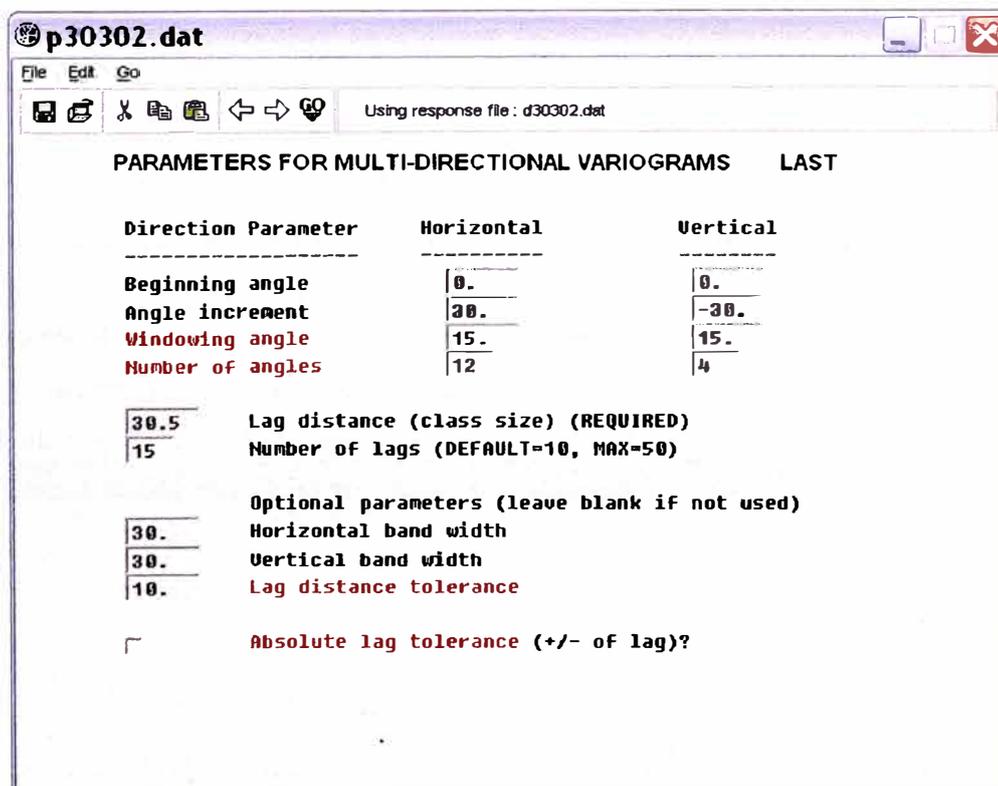


Fig. 6.3-1: Parámetros de Variogramas Multidireccionales en MineSight.

PARAMETROS DE VARIOGRAMAS

HORIZONTAL ANGLE [0°,330°] α 30° Window Angle = 15°
VERTICAL ANGLE [0°,-90°] ϕ 30° Window Angle = 15°
Lag distance = 31
Nro of lags = 15
Horizontal band width = 50
Vertical band width = 50
Lag distance tolerance = 15

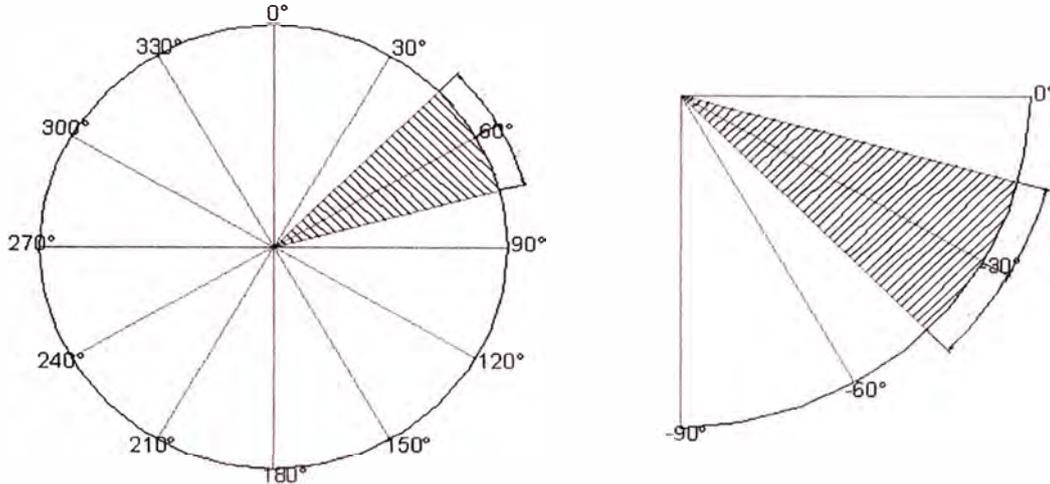


Fig. 6.3-2: Ángulos horizontales y verticales de Variogramas

Los contornos de variogramas también fueron generados para cada dominio geoestadístico. Estos contornos se utilizaron para determinar y verificar las tendencias de mineralizaciones en los dominios. Una elipse de forma aproximada fue el resultado de los contornos de los variogramas en cada dominio determinando la dirección de la mineralización. El eje mayor de la elipse es considerado como la dirección recta, mientras el eje menor es considerado como el ángulo de inclinación (Dip). Cuando ambos ejes son aproximadamente iguales, la mineralización es considerada isotrópica. Los variogramas calculados son 3D con los tres ejes mayor, medio y menor perpendiculares entre si. La tendencia general se da en el eje vertical que es de mayor longitud, esto es debido al control de la mineralización que ejerce el cuerpo cilíndrico de la brecha pipe y la dacita porfírica, ambos mantienen su continuidad hacia profundidad en el depósito de Toquepala según el reconocimiento hecho por taladros.

6.4 INTERPOLACION DE LEYES EN EL MODELO DE BLOQUES.

Para interpolar las leyes de los compósitos, se ha utilizado el Kriging Ordinario para las leyes principales y el Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) para las leyes secundarias, ver tabla 6.4-1.

Inicialmente los ítems del modelo de bloques de las leyes a interpolar deben estar vacíos o deben ser reseteados a -1.

La elección de los parámetros de búsqueda es basada en los análisis de los variogramas de los diferentes dominios, validación de puntos y previas experiencias de interpolación.

La interpolación por el Inverso de la Distancia al Cuadrado, es utilizado en los sectores donde hay escasez de información de compósitos y que su aleatoriedad no permiten modelar a los variogramas teóricos conocidos, esto se produce en las zonas de rocas volcánicas como la andesita, riolita situados en el borde del tajo o niveles superiores, donde no se han realizado la cantidad suficiente de taladros exploratorios.

También se usa el algoritmo de búsqueda elipsoidal para la interpolación de bloques. Para todos los dominios, los contornos de los variogramas son ploteados para decidir la dirección del eje mayor de la elipse. Los variogramas formados en las direcciones de los ejes, mayor, medio y menor son estudiados individualmente para estimar la meseta y los rangos de los radios de interpolación.

El máximo eje del elipsoide (máxima distancia de búsqueda) es limitado a 432 metros. El eje menor del elipsoide fue ajustado de acuerdo al rango total de radios de los variogramas. Para la longitud del eje vertical, el rango de la primera estructura del variograma vertical fue utilizado. Una segunda corrida utilizando la distancia máxima de búsqueda (longitud máxima del eje mayor de la elipse) un medio del rango de la primera estructura de cada dominio.

Para realizar el cálculo de recursos, consideramos 16 ítems de leyes a ser interpolados para el modelo de bloques. A continuación se detalla la lista de estas leyes, así como el método de interpolación empleado y el variograma empleado (Tabla 6.4-1).

Tabla 6.4-1: Leyes interpoladas en el modelo de bloques.

| Ítem | Interpolación |
|--|----------------------|
| 1. Cobre (Cu) | Kriging |
| 2. Molibdeno (Mo) | Kriging |
| 3. Plata (Ag) | Kriging |
| 4. Cobre soluble en acido (CuSAC) | IDW, Kriging |
| 5. Cobre soluble en cianuro (CuSCN) | IDW, Kriging |
| 6. Índice de Solubilidad en Acido (ISAC) | IDW, Kriging |
| 7. Índice de Solubilidad en Cianuro (ISCN) | IDW, Kriging |
| 8. Hierro soluble en acido (FeSAC) | IDW, Kriging |
| 9. Alúmina (Al ₂ O ₃) | IDW |
| 10. Plomo (Pb) | IDW |
| 11. Zinc (Zn) | IDW |
| 12. Hierro (Fe) | IDW, Kriging |
| 13. Pirita (Py) | Fórmula |
| 14. Calcopirita (Cpy) | Fórmula |
| 15. Arsénico (OxCa) | IDW |
| 16. Oxido de Calcio (OxCa) | IDW |

El Kriging, fue el método de interpolación utilizado para las principales leyes como: Cobre, Molibdeno, Cobre soluble en ácido, Cobre soluble en cianuro y Plata.

6.4.1 Evaluación e Interpolación de leyes de cobre.

6.4.1.1 Procesamiento de leyes de cobre.

Para el modelo de bloques se ha considerado la información proveniente de los taladros exploratorios, los que nos proveen intervalos de ensayos de 3 metros de largo (assays). Los valores considerados van de 0.000 a 15.000% Cu. La validación de datos ingresados como el Collar, Desviación de taladro, Longitudes, fueron hechas por el modulo del Minesight durante el cargado de la base de datos de taladros.

6.4.1.2 Composición.

Los intervalos de ensayos son compositados por bancos de 15 metros de alto. Este compósito es un promedio aritmético pesado de las leyes de cobre con sus respectivas longitudes (AI = Hasta - Desde) y dividido entre la longitud total.

El asignamiento del compósito se ha hecho al punto medio del banco. Luego de la composición todos los taladros, se listaron en el reporte del Minesight 18,840 compósitos con altos erráticos y con leyes por encima de 0.001 (Fig. 6.4-1).

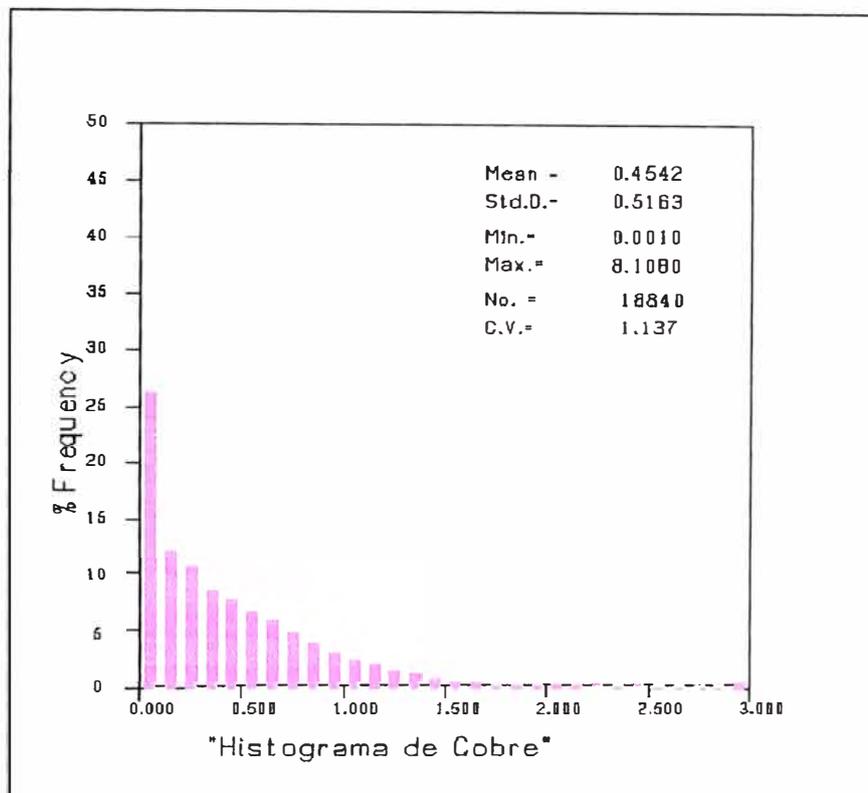


Fig. 6.4-1: Histograma de Cu.

6.4.1.3 Estadística.

Previo al estudio estadístico de las leyes compositadas de cobre, ploteamos estos compósitos en un papel semilogarítmico y obtenemos las curvas de probabilidad de cobre para cada tipo de roca (Fig. 6.4-2). Esta curva nos ayuda a establecer dominios o grupos de datos con similares comportamientos geológicos y estadísticos para obtener un mejor modelamiento variográfico y un mejor control para la interpolación de leyes.

Curva de probabilidad de cobre (Roca)

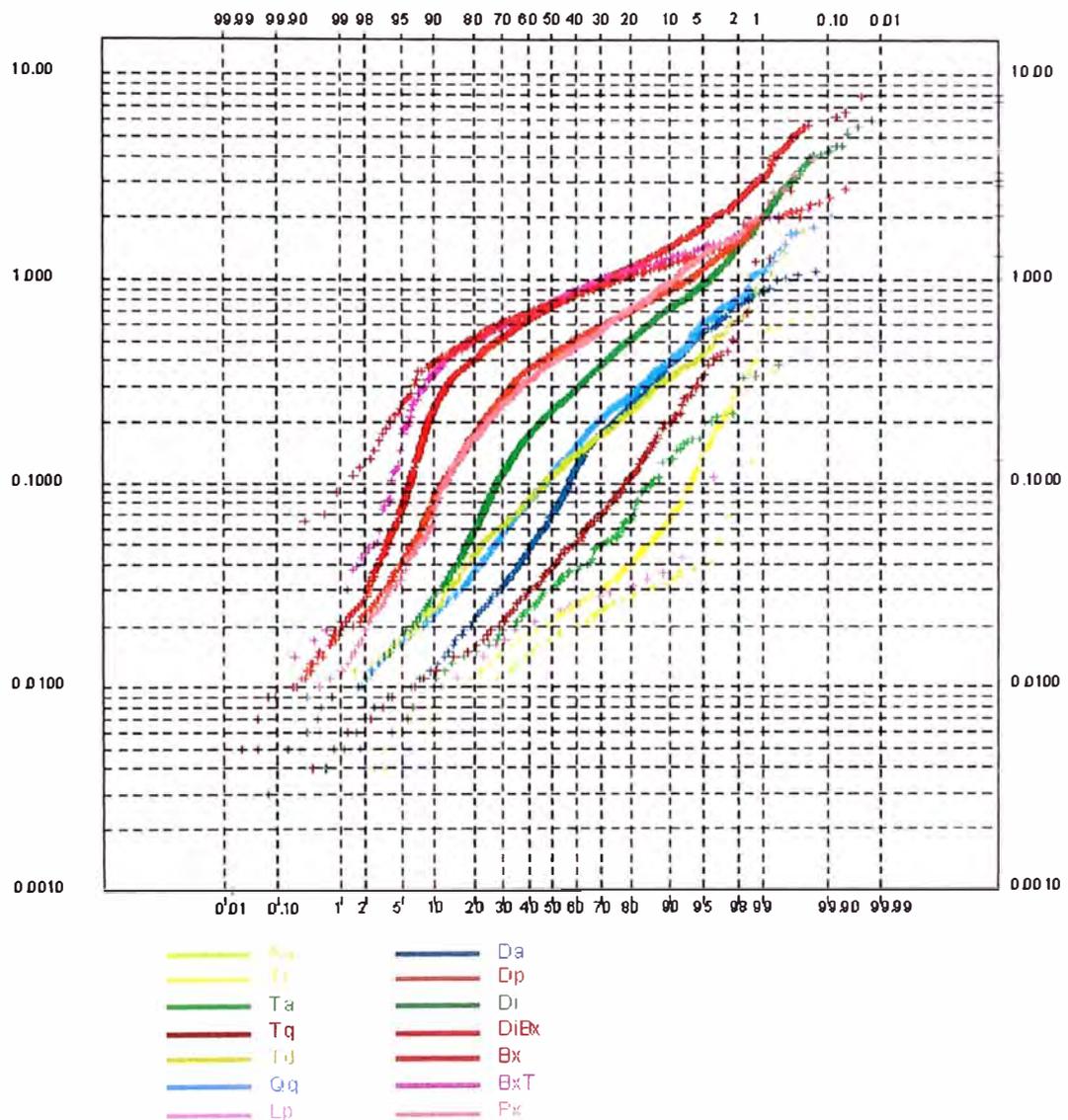


Fig. 6.4-2: Curva acumulativa de probabilidad en los compósitos de cobre por tipo de roca.

Después de hacer este análisis matemático y haber comprobado por experiencia de campo del comportamiento geológico similar de tales leyes en los diferentes tipos de roca, se optó por hacer un agrupamiento lógico para el cobre y para el molibdeno, conforme se puede observar en la Tabla 6.4-2.

En esta tabla podemos observar que se ha combinado los 4 tipos de mineralización con los 15 tipos de rocas de la mina. La agrupación de las rocas volcánicas se hace debido a que son prácticamente estériles a excepción de los sectores de mineral enriquecido de la Td. En el caso de la Diorita por tener una mayor población es tratada por separado en

Leach Capping, Enriquecido-Transicional y Primario. Otro buen grupo corresponde a las brechas, debido a su alta ley.

Para el cobre, se han definido 9 controles geológicos de mineralización, para el moly, 7 grupos que permite una interpolación de leyes más coherente. Para poder comprender las abreviaturas de los modelos de roca y mineralización referirse a las Tablas 5.3-2 y 5.3-4.

Agrupamiento lógico para la ley de cobre y molibdeno

| Feature | Tipo de Mineral | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 5 | 6 | 10 | 9 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---------|-----------------|-----------|----|----|----|----|-----------|----|----|-----------|-----------|------|----|-----|----|
| | | Aa | Tr | Ta | Tq | Lp | Da | Td | Qq | Di | Dp | DiBx | Bx | BxT | Px |
| 313 | Lc | C02 / M02 | | | | | C04 / M04 | | | C07 / M07 | C10 / M10 | | | | |
| 312-311 | E-T | C02 / M02 | | | | | C04 / M04 | | | C06 / M06 | C09 / M09 | | | | |
| 310 | P | C01 / M01 | | | | | C03 / M03 | | | C05 / M05 | C08 / M08 | | | | |

Grupo Geoestadístico

(Mineralización) + (Roca)

- Grupo C01, M01: (P) + (Aa, Tr, Ta, Tq, Lp, Da)
- Grupo C02, M02: (E, T, Lc) + (Aa, Tr, Ta, Tq, Lp, Da)
- Grupo C03, M03: (P) + (Td, Qq)
- Grupo C04, M04: (E, T, Lc) + (Td, Qq)
- Grupo C05, M05: (P) + (Di)
- Grupo C06, M06: (E, T) + (Di)
- Grupo C07, M07: (Lc) + (Di)
- Grupo C08, M08: (P) + (Dp, DiBx, Bx, BxT, Px)
- Grupo C09, M09: (E, T) + (Dp, DiBx, Bx, BxT, Px)
- Grupo C10, M10: (Lc) + (Dp, DiBx, Bx, BxT, Px)

Tabla 6.4-2: Agrupamiento lógico para cobre y molibdeno.

En el estudio estadístico de los compósitos de leyes de cobre se considero leyes desde 0.001 a 15.000 %Cu. Debido a la existencia de altos erráticos se hizo un tratamiento de estos, se detectó y corrigió con la media mas dos veces la desviación estándar. Esta corrección se aplicó a todos los compósitos cuyas leyes eran altas.

Un resumen del estudio estadístico se muestra en la tabla 6.4-3.

ESTADÍSTICA DE COMPOSITOS DE LEYES DE COBRE CON CONTROLES DE ROCA + MINERALIZACION - MINA TOQUEPALA
Modelo de Cu al 2005

| GRUPO | MINERAL | ROCA | MINERAL + ROCA | AVG | STD | MIN | MAX | N | CV | AVG + STD | AVG + 2*STD | # A.E. | % A.E. |
|-------|---------------|-------------------|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-----------|-------------|--------|--------|
| C01 | 310 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | (P) + (As,Tr,Ta,Tq,Lp,De) | 0.104 | 0.160 | 0.002 | 1.305 | 1134 | 1.539 | 0.264 | 0.424 | 56 | 5% |
| C02 | 311, 312, 313 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | (T,E,Lc) + (As,Tr,Ta,Tq,Lp,De) | 0.068 | 0.197 | 0.001 | 3.028 | 631 | 2.913 | 0.264 | 0.461 | 12 | 2% |
| C03 | 310 | 5, 6 | (P) + (I,d,Qq) | 0.136 | 0.128 | 0.005 | 1.720 | 1072 | 0.945 | 0.264 | 0.392 | 44 | 4% |
| C04 | 311, 312, 313 | 5, 6 | (T,E,Lc) + (I,d,Qq) | 0.254 | 0.315 | 0.005 | 2.332 | 596 | 1.240 | 0.568 | 0.883 | 25 | 4% |
| C05 | 310 | 10 | (P) + (Di) | 0.285 | 0.258 | 0.003 | 2.727 | 5742 | 0.906 | 0.543 | 0.801 | 260 | 5% |
| C06 | 311, 312 | 10 | (T,E) + (Di) | 0.754 | 0.816 | 0.013 | 7.418 | 990 | 1.082 | 1.570 | 2.386 | 49 | 5% |
| C07 | 313 | 10 | (Lc) + (Di) | 0.044 | 0.058 | 0.001 | 0.633 | 454 | 1.300 | 0.102 | 0.180 | 20 | 4% |
| C08 | 310 | 9, 12, 13, 14, 15 | (P) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Pr) | 0.678 | 0.433 | 0.009 | 5.260 | 6634 | 0.639 | 1.111 | 1.544 | 218 | 3% |
| C09 | 311, 312 | 9, 12, 13, 14, 15 | (T,E) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Pr) | 1.063 | 0.931 | 0.011 | 8.108 | 1012 | 0.875 | 1.994 | 2.924 | 41 | 4% |
| C10 | 313 | 9, 12, 13, 14, 15 | (Lc) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Pr) | 0.321 | 0.889 | 0.005 | 6.240 | 347 | 2.766 | 1.210 | 2.099 | 14 | 4% |
| | | | | 0.001 | 8.108 | 18.612 | | | | | | | |

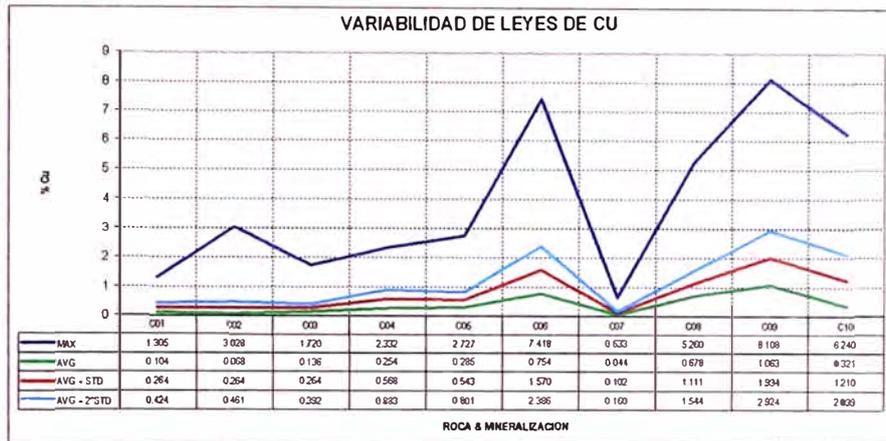


Tabla 6.4-3: Estadística de los compositos del cobre.

6.4.1.4 Análisis Variográfico.

Después del modelamiento variográfico se encontraron los parámetros geoestadísticos para cada uno de los 9 dominios geoestadísticos del cobre, y que serán utilizados en la interpolación de leyes. Estos parámetros son los que se muestran en la Tabla 6.4-4.

VARIOGRAM PARAMETERS FOR KRIGING FOR Cu - TOQUEPALA MINE
Model 2005

| CODIFICATION ZONES | | | VARIORAM PARAMETERS | | | ANISOTROPY DISTANCES | | | ANISOTROPY ANGLES | | | |
|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------|---------|----------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|---------|---------|
| MATERIAL GROUP | MINERAL TYPE | ROCK TYPE | MODEL TYPE | HUGOET Co | C | SILL | MAJOR RANGE | MINOR RANGE | VERTICAL RANGE | AZIMUTH (°) | OPH (°) | DPE (°) |
| C01/C02 | 310, 311, 312, 313 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | GLOBAL SPHERIC | 0.00294 | 0.01123 | 0.01417 | 170.0 | 170.0 | 170.0 | 0 | 0 | 0 |
| C03 | 310 | 5, 6 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.00092 | 0.00865 | 0.00956 | 200.0 | 160.0 | 130.0 | 135 | 0 | 0 |
| C04 | 311, 312, 313 | 5, 6 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.01246 | 0.08477 | 0.09722 | 129.8 | 114.9 | 121.4 | 45 | 0 | 0 |
| C05 | 310 | 10 | GLOBAL SPHERIC | 0.00473 | 0.02235 | 0.02708 | 192.0 | 192.0 | 192.0 | 0 | 0 | 0 |
| C06 | 311, 312 | 10 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.01932 | 0.24998 | 0.26930 | 160.0 | 160.0 | 130.0 | 135 | 0 | 0 |
| C07 | 313 | 10 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.00010 | 0.00021 | 0.00031 | 100.0 | 85.0 | 130.0 | 0 | 0 | 0 |
| C08 | 310 | 9, 12, 13, 14, 15 | GLOBAL SPHERIC | 0.02310 | 0.06704 | 0.09014 | 157.0 | 157.0 | 157.0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | 0.03904 | 0.12918 | 432.0 | 432.0 | 432.0 | 0 | 0 | 0 |
| C09 | 311, 312 | 9, 12, 13, 14, 15 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.12588 | 0.41727 | 0.54295 | 216.0 | 200.0 | 135.0 | 135 | 0 | 0 |
| C10 | 313 | 9, 12, 13, 14, 15 | DIRECTIONAL SPHERIC | 0.00028 | 0.00051 | 0.00079 | 181.7 | 169.8 | 70.0 | 135 | 0 | 0 |

Tabla 6.4-4: Parámetros geoestadísticos para el cobre.

6.4.1.5 Interpolación de bloques.

La interpolación de leyes de cobre se hizo teniendo en cuenta las 9 restricciones geológicas o grupos geoestadísticos ya explicados líneas arriba.

6.4.2 Evaluación e Interpolación de leyes de molibdeno.

6.4.2.1 Procesamiento de leyes de molibdeno.

Se ha trabajado con los mismos taladros utilizados para la evaluación del cobre, se ha considerado leyes dentro del rango 0.000 a 5.000% Mo.

6.4.2.2 Composición.

Igual que lo que se hizo con el cobre, la composición se hace por bancos. Se obtuvieron un total de 18,101 compósitos con altos erráticos y por encima de 0.0001 % Mo (Fig. 6.4-3).

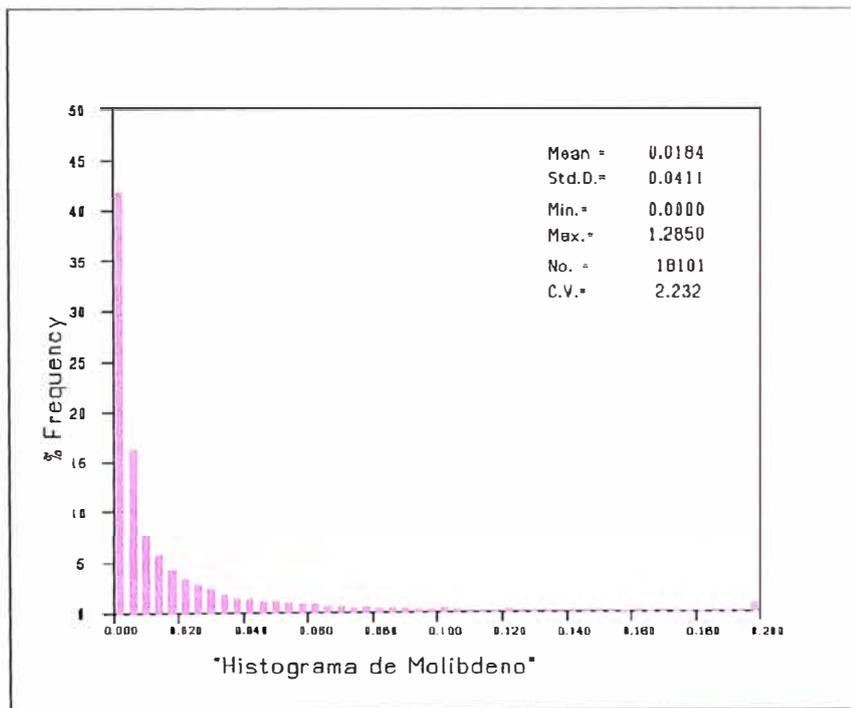


Fig. 6.4-3: Histograma de Mo.

6.4.2.3 Estadística.

El molibdeno tiene los mismos controles que las del cobre. Esto se puede observar en el ploteo de la curva de probabilidad de la figura 6.4-4.

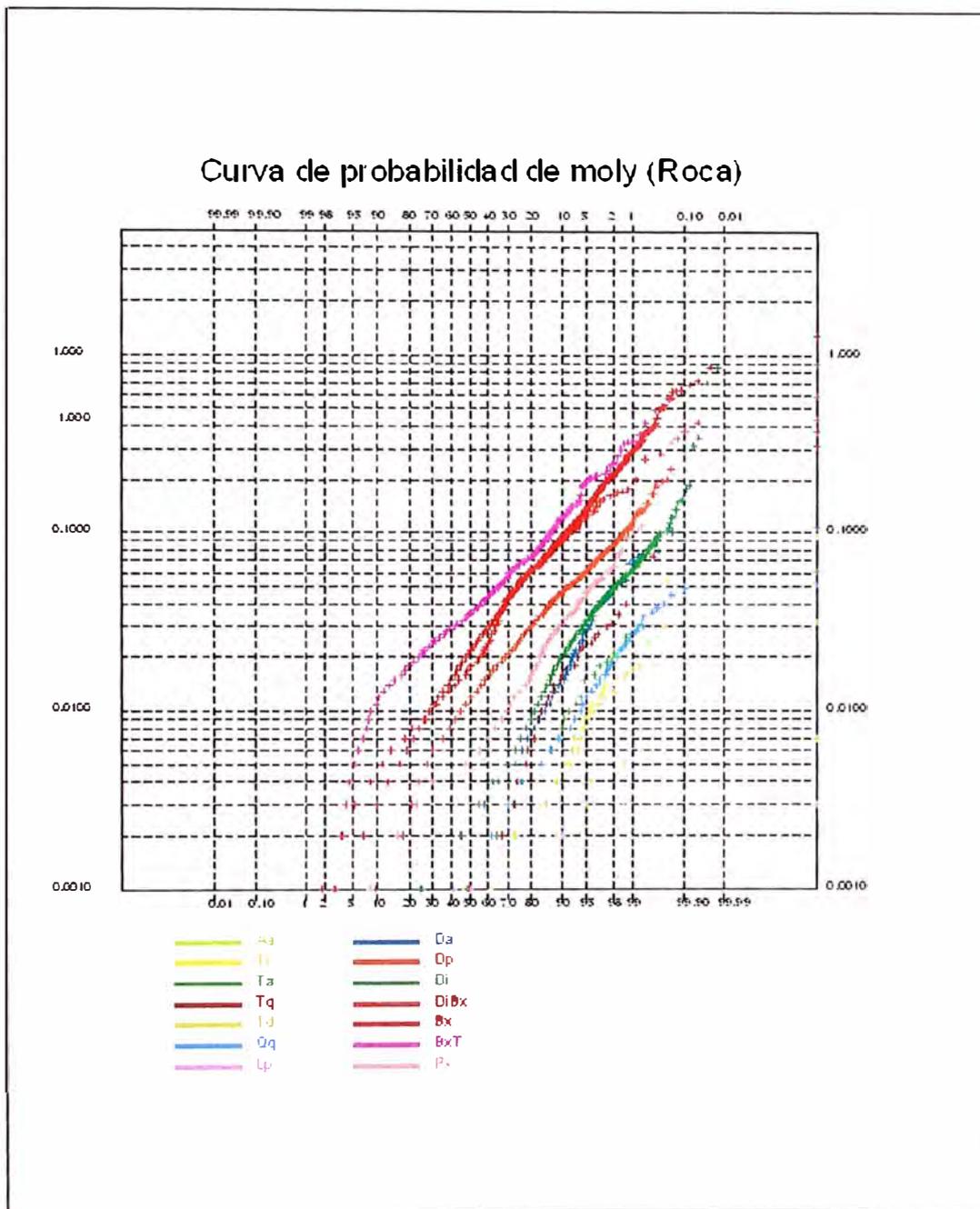


Fig. 6.4-4: Curva acumulativa de probabilidad de molibdeno por tipo de roca.

Con el estudio estadístico para el molibdeno se detectó y reemplazo los altos erráticos, con la media más tres veces la desviación estándar (Tabla 6.4-5).

El ploteo de la curva de probabilidad acumulada, también es utilizada para examinar los compósitos situados en las colas, que podría tener un comportamiento diferente al resto de la población.

ESTADÍSTICA DE COMPOSITOS DE LEYES DE MOLY CON CONTROLES DE ROCA + MINERALIZACION - MINA TOQUEPALA

Modelo de Mo #12005

| GRUPO | MINERAL | ROCA | MINERAL + ROCA | AVO | STD | MIN | MAX | N | CV | AVO + STD | AVO + 2*STD | AVO + 3*STD | # A.E. | % A.E. |
|-------|---------------|-------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|------|--------|-----------|-------------|-------------|--------|--------|
| M01 | 310 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | (P) + (As,Ti,Ta,Tq,Lp,De) | 0.0046 | 0.0132 | 0.0000 | 0.3080 | 1112 | 2.8560 | 0.0178 | 0.0310 | 0.0442 | 17 | 2% |
| M02 | 311, 312, 313 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | (T,E,Lc) + (As,Ti,Ta,Tq,Lp,De) | 0.0045 | 0.0087 | 0.0000 | 0.0960 | 584 | 1.9580 | 0.0132 | 0.0219 | 0.0308 | 10 | 2% |
| M03 | 310 | 5, 6 | (P) + (Tl,Qq) | 0.0024 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0340 | 1040 | 1.2850 | 0.0054 | 0.0084 | 0.0114 | 29 | 3% |
| M04 | 311, 312, 313 | 5, 6 | (T,E,Lc) + (Tl,Qq) | 0.0048 | 0.0067 | 0.0000 | 0.0520 | 536 | 1.4050 | 0.0115 | 0.0182 | 0.0249 | 14 | 3% |
| M05 | 310 | 10 | (P) + (D) | 0.0078 | 0.0132 | 0.0000 | 0.1860 | 5871 | 1.6830 | 0.0210 | 0.0342 | 0.0474 | 143 | 3% |
| M06 | 311, 312 | 10 | (T,E) + (D) | 0.0079 | 0.0313 | 0.0000 | 0.7010 | 811 | 3.9810 | 0.0392 | 0.0705 | 0.1018 | 6 | 1% |
| M07 | 313 | 10 | (Lc) + (D) | 0.0103 | 0.0644 | 0.0000 | 0.8870 | 374 | 8.2570 | 0.0747 | 0.1391 | 0.2035 | 2 | 1% |
| M08 | 310 | 9, 12, 13, 14, 15 | (P) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Px) | 0.0372 | 0.0574 | 0.0000 | 1.2850 | 6565 | 1.5450 | 0.0946 | 0.1520 | 0.2094 | 118 | 2% |
| M09 | 311, 312 | 9, 12, 13, 14, 15 | (T,E) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Px) | 0.0173 | 0.0271 | 0.0000 | 0.2700 | 911 | 1.5630 | 0.0444 | 0.0715 | 0.0986 | 23 | 3% |
| M10 | 313 | 9, 12, 13, 14, 15 | (Lc) + (Dp,Sbx,DiBx,Bx,T,Px) | 0.0182 | 0.0528 | 0.0000 | 0.4380 | 284 | 2.8980 | 0.0710 | 0.1238 | 0.1766 | 5 | 2% |

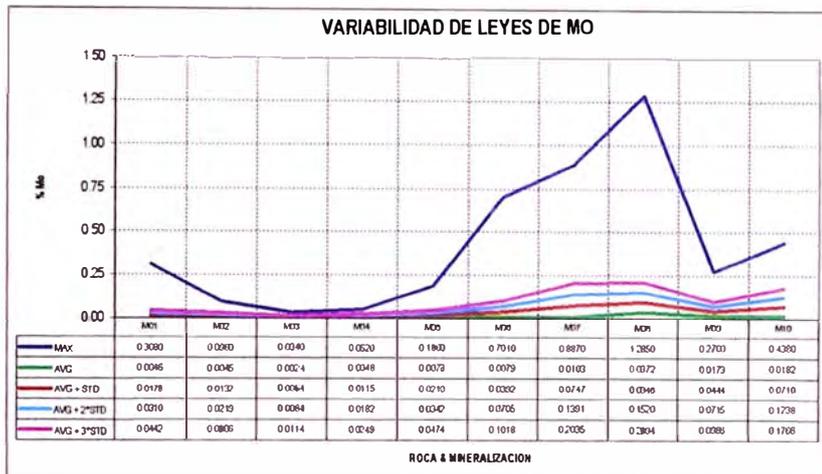


Tabla 6.4-5: Estadística de los compósitos de molibdeno.

6.4.2.4 Análisis Variográfico.

Se ha hallado los parámetros geoestadísticos de los elipsoides de búsqueda para cada uno de los 7 dominios geoestadísticos. Estos datos se muestran en la tabla 6.4-6.

VARIOGRAM PARAMETERS FOR KRIGING FOR Mo - TOQUEPALA MINE
Model 2005

| MATERIAL GROUP | CODIFICATION ZONES | | VARIORAM PARAMETERS | | | | ANISOTROPY DISTANCES | | | ANISOTROPY ANGLES | | |
|----------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------|---------|---------|----------------------|-------------|----------------|-------------------|---------|---------|
| | MINERAL TYPE | ROCK TYPE | MODEL TYPE | NUOOET Co | C | SILL | MAJOR RANOE | MINOR RANOE | VERTICAL RANOE | AZIMUTH (°) | DPH (°) | DPE (°) |
| M01/M02 | 310, 311, 312, 313 | 1, 2, 3, 4, 7, 8 | NORMAL SPHERIC | 0.31250 | 0.86750 | 1.00000 | 140.0 | 140.0 | 140.0 | 0 | 0 | 0 |
| M03/M04 | 310, 311, 312, 313 | 5, 6 | NORMAL SPHERIC | 0.20000 | 0.80000 | 0.80000 | 134.1 | 134.1 | 134.1 | 0 | 0 | 0 |
| M05 | 310 | 10 | NORMAL SPHERIC | 0.17240 | 0.72410 | 0.88650 | 220.0 | 220.0 | 220.0 | 0 | 0 | 0 |
| M06 | 311, 312 | 10 | NORMAL SPHERIC | 0.04187 | 0.79167 | 0.83334 | 190.0 | 190.0 | 190.0 | 0 | 0 | 0 |
| M07 | 313 | 10 | NORMAL SPHERIC | 0.03226 | 1.41030 | 1.46166 | 190.0 | 190.0 | 190.0 | 0 | 0 | 0 |
| M08 | 310 | 9, 12, 13, 14, 15 | NORMAL SPHERIC | 0.25110 | 0.86230 | 0.91340 | 144.0 | 144.0 | 144.0 | 0 | 0 | 0 |
| M09/M10 | 311, 312, 313 | 9, 12, 13, 14, 15 | LOGARITHMIC SPHERIC | 0.18368 | 0.93410 | 1.11778 | 179.8 | 179.8 | 179.8 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 6.4-6: Parámetros geoestadísticos para el molibdeno.

6.4.2.5 Interpolación de bloques.

Para interpolar las leyes de molibdeno se tomo en cuenta las 7 restricciones geológicas o grupos geoestadísticos ya explicados líneas arriba.

6.5 Evaluación del Peso específico y Asignamiento al Modelo de Bloques.

6.5.1 Procesamiento de prueba.

Los pesos específicos por cada tipo de roca se obtienen a partir de los testigos de los taladros. El proceso que se sigue es el siguiente: Por cada 15 metros se extrae una muestra representativa de más ó menos 6 cm. x 5 cm. x 3 cm., luego esta muestra es pesada en aire (Wa) y pesada sumergida en agua (Ww). La fórmula $W_a/(W_a-W_w)$ nos da el Peso específico de la roca, las unidades se expresan en TM/m³.

6.5.2 Composición.

Estos valores de pesos específicos forman parte de la base de datos de taladros diamantinos, y se compositan por banco.

6.5.3 Estadística.

Se ha hecho un estudio estadístico a fin de obtener el peso específico representativo para cada tipo de roca dentro del modelo geológico. En la tabla 6.5-1, se muestran los resultados finales del estudio estadístico realizado.

ESTADÍSTICA DE PESO ESPECÍFICO EN COMPOSITOS DE ROCA Y YESO - MINA TOQUEPALA

MODELO DE PESO ESPECÍFICO 2005

Zona sin Yeso

| MATERIAL | ROCA | YESO | ABREV | RANGO | ABREV. | AVG | STD | MIN | MAX | N | CV | AVG + STD | AVG + 2*STD | AVG CI |
|-------------------------------|------|------|-------|-------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Alta Andesita | 1 | 56 | Aa | [2,5] | Aa | 2.583 | 0.074 | 2.300 | 2.760 | 87 | 0.029 | 2.657 | 2.731 | 2.583 |
| Toquepala Riolita | 2 | 56 | Tr | [2,5] | Tr | 2.598 | 0.077 | 2.350 | 2.820 | 153 | 0.030 | 2.675 | 2.752 | 2.597 |
| Toquepala Andesita | 3 | 56 | Ta | [2,5] | Ta | 2.623 | 0.098 | 2.170 | 2.800 | 61 | 0.037 | 2.721 | 2.819 | 2.623 |
| Porfido Cuarzifero Toquepala | 4 | 56 | Tq | [2,5] | Tq | 2.617 | 0.104 | 2.280 | 2.760 | 57 | 0.040 | 2.722 | 2.826 | 2.617 |
| Dolerita Toquepala | 5 | 56 | Td | [2,5] | Td | 2.718 | 0.090 | 2.350 | 3.170 | 199 | 0.033 | 2.808 | 2.899 | 2.717 |
| Porfido Cuarzifero Quellaveco | 6 | 56 | Qq | [2,5] | Qq | 2.643 | 0.075 | 2.000 | 2.927 | 419 | 0.029 | 2.718 | 2.793 | 2.642 |
| Labla Porfínica | 7 | 56 | Lp | [2,5] | Lp | 2.642 | 0.040 | 2.556 | 2.700 | 18 | 0.015 | 2.683 | 2.723 | 2.642 |
| Dacita Aglomerada | 8 | 56 | Da | [2,5] | Da | 2.616 | 0.071 | 2.370 | 2.795 | 236 | 0.027 | 2.687 | 2.759 | 2.616 |
| Dacita Porfínica | 9 | 56 | Dp | [2,5] | Dp | 2.665 | 0.067 | 2.420 | 2.900 | 332 | 0.025 | 2.732 | 2.799 | 2.664 |
| Diorita | 10 | 56 | Di | [2,5] | Di | 2.676 | 0.100 | 2.000 | 3.214 | 1,533 | 0.037 | 2.776 | 2.875 | 2.674 |
| Brecha Diorita | 12 | 56 | DiBx | [2,5] | DiBx | 2.680 | 0.041 | 2.606 | 2.734 | 10 | 0.015 | 2.700 | 2.741 | 2.680 |
| Brecha Angular | 13 | 56 | Bx | [2,5] | Bx | 2.655 | 0.083 | 2.270 | 3.179 | 739 | 0.031 | 2.738 | 2.820 | 2.652 |
| Brecha Turmalina | 14 | 56 | BxT | [2,5] | BxT | 2.647 | 0.062 | 2.380 | 2.754 | 63 | 0.023 | 2.709 | 2.771 | 2.647 |
| Pebble Brecha | 15 | 56 | Px | [2,5] | Px | 2.619 | 0.087 | 2.347 | 3.162 | 155 | 0.033 | 2.706 | 2.793 | 2.616 |
| Total | | | | | | 2.657 | 0.086 | 2.000 | 3.214 | 4,062 | 0.032 | 2.744 | 2.830 | 2.655 |

2.66808

Zona con Yeso

| MATERIAL | ROCA | YESO | ABREV | RANGO | ABREV. | AVG | STD | MIN | MAX | N | CV | AVG + STD | AVG + 2*STD | AVG CI |
|-------------------------|------|------|---------|-------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Dacita Aglomerada + G/A | 8 | 55 | Da-GA | [2,5] | Da-G/A | 2.654 | 0.048 | 2.480 | 2.766 | 155 | 0.018 | 2.701 | 2.749 | 2.653 |
| Dacita Porfínica + G/A | 9 | 55 | Dp-GA | [2,5] | Dp-G/A | 2.721 | 0.067 | 2.000 | 2.969 | 738 | 0.025 | 2.788 | 2.855 | 2.720 |
| Diorita + G/A | 10 | 55 | Di-GA | [2,5] | Di-G/A | 2.757 | 0.071 | 2.300 | 2.990 | 1,867 | 0.026 | 2.828 | 2.899 | 2.756 |
| Brecha Diorita + G/A | 12 | 55 | DiBx-GA | [2,5] | DiBx-G/A | 2.757 | 0.067 | 2.450 | 2.930 | 242 | 0.024 | 2.825 | 2.892 | 2.757 |
| Brecha Angular + G/A | 13 | 55 | Bx-GA | [2,5] | Bx-G/A | 2.737 | 0.067 | 2.480 | 3.220 | 1,707 | 0.024 | 2.803 | 2.870 | 2.735 |
| Brecha Turmalina + G/A | 14 | 55 | BxT-GA | [2,5] | BxT-G/A | 2.720 | 0.063 | 2.550 | 2.988 | 290 | 0.023 | 2.783 | 2.845 | 2.719 |
| Pebble Brecha + G/A | 15 | 55 | Px-GA | [2,5] | Px-G/A | 2.696 | 0.075 | 2.520 | 2.820 | 33 | 0.028 | 2.771 | 2.847 | 2.696 |
| Total | | | | | | 2.739 | 0.068 | 2.000 | 3.220 | 5,032 | 0.025 | 2.807 | 2.874 | 2.738 |

Tabla 6.5-1: Estadística de los compósitos de Peso Específico.

6.5.4 Asignamiento de Peso Específico a bloques.

Teniendo los valores de peso específico promedios por tipo de roca y yeso/anhidrita, se realiza un asignamiento de este peso específico en el modelo de bloques (Tabla 6.5-2). Podemos notar en la tabla, que en profundidad los pesos específicos de las rocas tienden a aumentar cuando estas tienen yeso/anhidrita, como ejemplo comparemos una diorita sin yeso (2.674 tm/m^3) con una diorita con yeso (2.756 tm/m^3). Lo que se ha podido notar en el tajo es el predominio de la anhidrita en profundidad. Comparando los dos sulfatos, la anhidrita tiene un mayor peso específico que el yeso, además de poseer una mayor dureza.

PESO ESPECIFICO - 2005
(tm/m^3)

| Zona sin Yeso | | |
|-------------------------------|---------|--------------|
| Tipo Roca | Simbolo | Promedio |
| Alta Andesita | Aa | 2.583 |
| Toquepala Riolita | Tr | 2.597 |
| Toquepala Andesita | Ta | 2.623 |
| Porfido Cuarifero Toquepala | Tq | 2.617 |
| Dolerita Toquepala | Td | 2.717 |
| Porfido Cuarifero Quellaveco | Qq | 2.642 |
| Latita Porfirítica | Lp | 2.642 |
| Dacita Aglomerada | Da | 2.616 |
| Dacita Porfirítica | Dp | 2.664 |
| Diorita | Di | 2.674 |
| Brecha Diorita | DiBx | 2.660 |
| Brecha Angular | Bx | 2.652 |
| Brecha Turmalina | BxT | 2.647 |
| Pebble Brecha | Px | 2.616 |
| Relleno | Fill | 1.830 |
| Promedio Zona sin Yeso | | 2.657 |

| Zona con Yeso | | |
|-------------------------------|----------|--------------|
| Tipo Roca | Simbolo | Promedio |
| Dacita Aglomerada | Da-G/A | 2.653 |
| Dacita Porfirítica | Dp-G/A | 2.720 |
| Diorita | Di-G/A | 2.756 |
| Brecha Diorita | DiBx-G/A | 2.757 |
| Brecha Angular | Bx-G/A | 2.735 |
| Brecha Turmalina | BxT-G/A | 2.719 |
| Pebble Brecha | Px-G/A | 2.696 |
| Promedio Zona con Yeso | | 2.738 |

Tabla 6.5-2: Peso específico de cada tipo de roca.

CAPITULO 7

ESTIMACION Y CLASIFICACION DE RECURSOS MINERALES. RECONCILIACION.

7.1 Estimación y Clasificación de Recursos Geológicos.

7.1.1 Método de clasificación.

En esta sección identificamos aquel recurso geológico que deberá ser evaluado económicamente para ser elevado a la reserva mineral, en una explotación a tajo abierto. Para clasificar los recursos geológicos en Toquepala (SPCC), se ha considerado la recomendación hecha por Mintec, que es la de utilizar el Método de Varianza Combinada con intervalos de Confianza para las estimaciones de ley. El Índice RCB es calculada para cada bloque y usado para filtrar los recursos totales dentro de las tres categorías: Probado, Probable y Posible. A menor índice RCB hay mayor confianza por tener una varianza baja. El índice RCB (Relative Confidence Bound) se calcula con la formula:

$$LimiteDeConfidenciaSuperior = Z + 2 \times \sqrt{\frac{CV}{n}}$$

$$LimiteDeConfidenciaInferior = Z - 2 \times \sqrt{\frac{CV}{n}}$$

$$RCB = \frac{LimiteDeConfidenciaSuperior - LimiteDeConfidenciaInferior}{2 * LeyKrigadoDelBloque}$$

Donde:

Z = Ley krigada

CV = Varianza Combinada

n = Número de compósitos usados para krigear el bloque.

Según esto, las definiciones para cada uno de estas categorías se puede observar en la tabla 7.1-1.

| BLOCK | DEFINICION |
|--------------|--|
| Probado | Cuando el block tiene un RCB menor o igual a su mediana. |
| Probable | Cuando el block tiene un RCB entre una y dos veces su mediana. |
| Posible | Cuando el block tiene un RCB mayor a dos veces su mediana. |

Tabla 7.1-1: Definición de mineral Probado, Probable y Posible.

7.1.2 Estimación de recursos usando el índice RCB.

El índice RCB se calcula en todos los bloques del modelo y para esto se utiliza un programa de subrutina en Minesight (PMODCI.DAT y MCI612.EXE).

Al emplear este procedimiento y considerando RCB para el cobre a una confianza de 95%, obtenemos la Curva de probabilidad mostrada en la figura 7.1-1.

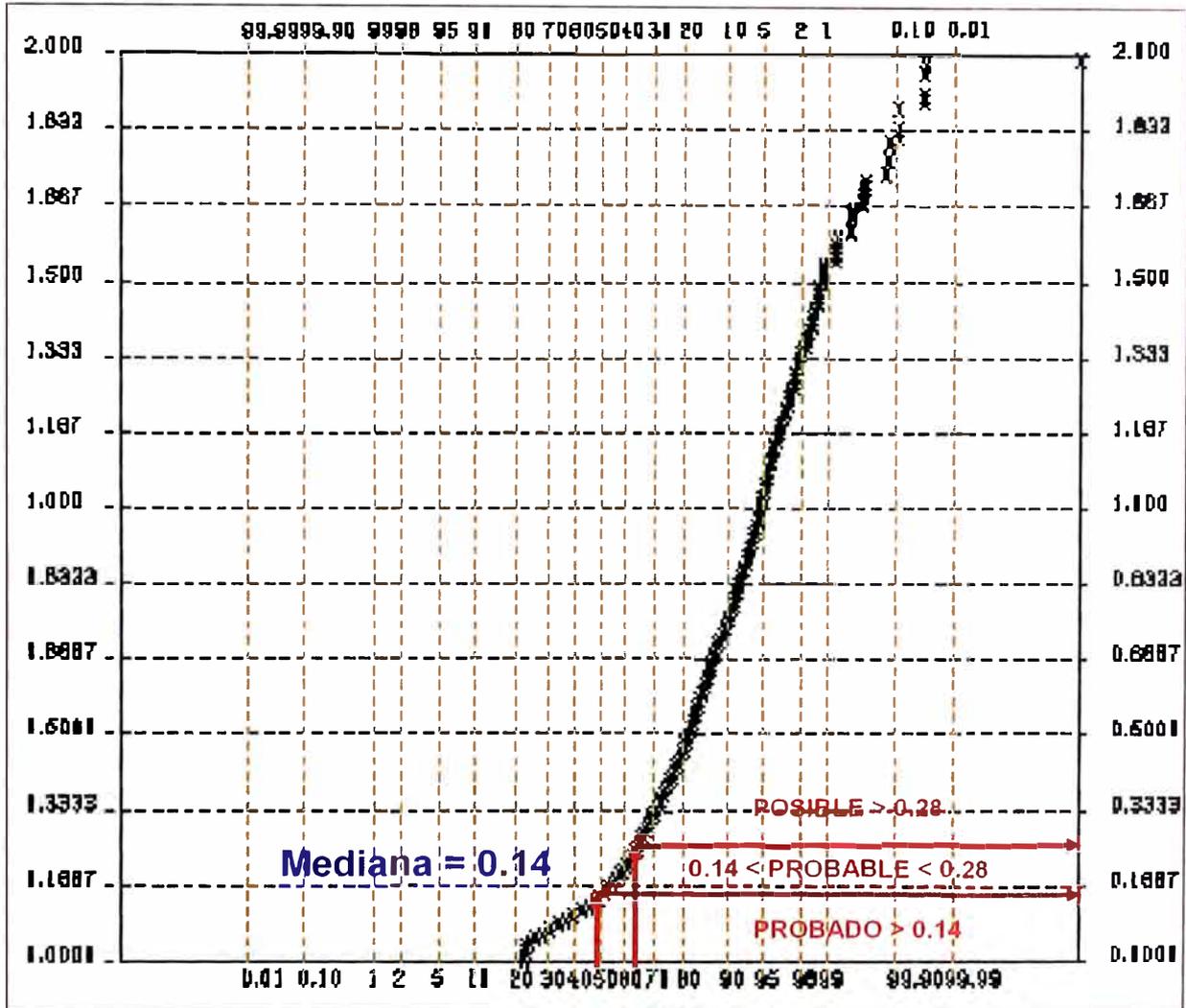


Figura 7.1-1: Curva de distribución de índice RCB al 2005.

En base a este criterio de definición de bloques obtenemos las siguientes categorías mostradas en la Tabla 7.1-2.

| CATEGORIA | INDICE RCB |
|-----------|-------------------|
| Probado | Menor que 0.14 |
| Probable | Entre 0.14 y 0.28 |
| Posible | Mayor que 0.28 |

Tabla 7.1-2: Confianza de bloques del modelo.

7.2 Reconciliación.

La Reconciliación es la comparación histórica de Tonelaje, Leyes y Contenido Fino estimado, entre el modelo de mina y Planta Concentradora. Esta comparación se realiza en un periodo de tiempo determinado, y se recomienda para lograr una prueba más eficaz, que esta se realice mensualmente para los últimos 5 años. De esta manera observaremos la diferencia que arroja el nuevo modelo antes de ponerlo en vigencia. Es de esperar, por la mayor cantidad de información disponible y retroalimentación adquirida, que un nuevo modelo de mina, tenga que ser más confiable que el anterior.

Con la reconciliación buscamos conocer y ajustar mediante el uso de factores, la planeación mensual, y anual de los siguientes años de la operación minera, y cumplir con los compromisos mensuales asumidos de envío de contenido fino desde mina.

Para hacer la reconciliación se ha tomado en cuenta la información de los cortes topográficos mensuales y se ha ejecutado la corrida en el modelo de bloques 2005, luego se ha comparado con el tonelaje molido por Planta Concentradora en los últimos 4 años.

En la tabla 7.2-1 se muestra un sumario anual cada 12 meses de los últimos 4 años.

RESUMEN RECONCILIACION DE LARGO PLAZO VS. CONCENTRADORA

| CORTE | Modelo 2005 (2) | | | | | | | | | Producción Concentradora (3) | | | | | | | | | Diferencias (2) - (3) | | | | | | | | |
|----------|-----------------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------------------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-----------------------|----|-----|-------|----|-------|-------|-----|-----|
| | TM | Cu | Mo | Ox Cu | Fe | PyCpy | CuBCN | IS | RHI | TM | Cu | Mo | Ox Cu | Fe | PyCpy | CuBCN | IS | RHI | TM | Cu | Mo | Ox Cu | Fe | PyCpy | CuBCN | IS | RHI |
| 2002 | 18.087.852 | 0.72 | 0.033 | 0.018 | 3.13 | 3.10 | 0.107 | 17.2 | 14.6 | 17.595.323 | 0.79 | 0.035 | 0.027 | 2.91 | 2.48 | 0.114 | 17.9 | 14.6 | 3 | -8 | -5 | -33 | 7 | 26 | -6 | -4 | -1 |
| 2003 | 20.920.584 | 0.73 | 0.031 | 0.019 | 3.39 | 3.65 | 0.115 | 18.3 | 14.7 | 21.208.195 | 0.75 | 0.029 | 0.025 | 3.15 | 2.82 | 0.089 | 15.2 | 14.5 | -1 | -3 | 6 | -27 | 7 | 29 | 30 | 20 | 1 |
| 2004 | 20.897.985 | 0.79 | 0.040 | 0.019 | 3.81 | 3.76 | 0.085 | 13.5 | 13.6 | 21.824.624 | 0.82 | 0.044 | 0.025 | 3.85 | 3.21 | 0.081 | 13.1 | 12.8 | -4 | -3 | -11 | -25 | -1 | 17 | 5 | 3 | 0 |
| 2005 | 21.260.869 | 0.83 | 0.034 | 0.018 | 3.49 | 3.02 | 0.117 | 16.4 | 14.2 | 21.224.484 | 0.81 | 0.039 | 0.030 | 3.29 | 3.00 | 0.128 | 19.2 | 13.7 | 0 | 2 | -12 | -40 | 6 | 1 | -8 | -15 | 4 |
| Feb'2006 | 3.413.522 | 0.78 | 0.046 | 0.015 | 2.86 | 2.26 | 0.101 | 14.2 | 14.8 | 3.336.511 | 0.70 | 0.048 | 0.024 | 2.85 | 2.95 | 0.103 | 17.8 | 14.7 | 2 | 9 | -5 | -35 | 0 | -23 | -2 | -20 | 0 |
| PROM | 84.589.812 | 0.77 | 0.035 | 0.018 | 3.44 | 3.34 | 0.106 | 16.2 | 14.3 | 85.189.137 | 0.79 | 0.037 | 0.027 | 3.30 | 2.90 | 0.102 | 16.3 | 13.9 | -1 | -2 | -5 | -31 | 5 | 16 | 5 | 1 | 3 |

Tabla 7.2-1: Reconciliación de mineral del Modelo vs Producción Concentradora (2002 - 2005).

CONCLUSIONES.

1. El modelo de la mina Toquepala nos permite comprender la distribución espacial de los materiales (Mineral, Lixiviable y Desmonte). Los ingenieros de planeamiento hacen uso de el para establecer un adecuado diseño de minado en el corto y largo plazo.
2. Durante la explotación del cuerpo mineral, un buen modelo de largo plazo debe predecir las condiciones mineralógicas del mineral que se enviara a planta Concentradora y cuanto afectará en su recuperación.
3. Los taladros exploratorios más profundos en la mina, han reconocido la continuidad del yeso dentro de los cuerpos de brecha, dacita y diorita. También los datos de profundidad, nos indican un ligero incremento en la dureza y peso específico del mineral.

RECOMENDACIONES.

1. El Modelo de Mina debe ser consistente y antes que entre en vigencia, es necesario someterle a la prueba de Reconciliación, con los cortes históricos de años anteriores. Se recomienda que la reconciliación se haga periódicamente, para mineral, lixiviable y desmonte. Los ítems a reconciliar deben ser principalmente TM, Cu, Mo, RHI.
2. Los taladros hechos a profundidad, que son aún insuficientes para el reconocimiento total de la brecha pipe, nos ha permitido moldear su forma cilíndrica. Se observa que su continuidad persiste, es decir la mineralización a profundidad esta aún abierta y se desconoce el fondo del mineral. De todas maneras se recomienda explorar con taladros de longitudes mayores a los 1000 metros, ya que algunos de los taladros más profundos han dado buenas leyes de molibdeno en profundidad. De ser así, se debería pensar en desarrollar una minería subterránea tal como se practica en otros tajos más profundos.

BIBLIOGRAFIA:

ALAN, Clark 1990. **Las Brechas de Colapso (Slump Breccia) en el Pórfido de Cobre (Molibdeno) de Toquepala, Perú: Implicaciones de los Fragmentos Redondeados en las Brechas Hidrotermales.** Economic Geology.

ALFARO, Marco A. 2002. **Introducción al Muestreo Minero.** IIMCh, Santiago.

BIBLIOGRAFIA:

ALAN, Clark 1990. **Las Brechas de Colapso (Slump Breccia) en el Pórfido de Cobre (Molibdeno) de Toquepala, Perú: Implicaciones de los Fragmentos Redondeados en las Brechas Hidrotermales.** Economic Geology.

ALFARO, Marco A. 2002. **Introducción al Muestreo Minero.** IIMCh, Santiago.

ANNELS, Alwyn E. 1991. **Mineral Deposit Evaluation: A practical approach.** Chapman & Hall, London.

BELLIDO, Eleodoro 1979. **Geología del Cuadrángulo de Moquegua.** Serie A Boletín 15 Hoja 35-u INGEMMET, Lima.

BUSTILLO, M. y LOPEZ, Carlos. 2002. **Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras.** IIMCh, Santiago.

CHILES, Jean P. y DELFINER, Pierre. 2001. **Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty.** John Wiley Sons Inc, USA.

DAVID, Michel. 1977. **Geostatistical Ore Reserve Estimation.** Elsevier, New York.

DAVIS, John C. 1973. **Statistics and Data Analysis in Geology.** John Wiley & Sons Inc., USA.

GEOEAS 1991. **User's Guide.** GEOSTATISTICAL ENVIRONMENTAL ASSESSMENT SOFTWARE. Las Vegas.

HUSTRULID, William y KUCHTA Mark 1989. **Open Pit Mine Planning & Design.** Baklava Publishers, Netherlands.

JOURNEL, A. G. y HUIJBREGTS Ch. J. 1989. **Mining Geostatistics.** Academic Press, London.

KREITER, M. 1978. **Investigación y Prospección Geológica.** Paraninfo, Madrid.

LOPEZ, Carlos. 2004. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas.** Instituto Tecnológico Geo-Minero de España, Madrid.

NUÑEZ, Walter. 1987. **Sinopsis del Oro.** Trabajo monográfico UNI, Lima.

NUÑEZ, Walter. 1998. **Modelamiento y Cubicación de Vetas empleando Vulcan.** INFOMINA 1998, Lima.

NUÑEZ, Walter. 1998. **Bondades del Software Minero Vulcan.** 2do. Seminario Geológico Minero "Ing. Rafael Navarro Grau". Trabajo inédito presentado a Consorcio Minero Horizonte, Pataz.

NUÑEZ, Walter. 1999. **Modelación Tridimensional Computarizada de Vetas en Cia. Minera Poderosa S. A.** 24va. Convención de Ingenieros de Minas del Perú. Arequipa.

NUÑEZ, Walter. 2006. **Reconciliación como Validación del Modelo de Mina.** Infomina 2006, Lima.

ORCHE, Enrique. 1999. **Manual de Evaluación de Yacimientos Minerales.** Madrid.

PARK, Charles F. y MACDIARMID, Roy A. 1982. **Yacimientos Minerales.** Ed. Omega, Barcelona.

READDY, L. y BOLIN, D. y MATHIESON G. 1982. **Ore Reserve Calculation.** The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Port City Press, Baltimore, Maryland.

SMIRNOV, V. I. 1982. **Geología de Yacimientos Minerales.** Ed. MIR, Moscú.

TAPP, C. 1982. **Sampling, Dilution and Recovery.** The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Port City Press, Baltimore, Maryland.

TITLEY, Spencer R. y HICKS, Carol L. 1966. **Geology of the Porphyry Copper Deposits. Southwestern North America.** The University of Arizona Press, Tucson.

TOSDAL, R., CHAVEZ, W. y CLARK A. 1977. **Overview of the Geologic Setting and Porphyry Cu-Mo Deposits of Southern Peru.** 3rd. International Congress of Prospectors and Explorers. Lima.

TULCANAZA, Edmundo. 1992. **Técnicas Geoestadísticas y Criterios Técnico-Económicos para la Estimación y Evaluación de Yacimientos Mineros.** Estudios Mineros, Santiago.

VEGA, L. y MURILLO, J. 1989. **Perforación y Voladura para Operaciones Mineras.** Comibol, La Paz.

ZWENG, P. y CLARK, A. 1977. **Hypogene Evolution of the Toquepala Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Moquegua Southeastern Peru**. Consulting Economic Geologist. California.

APENDICE A: Clasificación de Recursos y Reservas USBM/USGS

En 1988, a solicitud de los miembros de la Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME), el presidente de SME formó el *Grupo de Trabajo N° 79: Definición de Reservas Minerales* con la misión de preparar guías para la elaboración de informes públicos sobre exploración, recursos y reservas minerales.

El Grupo de Trabajo nombró un subcomité para que se encargue de hacer un esbozo de estas guías y de las recomendaciones a SME. En esta guía se resume las recomendaciones hechas por dicho subcomité.

El subcomité recomienda el uso de determinados términos y sus definiciones, en los informes públicos de exploración, recursos y reservas minerales. Donde sea posible, deberán usarse los términos recomendados y sus definiciones adoptadas por el US Bureau of Mines (USBM) y el US Geological Survey (USGS). Sin embargo se introdujeron algunas modificaciones para tener en cuenta las necesidades de la industria, la práctica internacional (Anon., 1988; Anon., 1990) y las guías normativas (US SEC). En particular, el subcomité recomienda que (1) los recursos deben ser identificados como medidos, indicados o inferidos y (2) que las reservas deben serlo como probadas o probables.

TERMINOLOGIA EMPLEADA EN LOS INFORMES

Existe una relación secuencial entre la información de exploración, recursos y reservas, la misma que se presenta en la figura 1.

Conforme aumenta el conocimiento geológico, es posible que la información de la exploración llegue a ser la suficiente como para calcular un recurso. Conforme aumenta la información económica, es posible que parte del total de un recurso se convierta en una reserva. Las flechas de doble sentido entre reservas y recursos que se incluyen en la figura 1, indican que los cambios en algunos factores podrían hacer que el material se desplace de una categoría a otra.

Recurso Mineral

Se denomina así a una concentración de material sólido, líquido o gaseoso que ocurre naturalmente en o sobre la corteza terrestre, en forma y cantidad tales, que la extracción

económica de un producto a partir de la concentración sea actual o potencialmente factible. La ubicación, ley, calidad y cantidad se conocen o estiman a partir de evidencias geológicas específicas. Con el propósito de reflejar los diversos grados de certeza geológica, los recursos minerales pueden dividirse en "medidos", "indicados" e "inferidos".

Medidos. La cantidad se calcula a partir de dimensiones reveladas en los afloramientos, trincheras, labores o perforaciones; la ley y la calidad se calculan a partir del resultado de los muestreos detallados. El tamaño, forma, profundidad y contenido mineral del recurso están bien establecidos, debido a que los lugares en los que se ha hecho la inspección, el muestreo y las medidas están espaciados tan estrechamente, que el carácter geológico del recurso está muy bien definido.

Indicados. La cantidad, ley y calidad se calculan a partir de información similar a la usada para los recursos medidos, pero los lugares para la inspección, muestreo y medición están muy alejados o no adecuadamente espaciados. El grado de certeza, a pesar de ser menor que en el caso de los recursos medidos, es lo suficientemente alto como para asumir que existe continuidad geológica entre los puntos de observación.

Inferidos. Los cálculos se basan en evidencias geológicas y en una continuidad asumida, en la cual existe menos confiabilidad que para el caso de los recursos medidos o indicados. Los recursos inferidos pueden estar o no respaldados por muestras representativas o mediciones, pero la influencia debe estar respaldada por datos geocientíficos (geológicos, geoquímicos, geofísicos u otros) razonablemente confiables.

Recurso Mineral

Reserva. Es aquella parte del recurso que cumple con criterios físicos y químicos mínimos relacionados con prácticas específicas de minería y de producción, incluyendo las de ley, calidad, espesor y profundidad. Se puede asumir de manera racional que es posible extraerla económica y legalmente en el momento de la determinación. La factibilidad de las prácticas mineras y de producción específicas debe haber sido demostrada o puede asumirse de manera racional sobre la base de pruebas y mediciones. El término "reservas" no implica necesariamente que las instalaciones de extracción estén en el lugar apropiado ni que estén operativas.

El término *económico* implica que se ha podido establecer o demostrar analíticamente que es posible una extracción o producción rentable, bajo hipótesis definidas de inversión. Las hipótesis deberán ser razonables, incluyendo los supuestos relacionados con los precios y costos que prevalecerán durante la vida del proyecto.

El término *legalmente* no implica que se haya obtenido los permisos necesarios para el minado y el procesamiento de los minerales o que estén totalmente resueltos otros asuntos legales. Sin embargo, para que exista una reserva, no debería haber incertidumbre en lo que respecta a la concesión de estos permisos o a la resolución de asuntos legales que estuvieran pendientes.

La relación existente entre reservas y recursos es la siguiente:

Reserva probada. Aquella parte de un recurso medido que satisface las condiciones para clasificarse como reserva.

Reserva probable. Aquella parte de un recurso indicado que satisface las condiciones para clasificarse como una reserva.

Deberá establecerse si el estimado de reservas es del material existente en el lugar o del material recuperable. Todo cálculo del material existente en el lugar deberá ser calificado para mostrar las pérdidas previstas que pudieran resultar de la aplicación de determinados métodos de minado o de procesamiento.

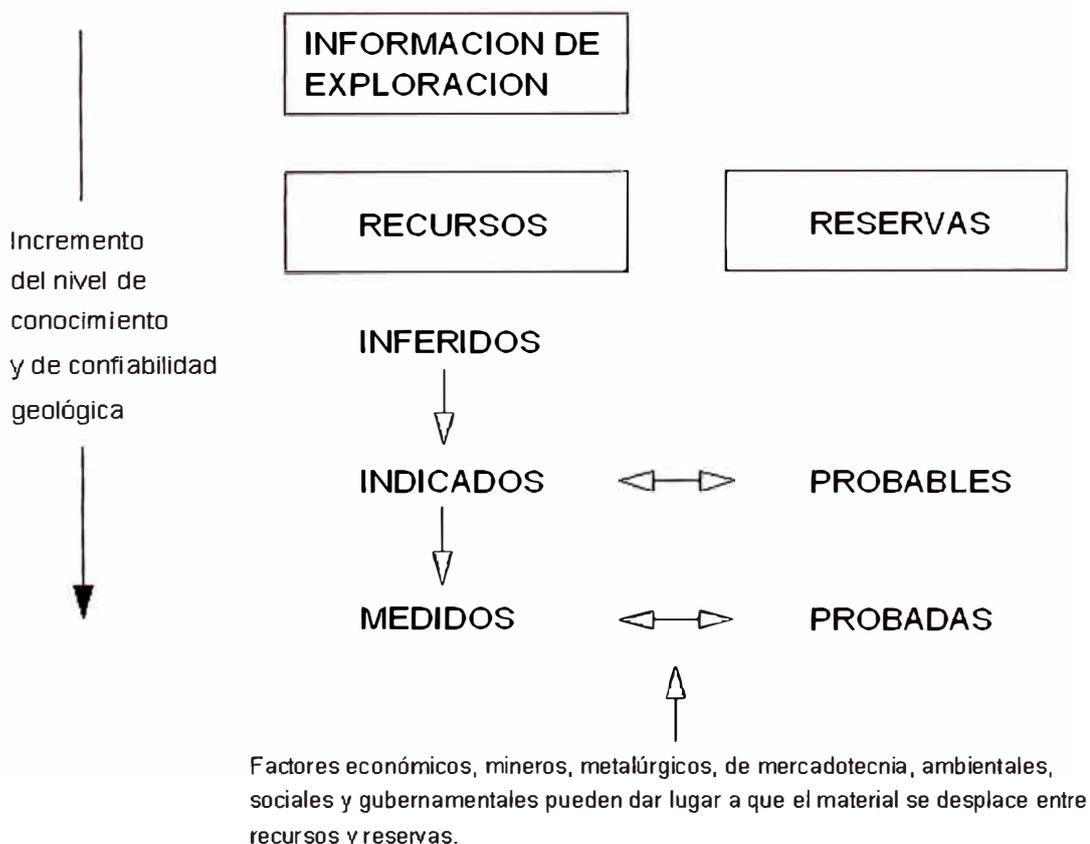


Fig. 1: Terminología empleada en los informes y relación entre la información de exploración, de recursos y de reservas minerales.

APENDICE B: Abreviaturas para los Minerales.

| Nombre (Especie) | Abreviatura | Composición |
|------------------|-------------|--|
| Anhidrita | anh | CaSO ₄ |
| Azurita | az | Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂ |
| Biotita | bt | K(Mg, Fe) ₃ Al(OH) ₂ Si ₃ O ₁₀ |
| Bornita | bn | Cu ₅ FeS ₄ |
| Calcantita | cct | CuSO ₄ .5H ₂ O |
| Calcita | ca | CaSO ₄ |
| Calcopirita | cpy | CuFeS ₂ |
| Calcosita | cc | Cu ₂ S |
| Caolinita | ko | Mineral de la arcilla |
| Cobre nativo | cu | Cu |
| Covelita | cv | CuS |
| Crisocola | crc | CuSiO ₃ .2H ₂ O |
| Cuarzo | cz | SiO ₂ |
| Cuprita | cup | Cu ₂ O |
| Enargita | en | Cu ₃ AsS ₄ |
| Esfalerita | ef | ZnS |
| Galena | gn | PbS |
| Goethita | goe | FeO(OH) |
| Hematita | hm | Fe ₂ O ₃ |
| Jarosita | jar | KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂ |
| Magnetita | mgt | Fe ₃ O ₄ |
| Malaquita | mlq | Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃ |
| Molibdenita | mo | MoS |
| Pirita | py | FeS ₂ |
| Sericita | ser | Moscovita de grano fino |
| Tenorita | ten | CuO |
| Tetraedrita | tt | (Cu, Fe, Zn, Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ |
| Turmalina | tur | WX ₃ B ₃ Al ₃ .(O, OH, F) ₄ (AlSi ₂ O ₉) ₃ |
| Turquesa | tuq | CuAl ₆ (OH) ₈ .4H ₂ O(PO ₄) ₄ |
| Yeso | ys | CaSO ₄ .2H ₂ O |

APENDICE C: Ilustraciones.

Figuras:

Fig. 1.1-1: Ubicación de la mina Toquepala.

Fig. 1.1-2: Instalaciones de la mina Toquepala.

Fig. 2.1-1: Columna estratigráfica regional.

Fig. 2.2-1: Plano geológico superficial local.

Fig. 2.2-2: Columna estratigráfica local.

Fig. 2.4-1: Evolución 1.

Fig. 2.4-2: Evolución 2.

Fig. 2.4-3: Evolución 3.

Fig. 2.4-4: Evolución 4.

Fig. 2.4-5: Evolución 5.

Fig. 2.4-6: Evolución 6.

Fig. 2.4-7: Evolución 7.

Fig. 2.4-8: Evolución 8.

Fig. 3.1-1: Sección vertical del modelo de alteración del pórfido de cobre (Toquepala).

Fig. 3.1-2: Plano superficial de alteraciones de Toquepala.

Fig. 3.1-3: Modelo ideal para representar la alteración hidrotermal del pórfido de cobre.

Fig. 3.2-1: Plano de mineralización (Toquepala).

Fig. 3.3-1: Sección vertical P del cuerpo cóncavo de yeso.

Fig. 3.5-1: Tectónica de Placas: Zona de subducción y magmatismo calco-alcalino.

Fig. 3.5-2: Secuencia Paragenética de la formación de Toquepala.

Fig. 4.1-1: Logueo geológico de testigos diamantinos.

Fig. 5.1-1: Bloque unitario del modelo de bloques.

Fig. 5.1-2: Diagrama de flujo para la creación del modelo de mina.

Fig. 5.2-1: Topografía y ubicación de taladros exploratorios.

Fig. 5.3-1: Sección vertical "P" (Roca).

Fig. 5.3-2: Sección vertical "P" (Alteración).

Fig. 5.3-1: Visualización tridimensional del Modelo de Roca.

Fig. 5.3-2: Visualización tridimensional del Modelo del Yeso.

Fig. 5.3-3: Visualización tridimensional del Modelo de Mineralización.

Fig. 5.3-4: Visualización tridimensional del Modelo de Alteración.

Fig. 5.3-5: Visualización tridimensional del Modelo Geometalúrgico.

Fig. 5.4-1: Superficie topográfica actual visto en 3D.

Fig. 5.4-2: Cálculo porcentual de bloque insitu.

Fig. 6.3-1: Parámetros de variogramas multidireccionales en Minesight.

Fig. 6.3-2: Angulos horizontales y verticales de variogramas.

Fig. 6.4-1: Histograma de Cu.

Fig. 6.4-2: Curva acumulativa de probabilidad de Cu por tipo de roca.

Fig. 6.4-3: Histograma de Mo.

Fig. 6.4-4: Curva acumulativa de probabilidad de Mo por tipo de roca.

Fig. 7.1-1: Curva de distribución de índice RCB.

Tablas:

Tabla 3.4-1: Mineralogía de Toquepala.

Tabla 4.1-1: Abreviaturas para intensidades de alteración.

Tabla 4.1-2: Abreviaturas para intensidades de mineralización.

Tabla 5.1-1: Dimensiones del modelo tridimensional de bloques.

Tabla 5.1-2: Ítems para la inicialización del modelo de bloques.

Tabla 5.2-2: Ítems de la base de datos de taladros.

Tabla 5.3-1: Número de secciones geológicas interpretadas.

Tabla 5.3-2: Codificación de Roca.

Tabla 5.3-3: Codificación del Yeso.

Tabla 5.3-4: Codificación de Mineralización.

Tabla 5.3-5: Codificación de Alteración.

Tabla 5.3-6: Matriz geológica de Dureza.

Tabla 5.3-7: Codificación de Dureza.

Tabla 5.3-8: Definición de las Zonas Geometalúrgicas.

Tabla 6.4-1: Leyes interpoladas en el modelo de bloques.

Tabla 6.4-2: Agrupamiento lógico para cobre y molibdeno.

Tabla 6.4-3: Estadística de los compósitos de cobre.

Tabla 6.4-4: Parámetros geoestadísticos para el cobre.

Tabla 6.4-5: Estadística de los compósitos de molibdeno.

Tabla 6.4-6: Parámetros geoestadísticos para el molibdeno.

Tabla 6.4-7: Estadística de los compósitos de Peso Específico.

Tabla 6.4-8: Peso específico de cada tipo de roca.

Tabla 7.1-1: Definición de mineral Probado, Probable y Posible.

Tabla 7.1-2: Confidencia de bloques del modelo

Tabla 7.2-1: Reconciliación de mineral de 4 años.

Foto:

Foto 4.4-1 Conos de detritos de perforación primaria (blastholes).