



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ESTRUCTURAL DE LA RAMPA DE
EXPLORACIÓN Y DEL TÚNEL DE DRENAJE, MINA CHUQUICAMATA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JUAN CARLOS MARIO AGUILAR AGUILERA

PROFESOR GUÍA:
SR. SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SRA. SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
SR. RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO, 2008

RESUMEN

Entre los años 2003 y 2005 se realizó la excavación de aproximadamente 6.200 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración y al Túnel de Drenaje de la mina Chuquicamata. Se entrega en este trabajo la caracterización geotécnica-estructural y la definición de soporte de estos desarrollos subterráneos, ubicados en el área de influencia de los esfuerzos activos inducidos por la minería a rajo abierto. Sobre la base del levantamiento geotécnico de las labores subterráneas, aplicando el sistema de clasificación geotécnica mediante el índice Q de Barton (1974), se establecen en forma empírica los requerimientos de fortificación adecuada y suficiente para la estabilidad de los túneles.

Las excavaciones subterráneas que se extienden en una franja Nor-Nor-Este de 2.400 m de largo por 600 m de ancho, se realizaron principalmente en el pórfido granodiorítico denominado Pórfido Este, huésped de la mineralización de cobre y molibdeno del yacimiento Chuquicamata. Subordinadamente también se excavaron rocas intrusivas estériles como las granodioritas Fortuna y Elena y una unidad de sedimentos mesozoicos afectadas por metamorfismo dinámico y de contacto. En el Pórfido Este se pueden distinguir unidades de alteración en franjas subverticales orientadas en dirección Nor-Este con predominio de clorita, feldespatos potásicos, sericita y de la asociación cuarzo-sericita.

Las unidades litológicas y de alteración presentan características geotécnicas homogéneas (unidades geotécnicas) que han sido reconocidas en los desarrollos subterráneos. De igual manera, se distinguen áreas con patrones estructurales propios, en función de la influencia de las fallas principales del yacimiento, y de la condición de las familias de fallas y diaclasas (Dominios Estructurales).

La calidad geotécnica del macizo rocoso en los túneles varía predominantemente de Buena a Regular con índice Q de Barton entre 2 y 30, RQD entre 60% y 90%, con una resistencia de la roca estimada entre 50 MPa y 120 MPa. Para estas condiciones, se determinó fortificar los desarrollos con pernos sistemáticos y malla tejida tanto en la bóveda como en la parte superior de las paredes. Para esta calidad de roca, solo puntualmente se requirió de la proyección de shotcrete en zonas con fracturamiento intenso y humedad.

Aproximadamente el 3% de los desarrollos se realizaron en roca de Mala y Muy Mala calidad geotécnica asociada principalmente a zona de influencia de fallas importantes del yacimiento como las fallas Oeste y Americana, con Índice Q de Barton entre 0,06 y 0,8, RQD de 30% a 65% y una resistencia de la roca estimada entre 1 MPa y 80 MPa. Para los tramos de Mala calidad geotécnica se determinó un sostenimiento consistente en pernos sistemáticos, malla tejida y shotcrete con espesores de 10 cm a 15 cm, en tanto que para la zona de Muy Mala calidad geotécnica se determinó la instalación de marcos metálicos.

Transcurridos entre 3 y 5 años desde la ejecución de estos desarrollos, se mantienen buenas condiciones de estabilidad, observándose solo puntualmente oxidación de los componentes metálicos de la fortificación, en zonas con afloramientos de aguas ácidas.

A la memoria de Juan Miguel y Myrta del Carmen

AGRADECIMIENTOS

Sr. Claudio Suárez, que propuso el tema a la Dirección de Geotecnia de Codelco Norte, orientó el desarrollo del trabajo y realizó las primeras correcciones. Al Sr. Danko Zaro, geólogo de la Dirección de Geotecnia de la División Codelco Norte, por su gestión en la autorización final por parte de la división. A los geólogos: Rodrigo Araya, Jorge Collado, Silvino Córdova, Cristian Guajardo, Ramiro Herrera, Cristian Rayo, Armando Siña, Claudio Suarez y Danko Zaro, por sus comentarios en el desarrollo del tema. Al Sr. Eduardo Graz, ingeniero administrador de contratos de Cimm T&S, por las facilidades dadas para la preparación de este informe. A los Srs. Jorge Nuñez y Juan Pablo Muños, asistentes de geólogo que participaron en el levantamiento geotécnico de túneles. Al Sr. Hugo Bugeño, asistente de geólogo, por su apoyo en la confección de los planos que se adjuntan a este informe. Al Sr. Sergio Sepúlveda, profesor guía, geólogo y académico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por sus recomendaciones y consejos en el desarrollo del presente informe. A la Sra. Sofía Rebolledo y al Sr. Ricardo Moffat, miembros de la comisión y académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, por sus alcances y recomendaciones en la etapa final del presente estudio. A la Sra. María Rosa Roco, secretaria docente del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por su buena disposición en la coordinación de las etapas curriculares necesarias para la presentación de este trabajo de título.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
I INTRODUCCIÓN	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Método de Trabajo	7
1.4 Ubicación y Accesos	7
1.5 Clima, Fisiografía e Hidrografía	9
II MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL	10
2.1 Generalidades	10
2.2 Litología	10
2.3 Estructuras	15
III GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	18
3.1 Generalidades	18
3.2 Litología	18
3.3 Estructuras	22
3.4 Alteración y Mineralización Hipógena	26
3.5 Zonas Supérgenas	29
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	30
4.1 Introducción	30
4.2 Unidades Geotécnicas	30
4.3 Dominios Estructurales	37
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	48
5.1 Introducción	48
5.2 Rampa de Exploración	50
5.3 Túnel de Drenaje	53
5.4 Cruzado Geotécnico N° 1	58
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	62
6.1 Introducción	62
6.2 Dominio Estructural Nor-Oeste	62
6.3 Dominio Estructural Balmaceda	64
6.4 Dominio Estructural Estanques Blancos	66
6.5 Dominio Estructural Americana	67
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	70
7.1 Rampa de Exploración	70
7.2 Túnel de Drenaje	74
7.3 Cruzado Geotécnico N° 1	77
7.4 Requerimientos de Fortificación	82
VIII DISCUSIÓN	85
IX CONCLUSIONES	88
X REFERENCIAS	91
ANEXOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
I INTRODUCCIÓN	
Figura 1.1 Vista general Mina Chuquicamata	4
Figura 1.2 Ubicación de los túneles de Exploración y drenaje	6
Figura 1.3 Ubicación y accesos a Mina Chuquicamata	8
II MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL	
Figura 2.1 Geología distrital de Chuquicamata	11
Figura 2.2 Mapa del sistema Falla Domeyko	16
III GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Figura 3.1 Unidades Litológicas de la Mina Chuquicamata	20
Figura 3.2 Fallas principales de la Mina Chuquicamata	25
Figura 3.3 Perfil de las unidades de alteración y mineralización de Chuquicamata	26
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Figura 4.1 Modelo de bloques de la unidades geotécnicas de Chuquicamata	31
Figura 4.2 Modelo conceptual de falla	38
Figura 4.3 Distribución tridimensional de los dominios estructurales	39
Figura 4.4 Red estereográfica del Dominio Estructural Fortuna Norte	40
Figura 4.5 Red estereográfica del Dominio Estructural Fortuna Sur	41
Figura 4.6 Red estereográfica del Dominio Estructural Americana	42
Figura 4.7 Red estereográfica del Dominio Estructural Balmaceda	43
Figura 4.8 Red estereográfica del Dominio Estructural Estanques Blancos	44
Figura 4.9 Red estereográfica del Dominio Estructural Nor-Oeste	45
Figura 4.10 Red estereográfica del Dominio Estructural Mesabi	46
Figura 4.11 Red estereográfica del Dominio Estructural Zaragoza	47
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	
Figura 5.1 Unidades geotécnicas en los túneles de exploración y drenaje	49
Figura 5.2 Red estereográfica de fallas y foliación en metasedimentos	55
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	
Figura 6.1 Red estereográfica del Dominio Estructural Nor-Oeste en los túneles	63
Figura 6.2 Red estereográfica del Dominio Estructural Balmaceda en los túneles	65
Figura 6.3 Red estereográfica del Dominio Est. Estanques Blancos en los túneles	66
Figura 6.4 Red estereográfica del Dominio Estructural Americana en los túneles	68
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	
Figura 7.1 Definición de fortificación de la Rampa de Exploración	72
Figura 7.2 Definición de fortificación del Túnel de Drenaje	76
Figura 7.3 Definición de fortificación Cruzado Geotécnico N° 1	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Tabla 4.1	Categorización de fallas y diaclasas en la mina Chuquicamata 38
Tabla 4.2	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Fortuna Norte 40
Tabla 4.3	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Fortuna Sur 41
Tabla 4.4	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Americana 42
Tabla 4.5	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Balmaceda 43
Tabla 4.6	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estruct. Estanques Blancos 44
Tabla 4.7	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Nor-Oeste 45
Tabla 4.8	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Mesabi 46
Tabla 4.9	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Zaragoza 47
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	
Tabla 5.1	Calidades geotécnicas de acuerdo al índice NGI-Q 48
Tabla 5.2	Calidades geotécnicas en la Rampa Exploración 50
Tabla 5.3	Calidades geot. en Pórfido Este Clorítico en la Rampa de Exploración 51
Tabla 5.4	Calidades geot. en Pórfido Este Potásico en la Rampa de Exploración 53
Tabla 5.5	Calidades geotécnicas en Metasedimentos, Túnel de Drenaje 54
Tabla 5.6	Calidades geot. en Pórfido Este Clorítico en el Túnel de Drenaje 55
Tabla 5.7	Resumen calidades geot. en P. E. Clorítico en el Túnel de Drenaje 56
Tabla 5.8	Calidades geot. en Pórfido Este Potásico en el Túnel de Drenaje 57
Tabla 5.9	Resumen calidades geot. en P. E. Potásico en el Túnel de Drenaje 58
Tabla 5.10	Calidades geotécnicas en el Cruzado Geotécnico N° 1 58
Tabla 5.11	Distribución de las Subunidades de RQS en el Cruzado Geotécnico N° 1 60
Tabla 5.12	Calidades geotécnicas en el Desvío XC-1 del Cruzado Geotécnico N° 1 61
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	
Tabla 6.1	Distribución de fallas en el D. E. Nor-Oeste de los túneles 63
Tabla 6.2	Distribución de fallas en el D. E. Balmaceda de los túneles 65
Tabla 6.3	Distribución de fallas en el D. E. Estanques Blancos de los túneles 67
Tabla 6.4	Distribución de fallas en el D. E. Americana de los túneles 68
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	
Tabla 7.1	Parámetros geotécnicos en la Rampa de Exploración 71
Tabla 7.2	Fortificación de la Rampa Exploración 73
Tabla 7.3	Parámetros geotécnicos en el Túnel de Drenaje 74
Tabla 7.4	Fortificación del Túnel de Drenaje 77
Tabla 7.5	Parámetros geotécnicos en el Cruzado Geotécnico N° 1 78
Tabla 7.6	Fortificación del Cruzado Geotécnico N° 1 81
Tabla 7.7	Requerimientos geotécnicos para los túneles de Mina Chuquicamata 83

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
POR: Juan Carlos Mario Aguilar Aguilera
FECHA: 23/10/2008
PROF. GUIA: Sr. Sergio Sepúlveda Valenzuela

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ESTRUCTURAL DE LA RAMPA DE EXPLORACIÓN Y DEL TÚNEL DE DRENAJE, MINA CHUQUICAMATA

Entre los años 2003 y 2005 se realizó la excavación de aproximadamente 6.200 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración y al Túnel de Drenaje de la mina Chuquicamata. Se entrega en este trabajo la caracterización geotécnica-estructural y la definición de soporte de estos desarrollos subterráneos, ubicados en el área de influencia de los esfuerzos activos inducidos por la minería a rajo abierto, mediante la aplicación del índice Q de Barton (1974).

Las excavaciones subterráneas que se extienden en una franja nor-noreste de 2.400 m de largo por 600 m de ancho, se realizaron principalmente en el pórfido granodiorítico denominado Pórfido Este, huésped de la mineralización de cobre y molibdeno del yacimiento Chuquicamata. Subordinadamente se excavaron rocas intrusivas estériles como las granodioritas Fortuna y Elena y una unidad de sedimentos mesozoicos afectados por metamorfismo dinámico y de contacto. En el Pórfido Este se pueden distinguir unidades de alteración en franjas subverticales orientadas en dirección noreste con predominio de clorita, feldespatos potásico, sericita y de la asociación cuarzo-sericita.

La calidad geotécnica del macizo rocoso en los túneles varía predominantemente de Buena a Regular, con índice Q de Barton entre 2 y 30, RQD entre 60% y 90%, con una resistencia de la roca intacta estimada entre 50 MPa y 120 MPa. Para estas condiciones, se determinó fortificar los desarrollos con pernos sistemáticos y malla tejida tanto en la bóveda como en la parte superior de las paredes. Para esta calidad de roca, solo puntualmente se requirió de la proyección de shotcrete en zonas con fracturamiento intenso y humedad.

Aproximadamente el 3% de los desarrollos se realizaron en roca de Mala y Muy Mala calidad geotécnica asociada principalmente a zona de influencia de fallas importantes del yacimiento como las fallas Oeste y Americana, con Índice Q de Barton entre 0,06 y 0,8, RQD de 30% a 65% y una resistencia de la roca intacta estimada entre 1 MPa y 80 MPa. Para los tramos de Mala calidad geotécnica se determinó un sostenimiento consistente en pernos sistemáticos, malla tejida y shotcrete con espesores de 10 cm a 15 cm, en tanto que para la zona de Muy Mala calidad geotécnica se determinó la instalación de marcos metálicos.

Transcurridos entre 3 y 5 años desde la ejecución de estos desarrollos, se mantienen buenas condiciones de estabilidad, observándose solo puntualmente oxidación de los componentes metálicos de la fortificación, en zonas con afloramientos de aguas ácidas.

A la memoria de Juan Miguel y Myrta del Carmen

AGRADECIMIENTOS

Sr. Claudio Suárez, que propuso el tema a la Dirección de Geotecnia de Codelco Norte, orientó el desarrollo del trabajo y realizó las primeras correcciones. Al Sr. Danko Zaro, geólogo de la Dirección de Geotecnia de la División Codelco Norte, por su gestión en la autorización final por parte de la división. A los geólogos: Rodrigo Araya, Jorge Collado, Silvino Córdova, Cristian Guajardo, Ramiro Herrera, Cristian Rayo, Armando Siña, Claudio Suarez y Danko Zaro, por sus comentarios en el desarrollo del tema. Al Sr. Eduardo Graz, ingeniero administrador de contratos de Cimm T&S, por las facilidades dadas para la preparación de este informe. A los Srs. Jorge Nuñez y Juan Pablo Muños, asistentes de geólogo que participaron en el levantamiento geotécnico de túneles. Al Sr. Hugo Bugeño, asistente de geólogo, por su apoyo en la confección de los planos que se adjuntan a este informe. Al Sr. Sergio Sepúlveda, profesor guía, geólogo y académico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por sus recomendaciones y consejos en el desarrollo del presente informe. A la Sra. Sofía Rebolledo y al Sr. Ricardo Moffat, miembros de la comisión y académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, por sus alcances y recomendaciones en la etapa final del presente estudio. A la Sra. María Rosa Roco, secretaria docente del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por su buena disposición en la coordinación de las etapas curriculares necesarias para la presentación de este trabajo de título.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
I INTRODUCCIÓN	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Método de Trabajo	7
1.4 Ubicación y Accesos	7
1.5 Clima, Fisiografía e Hidrografía	9
II MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL	10
2.1 Generalidades	10
2.2 Litología	10
2.3 Estructuras	15
III GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	18
3.1 Generalidades	18
3.2 Litología	18
3.3 Estructuras	22
3.4 Alteración y Mineralización Hipógena	26
3.5 Zonas Supérgenas	29
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	30
4.1 Introducción	30
4.2 Unidades Geotécnicas	30
4.3 Dominios Estructurales	37
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	48
5.1 Introducción	48
5.2 Rampa de Exploración	50
5.3 Túnel de Drenaje	53
5.4 Cruzado Geotécnico N° 1	58
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	62
6.1 Introducción	62
6.2 Dominio Estructural Nor-Oeste	62
6.3 Dominio Estructural Balmaceda	64
6.4 Dominio Estructural Estanques Blancos	66
6.5 Dominio Estructural Americana	67
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	70
7.1 Rampa de Exploración	70
7.2 Túnel de Drenaje	74
7.3 Cruzado Geotécnico N° 1	77
7.4 Requerimientos de Fortificación	82
VIII DISCUSIÓN	85
IX CONCLUSIONES	88
X REFERENCIAS	91
ANEXOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
I INTRODUCCIÓN	
Figura 1.1 Vista general Mina Chuquicamata	4
Figura 1.2 Ubicación de los túneles de Exploración y drenaje	6
Figura 1.3 Ubicación y accesos a Mina Chuquicamata	8
II MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL	
Figura 2.1 Geología distrital de Chuquicamata	11
Figura 2.2 Mapa del sistema Falla Domeyko	16
III GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Figura 3.1 Unidades Litológicas de la Mina Chuquicamata	20
Figura 3.2 Fallas principales de la Mina Chuquicamata	25
Figura 3.3 Perfil de las unidades de alteración y mineralización de Chuquicamata	26
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Figura 4.1 Modelo de bloques de la unidades geotécnicas de Chuquicamata	31
Figura 4.2 Modelo conceptual de falla	38
Figura 4.3 Distribución tridimensional de los dominios estructurales	39
Figura 4.4 Red estereográfica del Dominio Estructural Fortuna Norte	40
Figura 4.5 Red estereográfica del Dominio Estructural Fortuna Sur	41
Figura 4.6 Red estereográfica del Dominio Estructural Americana	42
Figura 4.7 Red estereográfica del Dominio Estructural Balmaceda	43
Figura 4.8 Red estereográfica del Dominio Estructural Estanques Blancos	44
Figura 4.9 Red estereográfica del Dominio Estructural Nor-Oeste	45
Figura 4.10 Red estereográfica del Dominio Estructural Mesabi	46
Figura 4.11 Red estereográfica del Dominio Estructural Zaragoza	47
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	
Figura 5.1 Unidades geotécnicas en los túneles de exploración y drenaje	49
Figura 5.2 Red estereográfica de fallas y foliación en metasedimentos	55
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	
Figura 6.1 Red estereográfica del Dominio Estructural Nor-Oeste en los túneles	63
Figura 6.2 Red estereográfica del Dominio Estructural Balmaceda en los túneles	65
Figura 6.3 Red estereográfica del Dominio Est. Estanques Blancos en los túneles	66
Figura 6.4 Red estereográfica del Dominio Estructural Americana en los túneles	68
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	
Figura 7.1 Definición de fortificación de la Rampa de Exploración	72
Figura 7.2 Definición de fortificación del Túnel de Drenaje	76
Figura 7.3 Definición de fortificación Cruzado Geotécnico N° 1	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA	
Tabla 4.1	Categorización de fallas y diaclasas en la mina Chuquicamata 38
Tabla 4.2	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Fortuna Norte 40
Tabla 4.3	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Fortuna Sur 41
Tabla 4.4	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Americana 42
Tabla 4.5	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Balmaceda 43
Tabla 4.6	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estruct. Estanques Blancos 44
Tabla 4.7	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Nor-Oeste 45
Tabla 4.8	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Mesabi 46
Tabla 4.9	Distribución de fallas y diaclasas Dominio Estructural Zaragoza 47
V CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TÚNELES	
Tabla 5.1	Calidades geotécnicas de acuerdo al índice NGI-Q 48
Tabla 5.2	Calidades geotécnicas en la Rampa Exploración 50
Tabla 5.3	Calidades geot. en Pórfido Este Clorítico en la Rampa de Exploración 51
Tabla 5.4	Calidades geot. en Pórfido Este Potásico en la Rampa de Exploración 53
Tabla 5.5	Calidades geotécnicas en Metasedimentos, Túnel de Drenaje 54
Tabla 5.6	Calidades geot. en Pórfido Este Clorítico en el Túnel de Drenaje 55
Tabla 5.7	Resumen calidades geot. en P. E. Clorítico en el Túnel de Drenaje 56
Tabla 5.8	Calidades geot. en Pórfido Este Potásico en el Túnel de Drenaje 57
Tabla 5.9	Resumen calidades geot. en P. E. Potásico en el Túnel de Drenaje 58
Tabla 5.10	Calidades geotécnicas en el Cruzado Geotécnico N° 1 58
Tabla 5.11	Distribución de las Subunidades de RQS en el Cruzado Geotécnico N° 1 60
Tabla 5.12	Calidades geotécnicas en el Desvío XC-1 del Cruzado Geotécnico N° 1 61
VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TÚNELES	
Tabla 6.1	Distribución de fallas en el D. E. Nor-Oeste de los túneles 63
Tabla 6.2	Distribución de fallas en el D. E. Balmaceda de los túneles 65
Tabla 6.3	Distribución de fallas en el D. E. Estanques Blancos de los túneles 67
Tabla 6.4	Distribución de fallas en el D. E. Americana de los túneles 68
VII DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN	
Tabla 7.1	Parámetros geotécnicos en la Rampa de Exploración 71
Tabla 7.2	Fortificación de la Rampa Exploración 73
Tabla 7.3	Parámetros geotécnicos en el Túnel de Drenaje 74
Tabla 7.4	Fortificación del Túnel de Drenaje 77
Tabla 7.5	Parámetros geotécnicos en el Cruzado Geotécnico N° 1 78
Tabla 7.6	Fortificación del Cruzado Geotécnico N° 1 81
Tabla 7.7	Requerimientos geotécnicos para los túneles de Mina Chuquicamata 83

I. INTRODUCCION

1.1. Generalidades

El yacimiento Chuquicamata ha sido conocido desde el siglo XIX, corresponde al principal depósito de cobre y molibdeno de la División Codelco Norte, ubicado en la precordillera del Norte de Chile. En sus orígenes pequeños mineros explotaron óxidos superficiales y vetas de óxidos de alta ley. A partir del año 1915 se inicia la explotación a escala industrial de los óxidos, mediante el rajo Chuquicamata. Desde la década de 1930 se incorpora el beneficio de minerales mixtos (óxidos de cobre y sulfuros de cobre). En los años cincuenta, con la instalación de la planta de flotación comienza la explotación de los sulfuros de cobre. A la fecha ha producido aproximadamente 34 millones de toneladas de cobre fino.



Figura 1.1 Vista general hacia el Norte de la Mina Chuquicamata

La progresiva profundización y expansión lateral del rajo Chuquicamata ha resultado en un incremento de la relación estéril: mineral que en los primeros 65 años de explotación era muy baja (por ejemplo 1: 0,6 en 1952), relación que en el futuro se proyecta hará su explotación, económicamente inviable, tomando en cuenta que Chuquicamata es una mina de cobre con una profundización actual sobre los 1.000m (Figura 1.1).

Entre los años 2001 a 2003 se realizaron campañas de sondajes desde superficie para reconocer del cuerpo mineralizado bajo el pit final, denominado Sulfuros Profundos. Su resultado confirmó la ocurrencia de mineralización económica en profundidad.

A partir del año 2003 Codelco Norte ha desarrollado un proyecto de inversión, cuyo principal objetivo es obtener información geológica, geotécnica y geometalúrgica, que permita sustentar un estudio de factibilidad de una mina subterránea, bajo el rajo Chuquicamata. El proyecto incluyó el desarrollo de una rampa de exploración subterránea de 3.200 m, que baja con una pendiente de 15% desde el Banco M-3 del rajo Chuquicamata a 2.400 m s.n.m., hasta la cota 1.943 m s.n.m. (Figura 1.2).

Entre los años 2004 y 2005, como parte del Plan de Drenaje y despresurización del Talud Este de la Mina Chuquicamata se realizó la excavación del Túnel de Drenaje de 2.650 m de largo, iniciado desde el metraje 575 de la Rampa de Exploración. La suma de ambos proyectos permitió establecer bajo el fondo del rajo 7.400m de túneles, incluyendo labores anexas, entre las cotas 2.400 m s.n.m. y 1.941m s.n.m. La mayor parte de estos desarrollos se extendieron en la periferia Este del cuerpo mineralizado de los Sulfuros Profundos.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

- Caracterizar las condiciones geotécnicas y estructurales del macizo rocoso en que se han desarrollado aproximadamente 6.200 m de túneles, en el ámbito de la Rampa de Exploración y el Túnel de Drenaje, con el propósito de definir, durante su construcción, empíricamente la fortificación adecuada y suficiente para asegurar la estabilidad de estas labores subterráneas.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Compilar el levantamiento geotécnico de los túneles y aplicar el sistema de clasificación de Barton (Barton et al, 1974) a la definición de soporte.
- Analizar la distribución de las estructuras y su relación con las condiciones de estabilidad actual y futuras de los túneles de acuerdo con sus características geológico-geotécnicas.

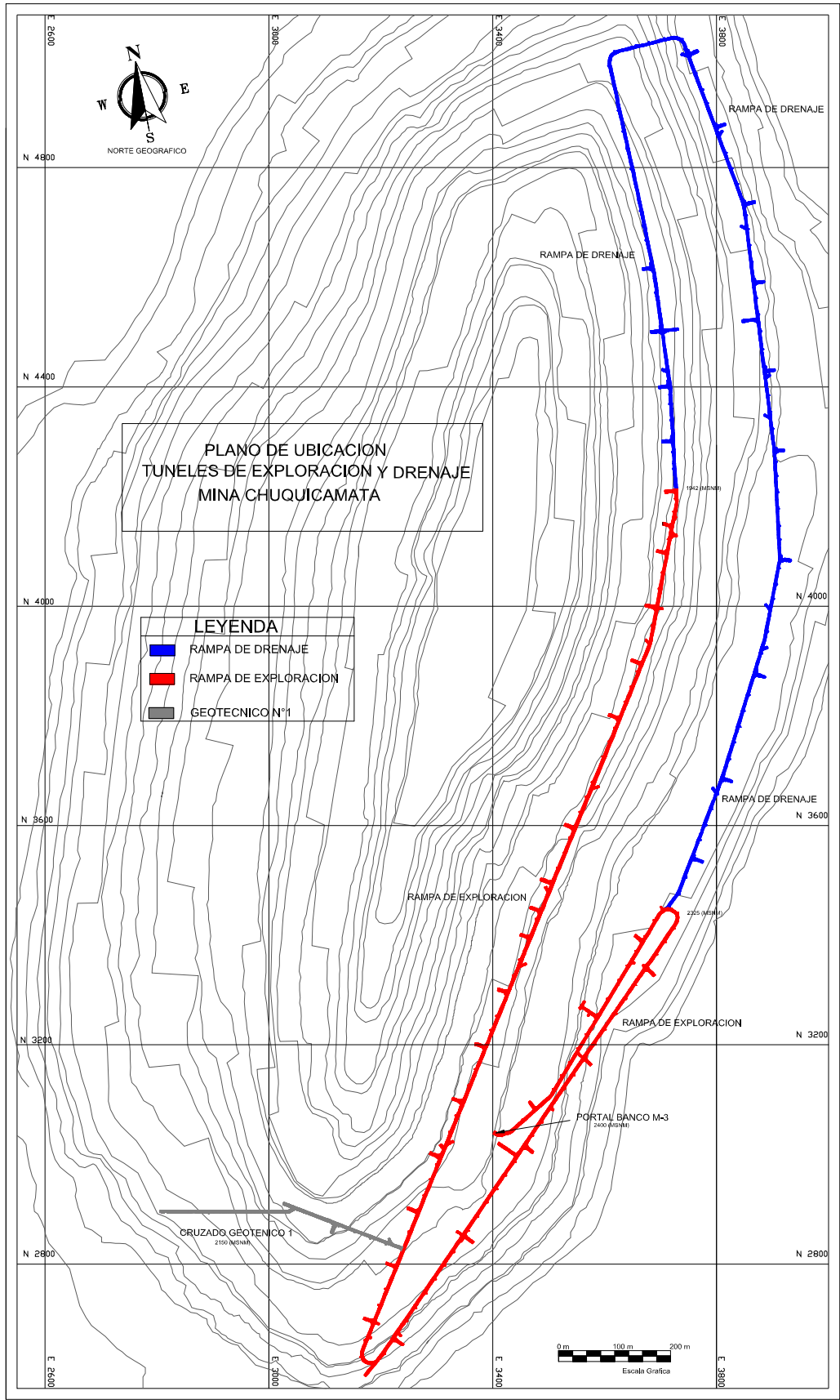


Figura 1.2: Ubicación de los túneles de Exploración y Drenaje. Mina Chuquicamata
1.3. Método de Trabajo

La metodología de trabajo utilizada para la caracterización geotécnica estructural de las labores subterráneas, se basa en los procedimientos establecidos por la Dirección de Geotecnia de Codelco Norte. La secuencia metodológica es la siguiente:

1.3.1 Caracterización Geotécnica de Frentes de Avance

La caracterización geotécnica de macizo rocoso se realiza mediante visitas diarias a los frentes de avance de las excavaciones, donde se determina la calidad geotécnica de la roca del último tramo excavado. Esta se realiza sobre la base de la clasificación geotécnica establecida por Barton, Lien y Lunde en 1974 (*Engineering Classification of Rock Masses for the Design of tunnel Support*), modificada según Grimstad & Barton, 1993.

1.3.2 Levantamiento Geotécnico-Estructural de túneles

El levantamiento geotécnico-estructural consiste en el levantamiento sistemático, mediante brújula y huincha a escala 1:100, de las fallas mayores (VIF, fallas con una zona de influencia igual o superior a 0,5 m), fallas intermedias (FT, fallas con desplazamiento superior a los 10 cm e influencia inferior a 0,5 m), diaclasas o fracturas (FR, discontinuidades con desplazamiento inferior a 10 cm), vetas y vetillas, con su correspondiente caracterización geométrica y geotécnica. La caracterización geotécnica se realiza a través de celdas definidas en tramos de túnel con un macizo rocoso geológica y geotecnicamente homogéneo, de acuerdo a parámetros como: estimación de la resistencia a la compresión uniaxial, litología, alteración, frecuencia de fracturas, grado de meteorización, presencia de agua, índice de calidad de roca RQD (Deere et al., 1967), índice Q (Barton et al., 1974), Índice GSI (Hoek, E., 1994) y zona de Influencia de fallas.

1.3.3. Manejo y análisis de la información

Una vez obtenida la información del levantamiento geotécnico-estructural, esta es procesada y almacenada en base de datos y sistemas gráficos. Esta información permite la construcción de planos a escala de 1: 250 a 1: 1.000, con la información geotécnico-estructural capturada del levantamiento. La definición de sistemas estructurales, se realiza mediante análisis estereográfico de frecuencia con el programa Dips versión 5.0.

1.4. Ubicación y Accesos

El complejo minero de Chuquicamata está ubicado a 1.650 km al Norte de Santiago, en la Región de Antofagasta, Provincia El Loa, a 240 km al noroeste de la ciudad de Antofagasta (68°54' longitud Oeste y 22°17' latitud Sur), a 2.870 m sobre el nivel del mar. El acceso

terrestre principal corresponde a la Carretera Panamericana (ruta 5) y la ruta 25, que une la localidad de Carmen Alto con la ciudad de Calama. Desde ésta se llega al yacimiento por un camino pavimentado de doble vía (Figura 1.3).

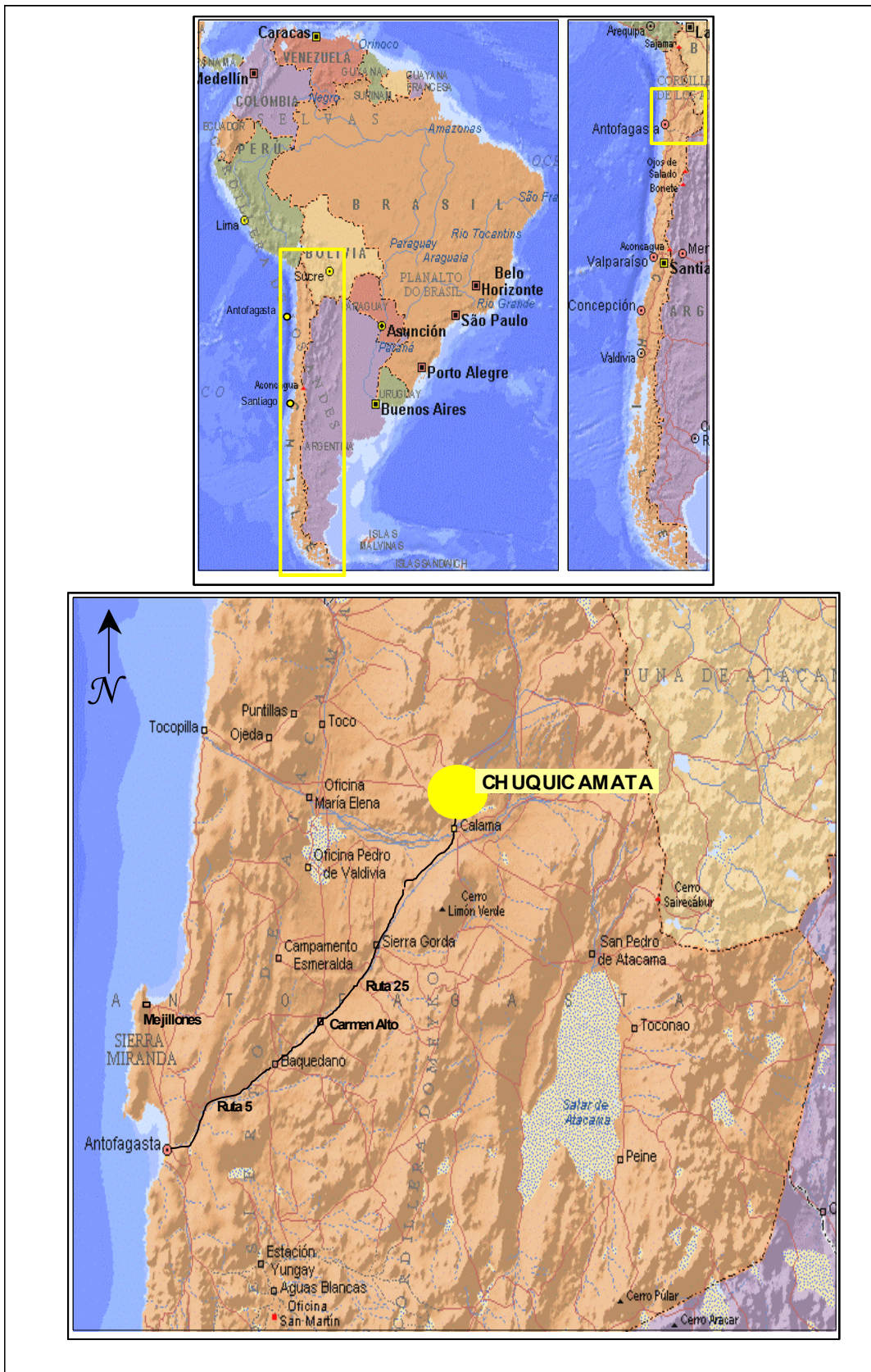


Figura 1.3: Ubicación y accesos Mina Chuquicamata

1.5. Clima, Fisiografía e Hidrografía

Las condiciones climáticas imperantes en la zona corresponden al tipo desértico marginal de altura (BWH; Fuenzalida, 1965), caracterizado por una temperatura media anual de 21° C, registrándose fuertes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche (10° C a 30° C y -3° C a 4° C, respectivamente). En el periodo de diciembre a marzo se producen precipitaciones de corta duración, producto del fenómeno meteorológico denominado Invierno Altiplánico. Aunque en Chuquicamata son escasos los registros pluviométricos, se infieren registros de lluvias de 10 mm/día cada 10 años y de 25 a 50 mm/día, cada 50 años. La tasa de evaporación alcanza valores de hasta 15 mm/día (Fuenzalida, 1950).

El complejo minero Chuquicamata se ubica en la unidad fisiográfica denominada Cordillera de Domeyko o Precordillera, que corresponde a unidad geográfica independiente de la cordillera principal en la región de Antofagasta, formada por serranías que alcanzan 4.500 m s.n.m. y una pampa de altitud media de 2.800 m s.n.m. (Pallauta, 1982).

Al Este de Chuquicamata se encuentra la parte alta del río Loa, que nace en la cordillera andina al Norte del volcán Miño, donde obtiene su alimentación de manantiales y de las precipitaciones del verano. El caudal del río Loa recibe aportes de los tributarios San Pedro, Salado y Salvador. Finalmente desemboca en la localidad de Caleta Loa a 100 km al Norte de la ciudad de Antofagasta.

II MARCO GEOLOGICO DISTRITAL

2.1 Generalidades

El entorno geológico del yacimiento Chuquicamata se caracteriza por la presencia dominante de rocas intrusivas y fallas de importancia regionales, además de rocas volcánicas y sedimentarias, conformando una columna geológica discontinua desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. El sistema de falla Domeyko (ZFD), incluyendo la Falla Oeste de Chuquicamata, divide el distrito en dos dominios: uno occidental, donde afloran unidades principalmente del Mesozoico al Terciario y uno oriental, en el que predominan rocas del Paleozoico.

La geología distrital que aquí se presenta, se basa fundamentalmente en los trabajos de Makshev y otros (1994) denominado “Estudio Geológico de la Franja Longitudinal comprendida entre Quebrada Blanca y Chuquicamata” y en el estudio realizado por Pardo y Rivera (1999) con el nombre de “Programa de Exploración Básica de Seguimiento Distrito Chuquicamata”. La distribución de estas unidades se observa en la Figura 2.1 que corresponde a un mapa geológico regional simplificado, escala 1:660.000 basado en el mapa geológico a escala 1:250.000 de Pardo y Rivera (1999).

2.2 Litología

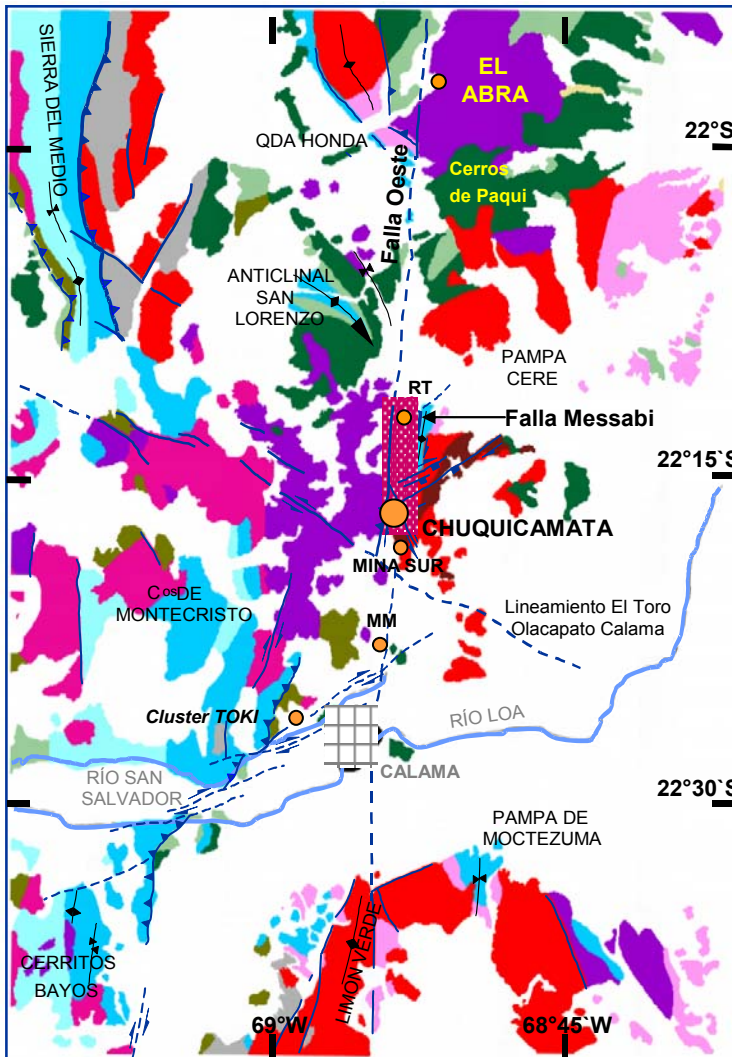
2.2.1 Rocas Metamórficas

Las unidades metamórficas, las rocas más antiguas de la región, se exponen a través de franjas en diversos sectores precordilleranos. Constituyen el basamento pre-mesozoico de la zona, representan protolitos de distintas edades y litologías con procesos de metamorfismos separados en el tiempo. El metamorfismo, en general es de baja temperatura y presión, generada a través de procesos regionales y de contacto.

En el distrito, se reconoce una unidad de rocas metamórficas, denominada Complejo Metamórfico de Limón Verde por Baeza (1984), quien describe con este nombre a una secuencia metamórfica expuesta típicamente en Sierra Limón Verde, 30km al sur de Calama. Esta unidad se dispone en contacto estructural con rocas marinas jurásicas y se encuentra cortada por pórfidos andesíticos de edad Paleozoica, como también por dioritas de edad Eocena.

2.2.2. Rocas estratificadas

Las rocas estratificadas, se han depositado durante eventos de sedimentación continentales, marinos y mixtos, asociados a un intenso volcanismo de composición intermedia. Su registro cronológico varía desde el Carbonífero hasta el Cuaternario.



GEOLOGÍA DISTRITAL DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA

SIMBOLOGIA

- Falla Observada Dextral
- Sinclinal
- Anticlinal
- Falla Observada Inversa
- Falla Inferida Dextral
- Falla Observada Dextral-Normal
- Falla Observada
- Falla Inferida
- Río

0 20 km

Escala Gráfica

- Yacimientos de cobre

LEYENDA

	ROCAS ESTRATIFICADAS	ROCAS METAMORFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	Sedimentitas Continentales y Gravas (Ter. Sup.)		Pórfido Chuqui (Olig.)
	Ignimbritas (Neog.)		Intrusivos (Kr.Sup-Eoc.)
MESOZOICO	Volcanitas (F. Icanche)		
	Sedimentitas Continentales		
	Volcanitas (F. Cerro Empexa)		

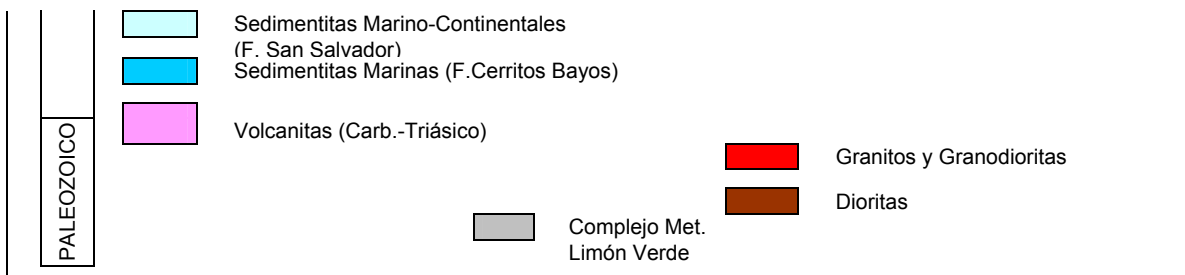


Figura 2.1: Geología Distrital del Yacimiento Chuquicamata (basado en el mapa a escala 1:250.000 de Pardo y Rivera, 1999).

2.2.2.1 Carbonífero – Triásico

Corresponden a volcanitas asociadas geográficamente a los intrusivos graníticos y dioríticos de edad paleozoica, que afloran en el Sur-Este y Nor-Este del distrito. Se incluye también la Formación Agua Dulce (García, 1967), asignada al Triásico, que aflora en los Cerros de Chuquicamata, donde yace en contacto depositacional sobre el Granito Mesa (Carbonífero Superior). Está compuesta por una secuencia de rocas volcánicas de color verde oscuro, consistente en andesitas y dacitas porfídicas con escasos fenocristales de plagioclasa.

2.2.2.2 Jurásico Superior

Las unidades estratificadas de Jurásico están representadas por estratos marinos transgresivos de litoral a plataforma carbonatada infralitoral, las cuales se han depositado discordantemente sobre un zócalo paleozoico, compuesto por rocas intrusivas (Ambrus, 1979 en Tapia, 1980). Se extienden en una franja irregular en el sector occidental del distrito entre la Sierra del Medio por el Norte, a Cerritos Bayos por el Sur. Corresponde a una secuencia de rocas carbonatadas de facie detritica compuestas por calizas, lutitas, margas y subordinadamente evaporizas, denominada Formación Cerritos Bayos (Lira, 1980), de edad asignada, según registro fósil, oxfordiana-kimmeredgiana.

2.2.2.3 Jurásico Superior – Cretácico Inferior

Unidad estratificada concordante y sobreyacente a la anterior, consistente en una secuencia de rocas calcáreas y silicoclasticas que afloran típicamente en la localidad de Cerritos Bayos, denominada Formación San Salvador (Lira, 1980). Incluye areniscas cuarcíferas, lutitas, areniscas rojas y conglomerados de edad asignada al intervalo Titoniano-Neocomiano (Pardo y Rivera, 1999).

2.2.2.4 Cretácico Superior – Terciario Inferior

En el Norte de Chile se reconoce, para este lapso, un intenso volcanismo sub-alcalino a calcoalcalino y depósitos aluviales desarrollados en cuencas estructurales. Estas unidades se

disponen, generalmente, en discordancia sobre rocas jurásicas o más antiguas. A su vez, el límite superior, es una marcada discordancia angular que las separa de secuencias silícicoclásticas del Oligoceno-Mioceno (Pardo y Rivera, 1999). En el distrito se distinguen dos unidades volcánicas y una secuencia de depósitos aluviales: la primera unidad volcánica corresponde a las volcanitas de la Formación Cerro Empexa (Galli, 1957), dispuestas en el borde occidental del distrito, formada por andesitas porfídicas, brechas andesíticas grises a pardas y tobas dacíticas parcialmente silicificadas, de edad cretácica media a paleogena. Los depósitos aluviales corresponden a sedimentitas de edad cretácica superior a palógenas. Por último, la tercera unidad corresponde a las volcanitas de la Formación Icanche (Maksaev, 1978) de edad Eoceno, consistente en una secuencia de andesitas porfídicas, aglomerados y tobas dacíticas parcialmente silicificadas, con una potencia mínima de 500m. En el distrito estas unidades se distribuyen como una franja discontinua de dirección Norte-Sur, próxima a la Falla Oeste.

2.2.2.5 Terciario Superior

Las rocas del Terciario Superior expuestas en el sector corresponden a la Formación Calama (Naranjo y Paskoff, 1981) de edad Mioceno Inferior a Medio que aflora en los cerros de Calama en Mina Sur y al Oeste del Salar de las Indias. Está compuesta por gravas polimícticas con abundante matriz arenosa. En general se encuentra mal estratificada y pobremente litificada, se apoya en contacto erosional sobre el Pórfido Chuqui y el Complejo Intrusivo Chuquicamata. Su techo lo constituye la Formación El Loa, dispuesta en discordancia angular.

La Formación El Loa (Fuenzalida, 1957) Mioceno Superior - Plioceno Inferior, se expone en el curso del río Loa. Se compone de una alternancia de areniscas calcáreas medias a gruesas, calizas pardo claras y niveles de travertinos interestratificados con calizas laminadas, que engranan lateralmente con gravas.

2.2.2.6 Cuaternario

Las unidades sedimentarias cuaternarias están marcadas por las condiciones de clima árido que predominaron en esta región durante todo este período. En este sistema se agrupan los depósitos recientes, y en ellos es posible diferenciar tres unidades principales: Gravas y Depósitos Lacustres del Plioceno – Pleistoceno, Depósitos no consolidados del Cuaternario y Depósitos y cubiertas Antrópicas.

Las Gravas y Depósitos Lacustres del Plioceno – Pleistoceno se encuentran representadas en el área por los Depósitos Aluviales, que corresponden a extensas y amplias depositaciones de piedemonte, constituidos por gravas, rípios y arenas polimícticas, mal seleccionadas, redondeadas, con matriz de limo y arcilla, en ocasiones cementadas por sales.

Los Depósitos no Consolidados del Cuaternario, están representados por sedimentos fluviales del Río Loa y niveles salinos. Los sedimentos fluviales corresponden a llanuras y terrazas abandonadas, generadas en estadios de inundación y que consisten en grava,

arena, limo y arcilla no consolidados. En la parte oriental del distrito se reconoce la presencia de los llamados Depósitos Salinos, que forman parte del Salar de Talabre y Salar del Indio. Estos corresponden a pequeñas cuencas con drenaje endorreico situadas por sobre los 2.300 m s.n.m. y compuestos principalmente por limo, arcilla, yeso y halita.

Los depósitos y cubiertas antrópicas corresponden a suelos de uso agrícola situados sobre las terrazas fluviales inactivas del Río Loa, localizadas en torno a la ciudad de Calama y a depósitos artificiales constituidos por material estéril removido de las minas Chuquicamata, Radomiro Tomic y Mina Sur.

2.2.3 Rocas Intrusivas

En el distrito se reconocen extensas franjas intrusivas distribuidas en sentido Norte-Sur principalmente, formando los relieves más altos como cordones y serranías. Aparecen como cuerpos batolíticos, “stocks”, apófisis y diques. Las diversas unidades intrusivas representan verdaderos complejos mostrando las rocas terciarias, una composición predominantemente ácida a intermedia con petrografía de granitos, granodioritas, tonalitas dioritas y variedades de pórfidos. Mientras que el Paleozoico muestra composiciones de mayor variedad, incluyendo desde rocas básicas a rocas ácidas. Según Pardo y Rivera (1999), las rocas intrusivas de este distrito, especialmente las del Paleozoico Superior, guardan estrecha relación espacial y semejanza litológica unas con otras, incluso en un sentido amplio, podrían ser parte de una sola unidad. Sin embargo para efecto de este trabajo se consideran cuatro unidades intrusivas, que se describen a continuación:

2.2.3.1 Dioritas Paleozoicas

Corresponden al Complejo Intrusivo de Chuquicamata (Pardo y Rivera, 1999), que incluye una serie de rocas intrusivas mayoritariamente básicas, diferenciándose diversos grados de tectonismo (milonitas y cataclasitas). Estas se encuentran representadas por gabro-dioritas, dioritas y tonalitas, de textura equigranular de grano fino a medio, constituidas por plagioclasa y horblenda, con proporciones menores de cuarzo, biotita y minerales opacos. La principal característica es la orientación de los máficos y el color gris verdoso por la presencia de clorita y epidota. Se distribuye en el flanco oriental de los Cerros de Chuquicamata, a través de una franja de varios kilómetros de largo y de dirección Nor-Este. Hacia el Norte, desaparece bajo la cubierta de gravas de Pampa Cere. Según Pardo y Rivera (1999), estas rocas intrusivas de edad mínima correspondiente al periodo Carbonífero, están controladas por estructuras de rumbo Nor-Este, generando franjas miloníticas con carácter de rocas metamórficas, y que podrían corresponder a manifestaciones sinmagmáticas o a un tectonismo de mayor grado.

2.2.3.2 Granitos y Granodioritas Paleozoicas

Conjunto de rocas intrusivas de composición granítica y granodiorítica, las cuales afloran en una franja de dirección Nor-Este en el flanco oriental de los Cerros de Chuquicamata y en el interior del “pit” de Mina Sur. Incluye el denominado Granito Mesa (Renzetti, 1957) y la Granodiorita Este (Renzetti, 1957) que intruye a la anterior. El Granito Mesa presenta una textura granular media a gruesa y ocasionalmente porfídica y en otros sectores un aspecto gneisítico, además de un color rosado debido a la presencia de feldespato potásico. El principal máfico reconocido es la biotita y entre los minerales de alteración se observan clorita, sericita, epidota y arcillas. En base a dataciones radiométricas se le confiere a esta unidad un rango de edad Carbonífero Superior – Pérmico (Pardo y Rivera, 1999). La Granodiorita Este corresponde a un “stock” granodiorítico de biotita y horblenda con textura hipidiomórfica equigranular, localmente porfídica con escasa masa fundamental. Para esta unidad se ha obtenido mediante dataciones radiométricas una edad mínima triásica inferior (Ambrus, 1979).

2.2.3.3 Intrusivos Cretácico-Eocenos

Corresponde a intrusivos que se extienden por decenas de kilómetros en la porción centro occidental del Distrito Chuquicamata. Comprende dioritas, tonalitas, granodioritas, monzonitas y granitos con variaciones texturales, desde porfídicas a equigranulares. Incluye el Complejo Intrusivo Montecristo (Pardo y Rivera, 1999) que sus autores asignan del Cretácico Superior al Paleoceno y el complejo intrusivo Fortuna-Los Picos (Thomas, 1978; Renzetti, 1957), extenso plutón alargado en dirección Norte-Sur, que en la mina Chuquicamata está en contacto con los pórfidos de Chuquicamata mediante la Falla Oeste (Ambrus, 1979). Además se incluye en esta unidad la Granodiorita Elena (Renzetti, 1957) que corresponde a un “stock” granodiorítico de biotita y escasa horblenda, expuesto en el margen oriental de la Mina Chuquicamata, de edad mínima cretácica inferior (Ambrus, 1979; Marinovic y Lahsen, 1984).

2.2.3.4 Pórfidos Oligocenos

Corresponde al denominado Pórfido Chuqui (Unidad Informal), conjunto de rocas que alojan la mineralización en la Mina Chuquicamata, y que afloran específicamente en la mina; corresponde a un cuerpo alargado de orientación Norte-Sur, con un largo de aproximadamente 14 km y un ancho que varía de 500 m a 2.000 m. Su composición corresponde a una diorita gris rosado, con textura porfídica. Incluye fenocristales de feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita, todos inmersos en una masa fundamental aplítica. Dataciones radiométricas permiten asignar esta unidad al Oligoceno Inferior (Ballard et al., 2001).

2.3 Estructuras

El rasgo estructural regional dominante es el Sistema de Falla Precordillerana (Lindsay y otros, 1995) vinculada a la franja de los principales yacimientos porfídicos de cobre (Figura 2.2). Este sistema reconocido por 2.000 kilómetros, está compuesto por varios segmentos de fallas regionales cada uno con distintos eventos de deformación (Tomlinson y otros, 1994). El segmento de la región de Antofagasta se conoce como Sistema Falla Domeyko (Maksaev y Zentilli, 1988), pero es frecuentemente referido a la Falla Oeste por ser esta una ramificación expuesta en la Mina Chuquicamata.

El Sistema de Falla Domeyko (SFD) se interpreta como una fractura interna de la placa sudamericana generada por la convergencia oblicua de la Placa de Nazca, en el marco de un margen de placas continentales (Hollister, 1978). Las dos mayores ramificaciones de este sistema, en el Distrito Chuquicamata son la Falla Oeste y la Falla Mesabi. Estas fallas limitan el Depósito Porfídico Chuquicamata por el Oeste y Este respectivamente.

La Falla Oeste se extiende desde Calama hasta Copaquiri y la naturaleza de su movimiento se ha debatido por más de medio siglo. Los primeros estudios indicaban que el cuerpo mineralizado de Chuquicamata se acuñaba contra la falla (Lopez, 1939) la cual posiblemente era normal (Sillitoe, 1973) o sinistral. En 1969 Baker (en Dilles y otros, 1997) fue el primero en proponer un movimiento lateral sinistral con 30 km a 35 km de desplazamiento, basado en correlaciones del complejo Fortuna, en el lado Oeste y el complejo El Abra en el lado Este. Estudios subsecuentes dentro y en los alrededores de mina Chuquicamata (Álvarez y otros, 1980; Reutter y otros, 1996; Dilles y otros, 1997), han demostrado que los eventos post-mineralización de la Falla Oeste son, principalmente, sinestrales.



Figura 2.2: Mapa parcial del Norte de Chile que muestra el Sistema Falla Domeyko y la distribución de los mayores yacimientos del tipo Pórfido Cuprífero de edad Eoceno-Oligoceno del Norte de Chile

Los complejos movimientos de la Falla Oeste controlaron el emplazamiento de los cuerpos intrusivos, así como truncaron y desplazaron porciones del cuerpo mineralizado, en diferentes tiempos y direcciones, durante la historia de deformaciones iniciadas hace 33 Ma (Lindsay y

otros, 1995). La Falla Oeste es una estructura antigua y profunda reconocida a través de sondajes hasta por lo menos 560 m de profundidad (Lindsay, 1995), que permanece activa hasta el presente, hecho evidenciado por escarpes producidos en la superficie actual del aluvio lo que indica reactivación a lo largo de esta (Renzetti, 1957; Alvarez y otros, 1980).

Otra estructura relevante a escala distrital es la Falla Messabi (Figura 2.1), que se reconoce en el margen Este y al Noreste de la Mina Chuquicamata, afectando principalmente a las rocas de caja del Pórfido Chuqui como metavolcanitas y metasedimentitas mesozoicas y la Granodiorita Elena. La Zona de falla Messabi, que induce una deformación de fábrica dúctil y semi-dúctil, con milonitas y flujos cataclásticos, presentan indicadores cinemáticos dextrales, según Lindsay et al. (1995) y Reutter et al. (1996). Estos autores presentaron evidencias de que esta falla estuvo activa antes y después del emplazamiento del Pórfido Chuqui y probablemente también durante la formación de las etapas tempranas de la mineralización, por lo cual le asignaron un rol clave en la localización y génesis del depósito, en coherencia con la hipótesis propuesta previamente por Makshev (1990), quien planteó que las fallas Oeste y Messabi formaron un dúplex extensional activo (tipo step-over o pull-apart), debido a los movimientos transcurrentes dextrales de ambas estructuras, controlando y favoreciendo el emplazamiento del Pórfido Chuqui y la génesis de la mineralización durante el Eoceno-Oligoceno.

III GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA

3.1 Generalidades

Chuquicamata es un depósito elongado en dirección Nor-Nor-Este (NNE), con 4 km de largo, 300 m a 900 m de ancho en sentido Este-Oeste que se ensancha de Sur a Norte, y una columna vertical de mineralización económica reconocida de unos 1.800 m (900 m bajo el fondo del rajo actual, de los cuales aproximadamente 700 m corresponden al cuerpo mineralizado de los Sulfuros Profundos de Chuquicamata). La descripción geológica del yacimiento Chuquicamata que se entrega a continuación, se basa en el modelamiento geológico de yacimiento de año 2005 (Modelo Geológico y estimación de recursos del Depósito Chuquicamata, año 2005) y la actualización geológica del Proyecto Transición a Minería Subterránea de año 2006, ambos realizados por la Dirección de Geología de Codelco Norte.

3.2 Litología

Las unidades litológicas que se reconocen en el yacimiento Chuquicamata son: Granodiorita Este, Granodiorita Elena, Unidad Metasedimentaria, Granodiorita Fortuna (Fiesta) que está instruida por cuerpos irregulares de los pórfidos aplíticos La Tetera y San Lorenzo; Complejo Intrusivo Chuquicamata, en el que se diferencian las unidades Pórfido Este, Pórfido Oeste y Pórfido Banco, y finalmente la unidad de Gravas (Ossandón et al., 2001 en Camus, 2003). La distribución de estas unidades se presenta en la Figura 3.1.

3.2.1 Granodiorita Este

Se reconoce en la parte Sur oriental del yacimiento con una disposición general Norte-Sur. En su borde occidental, está limitada por la falla Mesabi y la Zona de Deformación Este que la pone en contacto con el Pórfido Este y la Unidad Metasedimentaria. Petrográficamente corresponde a una granodiorita de biotita y hornblenda, con textura hipidiomórfica equigranular, de grano medio a grueso. Para esta unidad se han obtenido edades a partir de dataciones radiométricas con un rango de valores de edades que permiten asignarla al Triásico Medio (Tomlinson et al., 2001).

3.2.2 Unidad Metasedimentaria

Con disposición general Nor-Nor-Este se reconoce la presencia de una unidad compuesta principalmente por lutitas, areniscas y calizas asignadas a la Formación Quehuita (Hettangiano–Kimmeridgiano), que se encuentran afectadas por metamorfismo de contacto y dinámico en la Zona de Deformación Este. Las lutitas presentan tonos grises oscuros a negros con mineralización de pirita y alto grado de fisibilidad. Las areniscas presentan tonos verdosos y granulometría media a fina. Las calizas son de color negro y marrón con tonos claros. Debido a la intensa deformación estructural que afecta a esta unidad, no es posible reconocer con precisión la potencia de los diferentes niveles estratigráficos que constituyen

esta secuencia sedimentaria. La cual aparece deformada y plegada, con desarrollo local de milonitas y brechas tectónicas cloritizadas. Por lo general estas rocas afectadas por metamorfismo se presentan estériles, aunque algunos sondajes profundos han cortado las metasedimentitas con tramos de interés en mineralización tipo skarn de calcopirita y magnetita (Dirección de Geología, 2006).

3.2.3 Granodiorita Elena

Esta unidad se reconoce en el margen central oriental del yacimiento, con una disposición general Norte-Sur. Se encuentra intruida por el Pórfido Este, donde el contacto es litológicamente difuso y ha sido motivo de controversia geológica, debido a la gran similitud macroscópica existente entre Elena y el Pórfido Este. La única diferencia petrográfica es que la Granodiorita Elena es definitivamente equigranular de grano medio y no presenta megacristales de feldespato potásico. Dataciones radiométricas indican una edad de cristalinización de 37,7 Ma (Ballard, 2001). Esta edad, junto a sus características petrográficas, sugiere que este intrusivo podría ser un precursor del Pórfido Chuqui (Dirección de Geología, 2006).

3.2.4 Granodiorita Fortuna (Fiesta)

Por el Oeste, el Pórfido Chuqui está truncado por la Falla Oeste, quedando en contacto con la unidad estéril Granodiorita Fortuna de edad 39-38 Ma (Ballard, 2001), que forma parte del Complejo Granodiorita Fortuna - Los Picos (Ossandón et al., 2001). La Granodiorita Fortuna es una granodiorita de horblenda y biotita, con textura fanerítica de grano medio a grueso, la que presenta variaciones locales. En las cercanías de la Falla Oeste, dicha unidad está afectada por fuerte brechización por cizalle, con abundantes vetillas de calcita y hematita. Sus minerales máficos están generalmente cloritizados, en una alteración de baja intensidad no claramente relacionada a los eventos mineralizadores que ocurren en el Pórfido Chuqui.

Es posible reconocer dentro de esta unidad litológica la presencia de apófisis de intrusivos porfídicos menores, que corresponden a los denominados Pórfido San Lorenzo y Pórfido Aplítico Tetera.

3.2.5 Complejo Intrusivo Chuquicamata (“Pórfido Chuqui”)

El depósito Chuquicamata está emplazado íntegramente en el Complejo Porfídico Chuquicamata (“Pórfido Chuqui”), que se divide en tres variedades principales cuya composición general es granodiorítica a monzodiorítica cuarcífera: Pórfido Este, Pórfido Banco y Pórfido Oeste, de los cuales, el primero es el más importante volumétricamente. El complejo intrusivo Pórfido Chuqui ocurre como un gran dique subvertical, limitado por importantes fallas que son, por el Oeste la Falla Oeste, por el Este la Falla Mesabi y la Zona de Deformación Este y por el Sur, este complejo intrusivo se trunca y acuña estructuralmente, hasta alcanzar la forma de un pequeño dique de unos 30 m a 40 m de potencia, adosado a

la Falla Oeste. Hacia el Norte, el complejo intrusivo tiene continuidad más allá del depósito Chuquicamata, abarcando el Proyecto Chuqui Norte y el Yacimiento Radomiro Tomic.

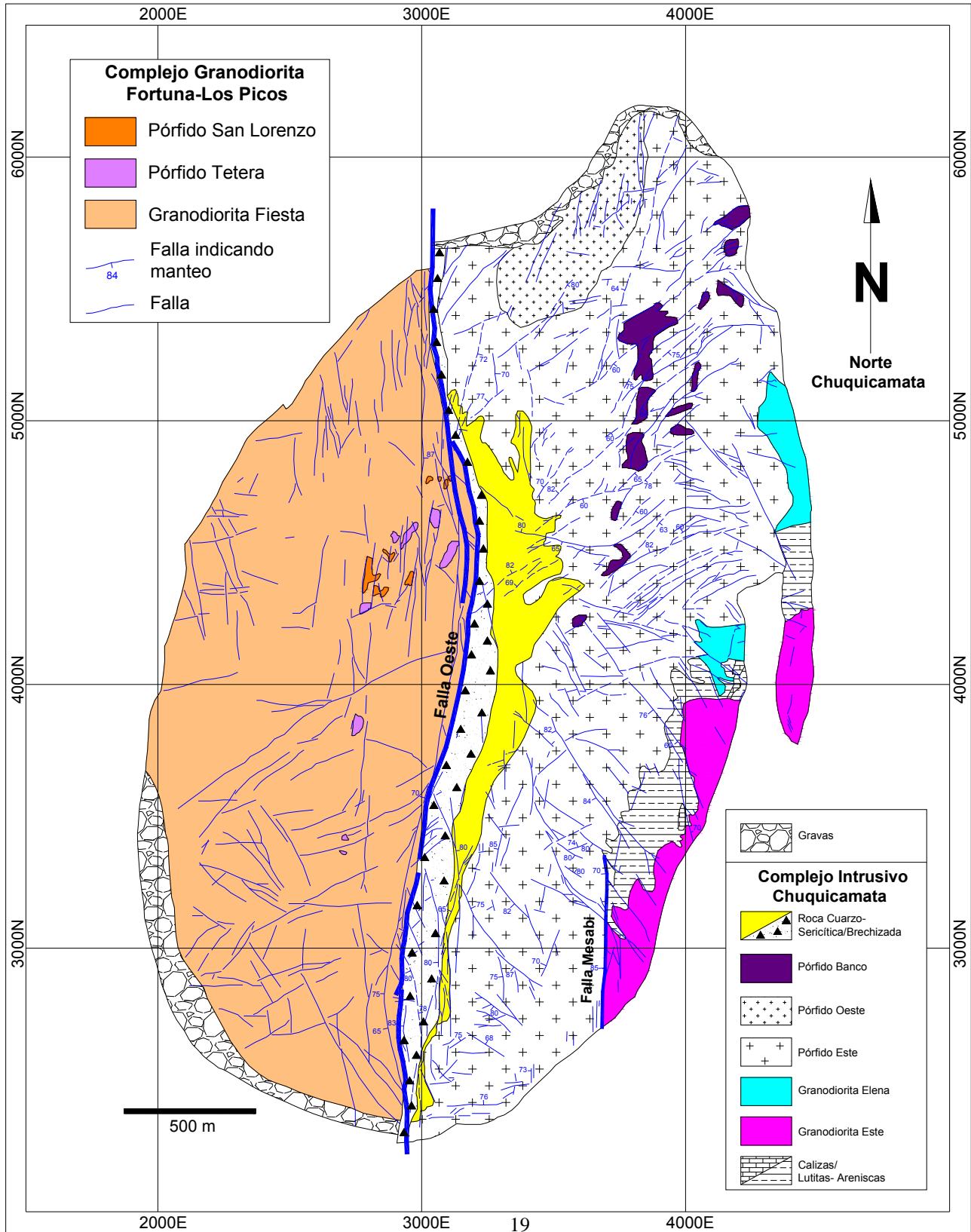


Figura 3.1: Unidades Litológicas de la mina Chuquicamata. Se observan tipos litológicos y estructuras con una continuidad superior a tres bancos (Tomado de Ossandón *et al.*, 2001 en Camus, 2003).

3.2.5.1 Pórfido Este

El Pórfido Este es la principal unidad litológica del Pórfido Chuqui, presentando una disposición general Norte-Sur. Corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera de biotita, con textura fanerítica a incipientemente porfídica, de grano medio. Se compone de esporádicos a frecuentes mega-cristales centimétricos de feldespato potásico con textura poikilítica, plagioclasa subhedral y escasa horblenda. Como accesorios se reconocen magnetita, esfeno y zircón. La edad de cristalización del Pórfido Este esta datada en 34,6 Ma (Ballard *et al.*, 2001). Esta unidad se encuentra afectada por alteraciones de los tipos clorítica, sericítica, potásica y cuarzo-sericítica. Esta última, que alcanza la mayor intensidad obliterando totalmente la roca, forma una franja elongada Norte-Sur denominada Roca Cuarzo-Sericítica que se presenta en la Figura 3.1 adosada a la Falla Oeste.

3.2.5.2 Pórfido Oeste

Corresponde a una unidad litológica diferenciada del Pórfido Chuqui, se presenta en el extremo Norte del yacimiento. Su litología corresponde a un monzogranito con textura porfídica fina (Aracena, 1981). Su mineralogía la conforman fenocristales de cuarzo, feldespato y plagioclasas, inmersos en una masa fundamental aplítica de cuarzo y feldespato. Se presenta afectada por alteración potásica y lixiviación intensa.

3.2.5.3 Pórfido Banco

Unidad de menor distribución areal del Pórfido Chuqui. Su disposición es de carácter filoniana, se emplaza principalmente en el sector Nor-Este del yacimiento, intruyendo el Pórfido Este. Su composición muy similar al Pórfido Este, pero se distingue por presentar plagioclasas en su masa fundamental, siendo sus contactos nítidos y abruptos.

3.2.6 Gravas

Corresponden a sedimentos cuaternarios semi o poco consolidados, depositados sobre la superficie de erosión desarrollada sobre la Granodiorita Fortuna en el Sur-Oeste de la Mina Chuquicamata y sobre el Pórfido Chuqui por el Nor-Este de la misma. Los clastos que conforman esta unidad presentan gran variedad de tamaños y de angularidad de sus bordes, encontrándose inmersos en una matriz areno-limosa, donde localmente se reconoce la presencia de sulfatos como agente cementante.

3.3 Estructuras

Los rasgos estructurales mas relevantes del yacimiento de acuerdo a los estudios estructurales de Lindsay et al. (1995); Reutter et al. (1996) y Collado, et al. (2005) son los siguientes (Figura 3.2):

3.3.1 Falla Oeste

De orientación Norte-Sur a Nor-Nor-Este y manteo de 75° a 80° al Oeste, que decrece levemente en profundidad, es la estructura mejor reconocida del depósito y la más sistemática y consistentemente interpretada en el modelo geológico. Al interior del depósito aparece principalmente como una falla post-mineral, con desplazamiento sinistral-inverso y que limita abruptamente el yacimiento por el Oeste, truncando al Pórfido Chuqui y a la mineralización temprana y poniéndolos en contacto con la Granodiorita Fortuna estéril. La evidencia en sondajes profundos de simetrías mineralógicas, de ley y de alteración, entre los bordes Este y Oeste del depósito, indican que esta falla post-mineral no se emplaza en el eje del depósito, sino que está desplazada hacia el Oeste respecto al centro de la mineralización hipógena y, por lo tanto, la franja de mineral disectada y “perdida” por el desplazamiento de la falla sería muy menor. Por otra parte la Falla Oeste presenta una divergencia angular con el eje principal de alteración y mineralización del depósito, que es aproximadamente Nor-Este, lo que indicaría que solo controla eventos muy tardíos de mineralización (sericita/pirita/enargita) que siguen aproximadamente su posición y, en cambio, disecta los eventos principales, más tempranos (Collado et al., 2005).

3.3.2 Sistema de Orientación NNE (Sistema Messabi)

Se incluye en este grupo la Zona de Deformación Este asociada a la falla Mesabi (Figura 3.1), la falla Americana, la falla C-2 y la falla Zaragoza (Figura 3.2). Este juego de estructuras es temprano en la evolución del depósito y, probablemente, controla el emplazamiento del Pórfido Chuqui y de las etapas tempranas de la mineralización, que son relevantes en cuanto al aporte de cobre y molibdeno en el depósito.

3.3.2.1 Zona de Deformación Este

La Zona de Deformación Este (ZDE) ha sido reconocida e interpretada de manera continua en el sector central Este del depósito, conformando ella el contacto entre el Pórfido Chuqui y la Granodiorita Elena. Es una zona compuesta por rocas de fallas cohesivas como milonitas, cataclasitas y brechas de falla recrystalizadas, de potencia variable, con manteos abrupto

hacia el Oeste (+/-80°). Las brechas contienen fragmentos de todos los tipos litológicos intrusivos que las encajan y también fragmentos de cuarzo, en una matriz recristalizada de clorita, feldespato y magnetita, propia de un protolito igneo. La brecha se observa sobreimpuesta por la fábrica dúctil y penetrativa de las milonitas y ambas litologías están a su vez cortadas por vetillas y pequeñas brechas tardías de especularitas, con esporádicas piritas y calcopirita en trazas. Similares características se presentan en su extensión hacia el Sur en la zona de contacto de la Unidad Metasedimentaria con el Pórfido Chuqui en el margen Noreste del depósito. Las relaciones geológicas de contacto observadas entre la milonización, la brechización, los fragmentos de cuarzo y el Pórfido Chuqui permiten inferir que esta zona de deformación existía antes de la intrusión del pórfido y tuvo reactivaciones posteriores a su emplazamiento, deformándolo en etapas intraminerales y confinando el sistema hidrotermal por el Este (Dirección de Geología, 2006).

3.3.2.2 Falla Americana

La Falla Americana es otra estructura relevante del sistema NNE. Se trata de un rasgo subvertical, cuya mayor expresión está en la parte Sur del yacimiento y se manifiesta como una zona de brecha que fractura y tectoniza principalmente a vetas de cuarzo-molibdenita. Esta zona estructural controla fuertemente el emplazamiento de los pulsos de alteración cuarzo-sericítica tardía.

3.3.2.3 Falla Zaragoza

En el extremo Norte del depósito la falla Zaragoza, con dirección Nor-Nor-Este e inclinación subvertical pueden considerarse en alguna manera similares a la falla Americana en el sector Sur. Entre el sistema Zaragoza y la Falla Oeste, ocurre el Pórfido Chuqui, con sus máficos cloritizados y escasa mineralización de muy baja ley de cobre, mostrando entonces el cierre y la simetría original del depósito en su extremo Nor-Oeste.

3.3.2.4 Falla C-2

El sistema de fallas C-2 constituye un rasgo estructural importante en el control de la mineralización primaria y secundaria, incluyendo zonas de oxidados de cobre, en el extremo Norte de la Mina Chuquicamata, donde estas fallas de rumbo Norte-Sur y Nor-Nor-Este, adquieren mayor penetratividad local. Con ello se evidencia que estos juegos de fallas también son antiguos en la evolución del depósito y participaron en el control del emplazamiento de la mineralización, no obstante hayan tenido reactivaciones posteriores a ese emplazamiento.

3.3.3 Sistema de Fallas Estanques Blancos

Corresponde a un sistema de fallas de actitud general Nor-Este / subvertical, que se presenta a lo largo de todo el depósito, pero es particularmente penetrativo en la parte Central-Norte,

donde se ubica la Falla Estanques Blancos (Dominio Estanques Blancos de Lindsay et al., 1995), reconocida con desplazamiento dextral, al Nor-Este del rajo Chuquicamata. En el sector Central-Norte del yacimiento, el sistema Estanques Blancos ejerce un importante control estructural sobre la alteración y la mineralización, lo que se ve reflejada en la orientación de las diversas zonas de alteración y en una notable anisotropía de vetas y vetillas mineralizadas, lo que indica que este sistema estructural es antiguo y está presente en la evolución del depósito. Paralelamente, numerosas evidencias procedentes de estudios estructurales anteriores le asignan a este sistema una reactivación post-mineral con un sentido de movimiento dextral. Por ejemplo Renzetti, en su plano geológico distrital de superficie (Renzetti, 1957), incluye la Falla Estanques Blancos con un desplazamiento dextral de las unidades de unos 200 m a 300 m.

El sistema Estanques Blancos tiene un comportamiento normal importante, con el bloque Sur de cada falla del sistema descendiendo con respecto al bloque Norte, de tal forma que desde el Norte de Chuquicamata y hasta la cuenca del río Loa, se verificaría un escalonamiento estructural progresivo y en descenso, que permite exponer, en sentido de Norte a Sur, niveles estructurales cada vez más superficiales de los sistemas mineralizados del distrito. Ello explicaría algunas diferencias en mineralización y alteración existentes entre los extremos Norte y Sur de Chuquicamata, así como la preservación en el Yacimiento MMH (Mansa Mina) de alteración argílica avanzada, más tardía y superficial, en contraste con la Mina Radomiro Tomic, que representa el otro extremo, más profundo, con escasa alteración fílica y total ausencia de asociaciones argílicas avanzadas (Dirección de Geología, 2006).

3.3.4 Fallas de orientación NNW

Corresponden a un importante juego de fallas de actitud Nor-Nor-Oeste a Nor-Oeste / subverticales, el cual se presenta en todo el depósito, pero es particularmente frecuente en el sector central y Sur (Dominio Noroeste de Lindsay et al., 1995). Tradicionalmente, en los estudios estructurales realizados en el yacimiento el sistema NNW ha sido considerado un sistema post-mineral y tardío en la evolución del depósito, debido a la ocurrencia de desplazamientos sinistral métricos que cortan a vetas mineralizadas, a fallas sinistral N-S y a contactos geológicos en general. Incluso hay evidencia de que estas fallas NNW cortan a la Falla Oeste, desplazándola algunos metros en sentido sinistral. Sin embargo, al interior del yacimiento existen también numerosas vetas y vetillas mineralizadas, de las distintas etapas evolutivas del yacimiento, aunque preferentemente tardías (pirita-enargita), que están controladas por estas estructuras. Por lo tanto, se puede suponer que este juego de estructuras existía y probablemente estuvo activo durante la formación del depósito, constituyendo un juego conjugado al Sistema Estanques Blancos, siendo posteriormente reactivado en una etapa post-mineral y reciente.

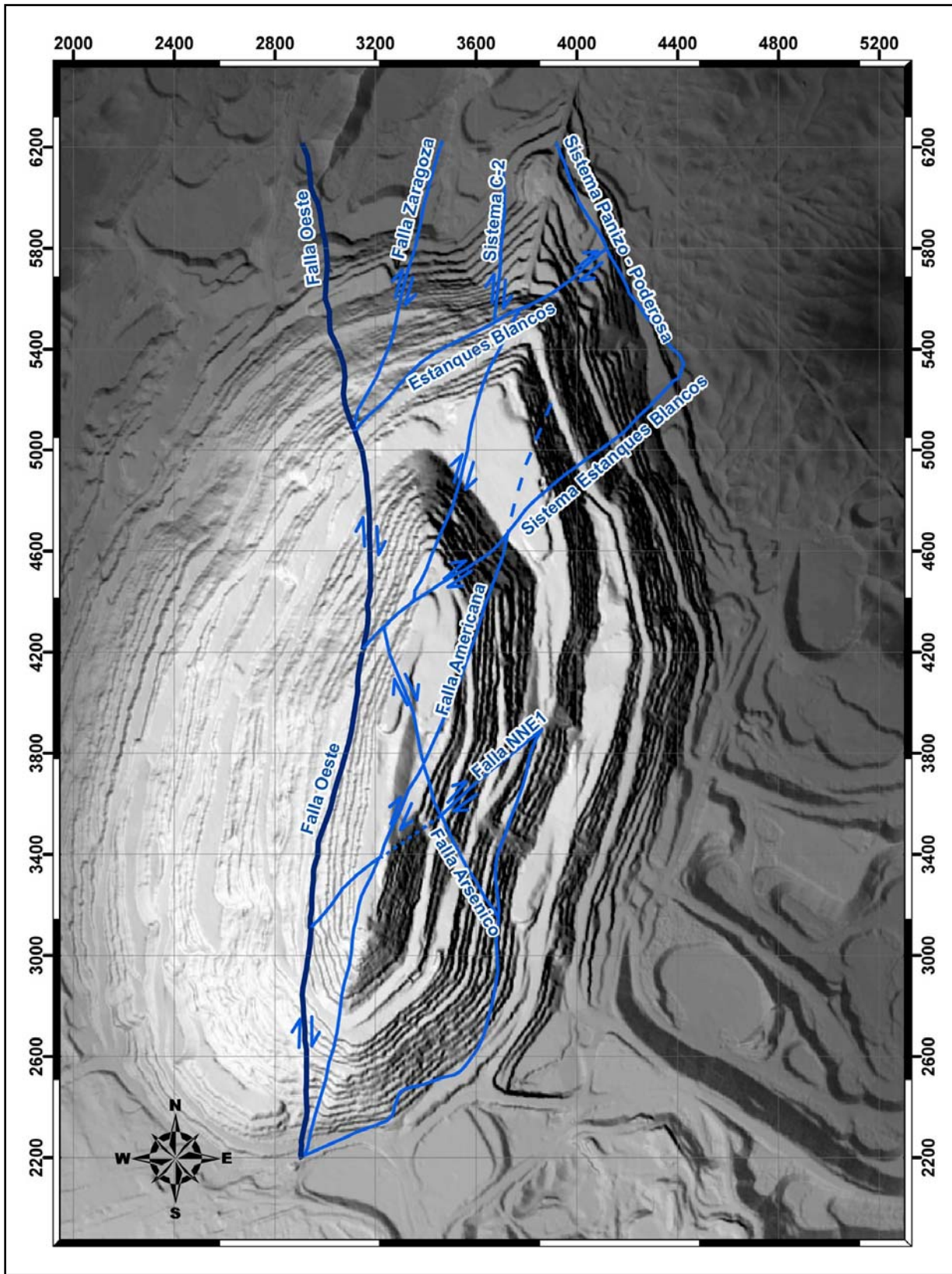


Figura 3.2: Fallas principales de la mina Chuquicamata. Collado et al., (2005)

3.4 Alteración y Mineralización Hipógena

Gran parte de la mineralización de cobre fue introducido al sistema hidrotermal de Chuquicamata como componentes de asociaciones de alteración tempranas, las que fueron posteriormente obliteradas por la alteración tardía. Los eventos de alteración hipógena han sido divididos temporalmente, en los tempranos de bajo contenido de pirita y aquellos tardíos que aportan asociaciones de menas con abundante pirita.

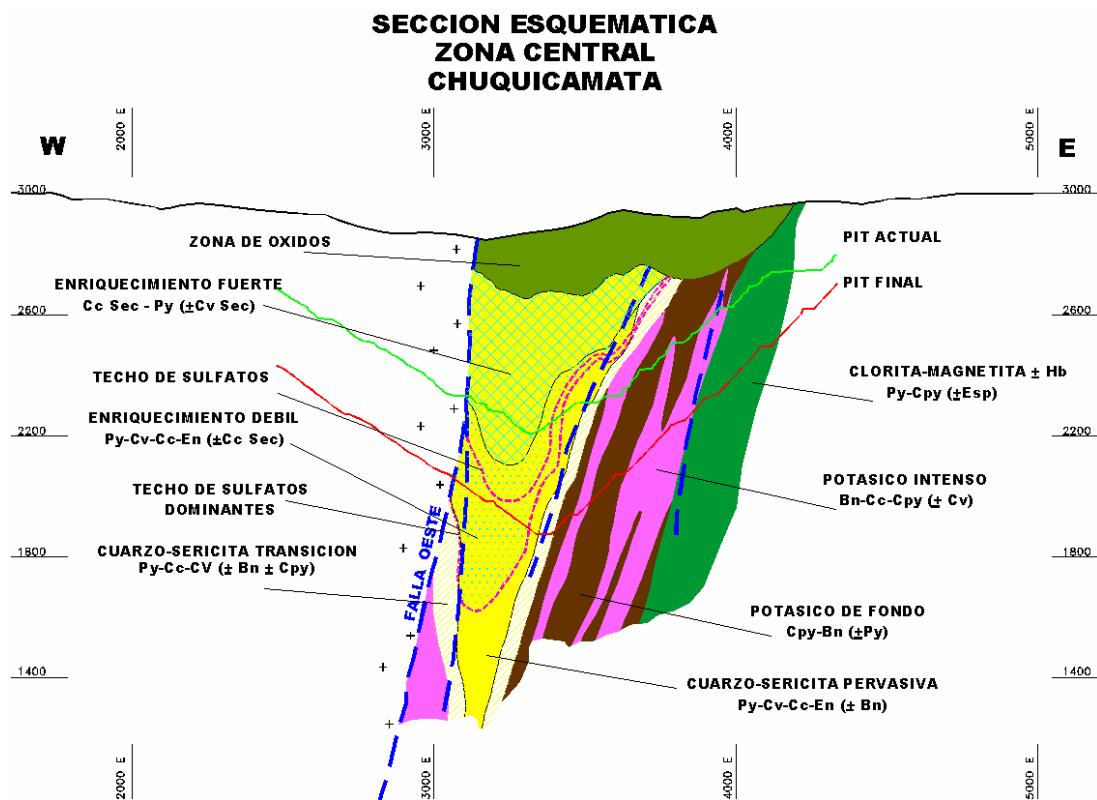


Figura 3.3: Perfil esquemático de las unidades de alteración, mineralización y zonas metalogénicas del yacimiento Chuquicamata. Dirección de Geología, Codelco-Norte.

3.4.1 Eventos Tempranos de Alteración con Asociaciones de Baja Pirita

3.4.1.1 Potásico de Fondo (PF)

Este tipo de alteración temprana, se caracteriza por el reemplazo selectivo de los máficos del Pórfido Chuqui por biotita secundaria, las plagioclasas están albitizadas y además suelen estar parcial y selectivamente alteradas a feldespato potásico, sericita y/o arcillas. La

magnetita original de la roca intrusita está destruida o hematizada. Biotita y feldespato potásico también ocurren en escasas microvetillas con cuarzo, calcita y sulfuros. Una característica distintiva de este tipo de alteración de fondo es que la textura original del Pórfido Chuqui está claramente preservada. La mineralización asociada a esta alteración ocurre predominantemente diseminada y, en menor medida, en microvetillas. Calcopirita es el sulfuro predominante y solo localmente puede predominar bornita o pirita. En cantidades muy subordinadas se han reconocido otros sulfuros como digenita, covelina, calcosina, blenda y molibdenita.

El potásico de fondo es el evento más temprano de alteración y mineralización, típicamente tardimagmático, y está ampliamente distribuido en las partes Este y Norte del depósito. Sin embargo, en otros sectores se reconocen relictos que indican que esta alteración estaba distribuida en todo el yacimiento, siendo posteriormente sobreimpuesta y obliterada por alteraciones posteriores. La edad del evento de alteración potásica de fondo esta datada entre 33,4 Ma y 34,0 Ma (Reynolds et al., 1998; Arnott, 2003).

3.4.1.2 Alteración Clorítica (CMH)

La alteración clorítica selectiva de los máficos, primarios o secundarios, y la aparición de vetillas de clorita ocurren en los márgenes del depósito. En las partes altas del yacimiento, este límite clorítico concuerda también con la aparición de magnetita primaria preservada, demarcando simultáneamente el fin del potásico de fondo. Sin embargo, en pozos más profundos se ha detectado la ocurrencia de zonas marginales de baja ley con muy escasa clorita, pero que contienen magnetita primaria preservada y/o horblenda fresca preservada, no biotizada, por lo cual tampoco puede ser considerada como pertenecientes al potásico de fondo. Por dicha razón, a estas asociaciones marginales de baja ley se les ha preferido llamar, en forma genérica, alteración CMH, que queda definida por cloritización selectiva de los máficos y/o magnetita primaria preservada y/o horblenda primaria fresca, en cualquiera de los casos con textura predominantemente preservada. La albitización selectiva de las plagioclasas y microvetillas de calcita y ankerita también son características de este tipo de alteración. La mineralización de baja ley del CMH se presenta diseminada con muy bajo volumen total de sulfuros y con la asociación característica pirita+/- calcopirita.

3.4.1.3 Feldespato Potásico – Cuarzo de Grano Fino (K-Sil)

La alteración denominada en Chuquicamata “K-Sil”, consiste en un reemplazo moderado a intenso de los feldespatos y la biotita por feldespato potásico secundario, en algunos casos acompañado por albita secundaria y cuarzo. La textura original del pórfido se observa de parcial a totalmente destruida y obliterada, adquiriendo un color gris característico. Al microscopio, la fábrica de este tipo de alteración se presenta fuertemente cataclástica, conteniendo frecuentemente una microbrecha con matriz fina de cuarzo micro a criptocristalino y feldespato (Siña et al., 2006). Cuarzo y feldespato potásico también ocurren en microvetillas. En la zona hipógena del depósito es muy común la ocurrencia significativa en el K-Sil, de anhidrita diseminada y en vetillas. La mineralización asociada a la alteración K-Sil, ocurre preferentemente en vetillas y microvetillas y es, por lo general, importante en cantidad y aporte cuprífero, pero de distribución irregular. Las asociaciones características

son bornita con +/- digenita +/- covelina o bien, calcopirita con +/- covelina +/- bornita +/- digenita.

3.4.1.4 Vetas y Vetillas de Cuarzo - Molibdenita

La mineralización de cuarzo–molibdenita ocurre en cantidades importantes como vetas y vetillas bandeadas, en el eje central del depósito, mostrando una parcial coincidencia espacial con la alteración cuarzo-sericítica tardía (descrita más adelante). Sin embargo las relaciones de contacto con las vetillas, asociadas al evento cuarzo-sericítico tardío, indican que el evento de cuarzo-molibdenita es anterior a éste y que no tienen relación temporal ni genética. Esta relación temporal está respaldada por dataciones radiométricas que indican que el evento de cuarzo-molibdenita ocurrió a los 32 Ma (Dirección de Geología, 2006). Este evento de vetas y vetillas de cuarzo-molibdenita, es el más importante y el que introdujo la mayor cantidad de molibdeno al sistema. De tal forma, que el principal control geológico de la ley de molibdeno está dado por la frecuencia volumétrica de vetas y vetillas de cuarzo-molibdenita (Ossandón et al., 2001), parámetro que refleja la intensidad de este evento en las distintas partes del depósito.

3.4.1.5 Sericita Gris-Verde Temprana

Esta alteración se caracteriza por la fuerte destrucción de la textura original de la roca, debido al reemplazo de los minerales del Pórfido Chuqui por un agregado de sericita, cuarzo, abundantes sulfuros de cobre diseminado y algo de feldespato potásico. La ocurrencia de este tipo de alteración puede presentarse como parches pervasivos, de forma irregular o como halos de vetillas tempranas, frecuentemente subparalelas, de cuarzo, cuarzo-bornita o cuarzo-molibdenita. La mineralización asociada a la sericita gris-verde ocurre finamente diseminada y es abundante. Se compone de las mismas asociaciones sin pirita presentes en el “K-Sil”: bornita +/- digenita +/- calcosina +/- covelina o bien calcopirita +/- bornita +/- covelina +/- digenita.

Exista una relación espacial entre la sericita gris-verde y el “K-Sil”, así como entre la sericita gris-verde y las vetas de cuarzo-molibdenita. Por lo general, la sericita gris-verde y su mineralización de sulfuros se observan cortando tanto al “K-Sil” como a las vetas de cuarzo-molibdenita, pero también se ha encontrado la relación inversa, lo que sugiere que son probablemente cercanos en el tiempo. Debido a esta correlación espacial entre “K-Sil” y sericita gris-verde temprana y a sus características comunes, ambas se han englobado funcionalmente en una unidad de alteración mayor, que se ha denominado Potásico Intenso (PI).

3.4.2 Eventos Tardíos de Cuarzo-Sericita con Asociaciones de Alta Pirita

La mayor parte de la mitad Oeste del depósito Chuquicamata consiste en alteración cuarzo-sericítica pervasiva con mineralización característica de alta pirita y sulfuros de cobre. Esta alteración consiste esencialmente en agregados de sericita, cuarzo y pirita que obliteran la textura original del pórfido, mediante el reemplazo intenso de los feldespatos y la biotita. También ocurren cantidades menores de arcillas del tipo caolinita, reemplazando principalmente a plagioclasas y escasas vetillas localizadas de alunita-cuarzo. Varios pulsos de mineralización sulfurada asociada a esta etapa fílica tardía, reflejan una evolución de asociaciones de alta pirita, que se van superponiendo en el tiempo y el espacio, según un paulatino incremento en su estado de sulfuración: pirita-calcopirita, pirita-digenita (+/- bornita), pirita-covelina (+/- enargita), pirita-enargita (+/- blenda +/- tenantita). El evento más tardío de pirita-enargita es muy importante y constituye el principal aporte de arsénico al sistema. Se localiza preferentemente en el sector Sur del depósito, aunque también se extiende hacia la zona central.

En zonas con alteración cuarzo-sericítica tardía pueden reconocerse alteraciones tempranas relictas o bandas irregulares que representan texturas “fantasmas” de alteraciones tempranas (“K-Sil” o sericita gris-verde), a veces como halo de vetillas tempranas, con abundantes sulfuros finamente diseminados, que sugieren que antes de la superposición del evento tardío existió mineralización temprana de alta ley, asociada a alteración potásica intensa. A las zonas más o menos continuas que presentan estas características, se las ha denominado Potásico Intenso Relicto (PIR).

3.5 Zonas Supérgenas

La actividad supérgena en Chuquicamata originó importantes cambios en la parte más alta del yacimiento, generándose amplias zonas lixiviadas, oxidadas, zonas con enriquecimiento secundario y lixiviación total o parcial de los sulfatos de calcio. Según dataciones radiométricas K – Ar en alunitas supérgenas, obtenidas al interior de estas zonas, los procesos supérgenos de Chuquicamata ocurrieron entre los 19 Ma y los 15 Ma atrás (Sillitoe y McKee, 1996). Uno de los efectos más notorios y resaltantes de la actividad supérgena en la parte superior del depósito es la lixiviación parcial o total de estos sulfatos. En efecto, en la zona primaria, donde no se reconocen efectos de la actividad supérgena, la anhidrita y el yeso están sellado la roca. Por el contrario, la lixiviación de dichos sulfatos genera cavidades y fracturas abiertas, originándose gradacionalmente una roca más porosa y con mayor fracturamiento. El sulfuro secundario más importante en la zona de enriquecimiento es calcosina, pero también hay cantidades significativas de covelina secundaria.

IV CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL YACIMIENTO CHUQUICAMATA

4.1 Introducción

El macizo rocoso que conforma el yacimiento, está compuesto de unidades de roca con características geológicas y geotécnicas más o menos homogéneas, las que se encuentran clasificadas y caracterizadas en Unidades Geotécnicas que abarcan todo el depósito. Por otra parte, el yacimiento también se encuentra dividido en Dominios Estructurales, definidos en función de la distribución, orientación y e influencia de las estructuras para la estabilidad del macizo rocoso. Se describen en este capítulo las unidades geotécnicas y los dominios estructurales definidos en la mina Chuquicamata por la Dirección de Geotecnia del Codelco Norte, según el Modelamiento Geotécnico de Mina Chuquicamata año 2005 (Dirección de Geotecnia, Codelco-Norte, 2005).

4.2 Unidades Geotécnicas

A partir del año 1999, La Dirección de Geotecnia de Codelco Norte realiza la caracterización del yacimiento Chuquicamata sobre la base del modelamiento de las Unidades Geotécnicas Básicas (UGEOTB), que consisten en cuerpos de características geotécnicas relativamente homogéneos y que son, en general, el resultado de la sobreimposición de las unidades de alteración a las unidades litológicas. En forma sistemática, el resultado de los levantamientos geotécnicos de bancos, sondajes y labores subterráneas se ha integrado en una base de datos que permite modelar los cuerpos correspondientes.

De acuerdo al modelo de Unidades Geotecnia Básicas (UGEOTB), realizado en el año 2005 por la Dirección de Geotecnia, en el yacimiento se encuentran definidas las siguientes UGEOTB, las que se muestran en la Figura 4.1 en un modelo de bloques isométrico del rajo Chuquicamata.

4.2.1 Unidad Geotécnica Granodiorita Fortuna (GDF)

La unidad geotécnica Granodiorita Fortuna está compuesta exclusivamente de la unidad litológica del mismo nombre, la cual se describe como una roca de textura equigranular de grano medio a grueso, con abundante horblenda las que alcanzan tamaños entre 4 mm y 12 mm. Esta unidad es la de mayor expresión superficial de todas las unidades de la mina, distribuyéndose completamente en el talud Oeste, específicamente desde la parte media hacia el Oeste, en toda su extensión longitudinal siendo el límite occidental del yacimiento. El macizo rocoso se caracteriza por ser muy resistente a la compresión uniaxial (estimada sobre 100 MPa); con un fracturamiento predominantemente irregular donde las fracturas se encuentran selladas a levemente abierta (< 1 mm), generando bloques de tamaño que varía de entre 10 cm a 2 m de lado, con un promedio de 30 cm, los cuales se encuentran en general bien trabados. De acuerdo a este fracturamiento, se le asigna un RQD de entre 50% y 75%. Esta unidad se clasifica de acuerdo al GSI de Hoek y Brown (1997), como un macizo fuertemente fracturado en bloques con una condición Regular a Buena de las discontinuidades, equivalente al rango numérico de 40 a 55.

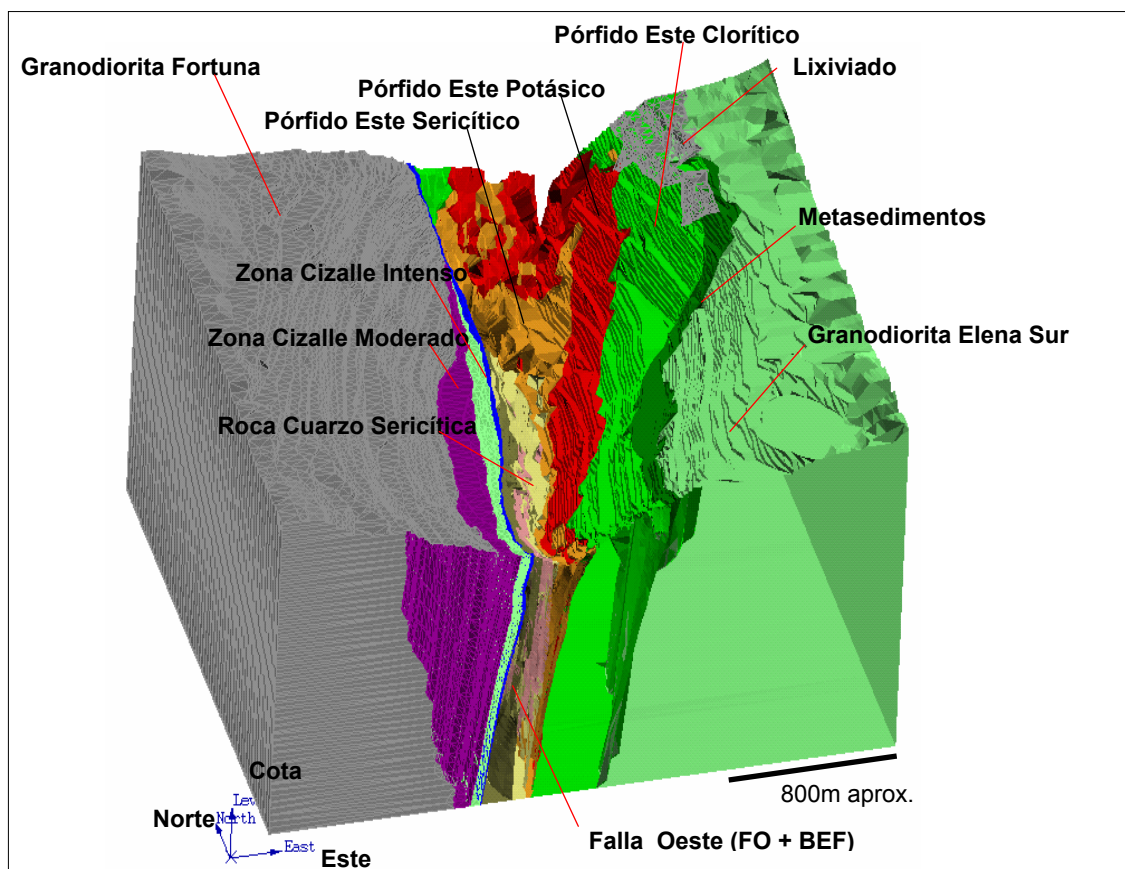


Figura 4.1: Modelo de bloques isométrico del rajo actual de Chuquicamata, mirando hacia el Norte, mostrando las Unidades Geotécnicas Básicas (Tomado del Modelamiento Geotécnico de la Mina Chuquicamata. Dirección de Geotecnia, 2005).

4.2.2 Unidad Geotécnica Zona de Cizalle Intenso (ZCI)

Esta unidad es parte de la zona de cizalle de la Falla Oeste y corresponde al sector con mayor grado de deformación que ha experimentado la Granodiorita Fortuna, debido a la actividad de la falla. La deformación que afecta a esta unidad es tal, que prácticamente se encuentra destruida la textura original, dejando un material con numerosos planos discontinuos de falla, biotitas orientadas y relleno arcilloso. Estudios microscópicos realizados por Niemeyer (1999), indican que esta unidad está compuesta mayoritariamente por cataclasitas.

Esta unidad se distribuye en superficie como una franja elongada y adosada a la traza occidental de la Falla Oeste, acotada hacia los márgenes del rajo por el Sur y hasta aproximadamente la coordenada local N-5.050 por el Norte. En profundidad se interpreta, con base en información de sondajes geotécnicos, como una franja paralela a la orientación de la Falla Oeste. La composición del material es similar a una brecha no cohesiva, con algunos bloques no mayores de 10 cm de lado en una matriz arcillosa que alcanza aproximadamente en 15% el volumen total, lo cual lo hace comportarse geomecánicamente como un material tipo suelo, prácticamente sin cohesión, lo que implica que en superficie, esta en constante desprendimiento.

En los bancos del rajo, la unidad ZCI se caracteriza por presentar una baja resistencia a la compresión uniaxial que varía de 5 MPa a 25 MPa. En el caso del fracturamiento, como se trata de un material arcilloso tipo suelo, se podría considerar una frecuencia de fracturas superior a 16, en este mismo sentido se puede estimar un RQD entre 0% y 50%. Se clasifica de acuerdo al Índice Geológico de Resistencia (GSI) principalmente como Desintegrado a Cizallado con una Mala condición de las discontinuidades, correspondiente a un rango numérico de 15 a 25.

4.2.3 Unidad Geotécnica Zona de Cizalle Moderado (ZCM)

Esta unidad es parte de la zona de cizalle adosado a la traza occidental de la Falla Oeste y corresponde al sector con menos grado de deformación de esta zona. La roca original corresponde a Granodiorita Fortuna, la que luego de eventos tectónicos se encuentra con la textura original parcialmente destruida, con planos de cizalle polidireccionales los cuales se cortan entre sí. Estos planos se caracterizan por presentar superficies suaves al tacto definidas por micas. Según estudios microscópicos llevados a cabo por Niemeyer (1999) las rocas de esta unidad corresponden principalmente a cataclasitas. Esta zona se distribuye en superficie en una franja Norte-Sur como un halo externo occidental de la zona de cizalle intenso, mientras que en profundidad se interpreta como franja externa paralela a la misma. El macizo rocoso se caracteriza por ser moderadamente resistente a la compresión uniaxial (estimada entre 25 MPa y 50 MPa). El fracturamiento se presenta en forma polidireccional con una frecuencia de fractura que varía entre 1 a 3 en los sectores más competentes y de 6 a 10 en los sectores con mayor deformación, esto genera bloques de tamaños de lado que varían entre 1,5 m a 5 cm, con una estimación promedio para un bloque de lado 25 cm, los cuales se encuentran poco trabados debido a que están insertos en una matriz arcillosa. Presenta valores de RQD entre 50% y 70%.

De acuerdo al índice geológico de resistencia (GSI) esta unidad se clasifica, principalmente, como un macizo Fracturado y Perturbado con una Mala condición de las discontinuidades. Esta unidad no es homogénea en toda su extensión, por lo que se presentan variaciones en

sus características, es así que en los sectores con mayor desarrollo de cizalle el GSI varía a un macizo Desintegrado con una Mala condición de las discontinuidades (D/P).

4.2.4 Unidad Geotécnica Roca Cuarzo Sericita (RQS)

La unidad Roca Cuarzo Sericítica es el resultado de la sobreimposición de la unidad de alteración cuarzo sericítica pervasiva a la unidad litológica Pórfido Este y geológicamente se define como una roca fuertemente alterada, con cuarzo como mineral dominante el que se presenta en forma de ojos recristalizados y en vetillos polidireccionales, esto en un agregado fino de sericita.

Con la última información obtenida de sondajes y labores subterráneas, asociado a mapeos de superficie, se pudo determinar que la unidad presenta una variabilidad importante en las calidades geotécnicas de la unidad, existiendo tres subunidades mapeables con calidades geotécnicas distintivas, asociadas al porcentaje de sericita y cuarzo. Estas Subunidades son las siguientes: Cuarzo Mayor Sericita (Q>S), Cuarzo Igual Sericita (Q=S) y Cuarzo Menor Sericita (Q<S).

4.2.4.1 Subunidad Geotécnica Cuarzo Mayor Sericita (Q>S)

Corresponde a una roca de textura totalmente obliterada, producto de la alteración cuarzo sericítica pervasiva, en que la característica principal es el contenido de cuarzo sobre sericita, con un porcentaje de cuarzo mayor a 60% de la roca. Se expone como una franja Norte-Sur principalmente en la parte central de la mina, en la forma de vetas en el centro del cuerpo cuarzo-sericítico, ocupando a todo lo largo la parte inferior del talud oeste, mientras que en profundidad ha sido reconocido continua en la porción Centro-Sur del yacimiento y como cuerpos colgados y aislados.

El macizo rocoso se caracteriza por ser resistente a la compresión uniaxial estimada en terreno, mediante el uso del martillo geológico (IRS). Esta unidad se presenta masiva, con algunos sectores de fracturas polidireccionales, que no supera las 5 ff/m en los sectores más fracturados. Es típico que en esta condición las fracturas se encuentren selladas. La relativa masividad de esta unidad permite estimar el parámetro RQD para la misma en el rango de 75% a 90%. De acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), esta unidad se clasifica como Fracturado en Bloques con una Buena condición de las discontinuidades.

4.2.4.2 Subunidad Geotécnica Cuarzo Igual Sericita (Q=S)

Corresponde a una roca de textura obliterada, producto de la alteración cuarzo sericítica pervasiva, en que la característica principal es el contenido de cuarzo semejante a sericita, con un porcentaje de cuarzo entre 25% y 60% de la roca. Se expone a lo largo de todo el cuerpo cuarzo-sericítico presentando la mayor extensión en área, en profundidad ha sido reconocida como la unidad dominante. Desde la coordenada N-4.500 hacia el Norte, se

presenta en forma de cuerpos aislados y colgados, desapareciendo en la coordenada N-5.000. Esta unidad grada hacia el Este a la unidad Pórfido Este Sericítico.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Moderadamente Resistente a la compresión uniaxial estimada en terreno, mediante el uso del martillo geológico (IRS). Esta unidad presenta sectores de diaclasas polidireccionales con ff/m de 5 a 10, que en general presentan una abertura de 2 mm a 3 mm. La relativa competencia de esta unidad permite estimar el parámetro RQD en el rango de 50% a 75%. De acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), esta unidad se clasifica como Fuertemente Fracturado en Bloques con una Regular condición de las discontinuidades.

4.2.4.3 Subunidad Geotécnica Cuarzo Menor Sericita (Q<S)

La unidad Cuarzo Menor Sericita corresponde a una roca de textura totalmente obliterada, producto de la alteración cuarzo sericítica pervasiva, en que la característica principal es el contenido de cuarzo muy menor a sericita, con un porcentaje de sericita mayor a 75% de la roca. Esta unidad se expone como una franja alargada Norte-Sur, principalmente en el flanco oriental de la Falla Oeste y como halo de estructuras mayores que cruzan la unidad. En profundidad se presenta como un cuerpo alargado que tiende a desaparecer y presentarse en forma aislada y colgada hacia la coordenada N-4.500.

El macizo rocoso se caracteriza por presentar una Baja resistencia a la compresión uniaxial estimada en terreno (IRS). Se presenta muy fracturada en el rango de 15 a 20 ff/m, con aberturas de 3 mm a 5 mm y relleno arcilloso. La Mala calidad de esta unidad permite estimar el parámetro RQD en el rango de 0% a 25%. De acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997) esta unidad se clasifica principalmente como Fracturada y Perturbada con una Mala a Regular condición de las discontinuidades.

4.2.5 Unidad Geotécnica Pórfido Este Sericítico (PES)

La unidad geotécnica Pórfido Este Sericítico es el resultado de la superposición de la unidad de alteración Sericítica-Potásica a la unidad litológica Pórfido Este. Petrográficamente se define como una granodiorita a diorita cuarcífera de textura porfídica con fenocristales de tamaño medio y una masa fundamental fina, la cual se encuentra con una alteración de feldspatos a sericita en forma pervasiva débil, por lo que aún se distingue la textura original de la roca. Se distribuye como una franja Norte-Sur en la parte centro y Sur de la mina, mientras que en el sector Norte se distribuye sin una orientación preferencial y es la unidad que predomina en este sector. Hacia el Oeste presenta contactos gradacionales con la unidad Roca Cuarzo-Sericítica, hacia el Este grada a la unidad Pórfido Este Potásico en el centro y Sur del yacimiento.

El macizo rocoso se caracteriza por ser moderadamente resistente a la compresión uniaxial (estimada de 75 MPa a 100 MPa), en cuanto al fracturamiento este se presenta intenso, en direcciones no ortogonales entre sí, con lo que genera una blocosidad irregular dejando

bloques de tamaño entre 15 cm y 35 cm de lado, los cuales se encuentran poco trabados. Una característica importante es que estas fracturas se presentan abiertas (entre 2 mm y 3 mm), lo que es muy desfavorable frente a las tronaduras ya que estas ayudan a soltar estos bloques generando un fracturamiento escalonado. De acuerdo a estas características es que se estima un valor de RQD variable entre 50% y 75%, el que se degrada a valores de 25% hasta 50% en sectores de mayor fracturamiento. Esta unidad se clasifica, de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como un macizo Fuertemente Fracturado en bloques con una Regular condición de las discontinuidades. Esta clasificación responde al alto fracturamiento desarrollado por esta unidad, incluso puede llegar a clasificarse como Fracturado y Perturbado en los sectores en que el fracturamiento se ve condicionado por la presencia de estructuras mayores, las cuales generan un halo de daño que se suma a las estructuras menores o diaclasas.

4.2.6 Unidad Geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK)

Es el resultado de la superposición de la unidad de alteración Potásica (Potásica de Fondo, "K-Sil", Sericitica gris verde y Potásica intensa) a la unidad litológica Pórfido Este. Petrográficamente se define como una roca con textura porfídica, con fenocristales en contacto de tamaño medio y una masa fundamental fina que escasamente aparece en la roca. La alteración Potásica esta constituida por feldespato potásico, que se presenta como venillas y cadenas de megacristales. Esta unidad se distribuye en la parte central de la mina como una franja discontinua, con una disposición Nor-Este, desde el centro hacia el Sur, en tanto que hacia el Norte se distribuye como porciones aisladas dentro de la unidad geotécnica Pórfido Este Sericítico.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Muy Resistente a la compresión uniaxial, estimada en terreno mediante martillo geológico, constituyéndose en una de las unidades más competentes de la Mina Chuquicamata. El fracturamiento se presenta irregular, en forma polidireccional con una frecuencia de 1 a 3 fracturas por metro, dejando bloques de tamaño desde 2 m a 30 cm de lado, los cuales se encuentran bien trabados. En general se presenta una alternancia de sectores con fracturamiento y otros masivos, lo que en promedio le da una buena competencia al macizo de este sector. Otra característica es que debido al alto contenido de feldespato potásico, tanto en la matriz como rellenando vetillas, la dureza se encuentra por sobre el resto de las UGEOB, lo que se traduce en una unidad geomecánicamente muy competente. Para esta unidad se han medido valores de RQD que varían de 75% a 90%. Se clasifica de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como un macizo Fracturado en Bloques, con una Buena condición de las discontinuidades, lo que representa un macizo conformado por bloques que se encuentran bien trabados, con discontinuidades moderadamente lisas y débilmente interperizadas.

4.2.7 Unidad Geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC)

Es el resultado de la superposición de la unidad de alteración clorítica (MCH) a la unidad litológica Pórfido Este, la cual se define como una roca de textura porfídica, con fenocristales en contacto de tamaño medio y una masa fundamental fina que escasamente aparece en la roca. La alteración esta constituida por clorita que invade parcialmente la textura de la roca, en forma de venillas y relleno de fracturas. Se distribuye en la parte media y superior del talud

Este, principalmente en la parte Sur donde se encuentra en forma casi exclusiva, en cambio en el sector Norte se restringe a una franja Norte-Sur, ubicada en la parte superior del talud. Hacia el Oeste central se encuentra en contacto gradacional con las unidades PES y PEK, mientras que hacia el Este se reconoce en disconformidad estructural con las unidades Metasedimentos y Granodiorita Elena.

El macizo rocoso se caracteriza por ser resistente a la compresión uniaxial (estimada sobre 100 MPa). El fracturamiento es escaso, desarrollando bloques regulares con tamaño promedio sobre 50 cm de lado, los cuales se encuentran moderadamente trabados. En general estas fracturas no se encuentran abiertas, por lo que los valores de RQD medidos oscilan entre 75% y 90%. Esta unidad se clasifica, de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como un macizo Fracturado en Bloques, con una Regular condición de las discontinuidades, la cual varía a Fuertemente Fracturado en bloques con una Buena a Regular condición de las discontinuidades, en los sectores en se exponen sistemas estructurales con sets de fracturas asociados y en el caso de las discontinuidades, generalmente se presentan lisas con pátinas de óxidos de hierro (limonita).

4.2.8 Unidad Geotécnica Metasedimentos (MET)

Se compone de una asociación de rocas de origen sedimentario, volcánico e ígneo que ha sido afectada por un metamorfismo de contacto y dinámico, dando como resultado un conjunto de rocas parcialmente metamorfizadas, milonitizadas y rocas completamente silicificadas. En este conjunto se distinguen metasedimentos clásticos, metasedimentos químicos, milonitas, cataclasitas, andesitas volcánicas, rocas corneas y rocas deformadas indiferenciadas. Esta unidad se distribuye en el talud Este como una franja continua e irregular de orientación Norte-Sur entre las coordenadas N-2.650 y N-5.050. El cuerpo se encuentra colgado presentando contactos principalmente estructurales hacia el Oeste con la unidad PEC y hacia el Este con la unidad Granodiorita Elena.

El macizo rocoso se caracteriza por ser resistente a moderadamente resistente a la compresión uniaxial (estimada sobre 50MPa). El fracturamiento de esta unidad es intenso y no presenta orientaciones preferenciales, con una frecuencia de fracturas que varía de 15 a 20. Este fracturamiento genera una blocosidad irregular con bloques de tamaño promedio de 15 cm a 8 cm de lado respectivamente, los cuales se encuentran semitrabados. De acuerdo con este fracturamiento se estiman valores de RQD entre 25% y 50%. Esta unidad se clasifica de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como Muy Fracturado en Bloques con una Regular condición de las discontinuidades, esto corresponde al fracturamiento polidireccional que afecta a esta unidad y a que las discontinuidades presentan pátinas de calcita, arcilla y óxidos de hierro en zonas lixiviadas.

4.2.9 Unidad Geotécnica Granodiora Elena Sur (GES)

Está compuesta exclusivamente de la unidad litológica Granodiorta Elena, la cual se describe como una roca de textura equigranular de grano medio a grueso, con abundante biotita y hornblenda, afectada por alteración clorítica de carácter más bien regional, y que en algunos sectores se enmascara con lixiviación. Esta unidad se expone como una franja Norte-Sur que se desarrolla en la parte Este del rajo, siendo el límite oriental del yacimiento.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a la compresión uniaxial (estimada sobre 100MPa). El fracturamiento de esta unidad se manifiesta en direcciones bien definidas pero no ortogonales entre sí, mostrando buena correlación con la orientación de los sistemas estructurales mayores. En general los planos de fallas y diaclasas se encuentran cerrados o levemente abiertos, en este último caso se generan bloques de tamaño promedio de 25 cm de lado. Los valores de RQD varían de 50% a 75%. Esta unidad se clasifica de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), en un rango variable desde Fracturado a Muy Fracturado en Bloques con una Regular condición de las discontinuidades.

4.2.10 Unidad Geotécnica Lixiviado (LIX)

Se agrupan dentro de esta unidad, todas aquellas rocas que se encuentran afectadas por procesos de lixiviación parcial o pervasiva producto de sucesivos eventos de mineralización del yacimiento. Debido al desarrollo de la mina Chuquicamata, esta unidad presenta solo afloramientos locales en los sectores marginales del rajo. En el sector Norte se ha reconocido la continuidad de esta unidad a través de sondajes, bajo la cobertura de gravas y botaderos, presentando un piso muy irregular con espesores máximos de hasta 200 m, donde existe un claro control estructural.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Resistente a la compresión uniaxial estimada en terreno mediante el uso del martillo geológico (IRS). En cuanto al fracturamiento, este se presenta polidireccional, las superficies se encuentran levemente abiertas, entre 1 mm y 2 mm y por lo general bastantes alteradas. El bloque unidad promedio se define de lado 15 cm, mientras que el parámetro RQD se encuentra en el rango 50% a 58%. Esta unidad se clasifica, de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como Fuertemente Fracturado con una Regular a Mala condición de las discontinuidades.

4.2.11 Unidad Geotécnica Brecha Entre Falla (BEF)

Corresponde a una franja alargada Norte-Sur, compuesta exclusivamente por megabrechas tectónicas producto de las reactivaciones de la Falla Oeste. Esta unidad se distribuye principalmente en la parte media de la mina entre las coordenadas N-3200 y N-5000 con espesores de 20 m a 40 m en sección E-W. En profundidad se presenta un estrechamiento, siempre limitado por las dos trazas de la Falla Oeste.

El macizo rocoso se caracteriza por ser Moderadamente Resistente a la compresión uniaxial estimada en terreno (IRS). En cuanto al fracturamiento, este se presenta polidireccional, las superficies se encuentran selladas y rellenas, por lo general de hematina y salbanda arcillosa.

Presentando un RQD en el rango de 10% a 60%. Se clasifica de acuerdo al GSI de Hoek & Brown (1997), como de Fuertemente Fracturado en Bloques con una Regular condición de las discontinuidades.

4.3 Dominios Estructurales

4.3.1 Modelo conceptual de falla

El modelo conceptual utilizado para describir zonas de fallas desde el punto de vista geotécnico dentro del distrito minero de Chuquicamata es el propuesto por Caine et al. (1996). En éste se distingue un núcleo integrado por cataclasitas y salbandas, a lo largo del cual se considera se ha desarrollado la mayor parte del movimiento, flanqueado por una zona de daño con fallas pequeñas, fracturas, vetas y vetillas, para finalmente descubrir el protolito hacia los márgenes del modelo. En la figura 4.2 se muestra este modelo conceptual, donde la elipse k representa la magnitud y orientación relativa del tensor bidimensional de permeabilidad, asociado con cada uno de los componentes de la falla. Los factores que controlan k son la litología, la escala de la falla, el tipo de falla, el estilo de deformación y su historia de presión y temperatura de la falla, el porcentaje de los componentes de la zona de falla y la anisotropía de ésta.

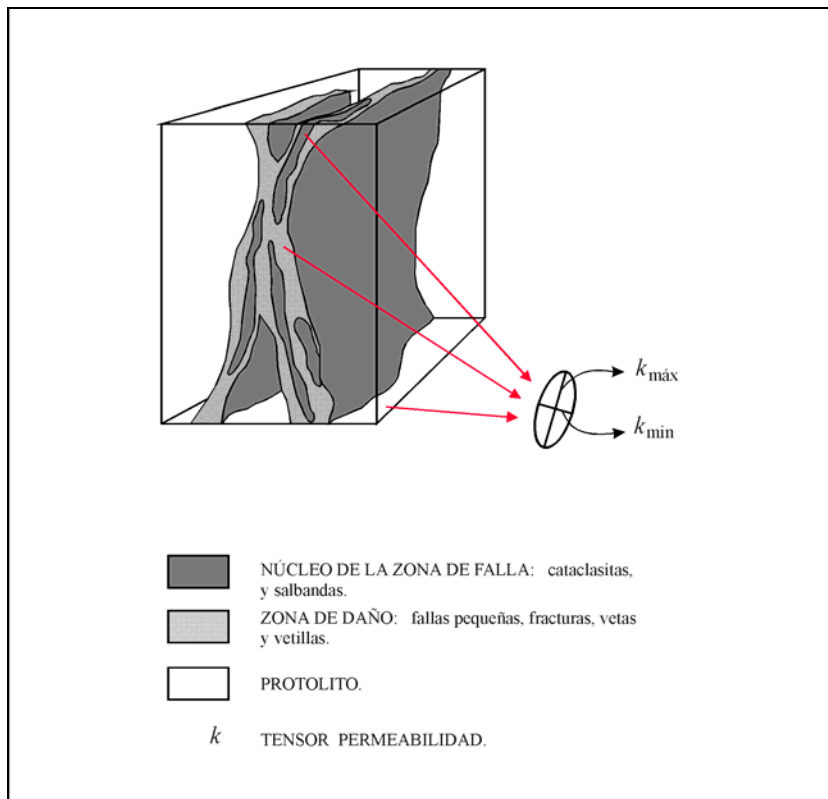


Figura 4.2: Modelo conceptual de una falla, según Caine et al. (1996)

De acuerdo al modelo conceptual presentado, las fallas y fracturas del yacimiento se han categorizado de acuerdo a la influencia, persistencia o continuidad. La influencia se entiende como el área que incorpora los conceptos de núcleo y zona de daño del modelo de Caine et al. (1996). Persistencia o continuidad se define como la corrida de las estructuras medida en superficie. De acuerdo a lo anterior se han definido tres tipos de estructuras diferenciables indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 4.1: Categorización de fallas y diaclasas en la mina Chuquicamata

Categoría	Influencia (m) (Núcleo + Zona de daño)	Persistencia (m)
VIF	≥0,5	> 100 (>2 Bancos dobles)
FT	<0,5	<100 (< 2 Bancos dobles)
Diaclasa	No presenta	Variable

Las estructuras VIF (Very Important Faults) corresponden a aquellas de mayor influencia y persistencia observables al interior del rajo Chuquicamata, las que en general definen límites de macrobloques y/o inestabilidades mayores a nivel intermedio (inter-rampas). Además, algunas de estas estructuras pueden presentar activación reciente a través de sus trazas, quedando esto manifestado por asentamientos diferenciales o volcamientos observables en los bancos de la mina. En los túneles de exploración y drenaje de Chuquicamata, donde generalmente no es posible observar la persistencia en rumbo o manteo, para definir las fallas importantes (VIF), prima el criterio de la zona de influencia igual o superior a 0,5 m, de los cuales generalmente, al menos 0,05 m corresponde al espesor del núcleo de las fallas VIF.

Las estructuras FT (Fault Traces) son de menor importancia, presentando influencias y persistencias reducidas por lo que afectan el comportamiento geotécnico solo a nivel básico (1 o 2 bancos en superficie, límite de cuñas en túneles). Cuantitativamente este tipo de estructuras corresponde a aproximadamente el 75% del total de fallas mapeadas en el rajo Chuquicamata.

Las diaclasas o fracturas (FR), corresponden a rupturas geológicas simples sin desplazamiento o con desplazamiento reducido (inferior a 10 cm), por lo que alcanzan a desarrollar núcleo y zona de daño muy reducido o inexistente. Generalmente presentan rellenos de poco espesor, producto de la circulación y precipitación de soluciones por sus aberturas. Pueden controlar inestabilidades a nivel básico (cuñas inestables en taludes de bancos o en túneles)

4.3.2 Distribución de los Dominios Estructurales

Los dominios estructurales corresponden a sectores del yacimiento que presentan características estructurales propias y distintivas en lo referente a las familias de estructuras, y cuyos límites quedan definidos por entes geológicos (fallas geológicas, contactos litológicos etc.). De acuerdo al modelo de caracterización geotécnica de Chuquicamata realizado por la Dirección de Geotecnia de Codelco-Norte, año 2005, sobre la base información proveniente de levantamiento estructural de bancos (80% de los datos) y sondajes diamantinos

orientados (20%), se encuentran definido 9 dominios estructurales en el yacimiento cuyos límites están definidos mayoritariamente por fallas importantes (Figura 4.3).

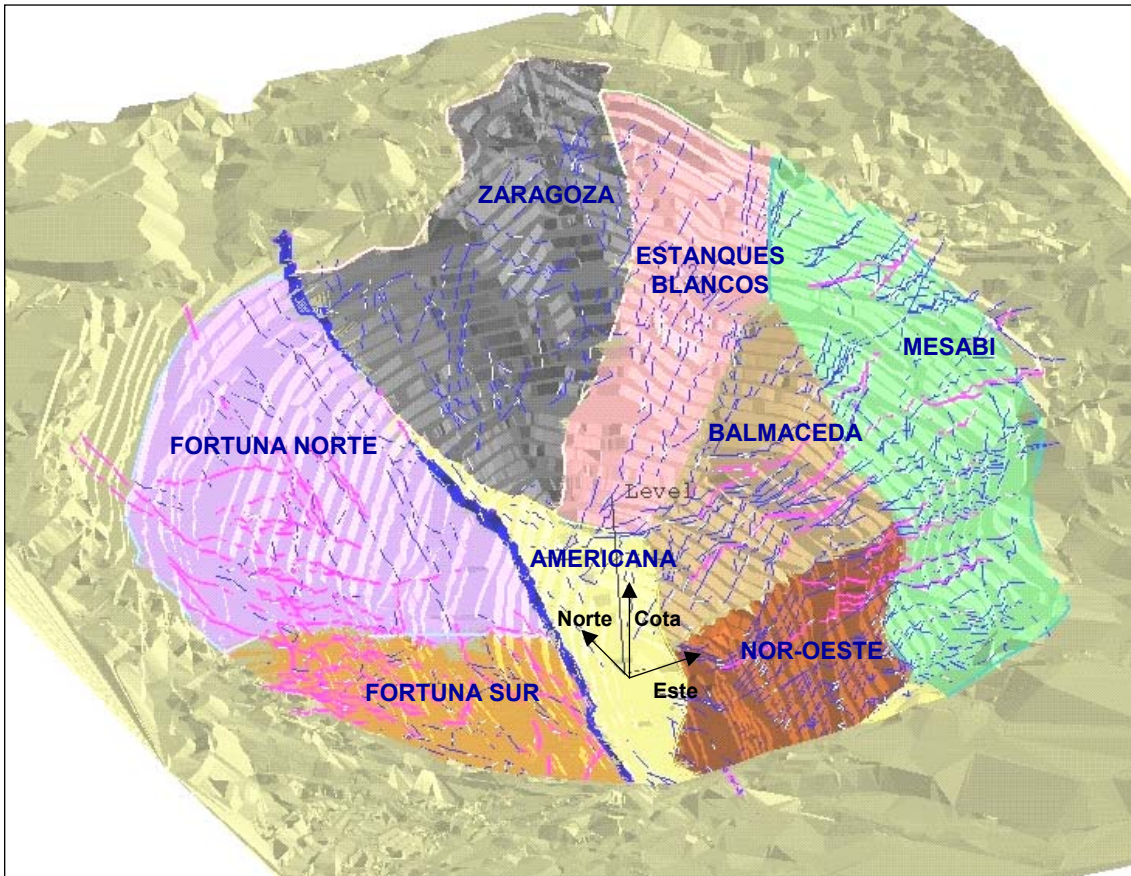


Figura 4.3: Distribución tridimensional en superficie de los Dominios Estructurales del Yacimiento Chuquicamata (Tomado del Modelamiento Geotécnico 2005, Dirección de Geotecnia). Vista en dirección Norte.
4.3.2.1 Dominio Estructural Fortuna Norte

Se define en la parte Norte del talud occidental, en la Granodiorta Fortuna, a partir de la coordenada N-4200. Se caracteriza por presentar sistemas VIF y FT relacionados entre sí de orientaciones predominantes Norte-Sur y Este-Oeste. Los sistemas de diaclasas también están relacionadas a las direcciones preferentes de fallas y a la orientación Nor-Este correspondiente a diaclasas de manteo intermedio (20°-50°). En la Tabla 4.2 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo (Dip) promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.2: Distribución de los principales Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Fortuna Norte

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Suborizantal	0°-	40° ± 8°/289° ± 12°		34° ± 16°/119° ± 23°	

	40°			$40^{\circ} \pm 8^{\circ}/289^{\circ} \pm 12^{\circ}$	
Inclinado	41°-70°	$67^{\circ} \pm 27^{\circ}/271^{\circ} \pm 16^{\circ}$ $40^{\circ} \pm 8^{\circ}/289^{\circ} \pm 12^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 10^{\circ}/262^{\circ} \pm 21^{\circ}$		$40^{\circ} \pm 8^{\circ}/289^{\circ} \pm 12^{\circ}$	$75^{\circ} \pm 9^{\circ}/356^{\circ} \pm 8^{\circ}$
Subvertical	71°-90°	$67^{\circ} \pm 27^{\circ}/271^{\circ} \pm 16^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ}/85^{\circ} \pm 15^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 5^{\circ}/85^{\circ} \pm 18^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 10^{\circ}/262^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 8^{\circ}/262^{\circ} \pm 9^{\circ}$ $87^{\circ} \pm 3^{\circ}/86^{\circ} \pm 9^{\circ}$			$82^{\circ} \pm 7^{\circ}/174^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $80^{\circ} \pm 9^{\circ}/171^{\circ} \pm 15^{\circ}$ $75^{\circ} \pm 9^{\circ}/356^{\circ} \pm 8^{\circ}$ $83^{\circ} \pm 6^{\circ}/356^{\circ} \pm 8^{\circ}$

$40^{\circ} \pm 8^{\circ}/289^{\circ} \pm 12^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas
 $73^{\circ} \pm 10^{\circ}/262^{\circ} \pm 21^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)
 $67^{\circ} \pm 27^{\circ}/271^{\circ} \pm 16^{\circ}$: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

En la Figura 4.4 se presenta la distribución de los principales sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia) donde se distinguen los rumbos preferentes NS y EW (sistemas en fondo color amarillo de la Tabla 4.2).

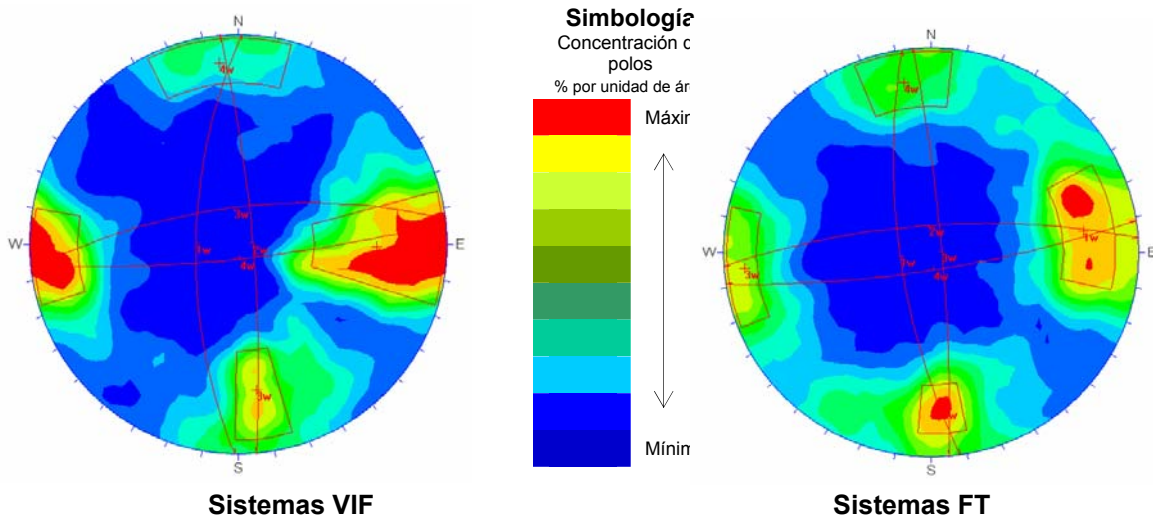


Figura 4.4: Red Estereográfica Dominio Estructural Fortuna Norte, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.2 Dominio Estructural Fortuna Sur

Se define en el talud Oeste, aproximadamente al Sur de la coordenada N-4.200. En este dominio se han reconocido dos sistemas de categoría VIF bien marcados, NS a NE y NW a EW. Los sistemas de fallas FT presentan una tendencia dominante de dirección EW. En los sistemas de diaclasa predomina la dirección NS. En la Tabla 4.3 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.3: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Fortuna Sur

Dip	NS	NW	NE	EW
-----	----	----	----	----

Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20°, 160°-200°
Horizontal	0°-40°	40° ±11°/109° ±21°		40° ±11°/109° ±21°	
Inclinado	41°-70°	55°±9°/285°±14° 40° ±11°/109° ±21° 51° ±14°/282° ±21°	74°±15°/238° ±10° 73°±9°/240° ±16°	55°±9°/285°±14° 75°±9°/333° ±17° 73°±16°/301° ±16° 40° ±11°/109° ±21°	
Vertical	71°-90°	81° ±8°/260° ±8°	83°±6°/195°±12° 74°±15°/238° ±10° 73°±9°/240° ±16°	75°±9°/333° ±17° 73°±16°/301° ±16°	83°±6°/195°±12° 86°±3°/173°±9° 80°±9°/345°±17°

40° ±8°/289° ±12°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas
73°±9°/240° ±16°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)
55°±9°/285°±14°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)
Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

En la Figura 4.5 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia). Este dominio estructural se presenta desarrollado en la unidad litológica Granodiorita Fortuna con alteración supérgena débil y está especialmente asociada a la denominada zona de cizalle.

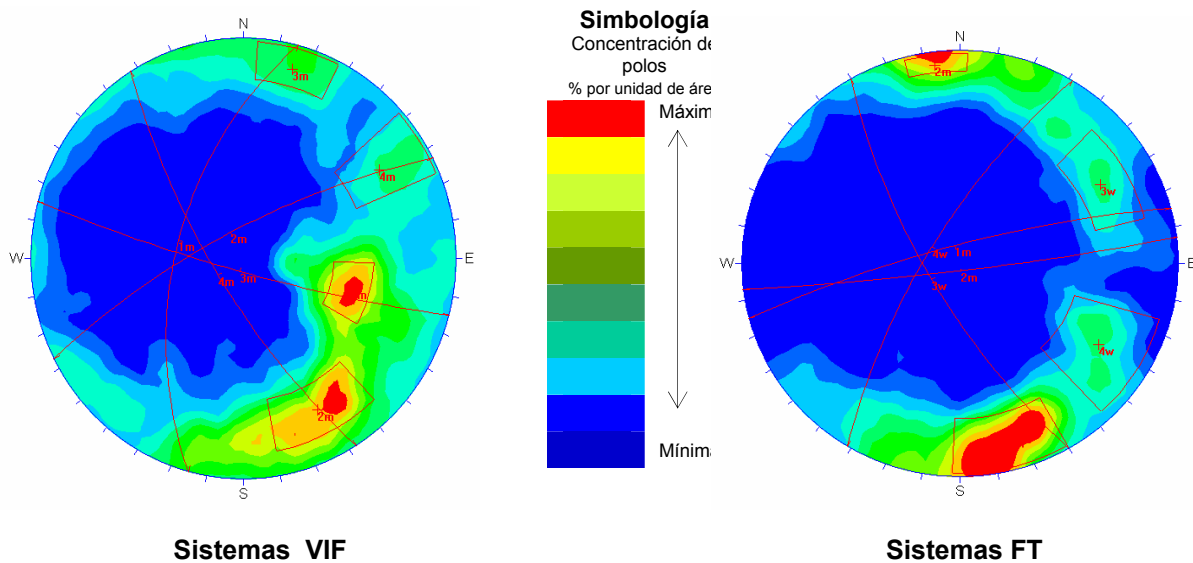


Figura 4.5: Red Estereográfica Dominio Estructural Fortuna Sur, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.3 Dominio Estructural Americana

El dominio estructural Americana se define como una franja estructural de disposición general Norte-Sur, adosada a la traza oriental de la Falla Oeste. Los dos sistemas principales de estructuras geológicas de categoría VIF, presentan orientación NS a NE. Los sistemas de fallas FT presentan orientación preferente NE con manteos subverticales. En la Tabla 4.4 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.4: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Americana

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°	$43^{\circ} \pm 17^{\circ} / 109^{\circ} \pm 19^{\circ}$		$43^{\circ} \pm 17^{\circ} / 109^{\circ} \pm 19^{\circ}$	
inclinado	41°-70°	$43^{\circ} \pm 17^{\circ} / 109^{\circ} \pm 19^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 16^{\circ} / 68^{\circ} \pm 26^{\circ}$	$73^{\circ} \pm 16^{\circ} / 68^{\circ} \pm 26^{\circ}$	$43^{\circ} \pm 17^{\circ} / 109^{\circ} \pm 19^{\circ}$	$75^{\circ} \pm 7^{\circ} / 359^{\circ} \pm 17^{\circ}$ $67^{\circ} \pm 8^{\circ} / 12^{\circ} \pm 18^{\circ}$ $78^{\circ} \pm 11^{\circ} / 195^{\circ} \pm 17^{\circ}$
Subvertical	71°-90°	$82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 110^{\circ} \pm 19^{\circ}$ $85^{\circ} \pm 4^{\circ} / 254^{\circ} \pm 12^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 16^{\circ} / 68^{\circ} \pm 26^{\circ}$	$84^{\circ} \pm 5^{\circ} / 228^{\circ} \pm 9^{\circ}$ $83^{\circ} \pm 6^{\circ} / 69^{\circ} \pm 13^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 16^{\circ} / 68^{\circ} \pm 26^{\circ}$	$85^{\circ} \pm 4^{\circ} / 295^{\circ} \pm 10^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 10^{\circ} / 319^{\circ} \pm 16^{\circ}$ $83^{\circ} \pm 6^{\circ} / 152^{\circ} \pm 19^{\circ}$ $83^{\circ} \pm 6^{\circ} / 120^{\circ} \pm 19^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 4^{\circ} / 302^{\circ} \pm 15^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 5^{\circ} / 158^{\circ} \pm 10^{\circ}$ $83^{\circ} \pm 6^{\circ} / 337^{\circ} \pm 10^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 3^{\circ} / 304^{\circ} \pm 17^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 4^{\circ} / 124^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$75^{\circ} \pm 7^{\circ} / 359^{\circ} \pm 17^{\circ}$ $67^{\circ} \pm 8^{\circ} / 12^{\circ} \pm 18^{\circ}$ $78^{\circ} \pm 11^{\circ} / 195^{\circ} \pm 17^{\circ}$

$73^{\circ} \pm 16^{\circ} / 68^{\circ} \pm 26^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas

$85^{\circ} \pm 4^{\circ} / 254^{\circ} \pm 12^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

$82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 110^{\circ} \pm 19^{\circ}$: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

En la Figura 4.6 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia).

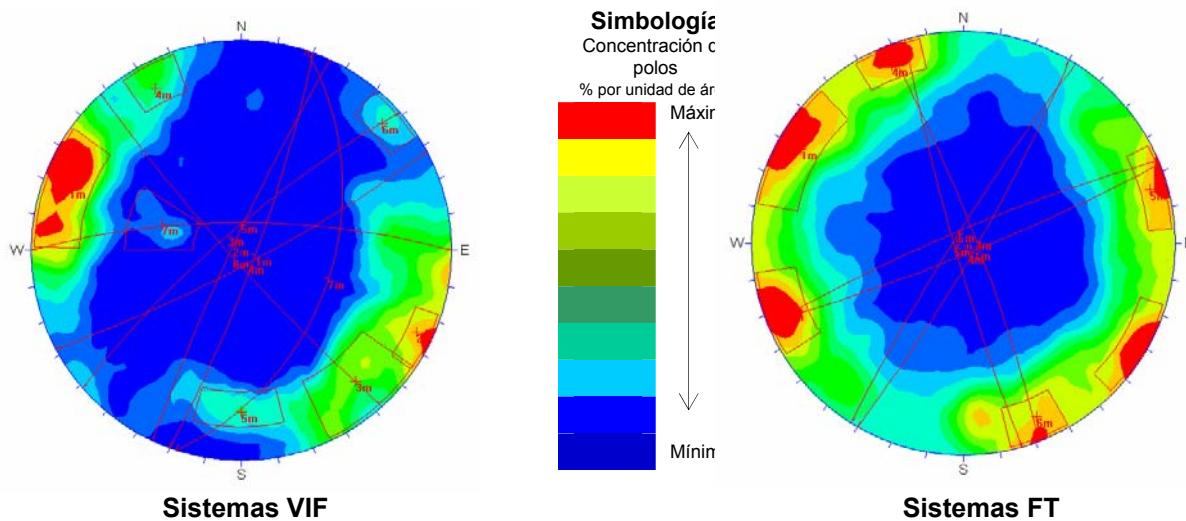


Figura 4.6: Red Estereográfica Software DIPS 5.0. Dominio Estructural Americana, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.4 Domino Estructural Balmaceda

El Dominio Estructural Balmaceda se ha definido en la porción central del talud Este de la mina Chuquicamata. Sus sistemas principales de fallas VIF y FT corresponde a la orientación NW. En la Tabla 4.5 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.5: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Balmaceda

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°,250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°,290°-340°	340°-20°,160°-200°
Subhorizontal	0°- 40°		74°±11°/28°±26°		
Inclinado	41°-70°		78°±11°/202°±27° 74°±11°/28°±26°	65°±12°/337°±23°	78°±11°/202°±27° 63°±12°/193°±21° 74°±11°/28°±26°
Subvertical	71°-90	79°±11°/270°±13° 80°±8°/260°±9°	80°±9°/218°±15° 80°±9°/40°±8° 78°±11°/202°±27° 83°±6°/33°±21° 74°±11°/28°±26°	83°±6°/335°±24° 65°±12°/337°±23°	80°±9°/176°±23° 83°±6°/359°±21° 78°±11°/202°±27° 83°±6°/335°±24° 83°±6°/33°±21° 63°±12°/193°±21° 74°±11°/28°±26°

80° ± 8°/260° ± 9°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas

78°±11°/202° ±27°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

80°±9°/218°± 15°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

En la Figura 4.7 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia).

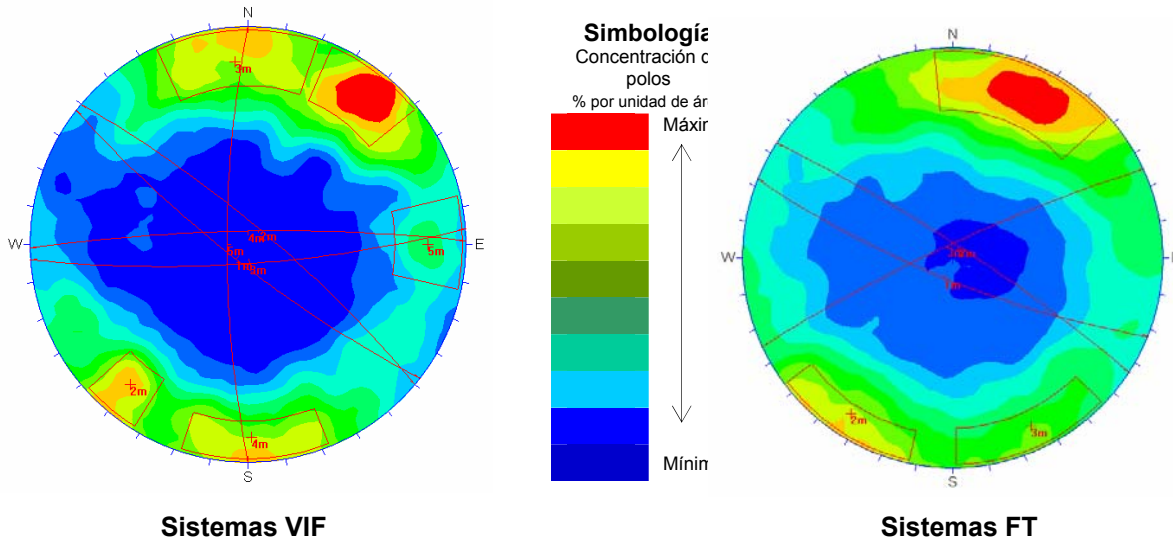


Figura 4.7: Red Esterográfica Dominio Estructural Balmaceda, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.5 Dominio Estructural Estanques Blancos

El dominio estructural Estanques Blancos se ha definido en la parte oriental superior del talud Este de la Mina Chuquicamata. En la Tabla 4.6 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo

fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.6: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Estanques Blancos

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°				
Inclinado	41°-70°		71°±8°/194°±21° 67°±15°/194°±26° 64°±14°/201°±28°	73°±16°/140°±23° 75°±14°/140°±23°	71°±8°/194°±21° 67°±15°/194°±26° 75°±10°/360°±15° 64°±14°/201°±28°
Subvertical	71°-90°	79°±8°/278°±9° 83°±7°/251°±7°	71°±8°/194°±21° 67°±15°/194°±26° 83°±7°/251°±7° 64°±14°/201°±28°	73°±16°/140°±23° 79°±10°/321°±14° 75°±14°/140°±23° 86°±3°/325°±17° 81°±9°/149°±13°	71°±8°/194°±21° 67°±15°/194°±26° 75°±10°/360°±15° 64°±14°/201°±28°

64° ± 14°/201° ± 28°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas

79° ± 8°/278° ± 9°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

71° ± 8°/194° ± 21°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

En la Figura 4.8 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia). Se aprecia el predominio de orientaciones NE y EW con manteos intermedios a altos.

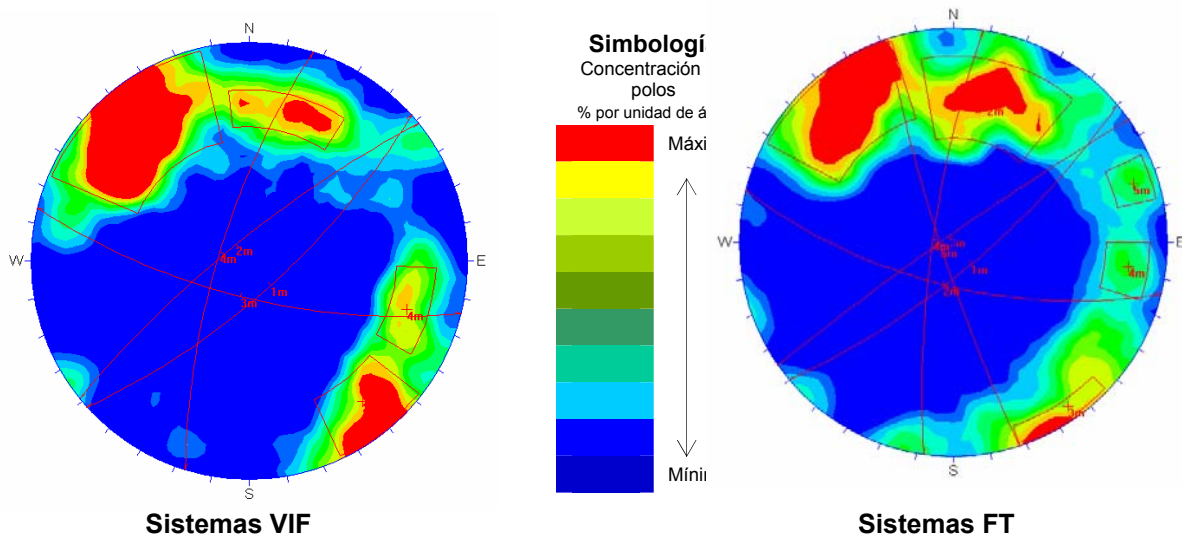


Figura 4.8: Red Estereográfica Dominio Estructural Estanques Blancos, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.6 Dominio Estructural Nor-Oeste

El Dominio Estructural Nor-Oeste está definido en la parte centro-Sur del talud Este del yacimiento. En la Tabla 4.7 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.7: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Nor-Oeste

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°		40° ±20°/211° ± 31°		40° ±20°/211° ± 31°
inclinado	41°-70°		40° ±20°/211° ± 31°	70°± 12°/329° ±25°	70°± 12°/329° ±25° 40° ±20°/211° ± 31°
Subvertical	71°-90°	80° ±9°/253° ± 24° 86° ±3°/72° ± 20° 86° ±3°/66° ± 14° 83°±6°/250°±18° 87°±2°/72°±16°	80° ±9°/253° ± 24° 86° ±3°/72° ± 20° 81°± 8°/252° ±20° 86° ±3°/66° ± 14° 83°±6°/250°±18° 87°±2°/72°±16°	70°± 12°/329° ±25° 80°± 9°/305° ±14°	80°±9°/345°±22° 70°± 12°/329° ±25°

40° ±20°/211° ± 31°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas

86°±3°/66° ±14°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

86°± 9°/253° ± 24°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

La ocurrencia de las orientaciones preferenciales de este dominio están estrechamente relacionadas a los afloramientos de la unidad geotécnica Metasedimentos que se encuentra afectada por metamorfismo de contacto y a la unidad litológica Pórfido Este con alteración potásica y clorítica. En la Figura 4.9 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia). Se aprecia el predominio de orientaciones NE a NS con manteos altos.

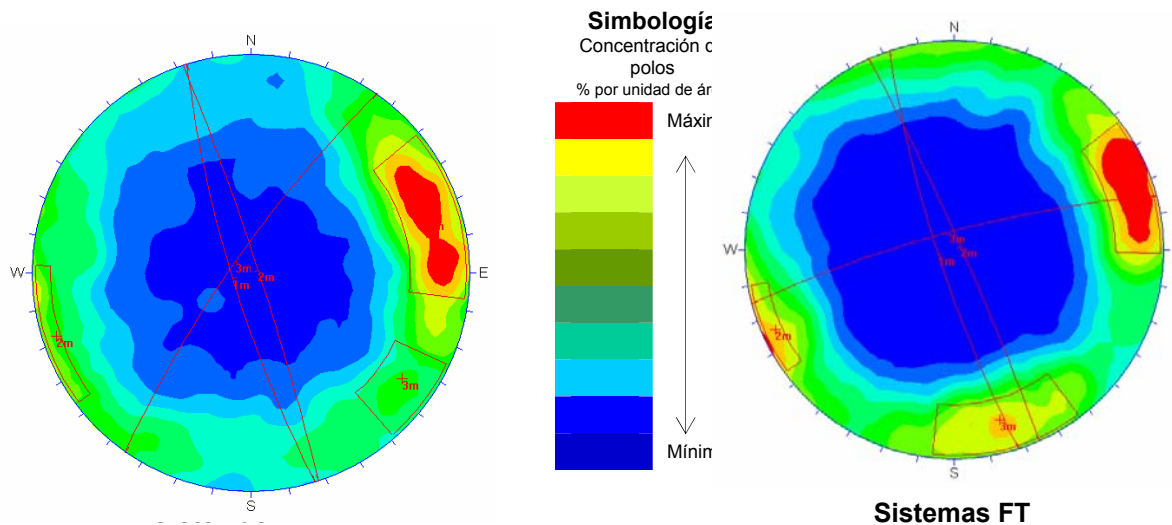


Figura 4.9: Red Estereográfica Dominio Estructural Nor-Oeste, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.7 Dominio Estructural Mesabi

Esta definido en los márgenes del yacimiento y su nombre se ha tomado de un sistema estructural reconocido a nivel distrital. En este dominio los sistemas de de fallas VIF y FT presenta orientación preferencial NS Y NW. En la Tabla 4.8 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.8: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Mesabi

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°			31°±7°/323°±16°	
Inclinado	41°-70°	66°±12°/265°±10°	72°±13°/226°±7° 85°±24°/48°±16°	77°±13°/346°±17° 66°±9°/144°±8°	77°±13°/346°±17°
Subvertical	71°-90°	79°±11°/234°±24° 80°±8°/271°±13° 78°±11°/236°±24° 78°±6°/275°±13° 82°±7°/70°±7° 66°±12°/265°±10°	79°±11°/234°±24° 85°±4°/37°±12° 78°±11°/236°±24° 85°±24°/48°±16° 82°±7°/70°±7° 72°±13°/226°±7°	77°±13°/346°±17° 80°±7°/306°±8° 66°±9°/144°±8°	77°±13°/346°±17°

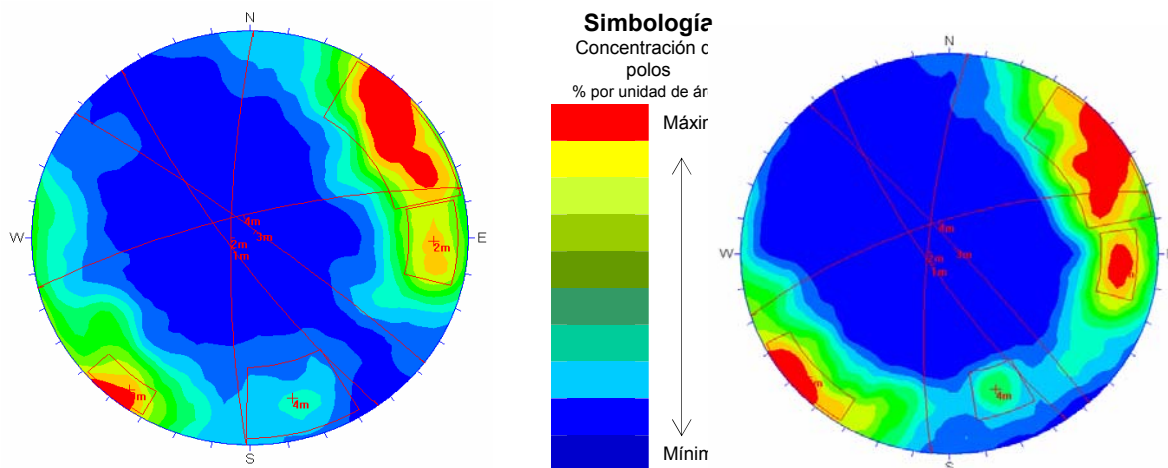
66° ± 12°/265° ± 10°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas

78°±11°/236° ±24°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

79°±11°/234°±24°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

Este dominio estructural presenta una clara relación espacial con las unidades de rocas encajadoras de los pórfidos mineralizados del yacimiento Chuquicamata, las cuales corresponden a la Granodiorita Elena y los Metasedimentos. En la Figura 4.10 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia).



Sistemas VIF

Sistemas FT

Figura 4.10: Red Estereográfica Dominio Estructural Mesabi, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

4.3.2.8 Dominio Estructural Zaragoza

Se define en la porción Norte del talud Este de Chuquicamata. Su nombre está relacionado con la antigua explotación de una importante veta de oxidados de cobre desarrollada en este sector. En la Tabla 4.9 se presenta la distribución de los sistemas de fallas y diaclasa de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul y sistemas de diaclasas en verde. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 4.9: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF, Fallas FT y Diaclasas del Dominio Estructural Zaragoza

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20°, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°				
Inclinado	41°-70°				60° ±16°/185° ± 26°
Subvertical	71°-90°	$81^{\circ} \pm 9^{\circ} / 118^{\circ} \pm 22^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 4^{\circ} / 75^{\circ} \pm 7^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 297^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 4^{\circ} / 104^{\circ} \pm 20^{\circ}$ $80^{\circ} \pm 9^{\circ} / 250^{\circ} \pm 10^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 8^{\circ} / 262^{\circ} \pm 32^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 3^{\circ} / 94^{\circ} \pm 18^{\circ}$	$74^{\circ} \pm 8^{\circ} / 225^{\circ} \pm 17^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 6^{\circ} / 205^{\circ} \pm 5^{\circ}$ $80^{\circ} \pm 9^{\circ} / 250^{\circ} \pm 10^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 8^{\circ} / 262^{\circ} \pm 32^{\circ}$	$82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 297^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 9^{\circ} / 118^{\circ} \pm 22^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 6^{\circ} / 343^{\circ} \pm 5^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 297^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $86^{\circ} \pm 4^{\circ} / 104^{\circ} \pm 20^{\circ}$ $80^{\circ} \pm 9^{\circ} / 138^{\circ} \pm 10^{\circ}$	$82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 297^{\circ} \pm 21^{\circ}$ $75^{\circ} \pm 9^{\circ} / 14^{\circ} \pm 9^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 10^{\circ} / 10^{\circ} \pm 12^{\circ}$

81° ± 8°/262° ± 32°: Dip/Dipdirection de Sistemas de diaclasas
 75° ± 9°/14° ± 9°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)
 81° ± 9°/118° ± 22°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)
 Se indican en fondo amarillo las orientaciones presentes de las familias de fallas del dominio

Este dominio está relacionado con la unidad litológica Pórfido Este, afectada por alteraciones del tipo sericítica intensa, sericítica-potásica, potásica, clorítica y procesos de lixiviación sobrepuesta. En la Figura 4.11 se presenta la distribución de los sistemas de fallas VIF y FT de acuerdo al modelamiento geotécnico del año 2005 (Dirección de Geotecnia).

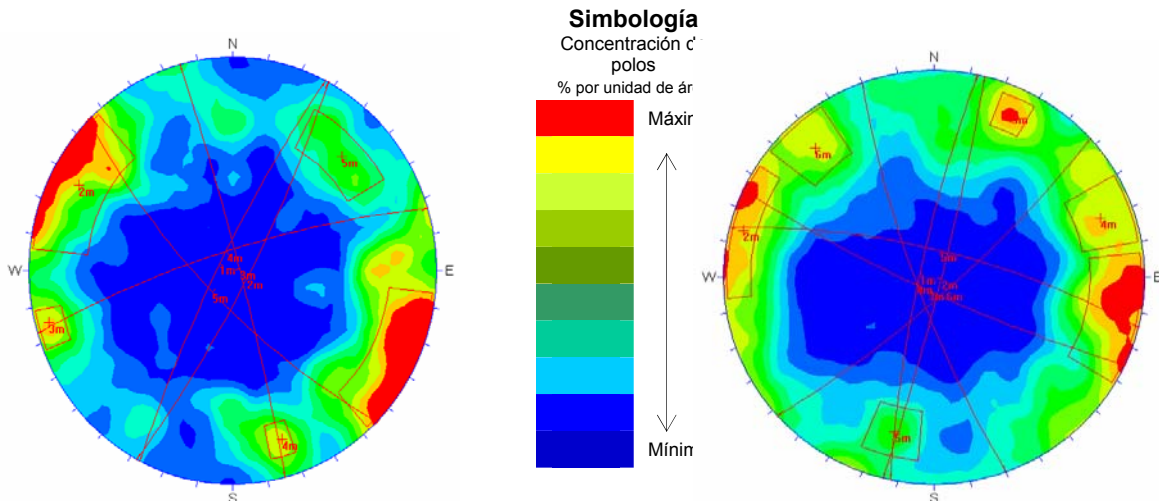


Figura 4.11: Red Estereográfica Dominio Estructural Zaragoza, Mina Chuquicamata según Modelo Estructural Septiembre 2005

V. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS TUNELES

5.1 Introducción

Se describe en este capítulo la caracterización geotécnica de los túneles de Exploración y Drenaje de la mina Chuquicamata excavados entre abril 2003 y noviembre 2005.

La caracterización geotécnica se ha realizado a partir de la síntesis del levantamiento geotécnico-estructural a escala 1:100 de aproximadamente 6.500 m de túneles, como parte del servicio de caracterización geotécnica realizado para la Dirección de Geotecnia de Codelco Norte. En el Anexo N° 3 se incluye parte del procedimiento de trabajo del levantamiento geotécnico-estructural, donde se indican los parámetros geotécnicos considerados. La calidad geotécnica del macizo rocoso, se obtiene a partir de los parámetros de clasificación geotécnica de Barton et al (1974, modificado por Grimstad & Barton, 1994, resumido en el Anexo N° 2), adaptada a los cinco tipos de soporte de la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Calidades geotécnicas del macizo rocoso de acuerdo al índice NGI-Q

Índice "Q"	Categoría Modificada de Barton et al 1974.		Categorías Geotécnicas Barton et al. 1974	Características Geotécnicas adaptadas a los túneles de Chuquicamata.
	Clase de soporte	Denominación		
>40	R1	Muy Buena	Extremadamente Buena, Excepcionalmente Buena y Muy Buena	Roca sana y dura. Masiva a débilmente fracturada con menos de 4 fracturas por metro (<4 f/m). Planos de fracturas cerrados y sin rellenos.
10 a 40	R2	Buena	Buena	Roca sana a débilmente descompuesta, dura. Escasa a moderadamente fracturada (2 a 7 f/m). Planos de fractura con ocasionales pátinas de relleno, delgadas.
1 a 10	R3	Regular	Regular y Mala	Roca débil a moderadamente descompuesta o meteorizada, relativamente dura. Moderado a fuerte fracturamiento (5 a 15 f/m). Las discontinuidades pueden tener rellenos de yeso, calcita, óxidos de Fe, sulfuros blandos y a veces, minerales arcillosos.
0,1 a 1	R4	Mala	Muy Mala	Roca moderada a fuertemente descompuesta o meteorizada, con ocurrencia de zonas de fallas con roca triturada o desintegrada. Fuerte a intenso fracturamiento (>10 f/m), La mayoría de las discontinuidades presentan rellenos de yeso, óxidos de Fe, sulfuros blandos y arcilla.

<0,1	R5	Muy Mala	Excepcionalmente Mala y Extremadamente Mala	Roca completamente descompuesta o meteorizada, con plena alteración a minerales arcillosos, blanda. Ocurrencia de importantes zonas de fallas y/o roca arcillosa disgregable con la mano.
------	----	----------	---	---

En la Figura 5.1 se presenta el trazado de los túneles con las unidades geotécnicas obtenidas del levantamiento geotécnico de las labores subterráneas, detallado en las Láminas N° 1 a N° 4 del Anexo N° 4

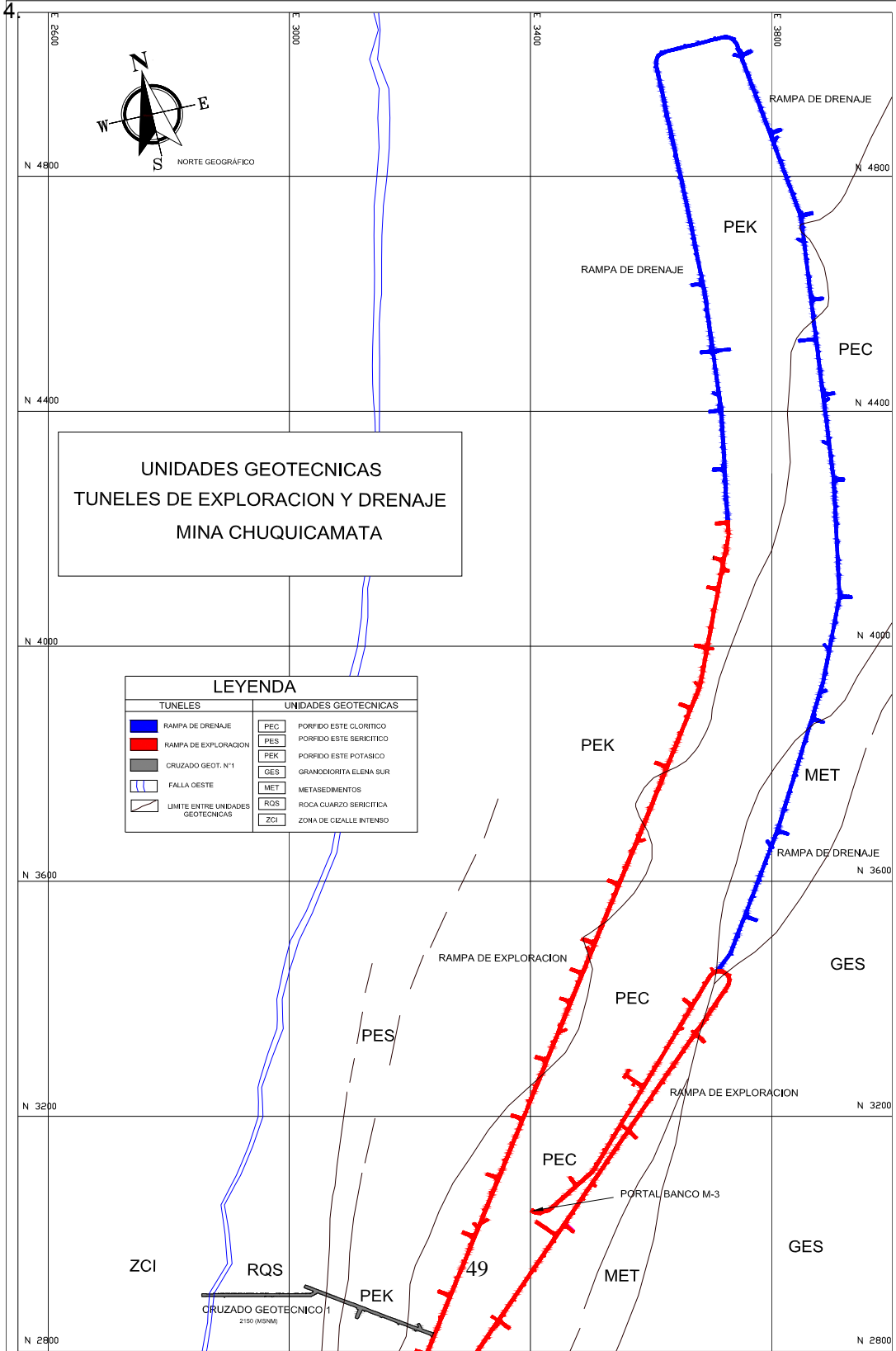


Figura 5.1: Unidades Geotécnicas de los Túneles de Exploración y Drenaje
5.2 Rampa de Exploración

Esta rampa de 3.216,3 m de extensión en proyección horizontal y sección de 5 m por 5 m, fue excavada con inicio en el banco M-3 del rajo Chuquicamata en roca asignada a las siguientes unidades geotécnicas: Pórfido Este Clorítico (PEC), Granodiorita Elena Sur (GES), Metasedimentos (MET) y Pórfido Este Potásico (PEK). En la Tabla 5.2 se presentan los parámetros geotécnicos y la calidad geotécnica de la roca, obtenidas del levantamiento geotécnico de la Rampa de Exploración, de acuerdo a la clasificación de calidad geotécnica de roca de la Tabla 5.1 y al sistema de clasificación del macizo rocoso GSI de Hoek de 1994 (Anexo N° 2).

Se observa el predominio de calidades geotécnicas Buena y Regular, en tanto que la roca de Mala calidad se vincula a los metasedimentos (Figura 5.1 y Lámina N° 1 del Anexo N° 4).

Tabla 5.2: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Rampa Exploración

Desde (m)	Hasta (m)	IRS (MPa)	ff/m	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	Unidad Geot.	GSI
0	360	70-100	1-10	34-95	1,1-5,7	Regular	PEC	VB/F(45-50)-B/G(60-65)
360	460	130-150	2-6	80-85	11,1-14,2	Buena	PEC	B/G(60-75)
460	480	130-150	4	85	9,4	Regular	PEC	B/F(55-60)
480	530	80-100	6-10	30-40	0,4-0,5	Mala	PEC	BD/P(30-35)-BD/F(35-40)
530	586	40-90	5-10	40-50	0,7-0,8	Mala	MET	VB/P(40-45)-VB/F(45-50)
586	685	90-140	2-8	65-80	2,2-3,9	Regular	GES	VB/F(50-55)-B/F(55-60)
685	1.273	90-140	2-10	50-80	2,3-8,9	Regular	PEC	VB/F(50-55)-B/G(60-65)
1.273	1.315	130-140	4-6	75-85	12,5-14,2	Buena	PEC	B/VG(70-75)
1.315	1.325	100	4-6	80	8,9	Regular	PEC	B/G(60-65)
1.325	1.335	100	4-6	80	11,1	Buena	PEC	B/G(60-65)
1.335	1.345	100-120	6	80	8,9	Regular	PEC	B/G(60-65)
1.345	1.375	130	4-6	85	14,2	Buena	PEC	B/VG(70-75)
1.375	1.405	100	6-8	75-80	6,3-8,9	Regular	PEC	B/G(60-65)
1.405	1.550	100-140	4-8	70-90	11,1-22,5	Buena	PEC	B/G(65-70)- B/VG(70-75)
1.550	1.560	90-110	4-6	80	5,6	Regular	PEC	VB/G(55-60)
1.560	1.710	90-140	4-6	75-90	13,3-17,7	Buena	PEC	B/G(60-70)
1.710	1.720	80-100	6-8	75	8,3	Regular	PEC	B/G(55-60)
1.720	1.750	90-110	4-9	80-85	16,7-17,7	Buena	PEC	B/G(60-65)
1.750	1.760	110-120	4-6	85	5,9	Regular	PEC	B/G(55-60)
1.760	1.860	90-140	4-8	75-85	10,4-16,7	Buena	PEC	B/G(55-65)
1.860	1.870	100	6-8	80	3,7	Regular	PEC	VB/G(55-60)
1.870	2.240	75-150	2-10	75-95	11,1-35,6	Buena	PEC	B/G(50-55)-I/VG(80-85)
2.240	2.250	120-150	6-8	75	6,3	Regular	PEK	B/F(50-55)
2.250	2.470	80-150	4-10	75-90	12,5-20	Buena	PEK	B/G(60-65)-B/VG(75-80)
2.470	2.500	100-120	4-8	80-85	13,3-21,3	Buena	PEC	B/VG(75-80)
2.500	2.530	120	4-8	85-90	17,7-33,8	Buena	PEK	B/G(65-70)-B/VG(75-80)

2.530	2.540	120-150	2-4	95	47,5	Muy Buena	PEK	I/VG(80-85)
2.540	2.690	100-150	4-9	80-95	12,5-22,5	Buena	PEK	B/F(55-60)-B/VG(75-80)
2.690	2.700	100-150	6-8	80	8,9	Regular	PEK	VB/G(55-60)
2.700	2.710	120-150	6-8	80	10	Buena	PEK	B/F(55-60)
2.710	2.740	120-150	6-8	70-80	10-18,8	Buena	PEC	B/F(50-55)-B/G(65-70)
2.740	2.780	80-150	3-8	70-85	1,8-9,4	Regular	PEC	B/P(45-50)-B/F(55-60)
2.780	2.790	120-130	6-8	75	12,5	Buena	PEC	B/G(55-60)
2.790	2.800	100-120	6-8	80	5,3	Regular	PEC	B/F(50-55)
2.800	2.810	100-120	6-8	80	2,7	Regular	PEK	B/F(50-55)
2.810	3.060	100-150	2-9	75-90	11,1-33,8	Buena	PEK	B/F(50-55)-B/VG(70-75)
3.060	3.070	120-150	4-8	80	8,9	Regular	PEK	B/G(60-65)
3.070	3.216,3	60-120	2-8	75-90	10,6-22,5	Buena	PEK	B/F(50-55)-B/G(60-65)

Los desarrollos en la Rampa de Exploración se realizaron íntegramente en roca seca, sin embargo en el metraje 190, la excavación cortó un pozo de drenaje antiguo que conduce aguas provenientes de otros sectores del rajo con un caudal constante estimado en 1 litro por minuto. Similar condición se observa en el metraje 500, a través del sondaje DD-6814 por donde se drenan aproximadamente 0,5 litros por minuto.

5.2.1 Pórfido Este Clorítico (PEC)

La unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC) es el resultado de la superposición de la unidad de alteración clorítica que afecta a la unidad litológica Pórfido Este del yacimiento. Se expone en el túnel como una granodiorita-monzonita de textura porfídica, con fenocristales en contacto de tamaño medio y una masa fundamental fina. La alteración esta constituida principalmente por clorita que invade parcialmente la textura de la roca, en forma de venillas y rellenos de fracturas. Se extiende a través de la Rampa de Exploración desde el portal hasta el metraje 2.240 (Lámina N° 1, Anexo N° 4), exceptuando el tramo de 530 m a 685 m, correspondiente a las unidades geotécnicas Granodiorita Elena Sur (GES) y de Metasedimentos (MET). Otros tramos menores de PEC se presentan en los intervalos de 2.420 m a 2.500 m (Lámina N° 1, Anexo N° 4) y de 2.710 m a 2.800 m (Lámina N° 2, Anexo N° 4).

El macizo rocoso en los tramos mencionados de PEC presenta una resistencia a la compresión uniaxial (IRS), estimada mediante martillo geológico (según procedimiento de trabajo indicado en Anexo N°3) que varía de 70 MPa a 150 MPa, lo que la califica como Resistente a Muy Resistente. La frecuencia de fracturas presenta variaciones de 1 a 10 fracturas por metro lineal (ff/m), siendo el rango mas típico de 4 a 6 ff/m. El índice RQD presenta variaciones de 30% a 95% con valores típicos en el rango de 70% a 85%. El Índice Geológico de Resistencia (GSI de Hoek & Brown, 1997) corresponde predominantemente a un macizo fracturado en bloques con una buena condición de las discontinuidades, en el rango numérico preferente de 55 a 65. La Tabla 5.3 muestra la relación entre las calidades de roca y la unidad geotécnica PEC en la Rampa de Exploración.

Tabla 5.3: Calidades Geotécnicas en Pórfido Este Clorítico (PEC). Rampa Exploración

Calidad Geotécnica	Tramo total (m)	Proporción	RQD (%)	Q(Barton)
Buena	1047	50,2%	70-95	10,0-35,6
Regular	1108	47,5%	34-95	1,1-9,4
Mala	50	2,3%	30-40	0,4-0,5
Total PEC	2250	100%	30-95	0,4-35,6

Las estructuras más importantes en el trazado del túnel en la unidad PEC corresponden a fallas VIF y FT de orientación $N35^{\circ}-45^{\circ}W / 75^{\circ}-85^{\circ}NE$, las que se presentan onduladas con superficies rugosas a pulidas, rellenas principalmente con salbanda arcillosa y yeso; las fallas principales (VIF) presentan zonas de influencia de 0,5 m a 2 m con fracturamiento asociado y escasa meteorización de la roca de caja. Un segundo sistema de fallas importantes e intermedia (VIF y FT), tiene orientación N-S a $N20^{\circ}E$; son fallas sinusoidales, con superficies suavemente rugosas, manteos subverticales tanto al NW como al SE, con variaciones en el espesor de 1 cm a 30 cm, influencia de 0,2 m a 1 m y rellenos de brecha de falla, yeso y salbanda con escasa arcilla.

5.2.2 Metasedimentos (MET)

La unidad geotécnica Metasedimentos (MET) corresponde a rocas sedimentarias metamorfizadas del tipo areniscas de grano fino, areniscas calcáreas y lutitas. Estas rocas presentan distintos grados de foliación asociados a eventos compresivos, los cuales son cortados por vetillas de carbonatos. Su alteración dominante es clorita-epidota. Se incluyen también en esta unidad rocas corneas, relacionadas posiblemente, a la intrusión del Pórfido Este, que en su emplazamiento interactuó con rocas sedimentarias, generando una aureola de metamorfismo de contacto. Estas rocas se han reconocido en la segunda curva de la Rampa de Exploración, entre los metrajés 530 a 586 (Lámina N° 1 de Anexo N° 4). Se presentan con un fuerte fracturamiento (5 a 10 ff/m) y foliación (8 a 25 planos por metro, preferentemente cerrados). Esta unidad presenta una resistencia a la compresión uniaxial, estimada mediante martillo geológico, variable entre 50 MPa y 90 MPa, lo que corresponde a un macizo rocoso Resistente a Muy Resistente. El RQD varía de 40% a 50%, mientras que el índice Q de Barton lo hace de 0,7 a 0,8, correspondiente a roca de Mala calidad geotécnica. Su clasificación según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), es el de un macizo con fuerte fracturamiento en bloques, con una condición de regular a mala de las discontinuidad, correspondiente al rango numérico de 40 a 50.

En la extensión de la Rampa de Exploración excavada en metasedimentos, se reconocen estructuras mayores e intermedias (VIF y FT) de orientaciones preferenciales N-S y $N20^{\circ}-40^{\circ}W$, con mateo de $60^{\circ}-75^{\circ}W$ y $60^{\circ}-85^{\circ}E$. Estas fallas con zonas de influencia de 0,2 m a 1,5 m, poseen en general, relleno de salbanda arcillosa, yeso, calcita y anhidrita, con espesores que varían entre los 2 cm y los 30 cm. Es notoria la presencia de vetas y vetilleos, en ocasiones intensos de calcita-yeso y/o yeso-anhidrita, donde las vetas pueden alcanzar los 40 cm de potencia con una orientación $N20^{\circ}-30^{\circ}W$ subvertical. Las actitudes preferentes de las foliaciones son las siguientes: $N70^{\circ}-80^{\circ}E / 75^{\circ}-80^{\circ}N$ y $N40^{\circ}-50^{\circ}W / 80^{\circ}W$.

5.2.3 Granodiorita Elena Sur (GES)

La unidad geotécnica Granodiorita Elena Sur (GES) se presenta entre los metrajés 586 a 685 de la Rampa de Exploración (Lámina N° 1 del Anexo N° 4). Su composición es granodiorítica,

con textura predominantemente equigranular de grano medio. La alteración presente es clorítica incluyendo escasa epidota y en menor proporción sericita. Presenta una resistencia a la compresión uniaxial estimada de 90 MPa a 140 MPa, correspondiente a un macizo Resistente a Muy Resistente. Las fracturas se presentan en una frecuencia de 2 a 8 ff/m, con un índice RQD de 65% a 80%. El índice Q de Barton para el tramo excavado en GES varía de 2,2 a 3,9 correspondiente a una calidad geotécnica Regular. La clasificación según el índice GSI de Hoek & Brown (1997), es el de un macizo con fuerte fracturamiento en bloques, con una condición regular de las discontinuidad, correspondiente al rango numérico de 40 a 50.

En el tramo excavado en la Granodiorita Elena Sur, se reconocen estructuras mayores e intermedias (VIF y FT), de orientación N10°-40°W / 70°-80°W las primeras y N70°-80°E / 60°-80°S y N10°-20°W / 70°-80°W las de tipo FT. Estas estructuras se presentan desde levemente onduladas, rugosas a lisas con rellenos de salbanda arcillosa, yeso y especularita, alcanzando espesores de hasta 30 cm.

5.2.4 Pórfido Este Potásico (PEK)

La unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK) es el resultado de la sobreimposición de la alteración potásica en el Pórfido Este. Corresponde a una roca granodiorítica-monzonítica de textura porfídica a inequigranular de grano medio, con alteración predominantemente potásica y en menor proporción sericítica. La alteración potásica está constituida por feldespato potásico, que se presenta como venillas y cadenas de cristales. En la extensión de la Rampa de Exploración la unidad geotécnica PEK se extiende desde los 2.240 m hasta los 3.216 m (Láminas N° 1 y N° 2 del Anexo N° 4), con la excepción de dos tramos menores de 30 m y 90 m de extensión en Pórfido Este Clorítico (PEC).

El macizo rocoso en la unidad geotécnica PEK presenta una resistencia a la compresión uniaxial (IRS), estimada mediante martillo geológico que varía de 60 MPa a 150 MPa, lo que la califica como Resistente a Muy Resistente. La frecuencia de fracturas presenta variaciones de 2 a 10 ff/m con valores típicos en el rango de 4 a 8 ff/m y un índice RQD de 75% a 95%. El índice GSI de Hoek & Brown (1997) corresponde predominantemente a un macizo fracturado en bloques con una regular a buena condición de las discontinuidades, en el rango numérico preferente de 55 a 70.

La Tabla 5.4 muestra la relación entre las calidades de roca y la unidad geotécnica PEK para la Rampa de Exploración. Se observa el fuerte predominio de roca de calidad geotécnica Buena, limitándose la roca de calidad geotécnica Regular, principalmente a zona con presencia de fallas importantes (VIF).

Tabla 5.4: Calidades Geotécnicas Pórfido Este Potásico (PEK). Rampa de Exploración

Calidad Geotécnica	Tramo total (m)	Proporción	RQD (%)	Q (Barton)
Muy Buena	10	1,2%	95	47,5
Buena	806,3	94,1%	75-95	10-33,8
Regular	40	4,7%	75-80	2,7-8,9
Total PEK	856,3	100%	75-95	2,7-47,5

El principal sistema estructural presente en el Pórfido Este Potásico corresponde a fallas intermedia (FT) y escasas fallas importante (VIF) subverticales (manteo superior a 80°) de rumbo general N40°-60°W, sinusoidales predominantemente rugosas sobre lisas y rellenos de salbanda, especularita y yeso. Las fallas FT de este sistema se presentan cerradas con espesores de 0,5 cm a 1,5 cm. En tanto que las fallas VIF con espesores de 10 cm a 30 cm se presentan espaciadas entre 40 m y 300 m en la dirección del túnel. Un segundo sistema de fallas intermedias (FT), también subvertical presenta rumbo N 50°-70°E; son sinusoidales rugosas con espesores de 0,5 cm a 1 cm rellenos de sulfuros blandos, salbanda con escasa arcilla y yeso o anhidrita.

5.3 Túnel de Drenaje

Esta labor de 2.650 m de extensión con pendiente negativa del 15%, parte desde la segunda curva de la Rampa de Exploración hacia el Norte, hasta la coordenada N-5.000, desde donde toma dirección al Sur descendiendo hasta la cota 1.942 m s.n.m., empalmando nuevamente con la Rampa de Exploración. De acuerdo al levantamiento geotécnico realizado durante su construcción (Láminas N° 2 y N° 3 del Anexo N° 4), las excavaciones fueron realizadas en las unidades geotécnicas Metasedimentos (MET), Pórfido Este Clorítico (PEC) y Pórfido Este Potásico (PEK).

En el desarrollo de la Rampa de Drenaje se excavaron dos zonas con presencia de escurrimiento menores de agua. La primera corresponde al metraje 1.686, donde se observan goteos, de caudal estimado menor a 1 litro por minuto (l/min), asociada a una falla importante (VIF) de actitud N 30°E / 80°NW. La segunda corresponde a una zona entre los metrajes 1.971 a 2.001. A los 1.970 m se observaron goteos con un caudal estimado menor a 1 l/min, asociada a una falla VIF de actitud N36°E / 80°NW. En el metraje 2.001 se observaron goteos con un caudal estimado menor a 1 l/min, asociados a la falla FT de actitud EW / 88°S.

A continuación se exponen las características geotécnicas y estructurales generales de las unidades geotécnicas excavadas en el Túnel de Drenaje.

5.3.1 Metasedimentos (MET)

La unidad geotécnica Metasedimentos (MET) se presenta desde el inicio hasta los 420 m. Es una roca de grano fino, de color gris verdoso, intensamente foliada (entre 10 y 30 planos de foliación por metro, predominantemente cerrados). Presenta vetas y vetillas de calcita, calcita-yeso, y/o yeso-anhidrita, donde las vetas pueden alcanzar hasta los 50 cm de potencia, con una orientación N20°-30°W / subverticales. De acuerdo a su calidad geotécnica esta unidad puede ser dividida en dos tramos. Un primer tramo de calidad geotécnica dominante Buena con intercalaciones de roca de Regular calidad geotécnica (entre 0 m y 155 m) y un tramo de calidad dominante Regular con una zona de Mala calidad geotécnica (entre 155 m y 420 m, asociadas a fallas VIF oblicuas a subparalelas a la dirección del túnel.

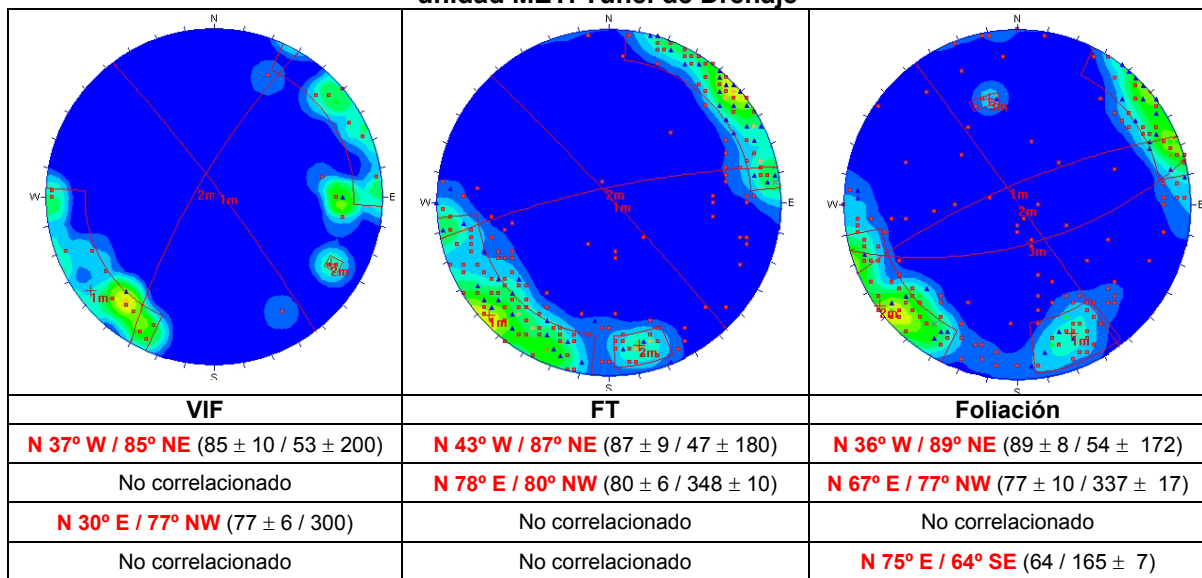
La Tabla 5.5 muestra las características geotécnicas para la roca excavada en los Metasedimentos del Túnel de Drenaje.

Tabla 5.5: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Túnel de Drenaje, MET

Desde (m)	Hasta (m)	Tramo (m)	IRS (MPa)	ff/m	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	GSI
0	10	10	75-100	6-8	75	2,8	Regular	B/F(50-55)
10	20	10	100-120	5-6	80	13,3	Buena	B/G(65-70)
20	50	30	50-100	10-12	60	5-7,5	Regular	B/F(50-55)-BV/G(50-60)
50	100	50	100-120	6-10	65-80	13,3-20	Buena	B/G(60-75)
100	110	10	100	8-12	70	9,7	Regular	B/F(55-60)
110	155	45	80-120	6-10	75-80	10,4-13,3	Buena	B/G(60-70)
155	270	115	50-120	6-20	45-75	1,5-8,3	Regular	VB/P(40-45)-B/G(55-60)
270	300	30	10-80	6-16	45-60	0,9-1	Mala	BD/P(30-35)-VB/P(35-40)
300	420	120	50-100	6-16	55-70	1,1-6,7	Regular	VB/P(35-40)-B/F(55-60)

En la Figura 5.2 se presenta un análisis de correlación entre la foliación y las familias de estructuras VIF y FT de la unidad geotécnica MET. En la comparación se observa la coincidencia entre la familia estructural principal de fallas VIF y FT con la dirección preferencial de orientación de la foliación. De este análisis se desprende que la orientación de las estructuras esta relacionada con la foliación propia de esta unidad y por lo tanto con su deformación.

Figura 5.2: Análisis de frecuencia y correlación entre estructuras VIF, FT y Foliación de la unidad MET. Túnel de Drenaje



N 37° W / 85° NE : actitud promedio de las familias de estructuras
(85 ± 10 / 53 ± 200) : Dip /Dipdir de las familias de estructuras

5.3.2 Pórfido Este Clorítico (PEC)

La unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC), se presenta como una roca granodirítica-monzonítica de textura porfídica a inequigranular, de grano medio con fenocristales en contacto de tamaño medio, en una masa fundamental fina. La alteración clorítica aparece en

vetillas y en rellenos de fallas y diaclasas. Conforman un cuerpo continuo entre los 420 m y los 1.155 m del Túnel de Drenaje. En su extremo Sur, se encuentra en contacto con la unidad geotécnica de MET. Al contrario que en superficie donde se puede identificar una falla reconocida como el límite de la unidad MET, En el túnel no se identifica una falla VIF que marque ese límite. Por el Norte está en contacto con la unidad geotécnica PEK, con un paso gradacional desde alteración clorítica (PEC) a alteración potásica (PEK). En la Tabla 5.6 se presenta la síntesis del levantamiento geotécnico del PEC en el Túnel de Drenaje.

Tabla 5.6: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Túnel de Drenaje, PEC

Desde (m)	Hasta (m)	Tramo (m)	IRS (MPa)	ff/m	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	GSI
420	440	20	50-100	4-8	70-75	3,1-3,8	Regular	VB/F(45-50)-B/F(55-60)
440	500	60	100-150	2-10	70-90	10-22,5	Buena	B/F(55-60)-B/G(60-70)
500	520	20	80-120	4-10	75	6,3-8,3	Regular	B/F(55-60)
520	530	10	120-150	4-6	85	14,2	Buena	B/G(60-65)
530	540	10	100-120	6-8	75	6,3	Regular	VB/F(50-55)
540	570	30	80-150	5-10	75-90	10-18	Buena	B/F(50-55)-B/G(60-65)
570	590	20	75-100	6-8	75-80	4,2-6,7	Regular	VB/F(45-50)-B/F(55-60)
590	810	220	75-150	2-10	75-95	10,6-35,6	Buena	B/F(55-65)-I/G(75-85)
810	830	20	20-120	6-8	80	6,7-8,9	Regular	B/F(45-55)
830	890	60	80-150	2-8	80-85	10-21,3	Buena	B/F(50-60)-B/G(60-70)
890	910	20	90-120	4-10	75	4,7-8,3	Regular	B/P(45-50)-B/F(50-55)
910	1.015	105	75-120	4-8	80-85	10-15	Buena	B/F(50-60)
1.015	1.030	15	70-120	6-8	75	9,4	Regular	B/F(50-55)
1.030	1.155	25	70-150	4-10	75-85	10-21,3	Buena	B/F(45-65)-B/G(55-75)
1.287	1.310	23	120-150	4-8	75-85	12,5-15,9	Buena	VB/G(55-60)-B/G(60-65)

El PEC se presenta en la Rampa de Drenaje como una roca de Buena calidad geotécnica, con algunos tramos muy localizados de Regular calidad, en largos no mayores a 20 m. La resistencia a la compresión uniaxial estimada presenta una variación general de entre 75 MPa y 150 MPa (Roca Resistente a Muy Resistente), con una frecuencia de fracturas de 2 a 8 ff/m y escasos tramos con 10 ff/m. El RQD varía de 75% a 95%. En zonas de Buena calidad geotécnica (aproximadamente el 95% del tramo) el índice Q de Barton varía de 10 a 35,6, las zonas de Regular calidad geotécnica tienen índice Q de Barton de 3,1 a 9,4. La Tabla 5.7 muestra la relación entre las calidades de roca y la unidad geotécnica PEC para la Rampa de Drenaje.

Tabla 5.7: Calidades geotécnicas. Pórfido Este Clorítico (PEC). Rampa Drenaje

Calidad Geotécnica	Tramo total (m)	Proporción (%)	RQD (%)	Q (Barton)	GSI
Buena	633	83,5	75-95	10-35,6	45-85
Regular	125	16,5	70-80	3,1-9,4	45-60
Total PEC	758	100	70-95	3,1-35,6	45-85

Las fallas VIF tienen actitud principales N70°-85°W / 75°-85°SW y N75°-85°E / 70°-80°N, estos sistemas se pueden interpretar también como uno solo, con variación en el manto, son fallas sinusoidales, rugosas, con relleno de roca triturada, arcilla y hematita, con espesores de 5 cm a 50 cm. Del mismo modo se identifican dos sistemas de fallas intermedias (FT), el principal de rumbo N75°-85°E y manto de 65°SW a subverticales y un segundo sistema N60°-80°W / 65°-80° NE, son fallas principalmente sinuosas, rugosas a lisas, con relleno predominante de arcilla, roca triturada y sulfuros molidos.

5.3.3 Pórfido Este Potásico (PEK)

En el Túnel de Drenaje la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK), se presenta con una roca granodirítica-monzonítica, de textura porfídica a inequigranular, con fenocristales de tamaño medio en una masa fundamental fina, afectada por alteración potásica en la forma de vetillas y cadenas de megacristales de feldespato potásico con sericitica variable. La calidad geotécnica del macizo rocoso de esta unidad varía de Buena a Regular. En la Tabla 5.8 se presenta la síntesis del levantamiento geotécnico del PEK en el Túnel de Drenaje.

Los tramos de Buena calidad geotécnica presentan una resistencia a la compresión uniaxial (IRS) estimada de 100 PMa a 150 MPa, frecuencia de fracturas de 2 a 9 ff/m con valores típicos en el rango de 4 a 6 ff/m y RQD de 70% a 90%. El índice GSI corresponde predominantemente a un macizo fracturado en bloques con una buena condición de las discontinuidades, en el rango numérico preferente de 60 a 70.

Las zonas de Regular calidad geotécnica se encuentran comúnmente asociados a estructuras tipo VIF y a un aumento de la cantidad de sericita en la roca. Se presenta con una resistencia a la compresión uniaxial (IRS), estimada, de entre 100 MPa y 150 MPa, aunque en áreas de influencia de fallas VIF, llega a un mínimo de 50 MPa. La frecuencia de fractura con predominio del rango de 6 a 10 ff/m presenta puntualmente hasta 12 ff/m. El RQD varía preferentemente entre 75% y 95%. El índice GSI corresponde predominantemente a un macizo fracturado a muy fracturado en bloques con una condición variable de las discontinuidades de buena a mala, en el rango numérico preferente de 45 a 60.

Tabla 5.8: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Túnel de Drenaje, PEK

Desde (m)	Hasta (m)	Tramo (m)	IRS (MPa)	ff/m	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	GSI
1.155	1.245	90	100-150	2-9	75-90	12,5-22,5	Buena	VB/G(55-60)-I/G(70-75)
1.245	1.258	13	50-80	6-10	65	4,1	Regular	VB/F(40-45)
1.258	1.287	29	100-120	2-6	80-85	13,3-14,2	Buena	B/G(60-70)
1.310	1.320	10	120-150	3-6	90	16,9	Buena	B/G(60-65)
1.320	1.338	18	100-120	6-8	75	8,3	Regular	B/F(55-60)
1.338	1.345	7	120	4-6	80	20	Buena	B/G(70-75)
1.345	1.355	10	100-120	8-10	70	7,8	Regular	B/F(50-55)
1.355	1.450	95	100-150	5-9	75-90	13,3-22,5	Buena	B/G(60-70)
1.450	1.480	30	100-120	6-10	70-75	6,3-7,8	Regular	VB/G(55-60)-B/F(55-60)
1.480	1.490	10	100-120	4-7	75	12,5	Buena	B/G(55-60)
1.490	1.496	6	100	6-8	75	8,3	Regular	B/F(55-60)
1.496	1.505	9	100-120	4-6	85	10,6	Buena	B/F(60-65)
1.505	1.530	15	75-120	6-8	75	6,3-8,3	Regular	B/F(55-60)-B/G(55-60)
1.530	1.540	10	120-150	6-8	80	13,3	Buena	B/G(65-70)
1.540	1.546	6	75-100	8-10	75	4,7	Regular	B/F(45-50)
1.546	1.620	74	100-150	4-10	70-85	11,7-20	Buena	VB/G(50-55)-B/G(55-70)
1.620	1.660	40	100-150	3-8	70-80	3,9-8,9	Regular	B/F(50-60)
1.660	1.670	10	120-150	3-4	80	13,3	Buena	B/G(60-65)
1.670	1.705	35	80-150	2-10	65-80	3,6-8,9	Regular	BD/G(45-50)-B/G(60-65)
1.705	1.710	5	120-150	2-6	80	13,3	Buena	B/G(60-70)
1.710	1.728	18	100-150	4-10	65-80	3,6-8,9	Regular	VB/G(50-55)-B/G(55-60)
1.728	1.732	4	120-150	4-6	75	12,5	Buena	B/G(55-60)
1.732	1.799	67	50-120	4-12	65-75	1,8-9,4	Regular	VB/P(35-40)-B/F(55-60)
1.799	1.960	161	80-150	2-7	75-90	10-20	Buena	B/F(55-60)-I/G(70-75)
1.960	2.050	90	25-150	4-10	70-80	3,1-8,9	Regular	B/P(45-50)-B/G(60-65)
2.050	2.060	10	120	4-6	80	13,3	Buena	B/G(60-65)

2.060	2.070	10	120-150	6-8	75	8,3	Regular	B/G(55-60)
2.070	2.122	52	100-150	4-6	80-85	10-21,3	Buena	B/G(60-65)
2.122	2.132	10	75-100	6-8	75	3,1	Regular	BD/F(40-45)
2.132	2.140	8	120	4-6	85	14,2	Buena	B/G(60-65)
2.140	2.160	20	100-120	4-6	75-80	8,3-8,9	Regular	B/G(55-60)
2.160	2.170	10	120	4-6	80	13,3	Buena	B/G(60-65)
2.170	2.235	65	50-120	4-10	60-80	2,2-8,9	Regular	VB/F(50-60)-B/G(55-60)
2.235	2.245	10	100-120	6-8	70	11,7	Buena	B/F(55-60)
2.245	2.252	7	100-120	8-10	65	5,4	Regular	B/F(50-55)
2.252	2.300	48	120-150	4-7	75-85	12,5-14,2	Buena	B/F(55-60)-B/G(60-70)
2.300	2.320	20	100-150	6-10	75	6,3-8,3	Regular	B/F(50-60)
2.320	2.370	50	100-150	2-8	80-95	10-13,2	Buena	B/F(50-60)-B/G(60-65)
2.370	2.390	20	120-150	6-10	70-80	5,8-7,5	Regular	B/F(50-60)
2.390	2.437	47	120-150	2-8	80-90	13,3-22,5	Buena	B/G(55-75)-I/G(75-80)
2.437	2.450	13	100-150	6-8	80	5	Regular	B/F(50-60)
2.450	2.618	168	100-150	2-8	75-90	10,6-28,3	Buena	B/F(50-65)-I/G(75-80)

La Tabla 5.9 muestra la relación entre las calidades de roca y la unidad geotécnica PEK para la Rampa de Drenaje.

Tabla 5.9: Calidades geotécnicas. Pórfido Este Potásico (PEK). Túnel de Drenaje

Calidad Geotécnica	Tramo total (m)	Proporción (%)	RQD (%)	Q(Barton)
Buena	927	64,3	70-95	10-28,3
Regular	515	35,7	60-80	1,8-9,4
Total PEK	1442	100	60-95	1,8-28,3

Desde un punto de vista estructural la unidad geotécnica PEK debe dividirse en dos zonas, una zona Sur, tomando como referencia el trazado del Túnel de Drenaje, ubicada en el Dominio Estructural Balmaceda y una zona Norte que se encuentra en el Dominio Estructural Estanques Blancos. Para ambos tramos las direcciones presentes de fallas VIF y FT son concordantes a las indicadas para los dominios estructurales respectivos. En el extremo Norte de la rampa, donde se excavaron 120 m de labor en dirección N75°E, la orientación preferencial de las estructuras con rumbo subparalelo a la dirección del túnel, causa un desmejoramiento de la calidad de la roca excavada. Por otra parte, un rasgo estructural prominente, consiste en la presencia de vetas de cuarzo y molibdeno de 1 m a 2 m de espesor con halos sericíticos, estas vetas se presentan asociadas a fallas VIF y FT y desmejoran la calidad de la roca debido al halo de alteración que poseen. Las zonas específicas donde se presentan estas vetas son:

- 1.615 m: veta de cuarzo y molibdeno, 2 m de espesor N40°E / subvertical.
- 1.686 m: veta de cuarzo y molibdeno, 1 m de espesor N32°E / 80°NW asociado a falla VIF en presencia de goteos.
- 1.971 m: veta de cuarzo y molibdeno de 1 m de espesor, N30°E / 80°NW asociada a falla VIF en presencia de agua.

Todas estas vetas se encuentran en la unidad geotécnica PEK y en el interior del Dominio Estructural Estanques Blancos.

5.4 Cruzado Geotécnico N° 1

Labor horizontal, de 400 m de largo y sección de 4,5 m por 4,5 m, construida desde el metraje 1.789,5 de la Rampa de Exploración. Fue excavada en dirección N67°W hasta los 239,2 m y tras cuatro meses de paralización por razones operacionales, se retomó su excavación mediante un desvío desde el metraje 205 en dirección EW. Atraviesa de Este a Oeste, aproximadamente a la coordenada N-2900, las unidades geotécnicas Pórfido Este Clorítico (PEC), Pórfido Este Potásico (PEK), Pórfido Este Sericítico (PES), Roca Cuarzo-Sericítica (RQS), la Zona de falla Oeste (FO y BEF) y la Zona de Cizalle Intenso (ZCI). En esta labor se expone la zonación lateral de las unidades geotécnicas del área Sur de la Mina Chuquicamata. La Lámina N° 4 del anexo N° 4 muestra la distribución de estas unidades así como sus parámetros geotécnicos y arreglo estructural. Además en la Tabla 5.10 se muestran los parámetros geotécnicos y la calidad geotécnica de la roca, obtenidas del levantamiento geotécnico de Cruzado Geotécnico N° 1 previo al desvío.

Tabla 5.10: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Cruzado Geotécnico N° 1

Desde (m)	Hasta (m)	IRS (MPa)	fxm	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	Unidad Geot.	GSI
0	50	100-140	4-6	85-90	17,7-18,8	Buena	PEC	B/G(60-65)
50	130	120-150	2-6	85-95	17,7-29,7	Buena	PEK	B/G(60-65)-I/G(70-75)
130	140	100-120	8	85	5,3	Regular	PEK	B/F(50-60)
140	150	75-100	8	90	10	Buena	PEK	B/G(65-70)
150	160	80-100	6-8	80	8,9	Regular	PEK	VB/F(45-50)
160	200	20-100	5-10	75-80	1,9-8,9	Regular	PES	BD/P(30-35)-B/G(60-65)
200	218	20-70	6-8	75	8,3	Regular	RQS	VB/G(55-60)
218	228	10-40	8-10	65	0,8	Mala	RQS	BD/P(25-30)

Durante la excavación del Cruzado Geotécnico N°1 se observó una zona de humedad y goteos continuos entre las coordenadas E-3.000 y E-3.040. Esto incluye el tramo de 216 m a 228 m del túnel, con humedad y goteos por planos de diaclasas y fallas, tanto en la caja Sur como en la bóveda, asociadas a fallas VIF de actitud N25°-35°E / 70°-80°SE. En el metraje 216, se estimó al momento de la construcción el escurrimiento de 1 a 2 l/min, desde una falla oblicua a la dirección del túnel. En el desvío del Cruzado Geotécnico N° 1 entre los metrajes 8 a 37, se observaron goteos con un caudal estimado menor a 1 l/min, asociado a fallas VIF de actitud N25°-45°E / 70°-80°SE y N12°W / 70°-80°NE.

5.4.1 Pórfido Este Clorítico (PEC)

La unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC) se presenta de 0 m a 50 m, corresponde a una roca granodiorítica-monzonítica de textura porfídica a inequigranular de grano medio con alteración predominante clorítica sobre potásica y sericítica. Su calidad geotécnica es Buena con índice Q entre 17,7 y 18,8. Presenta una resistencia a la compresión uniaxial de 100 MPa a 120 MPa según estimación que la califica como roca Muy Resistente. Además su frecuencia de fractura varía de 4 a 6 fracturas por metro y su índice RQD entre 85% y 90%. Las fallas VIF en el tramo tiene una actitud general N2°W ± 12° / 88°W ± 8°, son fallas planas a curvas, rugosas, con rellenos de arcilla y yeso. Dos sistemas de fallas FT se aprecian en este tramo, el principal de actitud N60°-75°E / 80°-85°SE y un segundo de actitud N25°-45°W / 65°-80°SW, ambos corresponden a fallas sinuosas a planas, rugosas con relleno de yeso y arcillas.

5.4.2 Pórfido Este Potásico (PEK)

Entre los 50 m y los 160 m del cruzado se presenta la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK), con las mismas características litológicas y de alteración de la Rampa de Exploración. Su calidad geotécnica de acuerdo al índice Q de Barton es predominantemente Buena sobre Regular (Índice Q de 5,3 a 29,7). Es una roca Resistente a Muy Resistente con una resistencia a la compresión uniaxial estimada mediante martillo geológico entre 75 MPa y 150 MPa, RQD de 85% a 95% y frecuencia de fracturas de 2 a 8 ff/m. En este tramo se observa una falla VIF de actitud N10°W / 85°E; es una falla sinuosa, rugosa con relleno de arcilla, yeso, hematita y sulfuros molidos. Dos sistemas de fallas FT se aprecian en el tramo, con actitudes N10°-30°W / 70°-85°NE y N60°-80°E / 70°-80°NW, son fallas sinuosas rugosas con relleno de yeso, arcilla y hematita.

5.4.3 Pórfido Este Sericítico (PES)

La unidad geotécnica Pórfido Este Sericítico (PES), se presenta entre los 160 m y los 200 m del cruzado. Corresponde a una roca granodiorítica-monzonítica de textura porfídica a inequigranular de grano medio, afectada por alteración sericítica en la forma de un reemplazo parcial de la roca por un agregado fino de sericita y cuarzo. Su calidad geotécnica es Regular, con un índice Q de 1,9 a 8,9. Tiene una resistencia a la compresión uniaxial (IRS), estimada variable entre 20 MPa y 100 MPa, aún que predomina la roca de dureza inferior a 70 MPa. La frecuencia de fracturas varía de 5 a 10 ff/m. El RQD se encuentra en el rango de 75% a 80%. En esta unidad, se presenta solo una falla VIF, de geometría anastomosada, de actitud N10°E / 75°SE, curva y lisa, con relleno de roca molida arcilla y yeso. Existen dos sistemas de fallas FT de actitud N55°-60°E / 70°-80°NW y N5°-30°E / 65°-75°NW.

5.4.4 Roca Cuarzo-Sericítica (RQS)

La unidad geotécnica Roca Cuarzo-Sericítica (RQS), resultado de la alteración cuarzo-sericítica sobre el Pórfido Este, se define como una roca fuertemente alterada con cuarzo como fenocristales recristalizados y vetilleos polidirecciones, en un agregado fino pervasivo de sericita y cuarzo, obliterando la mayor parte de la textura original de la roca (sobre el 90%). De acuerdo a la proporción entre cuarzo y sericita se han diferenciado tres unidades de RQS: Cuarzo Menor Sericita (Q<S), Cuarzo Igual Sericita (Q=S) y Cuarzo Mayor Sericita (Q>S). Se presenta desde 199,2 m a 232,9 m del Cruzado Geotécnico N°1 en su trazado original y desde los 0 m a los 169 m del Desvío XC-1, donde su límite occidental es la Falla Oeste. La Tabla 5.11 muestra los rangos de parámetros geotécnicos para las distintas subunidades de la unidad geotécnica RQS en el trazado del Cruzado Geotécnico N° 1.

Tabla 5.11: Distribución de subunidades de RQS en el Cruzado Geotécnico N° 1.

Subunidad	Ubicación	IRS (MPa)	Frecuencia de fracturas	RQD (%)	Q de Barton	Calidad Geotécnica	Obsevaciones
Q=S	XC-1; 199,3 m hasta 212,5 m	20-50	6-8	75	8,3	Regular	Zona de contacto entre RQS y PES
	Desvío XC-	50-120	2-8	80-85	13,3	Buena	Zona de RQS

	1; 51,2 m hasta 99,8				21,3		con la menor frecuencia de fallas
	Desvío XC-1; 139,4 hasta 169 m	1-100	6-10	60-80	0,06-5	Regular a Muy Mala	Zona de influencia Falla Oeste
Q>S	XC-1; 212,5 hasta 232,9 m y Desvío XC-1; 5 a 51,2 m	20-100	6-12	65-85	0,8-8,3	Mala a Regular	Zona de fallas VIF con goteos de agua y vetas de cuarzo molibdeno
Q<S	Desvío XC-1; 99,8 m a 139,4 m	25-100	4-11	75-85	5 a 9,4	Regular	

Las zonas de mayor daño estructural corresponden a las ubicadas al inicio del desvío, zona de Q>S con fallas VIF y vetas de cuarzo con velillas de molibdeno en presencia de goteos de agua, y a la zona aledaña a la Falla Oeste, correspondiente a la subunidad Q=S donde existe una alta frecuencia de fallas VIF.

En la unidad de RQS se identifican dos sistemas de fallas importante (VIF), el principal tiene una actitud N-S a N30°E / 70°-85°NW, son fallas sinuosas lisas, con relleno de salbanda, hematina y roca molida, este sistema es prominente en la zona de influencia de la Falla Oeste. Un segundo sistema, de menor importancia, restringida a la subunidad Q>S, tiene una actitud N10°-15°W / 70°-80°NE, son fallas sinuosas lisas con rellenos de arcilla y yeso. Las fallas intermedias (FT) se pueden asimilar a dos sistemas. El primero corresponde a fallas transversales a la dirección del túnel de rumbo general N30°E a 10°W, con manteos sobre 80° al NW y SE. El segundo sistema presenta rumbo N40°-70°E, con manteos variables de 60°-85° a NW y SE. En general estas fallas son curvas a sinusoidales con relleno de salbanda arcillosa, sulfuros molidos y yeso, presentando aberturas de 1 mm a 2 mm.

5.4.5 Falla Oeste (FO) y Brecha Entre Falla (BEF)

La Falla Oeste intercepta el Cruzado Geotécnico N° 1 entre los 169 m y los 172 m del Desvío XC-1. Su traza se ha caracterizado como paquetes arcillosos de color gris y rojizo de espesores e 0,1 m a 0,7 m de actitud NS / 85°-90° W (FO) y una brecha tectónica compuesta por fragmentos de Granodiorita Fortuna denominada Brecha Entre Falla (BEF). La roca presenta una resistencia a la compresión uniaxial (IRS) estimada entre 1 MPa y 80 MPa, variable de una roca Muy Débil a una roca Resistente. La brecha tectónica (BEF) se presenta fracturada en múltiples planos irregulares y polidireccionales de cizalle, con relleno de arcilla. El fracturamiento aparente es de 8 a 12 ff/m, pero al apretar el material con la mano se rompe por superficies no observables inicialmente. El Índice Q de Barton para la excavación realizada en la Falla Oeste es de 0,06, lo que la califica como una roca de Muy Mala calidad geotécnica. En la Tabla 5.12 se presentan algunos parámetros geotécnicos obtenidos del levantamiento geotécnico del Desvío XC-1 entre los 169 m y los 291 m, excavados en la Falla Oeste (FO) y la Zona de Cizalle Intenso (ZCI).

Tabla 5.12: Calidades Geotécnicas del macizo rocoso. Cruzado Geotécnico N° 1 (Desvío XC-1) Falla Oeste (FO + BEF) y Zona de Cizalle Intenso (ZCI)

Desde (m)	Hasta (m)	IRS (MPa)	Fxm	RQD (%)	Q Barton	Calidad Geot.	Unidad Geot.	GSI
169	172	1-80	10-12	60	0,06	Muy Mala	FO+BEF	BD/P(25-30)
172	175	1-25	15-20	30	0,08	Muy Mala	ZCI	BD/P(25-30)
175	191	3-25	10-15	20-60	0,17-0,75	Mala	ZCI	BD/P(30-35)-VBP(35-40)

5.4.6 Zona de Cizalle Intenso (ZCI)

Desde 172 m a 191 m del Desvío XC-1, se presenta la Zona de Cizalle Intenso (ZCI). Esta unidad geotécnica corresponde a roca de la Granodiorita Fortuna afectada por los mismos esfuerzos que generaron la Falla Oeste. Corresponde a una zona con un gran grado de deformación y diaclasamiento intenso a moderado. Los rellenos de fallas y diaclasa consisten en salbanda gris verdosa, hematita y goethita; con numerosos planos de cizalle polidireccionales a irregulares. La roca presenta una textura granular microfracturada de aspecto cataclástico. Su resistencia a la compresión uniaxial (IRS) estimada, presenta variaciones de 5 MPa a 25 MPa, lo que la califica como una roca de baja resistencia. Su RQD varía de 30% en la zona inmediata a la Falla Oeste hasta 55% en la zona más distal a la Falla Oeste. El índice Q de Barton varía de 0,08 a 0,67 lo que la califica de Muy Mala a Mala calidad geotécnica. Se reconocieron fallas importantes (VIF) con actitudes NS / 90° y N25°-35°W / 70°NE a subverticales, de 5 cm a 45 cm de espesor, con relleno arcillosos de color gris e influencia de hasta 2 m. Además se reconocen dos sistemas principales de fallas intermedias (FT) de actitudes N45°-65°E / 70°-75°NW y N30°W / 50°-80°SW, rellenas con roca molida, limonita y arcillas con una influencia de 0,2 m a 0,4 m y espesores de 0,5 cm a 2 cm.

VI ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TUNELES

6.1 Introducción

Sobre la base de la superposición del trazado de los túneles de exploración y drenaje de Chuquicamata, a los dominios estructurales del yacimiento y a la interpretación de datos estructurales, recolectados durante el levantamiento geotécnico-estructural de los túneles, en el mes de diciembre 2005, se ha realizado análisis estereográfico de distribución de fallas empleando el software DIPS 5.0, en el cual se consideró la proyección en el hemisferio inferior, distribución de Fisher, proyección equiangular, rangos de contornos superiores a 1% y corrección de Terzaghi, con un ángulo mínimo de 15° por orientación de las labores. Como resultado se interpreta la presencia de cuatro dominios estructurales en las labores

desarrolladas al Oriente de la Falla Oeste. Estos son: Nor-Oeste, Balmaceda, Estanques Blancos y Americana.

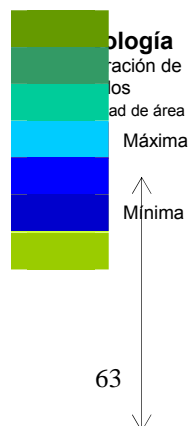
La Rampa de Exploración y el Túnel de Drenaje que en conjunto alcanzan una extensión lineal superior a los 5.900 m, se extienden preferentemente al Este del cuerpo mineralizado, en el área correspondiente a los dominios estructurales Noroeste, Balmaceda y Estanques Blancos (Capítulo IV, 4.3). El Cruzado Geotécnico N° 1 intersecta el cuerpo mineralizado en sentido Este-Oeste en la coordenada aproximada N-2.900, entre los dominios estructurales Noroeste y Americana. En la Lámina N° 5 del Anexo N° 4 se presenta el resultado del análisis con la distribución de los dominios estructurales en los túneles de exploración y drenaje de Chuquicamata,

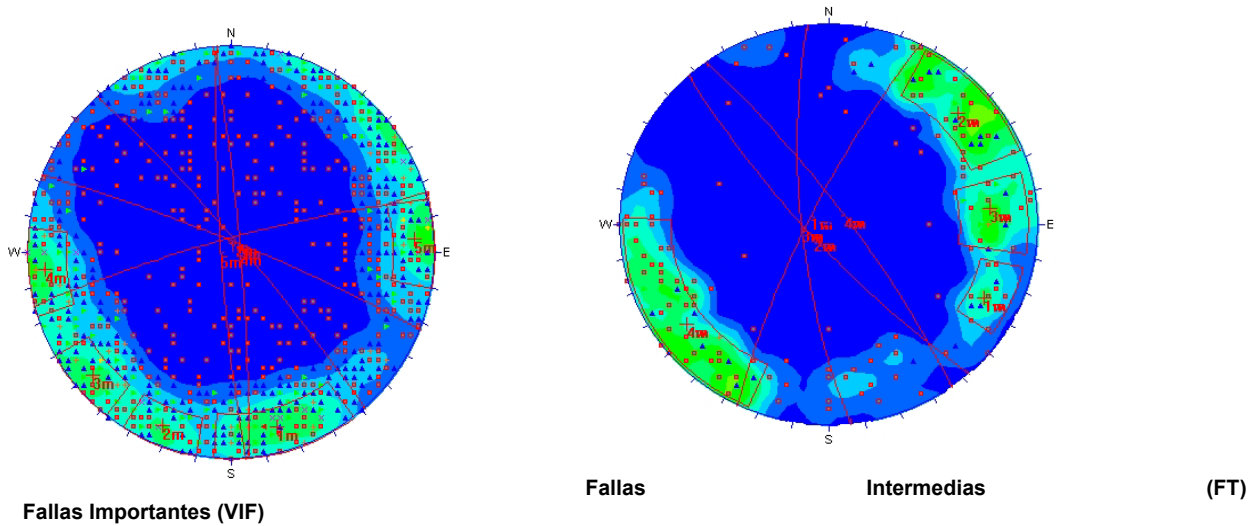
6.2 Dominio Estructural Nor-Oeste

El Dominio Estructural Nor-Oeste incluye el trazado de la Rampa de Exploración desde el portal hasta aproximadamente los 2.890 m y el Túnel de Drenaje desde su inicio hasta el metraje 420. En la Rampa de Exploración, la mayor proporción corresponde a la unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC), subordinadamente a la unidad Pórfido Este Potásico (PEK) y en menor proporciones a las unidades de Metasedimentos (MET) y Granodiorita Elena Sur (GES). En la Rampa de Drenaje corresponde únicamente a la unidad geotécnica de Metasedimentos (MET) hasta su contacto con el Pórfido Este Clorítico (PEC). Además el Dominio Noroeste cubre aproximadamente 180 m del Cruzado Geotécnico N° 1 en las unidades geotécnicas PEC, PEK y PES.

El límite Norte de este dominio, en el Túnel de Drenaje, corresponde a la unidad geotécnica de Metasedimentos (criterio litológico), unidad que se incluye en este dominio en forma congruente con lo definido para esta zona en superficie. En la Rampa de Exploración el límite Norte corresponde a un marcado cambio en la actitud de las estructuras desde un sistema de fallas de actitud general $N70^{\circ}-80^{\circ}W / 80^{\circ}-85^{\circ}SW$, perteneciente Dominio Nor-Oeste, hacia un sistema de estructuras de actitud general $N60^{\circ}-75^{\circ}E / 75^{\circ}-85^{\circ}SE$, incluido en el dominio Balmaceda. El límite específico del dominio en la Rampa Exploración es una estructura intermedia (FT) de actitud $N72^{\circ}W / 85^{\circ}NE$ a los 2.892 m.

En la Figura 6.1 siguiente se presenta la distribución estereográfica de los sistemas de fallas Intermedias (FT) e Importantes (VIF) del Dominio Estructural Nor-Oeste obtenida de una base de datos de las estructuras FT y VIF de 3.440 m de túneles.





FT	Polos totales (1.747)	Ocurrencia (%)	VIF	Polos totales (211)	Ocurrencia (%)
82/345	203	11,6	79/228	37	17,3
84/22	86	4,9	79/296	14	6,6
84/49	92	5,26	80/54	51	24,17
85/85	104	5,95	75/264	25	11,8
84/266	124	7,09			

Figura 6.1: Red Estereográfica para el Dominio Estructural Nor-Oeste en la Rampa de Exploración, el Túnel de Drenaje y el Cruzado Geotécnico N° 1

En la Tabla 6.1 se presenta la distribución de los sistemas de fallas de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul e indicando en fondo amarillo las tendencias principales de los sistemas de fallas del Dominio Nor-Oeste de Chuquicamata. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 6.1: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF y FT del Dominio Estructural Nor-Oeste en los túneles de Chuquicamata

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°				
Inclinado	41°-70°	$75^{\circ} \pm 12^{\circ} / 264^{\circ} \pm 14^{\circ}$			
Subvertical	71°-90°	$75^{\circ} \pm 12^{\circ} / 264^{\circ} \pm 14^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 6^{\circ} / 296^{\circ} \pm 12^{\circ}$ $85^{\circ} \pm 14^{\circ} / 85^{\circ} \pm 14^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 8^{\circ} / 266^{\circ} \pm 14^{\circ}$	$80^{\circ} \pm 8^{\circ} / 54^{\circ} \pm 40^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 9^{\circ} / 228^{\circ} \pm 25^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 7^{\circ} / 22^{\circ} \pm 13^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 7^{\circ} / 49^{\circ} \pm 13^{\circ}$	$79^{\circ} \pm 6^{\circ} / 296^{\circ} \pm 12^{\circ}$	$80^{\circ} \pm 8^{\circ} / 54^{\circ} \pm 40^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 345^{\circ} \pm 23^{\circ}$ $84^{\circ} \pm 7^{\circ} / 22^{\circ} \pm 13^{\circ}$

$85^{\circ} \pm 14^{\circ} / 85^{\circ} \pm 14^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

$80^{\circ} \pm 8^{\circ} / 54^{\circ} \pm 40^{\circ}$: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

La preponderancia de altos ángulos de manteo en los sistemas de falla principales, hacen poco probable la ocurrencia de cuñas inestables en este dominio estructural. La condición potencialmente más desfavorable a la estabilidad, se presenta en tramos de túnel, con

orientación paralela a las estructuras y con suficiente intensidad para que se produzca el desprendimiento de fragmentos tabulares (lajas) desde las paredes.

En la Rampa de Exploración se tiene esta orientación solo en cortos tramos, como en el inicio inmediato al portal, en las dos curvas principales y en labores anexas como estocadas para distintos fines. De estos tramos, solo en la curva próxima al inicio del Túnel de Drenaje, entre los metrajes 565 y 580, se observa esta condición en rocas corneas pertenecientes a la unidad geotécnica de Metasedimentos (MET), de Mala calidad geotécnica (índice Q de Barton de 0,8). El tramo de mayor extensión (80 m) con orientación Nor-Oeste se encuentra en el acceso a las chimeneas de ventilación (metraje 1.100 de la rampa), sin embargo, aquí las fallas se presentan cerradas, rugosas e irregulares, en roca de la unidad geotécnica PEC de Buena calidad (índice Q de 14,2 a 21,3).

En el tramo de 260 m a 280 m del Túnel de Drenaje, se encuentra la única zona de Mala calidad geotécnica (índice Q de 0,9), producto de la intercepción de fallas importantes e intermedias del Dominio Nor-Oeste, junto con la foliación propia de la unidad de Metasedimentos, la cual debió ser controlada incorporando la proyección de shotcrete a la fortificación con pernos sistemáticos y malla tejida.

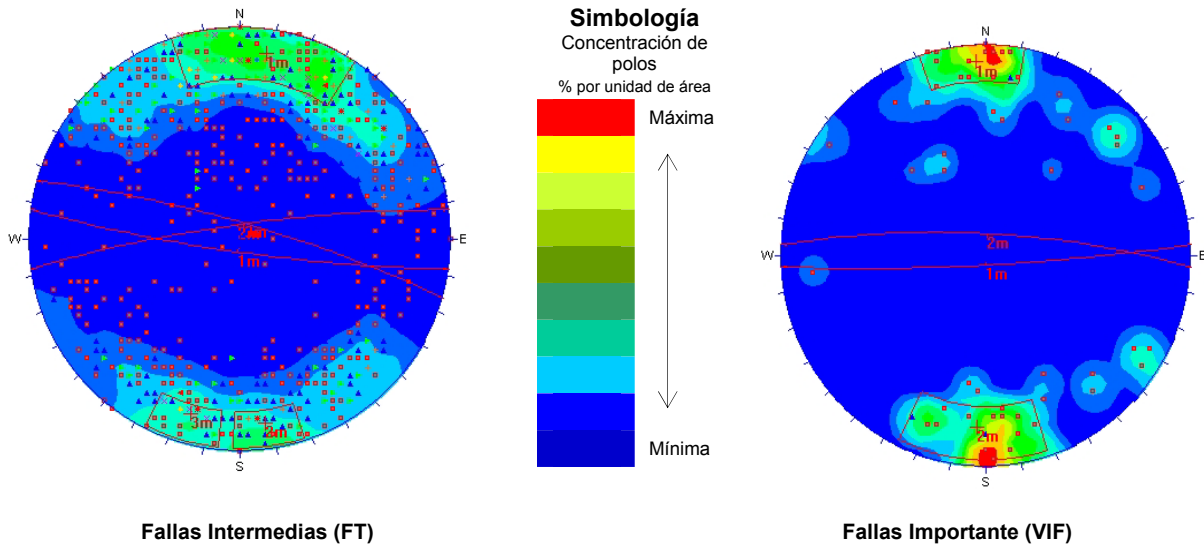
En el Cruzado Geotécnico N°1, el Dominio Nor-Oeste esta representado por fallas intermedias con escasa tendencia al deslizamiento en rocas de Buena calidad geotécnica de las unidades PEC y PEK.

6.3 Dominio Estructural Balmaceda

El Dominio Balmaceda se extiende desde el metraje 2.890 de la Rampa Exploración, y desde el metraje 420 del Túnel de Drenaje hacia el Norte, cubriéndolo en su mayor parte, exceptuando el tramo de 1.500 m a 2.000 m en el extremo Norte asignada al Dominio Estanques Blancos.

El límite Norte del Dominio Balmaceda corresponde a fallas importantes (VIF) de actitudes N53°E / 65°-75°NW y E-W / 88°S, marcando un desplazamiento de 200 m a 300 m al Norte del límite definido en superficie.

En la Figura 6.2 se presenta la distribución estereográfica de los sistemas de fallas Intermedias (FT) e Importantes (VIF) del dominio estructural Balmaceda obtenida de una base de datos de las estructuras FT y VIF de 2.000 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración y al Túnel de Drenaje en roca asignada a las unidades geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC) y Pórfido Este Potásico (PEK).



FT	Polos totales	Ocurrencia	VIF	Polos totales	Ocurrencia
	(1.114)	(%)		(58)	(%)
83/188	276	24,77	85/177	16	27,58
82/352	36	3,23	78/3	16	27,58
81/16	44	3,95			

Figura 6.2: Red estereográfica para el Dominio Estructural Balmaceda. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje

En la Tabla 6.2 se presenta la distribución de los sistemas de fallas de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul e indicando en fondo amarillo las tendencias principales de los sistemas de fallas del Dominio Balmaceda de Chuquicamata. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 6.2: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF y FT del Dominio Estructural Balmaceda en los túneles de Chuquicamata

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°,250°-290°	20°-70°,200°-250°	110°-160°,290°-340°	340°-20°,160°-200°
Subhorizontal	0°-40°				
Inclinado	41°-70°				
Subvertical	71°-90°		83°±11°/188°±30°	85°±10°/177°±19°	85°±10°/177°±19° 78°±7°/3°±26° 83°±11°/188°±30° 82°±6°/352°±11° 81°±5°/16°±12°

83°±11°/188°±30°: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

85°±10°/177°±19°: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

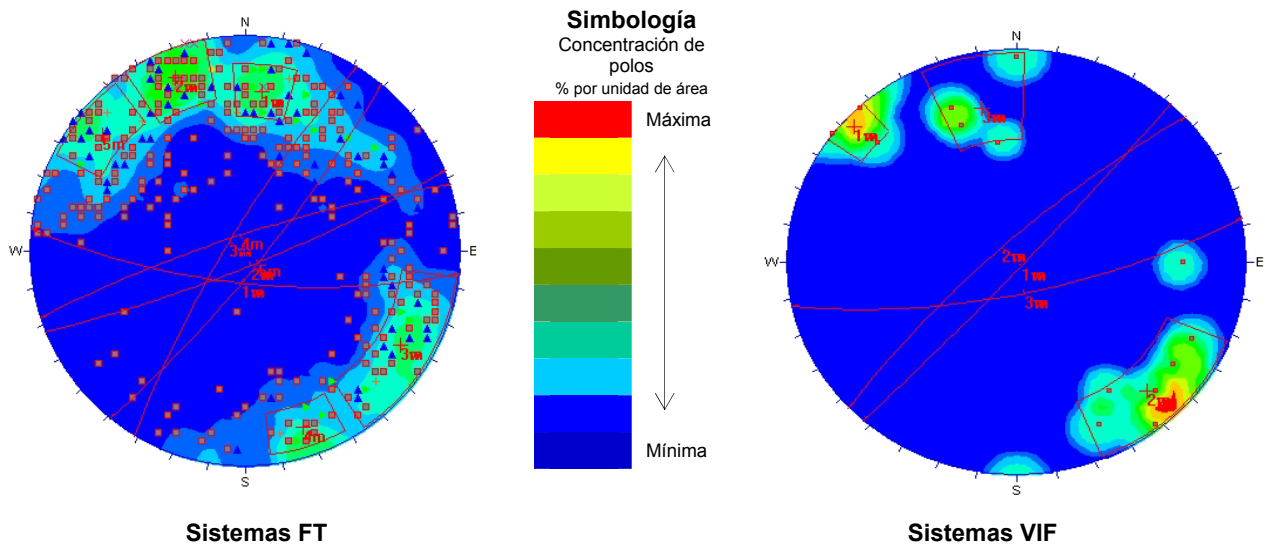
La preponderancia de fallas subverticales de orientación EW dentro del Dominio Balmaceda, hace poco probable la presencia de cuñas inestables en la Rampa de Exploración y el Túnel de Drenaje, ambos orientados preferentemente NS en el área de este dominio estructural. En estos desarrollos solo se pueden contabilizar la ocurrencia de desprendimientos de

fragmentos tabulares (lajas), desde las cajas de algunos de las estocadas, cargando parcialmente algunas mallas, en el transcurso de 2 a 3 años.

6.4 Dominio Estructural Estanques Blancos

Corresponde al extremo Norte de los desarrollos subterráneos de Chuquicamata, entre los metrajes 2.000 a 2.500 del Túnel de Drenaje excavada en la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK).

En la Figura 6.3 se presenta la distribución estereográfica de los sistemas de fallas Intermedias (FT) e Importantes (VIF) del dominio estructural Estanques Blancos obtenida de una base de datos de las estructuras FT y VIF de 500 m de túnel correspondientes al Túnel de Drenaje.



FT	Polos totales	Ocurrencia	VIF	Polos totales	Ocurrencia
	(489)	(%)		(14)	(%)
81/129	29	5,93	87/132	3	21,42
73/186	48	9,82	79/317	6	42,85
80/301	60	12,27	73/168	4	28,57
81/342	21	4,29			
82/158	61	12,47			

Figura 6.3: Red estereográfica para Dominio Estructural Estanques Blancos. Túneles de Exploración y Drenaje de Chuquicamata

En la Tabla 6.3 se presenta la distribución de los sistemas de fallas de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), distinguiendo fallas VIF en rojo, fallas FT en azul e indicando en fondo amarillo las tendencias principales de los sistemas de fallas del Dominio Estanques Blancos de Chuquicamata. Para cada sistema se indica el manteo promedio con

su rango de variación y la dirección de manto (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 6.3: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF y FT del Dominio Estructural Estanques Blancos en los túneles de Chuquicamata

	Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection		70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°
Subhorizontal	0°-40°				
Inclinado	41°-70°			$73^{\circ} \pm 23^{\circ} / 168^{\circ} \pm 22^{\circ}$	$73^{\circ} \pm 23^{\circ} / 168^{\circ} \pm 22^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 12^{\circ} / 186^{\circ} \pm 12^{\circ}$
Subvertical	71°-90°			$87^{\circ} \pm 12^{\circ} / 132^{\circ} \pm 8^{\circ}$ $79^{\circ} \pm 11^{\circ} / 317^{\circ} \pm 30^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 7^{\circ} / 342^{\circ} \pm 11^{\circ}$ $80^{\circ} \pm 7^{\circ} / 301^{\circ} \pm 26^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 8^{\circ} / 129^{\circ} \pm 16^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 158^{\circ} \pm 13^{\circ}$	$79^{\circ} \pm 11^{\circ} / 317^{\circ} \pm 30^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 23^{\circ} / 168^{\circ} \pm 22^{\circ}$ $73^{\circ} \pm 12^{\circ} / 186^{\circ} \pm 12^{\circ}$ $81^{\circ} \pm 7^{\circ} / 342^{\circ} \pm 11^{\circ}$ $82^{\circ} \pm 7^{\circ} / 158^{\circ} \pm 13^{\circ}$

$73^{\circ} \pm 12^{\circ} / 186^{\circ} \pm 12^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

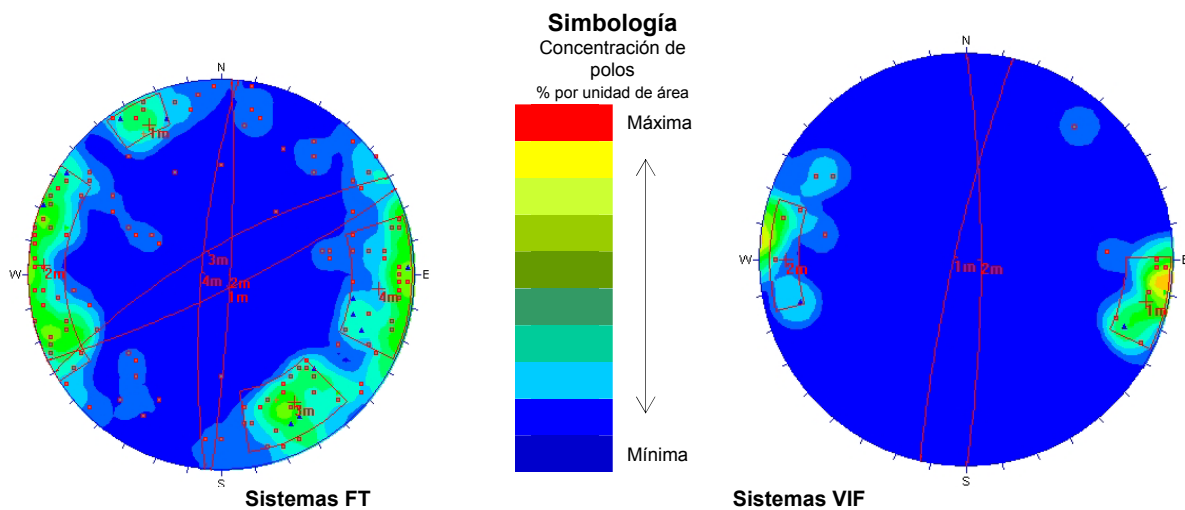
$79^{\circ} \pm 11^{\circ} / 317^{\circ} \pm 30^{\circ}$: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Las tendencias preferente subverticales y de orientación NE de las fallas de este dominio, en roca de la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK), presenta mayor probabilidad de inestabilidad en el extremo Norte del Túnel de Drenaje, excavación que tiene una orientación N70°E, concordante con los sistemas principales de fallas, generando una condición de calidad geotécnica Regular, con los valores menores en el índice Q en la curva Nor-Oeste del túnel (índice Q de 1,8), donde se observa gran cantidad de cuñas verticales esencialmente estables, limitadas por fallas sinusoidales.

6.5 Dominio Estructural Americana

Este dominio fue identificado en el sector sur de los sulfuros profundos en el Cruzado Geotécnico N° 1 y el Desvio XC-1. Se extiende desde el metraje 190 hasta el metraje 396 correspondiente a la traza Este de la Falla Oeste. Su límite por el Este corresponde a una falla VIF de actitud N10°-20°E / 75°SE, de geometría anastomosada. Comprende la unidad geotécnica Roca Cuarzo Sericítica (RQS) y en menor medida a la unidad Pórfido Este Sericítico (PES).

En la figura siguiente se presenta la distribución estereográfica de los sistemas de fallas Intermedias (FT e Importantes (VIF) del dominio estructural Americana obtenida de una base de datos de las estructuras FT y VIF correspondiente a 230 m de túnel del Cruzado Geotécnico N° 1.



FT	Polos totales	Ocurrencia	VIF	Polos totales	Ocurrencia
	(166)	(%)		(21)	(%)
81/154	8	4,8	82/90	5	42,8
85/93	36	21,6	83/283	9	23,8
74/330	33	19,8			
78/275	26	15,6			

Figura 6.4: Red estereográfica para Dominio Estructural Americana, Rampa Proyecto Sulfuros Profundos

En la Tabla 6.4 se presenta la distribución de los sistemas de fallas de acuerdo a su orientación (columnas) y a su manteo (filas), se indican en fondo amarillo las tendencias principales de los sistemas de fallas del Dominio Americana de Chuquicamata. Para cada sistema se indica el manteo promedio con su rango de variación y la dirección de manteo (Dipdirection) promedio con su rango de variación.

Tabla 6.4: Distribución de los Sistemas de Fallas VIF y FT del Dominio Estructural Americana en los túneles de Chuquicamata

Dip	NS	NW	NE	EW
Dipdirection	70°-110°, 250°-290°	20°-70°, 200°-250°	110°-160°, 290°-340°	340°-20, 160°-200°

Subhorizontal	0°-40°				
inclinado	41°-70°	$78^{\circ}\pm 14^{\circ}/275^{\circ}\pm 25^{\circ}$		$74^{\circ}\pm 12^{\circ}/330^{\circ}\pm 22^{\circ}$ $78^{\circ}\pm 14^{\circ}/275^{\circ}\pm 25^{\circ}$	$74^{\circ}\pm 12^{\circ}/330^{\circ}\pm 22^{\circ}$
Subvertical	71°-90°	$82^{\circ}\pm 5^{\circ}/90^{\circ}\pm 28^{\circ}$ $83^{\circ}\pm 8^{\circ}/283^{\circ}\pm 19^{\circ}$ $85^{\circ}\pm 9^{\circ}/93^{\circ}\pm 42^{\circ}$ $78^{\circ}\pm 14^{\circ}/275^{\circ}\pm 25^{\circ}$	$82^{\circ}\pm 5^{\circ}/90^{\circ}\pm 28^{\circ}$ $85^{\circ}\pm 9^{\circ}/93^{\circ}\pm 42^{\circ}$	$82^{\circ}\pm 5^{\circ}/90^{\circ}\pm 28^{\circ}$ $83^{\circ}\pm 8^{\circ}/283^{\circ}\pm 19^{\circ}$ $85^{\circ}\pm 9^{\circ}/93^{\circ}\pm 42^{\circ}$ $74^{\circ}\pm 12^{\circ}/330^{\circ}\pm 22^{\circ}$ $81^{\circ}\pm 5^{\circ}/154^{\circ}\pm 9^{\circ}$ $78^{\circ}\pm 14^{\circ}/275^{\circ}\pm 25^{\circ}$	$81^{\circ}\pm 5^{\circ}/154^{\circ}\pm 9^{\circ}$ $74^{\circ}\pm 12^{\circ}/330^{\circ}\pm 22^{\circ}$

$78^{\circ}\pm 14^{\circ}/275^{\circ}\pm 25^{\circ}$: Dip/Dipdirection de Sistemas de Fallas intermedia (FT)

$82^{\circ}\pm 5^{\circ}/90^{\circ}\pm 28^{\circ}$: Dip/Direction de Sistemas de Fallas Importantes (VIF)

Las direcciones preferentes NS a NE y altos ángulos de manto de las fallas del Dominio Americana, hacen poco probable la ocurrencia de cuñas inestables en el Cruzado Geotécnico N°1. El tramo más desfavorable por la cantidad de fallas y su baja resistencia al deslizamiento se encuentra entre los 205 m y 228 m del cruzado, en Roca Cuarzo-Sericítica (RQS) de Regular a Mala calidad geotécnica (índice Q de 8,3 a 0,8), cuya inestabilidad produjo un derrumbe producto de una fortificación insuficiente, y la paralización de los trabajos por varios meses debido a motivos operacionales. Si bien el área del derrumbe se encontraba parcialmente fortificada con pernos sistemáticos, malla y shotcrete, este se produjo a partir de la frente sin fortificar.

VII. DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN

En este capítulo se presenta la definición de la fortificación de los túneles de exploración y drenaje de Chuquicamata. Esta definición se ha realizado a partir de la clasificación NGI-Q de Barton (Grimstad & Barton, 1993; en Anexo N° 1), ajustada de acuerdo a las condiciones existentes en la mina Chuquicamata. Debido al hecho que los túneles se encuentran inmediatamente debajo del rajo Chuquicamata, dentro del área de esfuerzos activos inducidos por la explotación, Codelco Norte ha establecido como estándar mínimo de fortificación, independiente tanto de la calidad geotécnica del macizo rocoso excavado, como de la función, periodo de vida útil y dimensiones de las labores subterráneas, lo siguiente:

- Instalación de pernos helicoidales lechados sistemáticos en bóveda y parte superior de las paredes.
- Instalación de malla tejida en bóveda y parte superior de las cajas.
- Instalación de marcos de acero en portales y en el cruce de la Zona de Falla Oeste.

7.1. Rampa de Exploración

La Rampa de Exploración constituye la labor de acceso para acceder desde el banco M-3 del rajo Chuquicamata, a la periferia de las reservas explotables de los sulfuros profundos. Se desarrolló entre marzo del año 2003 y enero del año 2005, incluyendo 3.250 m de túnel, de 5 m por 5 m de sección y aproximadamente 700 m en labores anexas como estocadas de marina y de sondajes (de 18 m de largo), estocadas de drenaje (de 12 m de largo), accesos a los piques de ventilación, etc.

En la Tabla 7.1 se presentan los parámetros geotécnicos obtenidos del levantamiento geotécnico de la Rampa de Exploración incluyendo para cada tramo de túnel en proyección

horizontal la unidad geotécnica (U.G.), el índice RQD de Deere (1964) y los parámetros del sistema de clasificación de roca y definición de soporte de Barton et al. (1974). Para la razón de soporte (ESR de Barton, 1974, 1993) se asignó el valor 1,3 correspondiente a túneles de acceso. Se incluye el parámetro tramo máximo sin soporte S_{max} , que para este túnel, el cálculo entrega valores de 1,8 m en roca de Mala calidad geotécnica a 12,2 m en roca de Muy Buena calidad geotécnica. En la última columna de la Tabla 7.1 se incluye en cálculo del largo de los pernos sistemáticos según la metodología de Barton (1974, en Anexo N°1), que entrega un largo de 2,2 m para la rampa con extensión a los 2,4 m en las zonas de ensanche de las estocadas.

Desde el inicio hasta los 480 m del túnel, la excavación corresponde a roca de calidad geotécnica predominante Regular, de la unidad geotécnica Pórfido Este Clorítico (PEC), con índice Q entre 1,1 y 14,2; índice J_n predominante 6 a 10 correspondiente dos o más sistemas de fallas y diaclasas; J_r de 1,5 a 3 (fallas y diaclasas onduladas rugosas a pulidas); J_a de 2 a 4 (estructuras ligeramente alteradas o con rellenos arcillosos poco expansivos); y SRF de 1 a 2,5 correspondiente a macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud o de baja magnitud próximo a la superficie.

Entre los 480 m y 586 m se presenta roca de calidad geotécnica Mala en las unidades geotécnicas PEC y MET, con índice Q entre 0,4 a 0,8; índice J_n predominante 15 a 20 correspondiente a más de tres sistemas de fallas y diaclasas y ha roca desintegrada; J_r de 1 (fallas y diaclasas con espesores que impiden el contacto entre las paredes), J_a de 4 (rellenos arcillosos poco expansivos); y SRF de 1 correspondiente a macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud.

Tabla 7.1: Parámetros geotécnicos par la definición de la fortificación de la Rampa Exploración

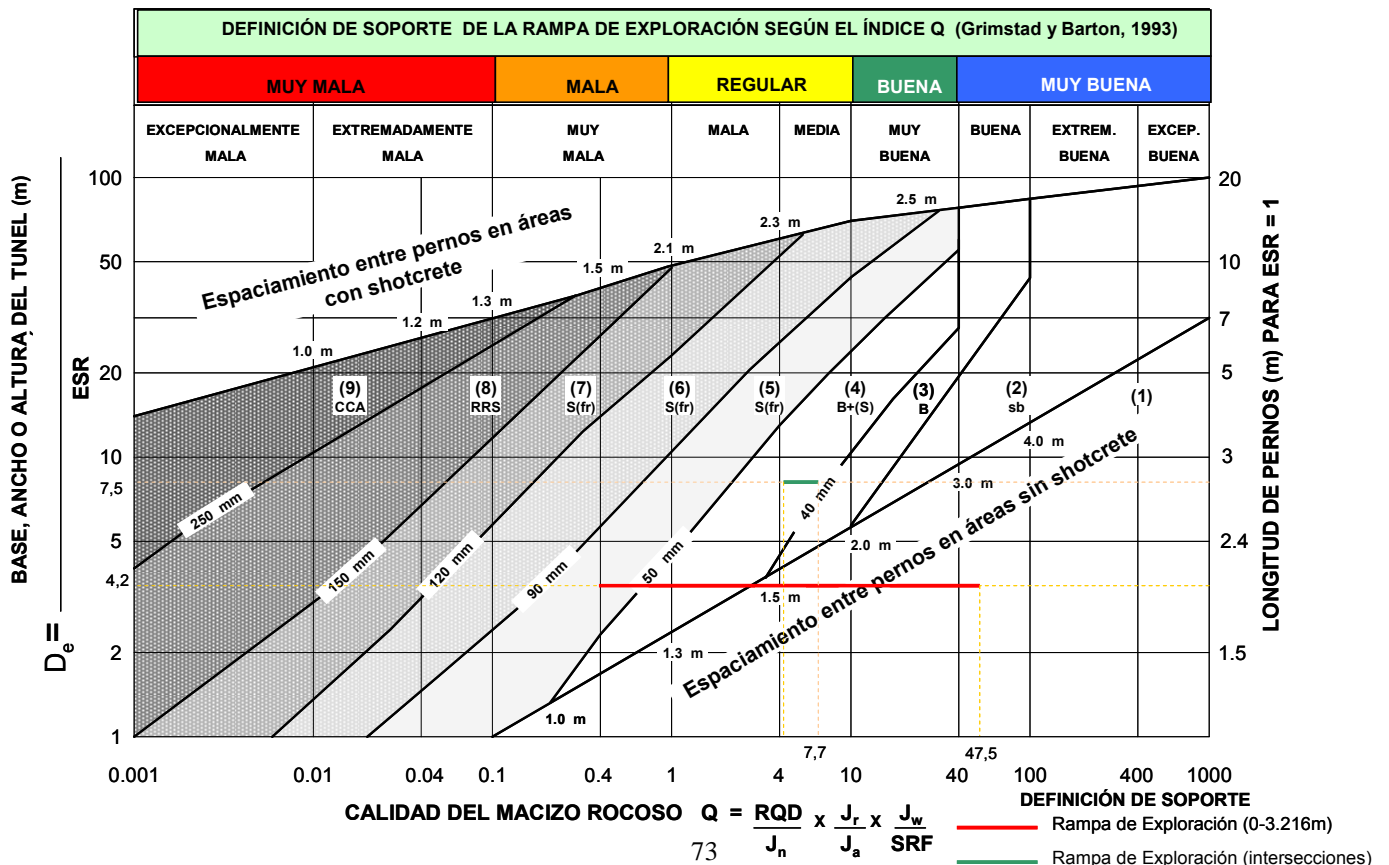
Tramo (m)	U.G.	RQD (%)	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	ESR	D_e	S_{max} (m)	L_p (m)
0-6	PEC	65	18	3	4	1	2,5	1,1	1,3	4,2	2,7	2,2
6-19	PEC	70	9	2	4	1	2,5	1,6	1,3	4,2	3,1	2,2
19-27	PEC	74	9	3	4	1	2,5	2,5	1,3	4,2	3,7	2,2
27-35	PEC	60	9	3	4	1	2,5	2	1,3	4,2	3,4	2,2
35-140	PEC	75-98	6-15	2-3	4	1	1	1,7-5,7	1,3	4,2	3,2-5,2	2,2
140-158	PEC	82-85	15	2,5	4	1	1	3,4-3,5	1,3	4,2	4,2-4,3	2,2
158-360	PEC	75-98	9-15	1,5-2,5	4	1	1	2,3-5	1,3	4,2	3,6-4,9	2,2
360-470	PEC	80-85	6-9	2-2,5	2	1	1	9,4-14,2	1,3	4,2	6,3-7,5	2,2
470-480	PEC	85	9	2	2	1	1	9,4	1,3	4,2	6,3	2,2
480-530	PEC	30-40	20	1	4	1	1	0,4-0,5	1,3	4,2	1,8-2	2,2
530-565	MET	40-50	15	1	4	1	1	0,7-0,8	1,3	4,2	2,2-2,4	2,2
565-586	MET	50	15	1	4	1	1	0,8	1,3	4,2	2,4	2,2
586-685	GES	65-80	9-15	2	4	1	1	2,2-3,9	1,3	4,2	3,7-4,5	2,2
685-1.125	PEC	55-80	9-15	2-3	4	1	1	2,3-6,7	1,3	4,2	3,6-5,6	2,2
1.125-1.273	PEC	60-80	9-12	1,5-2	2	1	1	4,2-8,9	1,3	4,2	4,6-6,3	2,2
1.273-1.600	PEC	70-90	6-9	1,5-3	2	1	1	8,3-22,5	1,3	4,2	6,1-9	2,2
1.600-1.800	PEC	75-90	9-6	2-2,5	2	1	1	10,4-18,8	1,3	4,2	6,6-8,4	2,2
1.800-2.240	PEC	75-90	4-9	2,5-3	2-3	1	1	11,1-31,9	1,3	4,2	6,8-10,4	2,2
2.240-2.250	PEK	75	6	2	4	1	1	6,3	1,3	4,2	5,4	2,2
2.240-2.470	PEK	75-90	4-6	2-3	2-3	1	1	12,5-20	1,3	4,2	7,1-8,6	2,2
2.470-2.500	PEC	80-85	6	2-3	2	1	1	13,3-21,3	1,3	4,2	7,3-8,8	2,2
2.500-2.710	PEK	75-90	3-6	2-3	2-4	1	1	8,9-47,5	1,3	4,2	6,2-12,2	2,2
2.710-2.740	PEC	70-80	6	1,5-3	2-3	1	1	10-18,8	1,3	4,2	6,5-8,4	2,2
2.740-2.750	PEC	70	6	1,5	4	1	2,5	1,8	1,3	4,2	3,3	2,2
2.750-2.800	PEC	75-85	6-9	1,5-2	2-3	1	1-2,5	5,3-12,5	1,3	4,2	5,1-7,1	2,2
2.800-2.810	PEK	80	6	2	4	1	2,5	2,7	1,3	4,2	4	2,2
2.810-3.216	PEK	75-90	4-6	1,5-3	2-4	1	1	8,9-33,8	1,3	4,2	6,2-10,6	2,2
Intersecciones	PEC-PEK	34-90	12-18	3-4	2-4	1	1	2,8-15	1,3	7,5	4-7,7	2,4

U.G. : Unidad Geotécnica
RQD : Rock Quality Designation (Deere, 1967)
J_n : Joint Set Number (Barton, 1974)
J_r : Joint Roughness Number (Barton, 1974)
J_a : Joint Alteration Number (Barton, 1974)
J_w : Joint water Reduction Factor (Barton, 1974)

SRF : Stress Reduction Factor (Barton, 1974)
Q : Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)
ESR : Excavation Support Ratio (Barton, 1974)
D_e : Dimensión Equivalente (Barton, 1974)
S_{max} : Distancia máxima sin soporte (Barton, 1974)
L_p : Largo de pernos sistemáticos (Barton, 1974)

Entre 586 m y 3.216 m predomina la calidad geotécnica Buena sobre Regular principalmente en la unidades geotécnicas PEC y PEK con índice Q entre 2,2 a 47,5; índice J_n de 4 a 15 correspondiente a dos o más de tres sistemas de fallas y diaclasas; J_r de 1,5 a 4 (fallas y diaclasas con planos ondulados lisos o a estructuras discontinuas); J_a de 2 a 4 (desde estructuras ligeramente alteradas a estructuras con rellenos arcillosos poco expansivos); y SRF de 1 a 2,5 correspondientes desde un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud hasta excavación en zonas débiles aisladas.

En la Figura 7.1 se presenta el gráfico de definición de soporte según el índice Q (Grimstad y Barton, 1993), aplicado a la excavación de la Rampa de Exploración, caracterizado en toda su extensión por una dimensión equivalente (D_e) de 4,2, exceptuando las zonas de intersección con labores anexas como estocadas de sondajes, donde la D_e alcanza el valor 7,5 por el aumento de sección en el túnel. Para las calidades geotécnicas de la roca con índice Q entre 0,4 a 47,5 (variables de calidad geotécnica Mala a Muy Buena), la aplicación del gráfico indica categorías de fortificación de 1, 4 y 5; correspondientes, respectivamente, a sin fortificación, a pernos sistemáticos mas shotcrete de 4 cm a 10 cm y a shotcrete con fibra (5 cm a 9 cm de espesor) mas pernos sistemáticos. Respecto al espaciamento de los pernos sistemáticos instalados en paredes y bóveda de la rampa, de acuerdo a la aplicación gráfica, se obtienen valores de 1,5 m a 2,3 m siempre aplicados con shotcrete, para largos de perno de aproximadamente 2 m que se extienden a 2,8 m en las intersecciones.



CATEGORÍAS DE FORTIFICACIÓN

- | | |
|--|--|
| 1. Sin Fortificación
2. Pernos Puntuales, sb
3. Pernos Sistemáticos, B | 4. Sin Fortificación
5. Shotcrete con Fibras, 40 - 50 mm y Pernos, S(fr)
6. Shotcrete con Fibras, 90 - 120 mm y Pernos, S(fr) + B
7. Shotcrete con Fibras, 120 150 120 mm y Pernos, S(fr) + B
8. Shotcrete con Fibras, > 150 mm con Pernos y Marcos Reforzados con Shotcrete |
|--|--|

Figura 7.1: Definición de fortificación a través del gráfico de Grimstad y Barton (1993) aplicado a la Rampa de Exploración de Chuquicamata

En la Tabla 7.2 se presenta la fortificación definida de acuerdo al índice de calidad de roca Q de Barton según el gráfico de definición de soporte de Grimstad y Barton de 1993 (Figura 7.1) y la fortificación aplicada en la Rampa de Exploración de Chuquicamata, de acuerdo al estándar de Codelco Norte, considerando el efecto de la excavación y tronadura del rajo Chuquicamata, a distancias lineales sobre 400 m, sobre la estabilidad de los desarrollos subterráneos.

Ante el efecto acumulativo, en el mediano y largo plazo (1 a 10 años), se considera como fortificación mínima la instalación de pernos sistemáticos y malla tejida sobre la gradiente. Además se privilegia el empleo de pernos helicoidales lechados, sobre la proyección de shotcrete, aumentando su extensión a los 2,7 m y su densidad de 0,25 pernos por metro cuadrado (P/m^2) a $0,44 P/m^2$. En roca de mala calidad geotécnica con índice Q 0,4 a 0,5 se reemplaza la proyección de shotcrete con fibra por shotcrete con malla tejida, considerando que ambos sistemas de fortificación presenta una resistencia a la tracción similar. Por último, en el área del portal, se considera la instalación de marcos rígidos como soporte de la roca dañada por la tronadura masiva.

Tabla 7.2: Fortificación Rampa Exploración.

Tramo (m)	Fortificación según Q-NGI (Grimstad & Barton, 1993)	Fortificación Aplicada en Chuquicamata
0-6	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m. separados a 2,1 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Marco rígido a 1 m embebido en hormigón.
6-19	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m. separados a 2,2 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos helicoidales de 22 mm de espesor, lechados en toda su extensión, de 2,7 m de largo separados sistemáticamente en corridas a 1,5 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm. Marco rígidos a m.
19-27		<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
27-35	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 2,1 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm.
35-140	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 2,2 m Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
140-158	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm.
158-360	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m.

	<ul style="list-style-type: none"> separados a 2,2 m. Shotcrete 4cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Malla 10006.
360-470 470-480	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	
480-530	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0m separados a 1,5 m. Shotcrete reforzado con fibra 7 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm sobre la gradiente.
530-565 565-586	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 1,9 m. Shotcrete 5 cm. 	
586-1.125	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 2,2 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
1.125-1.610		
1.610-2.740	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m. Malla 10006.
2.740-2.750	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 2,1 m. Shotcrete 6 cm. 	
2.750-2.800	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	
2.800-2.810	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,0 m separados a 2,2 m. Shotcrete 5 cm. 	
2.810-3.216	Sin fortificación.	
Intersecciones	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,8 m separados a 2,3 m. Shotcrete 4 cm. 	

7.2. Túnel de Drenaje

El Túnel de Drenaje del Talud Este del Rajo Chuquicamata, se desarrolló entre Junio del año 2004 y Octubre del año 2005, incluyendo 2.650 m de túnel y aproximadamente 300 m en labores anexas como estocadas de marina y de sondajes (de 18 m de largo), estocadas de drenaje (de 12 m de largo), accesos a piques de ventilación, etc.

En la Tabla 7.3 se presentan los parámetros geotécnicos obtenidos del levantamiento geotécnico del Túnel de Drenaje incluyendo para cada tramo de túnel en proyección horizontal la unidad geotécnica (U.G.), el índice RQD de Deere (1964) y los parámetros del sistema de clasificación de roca y definición de soporte de Barton et al. (1974), modificado por Grimstad & Barton (1993). Estos parámetros no consideran el efecto de la excavación y tronadura del rajo Chuquicamata sobre la estabilidad de los desarrollos subterráneos bajo el rajo.

Tabla 7.3: Parámetros geotécnicos par la definición de la fortificación del Túnel de Drenaje

Tramo (m)	U.G.	RQD (%)	J _n	J _r	J _a	J _w	SRF	Q	ESR	D _e	S _{max} (m)	L _p (m)
0-6	MET	75	18	2	3	1	1	2,8	1	4,5	4,8	2,7
6-50	MET	60-80	6	1,5-3	3-4	1	1	5-13,3	1,3	3,5	6,1-9	2
50-155	MET	65-80	6-9	2-3	2	1	1	9,7-20	1,3	3,5	7,9-10,6	2

155-270	MET	45-70	6-9	2-3	2-4	1	1-2,5	1,5-8,3	1,3	3,5	3,7-7,5	2
270-300	MET	45-60	6	1-2	4-5	1	2,5	0,9-1	1,3	3,5	3,1-3,2	2
300-420	MET	55-80	4-6	1-2	3-4	1	1-2,5	1,1-6,7	1,3	3,5	3,3-6,8	2
420-440	PEC	77-75	6	2-3	3-4	1	2,5	3,1-3,8	1,3	3,5	5-5,4	2
440-590	PEC	70-90	4-9	2-3	2-4	1	1	4,2-22,5	1,3	3,5	5,7-11,1	2
590-810	PEC	75-95	3-6	2,5-3	2-4	1	1	10,6-35,6	1,3	3,5	8,2-13,3	2
810-1.030	PEC	75-85	4-6	1,5-3	3-4	1	1	4,7-15	1,3	3,5	5,9-9,4	2
1.030-1.150	PEC	75-85	4-6	3	3-4	1	1	10-21,3	1,3	3,5	8-10,9	2
1.150-1.287	PEK	65-90	3-6	1,5-3	3-4	1	1	4,1-22,5	1,3	3,5	5,6-11,1	2
1.287-1.310	PEC	75-85	4-6	1,5-3	2-3	1	1	12,5-15,9	1,3	3,5	8,8-9,7	2
1.310-1.620	PEK	90-70	4-6	1,5-3	2-4	1	1	4,7-22,5	1,3	3,5	5,9-11,1	2
1.620-1.799	PEK	65-80	6-9	1-3	3-4	1	1	1,8-13,3	1,3	3,5	4-9	2
1.799-1.960	PEK	75-90	3-6	2-3	3-4	1	1	10-20	1,3	3,5	8-10,6	2
1.960-2.450	PEK	70-95	4-9	1-3	2-4	1	1	3,1-22,5	1,3	3,5	5-11,1	2
2.450-2.618	PEK	75-90	3-6	1,5-3	2-3	1	1	10,6-28,3	1,3	3,5	8,2-12,2	2
Intersecciones	MET-PEK	55-90	12-27	1,5-3	2-4	1	1	1,9-14,2	1,3	6,5	4,1-9,2	2,3

U.G. : Unidad Geotécnica

RQD : Rock Quality Designation (Deere, 1967)

J_n : Joint Set Number (Barton, 1974)

J_r : Joint Roughness Number (Barton, 1974)

J_a : Joint Alteration Number (Barton, 1974)

J_w : Joint water Reduction Factor (Barton, 1974)

SRF : Stress Reduction Factor (Barton, 1974)

Q : Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)

ESR : Excavation Support Ratio (Barton, 1974)

D_e : Dimensión Equivalente (Barton, 1974)

S_{max} : Distancia máxima sin soporte (Barton, 1974)

L_p : Largo de pernos sistemáticos (Barton, 1974)

Para el Túnel de Drenaje se ha empleado el valor 1,3 para la razón de soporte ESR correspondiente a túneles de acceso y 1 correspondiente a intersecciones de túneles. De acuerdo al ancho de la labor de 4,5 m, para la dimensión equivalente D_e se obtiene un valor de 3,5 y largo de perno de 2 m con excepción del inicio del túnel en el metraje 575 de la Rampa de Exploración donde D_e=4,5 y L_p=2,7. También difieren estos valores en la intersecciones y ensanches de las estocadas de drenaje a D_e=6,5 y L_p=2,3 m. Se incluye el parámetro tramo máximo sin soporte S_{max}, que para este túnel, el cálculo entrega valores de 3,1 m en roca de Mala calidad geotécnica a 13,3 m en roca de Buena calidad geotécnica. En la última columna de la Tabla 7.3 se incluye en cálculo del largo de los pernos sistemáticos según la metodología de Barton (1974, en Anexo N°1), que entrega un largo de 2,0 m para la rampa con extensión a los 2,3 m en las zonas de ensanche de las estocadas.

Desde 0 m hasta 420 m, en la unidad geotécnica MET predomina la roca de calidad geotécnica Regular con índice Q entre 0,9 a 20; índice J_n predominante de 6 a 9 correspondientes a dos sistemas más fallas de dirección aleatorias o a tres sistemas de fallas y diaclasas; J_r de 1 a 3 (fallas y diaclasas con espesores que impiden el contacto entre las paredes o fallas y diaclasas con planos ondulados rugosas a lisos); J_a de 2 a 5 (estructuras con ligera alteración a estructuras con rellenos arcillosos poco expansivos); SRF de 1 a 2,5 correspondientes desde un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud hasta excavación en zonas débiles aisladas.

Entre 420 m y 2.618 m se encuentra roca de calidad geotécnica predominante Buena sobre Regular en las unidades geotécnicas PEC y PEK, con índice Q entre 1,8 a 28,3; índice J_n predominante de 4 a 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas y opcionales estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1 a 3 (fallas y diaclasas con espesores que impiden el contacto entre las paredes a fallas y diaclasas con planos ondulados rugosas a lisos), J_a de 2 a 4 (rellenos arcillosos poco expansivos); SRF predominante de 1 correspondiente a un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud.

En la Figura 7.2 se presenta el gráfico de definición de soporte según el índice Q (Grimstad y Barton, 1993), aplicado a la excavación del Túnel de Drenaje, caracterizado por una dimensión equivalente (D_e) de 3,5, exceptuando las zonas de intersección con la Rampa de Exploración en su inicio y con labores anexas como estocadas de sondajes, donde la D_e alcanza el valor 4,5 y 6,5 respectivamente. Para las calidades geotécnicas de la roca con índice Q entre 0,9 a 35,6 (variables de calidad geotécnica Mala a Buena), la aplicación del gráfico indica categorías de fortificación de 1, 3 y 4; correspondientes, respectivamente, a sin fortificación, a pernos sistemáticos y a pernos sistemáticos con shotcrete de 40 mm a 100 mm.

El espaciamiento de los pernos sistemáticos instalados en paredes y bóveda de la rampa, de acuerdo a la aplicación gráfica, se obtienen valores de 1,7 m a 2,3 m, con shotcrete para largos de perno de aproximadamente 1,8 m que se extienden a 2,2 m en la intersección de inicio del túnel y a 2,6 en las intersecciones con las estocadas de sondaje.

Ante el efecto acumulativo, en el mediano y largo plazo (1 a 10 años), se considera como fortificación mínima la instalación de pernos sistemáticos y malla tejida sobre la gradiente. Además se privilegia el empleo de pernos helicoidales lechados, sobre la proyección de shotcrete. En el inicio del túnel, se aumentando su extensión a los 2,7 m y 4 m y su densidad de $0,51 \text{ P/m}^2$ a $0,69 \text{ P/m}^2$. En el resto del túnel, se aumentando su extensión a los 2,7 m y su densidad de $0,25 \text{ P/m}^2$ a $0,51 \text{ P/m}^2$.

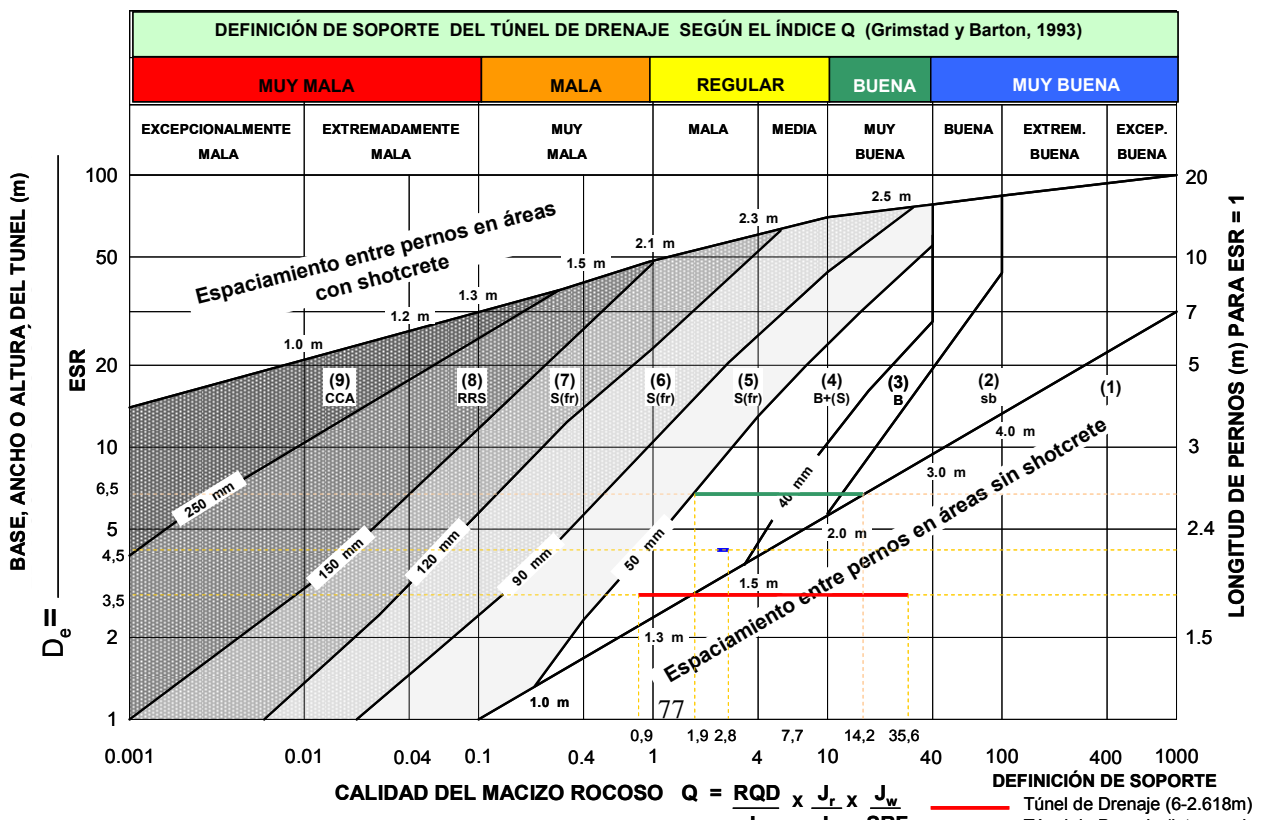


Figura 7.2: Definición de fortificación a través del grafico de Grimstad y Barton (1993) aplicado al Túnel de Drenaje de Chuquicamata

En la Tabla 7.4 se presenta la fortificación definida de acuerdo al índice de calidad de roca Q de Barton de según el gráfico de definición de soporte de Grimstad y Barton de 1993 (Figura 7.2). Para los tramos indicados del Túnel de Drenaje se indica la fortificación obtenida del grafico y la fortificación recomendada durante la excavación que considera el sostenimiento adicional para asegurar la estabilidad de desarrollos subterráneos debajo del rajo en explotación.

En la Rampa de Drenaje, el único tramo con Mala calidad geotécnica, ubicado entre los 270 m y 300 m, requirió de la proyección sobre los pernos sistemáticos y la malla, de 10 cm de shotcrete a sección completa. Además se recomendó la proyección de 5 cm de shotcrete en una estocada de sondajes (Estocada de Sondajes N° 2) de Regular calidad geotécnica afectada por la escurrimientos de agua proveniente de sondajes de drenaje que afectaron roca alterada de la unidad de MET. En el resto del túnel, donde la roca es de Regular y Buena calidad geotécnica (incluyendo las demás intersecciones con estocadas de marina y sondaje), se fortificó con el soporte básico consistente en pernos sistemáticos y malla tejida. En el inicio de la Rampa se recomendó la instalación de pernos sistemáticos de 4 m de largo, en una cuadrícula adicional separados a 2 m en la bóveda. Por último se recomendaron pernos puntuales para asegurar la estabilidad de cuñas probablemente inestables no cubiertas por los pernos sistemáticos.

Tabla 7.4: Fortificación Túnel de Drenaje.

Tramo (m)	Fortificación según Q-NGI (Grimstad & Barton, 1993)	Fortificación Aplicada en Chuquicamata
0-6	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m Pernos sistemáticos de 4 m separados a 2 m Malla 10006
6-155		<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
155-270	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,2 m. Shotcrete 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
270-300	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,1 m. Shotcrete 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006. Shotcrete 10 cm a sección completa
300-420		<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m

420-1.287	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	
1.287-1.620		
1.620-1.799	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,2 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006. Pernos puntuales de 2,7 m
1.799-2.450	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.
2.450-2.618		
Intersecciones	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,6 m separados a 2,2 m + Shotcrete (5 cm) o pernos sistemáticos de 2,6 m separados a 1,8 m. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.

7.3. Cruzado Geotécnico N° 1

El Cruzado Geotécnico N° 1 se desarrolló hasta los 396,2 m entre Marzo del año 2004 y Marzo del año 2005. En la Tabla 7.5 se presentan los parámetros geotécnicos para la definición de la fortificación de acuerdo al sistema de clasificación de calidad de roca Q de Barton et al (1974), modificado por Grimstad & Barton (1993), obtenido del levantamiento geotécnico del Cruzado Geotécnico N° 1. Para cada tramo se indica la unidad geotécnica (U.G.), el índice de calidad RQD, el índice J_n de número de sistemas de discontinuidades, el índice J_r de rugosidad de las estructuras más favorables al deslizamiento, el índice J_a de alteración y relleno de las discontinuidades más favorables al deslizamiento, índice J_w por presencia de agua, el factor SRF de la condición de esfuerzos del macizo rocoso, el índice Q de Barton, la razón de soporte ESR, la dimensión equivalente D_e , la máxima extensión sin fortificar S_{max} y el largo de los pernos de roca L_p . El parámetro S_{max} , el cálculo entrega valores de 0,8 m en roca de Muy Mala calidad geotécnica a 10,1 m en roca de Buena calidad geotécnica. En la última columna de la Tabla 7.5 se incluye en cálculo del largo de los pernos sistemáticos según la metodología de Barton (1974, en Anexo N°1), que entrega un largo de 2,0 m para la rampa con extensión a los 2,3 m en las zonas de ensanche de las estocadas. Estos parámetros no consideran el efecto de la excavación y de la tronadura en el rajo Chuquicamata sobre la estabilidad de los desarrollos subterráneos.

Tabla 7.5: Parámetros geotécnicos par la definición de la fortificación del Cruzado Geotécnico N° 1

Tramo (m)	U.G.	RQD (%)	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	ESR	D_e	S_{max} (m)	L_p (m)
0-50	PEC	85-90	6	2,5	2	1	1	17,7-18,8	1,3	3,5	8,2-8,4	2
50-130	PEK	85-95	4-6	2,5	2	1	1	17,7-29,7	1,3	3,5	8,2-10,1	2
130-160	PEK	80-90	6	1,5-2	3-4	1	1	5,3-10	1,3	3,5	5-6,5	2
160-200	PES	75-80	6	1,5-2	3-4	1	1-2,5	1,9-8,9	1,3	3,5	3,3-6,2	2
200-215	RQS	75	6	2	3	1	1	8,3	1,3	3,5	6	2
215-225	RQS	65	6	1,5	8	1	2,5	0,8	1,3	3,5	2,3	2
225-232	RQS	65	6	1,5	8	1	2,5	0,8	1,3	3,5	2,3	2
DESVÍO XC-1												
203-235	RQS	75-80	4-6	1-2,5	6	1	2,5	0,8-2	1,3	3,5	2,3-5,4	2
235-243	RQS	75-80	6	1,5	6	1	2,5	0,8	1,3	3,5	3,2-5,4	2

243-255	RQS	80	4-6	2	4	1	1-2,5	4-6,7	1,3	3,5	4,5-5,6	2	U.G. :
255-310	RQS	80-85	4-6	3	3-4	1	1	13,3-21,3	1,3	3,5	7,3-10	2	
310-355	RQS	70-85	6	1,5-2	3-4	1	1	5-9,4	1,3	3,5	4,9-6,4	2	
355-374	RQS	60-70	6	1,5	6	1	2,5	1-1,2	1,3	3,5	2,6-2,8	2	
374-377	FO	60	6	0,5	8	1	10	0,06	1,3	3,5	0,8	2	
377-380	ZCI	30	6	1	6	1	10	0,08	1,3	3,5	0,9	2	
380-396,2	ZCI	55-60	6	1	6	1	2,5	0,6-0,7	1,3	3,5	2,1-2,3	2	
Intersección	PEK	80	18	2,5	2	1	1	5,6	1,3	6,5	5,2	2,3	

Unidad Geotécnica

RQD : Rock Quality Designation (Deere, 1967)

J_n : Joint Set Number (Barton, 1974)

J_r : Joint Roughness Number (Barton, 1974)

J_a : Joint Alteration Number (Barton, 1974)

J_w : Joint water Reduction Factor (Barton, 1974)

SRF : Stress Reduction Factor (Barton, 1974)

Q : Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)

ESR : Excavation Support Ratio (Barton, 1974)

D_e : Dimensión Equivalente (Barton, 1974)

S_{max} : Distancia máxima sin soporte (Barton, 1974)

L_p : Largo de pernos sistemáticos (Barton, 1974)

Para el Cruzado Geotécnico N° 1 se ha empleado el valor 1,3 para la razón de soporte ESR correspondiente a túneles de acceso. De acuerdo al ancho de la labor de 4,5 m, para la dimensión equivalente D_e se obtiene un valor de 3,5 y largo de perno L_p de 2 m con excepción del ensanche para una estocada de sondajes, donde D_e=6,5 y L_p=2,3 m.

De 0 m a 215 m se excavó en roca de calidad geotécnica Regular a Buena, en las unidades geotécnicas PEC, PEK, PES y RQS, con índice Q entre 1,9 a 29,7; índice J_n predominante de 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1,5 a 2,5 (fallas y diaclasas con planos ondulados rugosos a lisos); J_a de 2 a 4 (desde estructuras ligeramente alteradas a rellenos arcillosos poco expansivos); y SRF de 1 a 2,5 correspondiente principalmente a un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud y puntualmente a excavación en zonas débiles aisladas.

De 215 m a 232 m corresponde a roca de calidad geotécnica Mala en RQS, con índice Q de 0,8; índice J_n de 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1,5 (fallas y diaclasas con planos ondulados lisos); J_a de 8 (rellenos arcillosos que se ablandan); y SRF de 2,5 correspondiente a excavación en zonas débiles aisladas.

Entre los 205 m y los 235 m, en el tramo de inicio del Desvío XC-1 predomina la calidad geotécnica Regular sobre Mala, en RQS con índice Q entre 0,8 y 6,3; índice J_n de 4 a 18 correspondientes a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatorias; J_r de 1 a 2 (fallas con relleno arcilloso sin posibilidad de contacto entre las paredes y estructuras onduladas lisas); J_a de 4 a 6 (desde estructuras con rellenos arcillosos poco expansivos a estructuras con rellenos arcillosos que no se ablandan); y SRF de 1 a 2,5 correspondientes desde un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud hasta excavación en zonas débiles aisladas.

De 235 m a 243 m se presenta roca de calidad geotécnica Mala en RQS, con índice Q de 0,8; índice J_n de 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1 (fallas con relleno arcilloso sin posibilidad de contacto entre las paredes al deslizarse); J_a de 6 (rellenos arcillosos que se no ablandan); y SRF de 2,5 correspondiente a excavación en zonas débiles aisladas.

Entre los 243 m y los 355 m del Desvío XC-1 se presenta calidad geotécnica Regular y Buena en RQS con índice Q entre 4 y 21,3; índice J_n de 4 a 6 correspondientes a dos sistemas de fallas y diaclasas más ocasionales estructuras de orientación aleatorias; J_r de 1,5 a 3 (fallas y diaclasas con planos ondulados rugosas a lisos); J_a de 3 a 4 (estructuras con poco contenido de arcillas o rellenos arcillosos poco expansivos); y SRF de 1 a 2,5 correspondientes, predominantemente, a un macizo rocoso competente con un estado tensional de moderada magnitud, sobre excavación en zonas débiles aisladas.

Entre los 355 m y los 374 m se presenta roca RQS de calidad geotécnica Regular, con índice Q de 1 a 1,2; índice J_n de 6 correspondientes a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatorias; J_r de 1,5 (fallas y diaclasas con planos ondulados lisos); J_a de 6 (estructuras con contenido de arcillas que no se ablandan); y SRF de 2,5 correspondiente a excavación en zonas débiles aisladas.

De 374 m a 380 m corresponde a roca de Muy Mala calidad geotécnica en la zona de la Falla Oeste (FO) y parte de su zona de cizalle (ZCI), con índice Q de 0,06 a 0,08; índice J_n de 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1 a 0,5 (fallas con relleno arcilloso sin posibilidad de contacto entre las paredes o planas y pulidas); J_a de 6 a 8 (rellenos arcillosos que se pueden ablandar); y SRF de 10 correspondiente a excavación en zonas débiles múltiples.

Entre 380 m y 396,2 m del Desvío XC-1 predomina la calidad geotécnica Mala sobre Regular en Zona de Cizalle Intenso (ZCI) con índice Q entre 0,2 y 2,2; índice J_n de 6 correspondiente a dos sistemas de fallas y diaclasas más estructuras de orientación aleatoria; J_r de 1 a 2 (fallas con relleno arcilloso sin posibilidad de contacto entre las paredes y estructuras onduladas y lisas); J_a de 4 a 6 (desde estructuras con rellenos arcillosos poco expansivos a estructuras con rellenos arcillosos que no se ablandan); y SRF de 2,5 a 5 correspondientes desde excavación en zonas débiles aisladas a un macizo rocoso muy fracturado.

En la Figura 7.3 se presenta el gráfico de definición de soporte según el índice Q (Grimstad y Barton, 1993), aplicado a la excavación del Cruzado Geotécnico N° 1, caracterizado por una dimensión equivalente (D_e) de 3,5, exceptuando las zonas de intersección con una estocadas de sondajes, donde la D_e alcanza el valor 6,5. Para las calidades geotécnicas de la roca con índice Q entre 0,06 a 29,7 (variables de calidad geotécnica Mala a Buena), la aplicación del gráfico indica categorías de fortificación de 1, 4, 5 y 6; correspondientes, respectivamente, a sin fortificación, a pernos sistemáticos con shotcrete de 40 mm a 100 mm, a shotcrete con fibra (50 mm – 90 mm) y pernos sistemáticos y a shotcrete con fibra (90 mm – 120 mm) y pernos sistemáticos. Respecto al espaciamiento de los pernos sistemáticos instalados en paredes y bóveda de la rampa, de acuerdo a la aplicación gráfica, se obtienen valores de 1,3 m a 1,6 m con shotcrete, para perno de aproximadamente 1,7 m que se extienden a 2,6 m en las intersecciones.

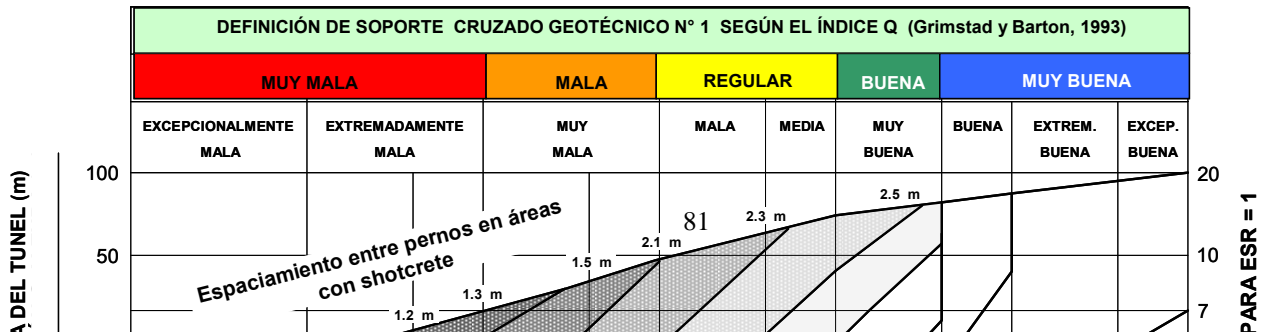


Figura 7.3: Definición de fortificación a través del gráfico de Grimstad y Barton (1993) aplicado al Cruzado Geotécnico N° 1

En la Tabla 7.6 se presenta la fortificación definida de acuerdo al índice de calidad de roca Q de Barton según el gráfico de definición de soporte de Grimstad y Barton de 1993 (Figura 7.3). Para los tramos indicados del Cruzado Geotécnico N° 1 se indica la fortificación obtenida del gráfico y la fortificación recomendada durante la excavación, que considera el sostenimiento adicional, para asegurar la estabilidad de los desarrollos subterráneos debajo del rajo Chuquicamata, con los estándares mínimos de fortificación aplicados en los túneles, de acuerdo a los tipos de fortificación definidos por Codelco Norte, incluyendo la fortificación de rocas de Mala y Muy Mala calidad geotécnica, en zonas de cruces de las fallas más importantes con marcos metálicos rígidos o cedentes.

Tabla 7.6: Fortificación Cruzado Geotécnico N° 1

Tramo (m)	Fortificación según Q-NGI (Grimstad & Barton, 1993)	Fortificación Aplicada al Cruzado Geotécnico N° 1
0-160	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos (helicoidales lechados) de 2,4 m de largo, separados en corridas de 1,1 m sobre el spring line. Malla tejida tipo 10006 sobre spring line.
160-200	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,2 m. Shotcrete 4 cm. 	
200-215	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación 	
215-225	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,7 m. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m sobre la

		<ul style="list-style-type: none"> Malla 10006. Shotcrete 6 cm sobre la gradiente.
225-235	<ul style="list-style-type: none"> Shotcrete 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m. Malla 10006. Shotcrete 10 cm espesor a sección completa.
DESIVIO XC-1		
205-211	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación 	
211-227	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,2 m. Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,4 m separados a 1,1 m Malla 10006.
227-235	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,9 m Shotcrete 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m. Malla 10006. Shotcrete 8 cm espesor.
235-243	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,8 m Shotcrete 5 cm. 	
243-355	<ul style="list-style-type: none"> Sin fortificación. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,4 m separados a 1,1 m. Malla 10006.
355-374	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 2,1 m. Shotcrete 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm espesor.
374-377	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,2 m. Shotcrete con fibra 12 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1 m. Malla 10006. Shotcrete 5 cm a sección completa. Marcos metálicos.
377-380	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,3 m. Shotcrete con fibra 11 cm. 	
380-384		
384-396,2	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 1,9 m separados a 1,6 m. Shotcrete con fibra 5 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 1,1 m. Malla 10006. Shotcrete 8 cm espesor.
Intersecciones	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos de 2,7 m separados a 2,4 m Shotcrete 4 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> Pernos sistemáticos De 2,7 m separados a 1,5 m. Malla 10006.

En la extensión del Cruzado Geotécnico N° 1 donde se ha desarrollado de acuerdo a su diseño original (232 m), se fortificó con el sostenimiento básico de pernos sistemáticos y malla tejida, agregando shotcrete en el área de peor calidad geotécnica. Desde el inicio hasta los 215 m la fortificación de pernos sistemáticos y malla ha permitido mantener la estabilidad del túnel, sin evidencia de requerir fortificación adicional, incluyendo el tramo de 160 m a 200 m donde de acuerdo al gráfico de definición de fortificación se recomienda la proyección de 4 cm de shotcrete en la bóveda de parte de este tramo.

El tramo de 215 m a 235 m se recomendó la proyección de 6 cm a 10 cm de shotcrete a sección completa, sin embargo sólo se realizó la fortificación parcial del tramo, ya que se abandonó esta frente por razones operacionales durante varios meses, tras lo cual, al retomar los trabajos, se constató el derrumbe de la frente, por lo que solo se realizaron actividades de mitigación para controlar el derrumbe. Razón por lo cual se reinició la excavación mediante el Desvío XC-1 a partir del metraje 205.

En el Desvío XC-1 desde el inicio en el metraje 205 hasta la Falla Oeste en los 434 m se recomendó fortificar con el sostenimiento básico de pernos sistemáticos de 2,4 m separados en corridas cada 1,1 m de túnel y malla tejida sobre la gradiente. También se recomendó sostenimiento adicional con shotcrete en espesor de 8 cm y 5 cm en los tramos respectivos de 227 m a 243 m y de 355 m a 374 m, sin embargo solo se fortifico con shotcrete el primer tramo.

Entre 374 m y 384 m junto con la fortificación básica de pernos sistemáticos y malla más 5cm de shotcrete sobre la gradiente, se propuso la instalación de marcos metálicos separados a 1 m, en la zona del cruce de la Falla Oeste (FO) y en parte de la Zona de Cizalle Intenso (ZCI) en calidades geotécnicas de Mala a Muy Mala.

En el tramo restante de 384 m a 396,2 m, se fortificó con pernos sistemáticos malla tejida y shotcrete con espesor de 15 cm a sección completa en roca de la unidad geotécnica ZCI de Mala calidad geotécnica.

7.4. Requerimientos de fortificación

La definición de fortificación de los túneles de exploración y drenaje del rajo Chuquicamata, desarrollados entre los años 2003 y 2005, aplicando el sistema de clasificación geotécnica Q-NGI de Barton (1974, modificado por Grimstad & Barton, 1993), se resumen en la **Tabla 7.7**, donde se indica para las calidades de roca encontradas en los desarrollos, los requerimientos de fortificación y de preparación previa a la tronadura recomendadas para asegurar la estabilidad y evitar el deterioro progresivo del macizo rocoso en el área de exploración que se encuentra bajo el rajo en producción.

Tabla 7.7: Requerimientos geotécnicos para la excavación de túneles en el área del cuerpo mineralizado de los Sulfuros Profundos de Chuquicamata

Clasificación Geotécnica		Distancia desde la fortificación hasta la frente	Preparación para el disparo	Avance, largo de perforación (m)	Tiempo sin fortificar	Fortificación
Calidad	Q-NGI					
Muy Buena	>40	> 20 m		3,5-4	7 o más días	Pernos Sistemáticos (PS) en bóveda de largo 2,4 m - 2,7 m separados a 1,5 m - 2 m Malla en bóveda
Buena	10-40	12 m - 20 m		3,5-4	2 a 7 días	PS en bóveda 2,4 m -2,7 m separados a 1,5 m Malla en bóveda
Regular	3-10	6m - 12 m		3-3,5	24-48 h.	PS en bóveda y parte superior de las cajas 2,4 m - 2,7 m separados a 1,3 m Malla en bóveda
	1-3	4 m - 6 m		3	12-24 h.	PS en bóveda y parte superior de las cajas 2,4 m - 2,7 m separados a 1,1 m Malla en bóveda Shotcrete 5 cm sobre gradiente
Mala	0,3-1	0 m - 4 m		2,5-3	3-9 h.	PS en bóveda y cajas 2,4 m - 2,7 m separados a 1,1 m Malla sobre gradiente Shotcrete 10 cm en bóveda y cajas
	0,1-0,3	0 m - 2 m	Pernos en Parrilla (PP) en la periferia de la bóveda (4 m de largo)	2-2,5	0-3 h.	PS en bóveda y cajas 2,4 m - 2,7 m separados a 1 m Malla sobre gradiente Shotcrete 15 cm sección completa
Muy Mala	0,01-0,1	0 m	PP periferia de la bóveda (4 m de largo)	1-2	Shotcrete sobre la marina. Perno, malla y shotcrete en el turno	PS en bóveda y cajas 2,4 m - 2,7 m separados a 1 m Malla en bóveda. Shotcrete 5 cm - 10 cm sección completa Marcos metálicos a 1 m
	<0,01	0 m	PP periferia de la bóveda (4 m de largo).	0,5-1. Sección parcial	Shotcrete sobre la marina. Shotcrete después de la marina. Marcos en el turno.	Shotcrete 5 cm - 10 cm sección completa y frente. Marcos metálicos a 0,5 m -1 m embebidos en hormigón

Notas adicionales:

1. En roca de mala calidad geotécnica en presencia de escurrimientos importantes de agua (mayor a 4 litros por minuto) se deben perforar barbacanas para conducir el escurrimiento y disminuir la presión del agua sobre las discontinuidades abiertas.
2. Los pernos en parrillas se instalan en la periferia de la bóveda separados 0,5 m- 0,8 m en la dirección del eje del túnel con inclinación de 20° a 25° sobre la inclinación del túnel.
3. Se deben considerar pernos puntuales adicionales del mismo largo que los pernos sistemáticos, donde el análisis de cuñas identifique cuñas inestables no cubiertas por los pernos sistemáticos.

4. El tramo de distancia de la zona fortificada hasta la frente, por los tiempos sin fortificar, deben mantenerse con acuñadura periódica, al menos una vez en el turno diario y con restricciones para del ingreso de personal al área.
5. Se deben controlar los factores operacionales que inciden sobre la calidad geotécnica de la roca y la estabilidad de los desarrollos como el diseño de los tiros de tronadura, la geometría de contorno de la sección, el paralelismo de los tiros, el factor de carga y distribución y amortiguación del explosivo.
6. Se debe revisar el diseño de la tronadura de acuerdo a las características de las unidades geotécnicas y calidades geotécnicas de la roca esperada de acuerdo a predicciones geotécnica. estructurales.
7. En roca de Mala y Muy Mala calidad geotécnica, el incumplimiento de los tiempos máximos sin fortificar ocasiona el deterioro progresivo del macizo rocoso que debe ser reevaluado y originará requerimientos de fortificación adicionales.

VIII. DISCUSIÓN

Entre los años 2003 y 2005 se realizó la excavación de aproximadamente 6.200 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración y al Túnel de Drenaje de la mina Chuquicamata. Sobre la base del levantamiento geotécnico de las labores subterráneas, aplicando el sistema de clasificación geotécnica mediante el índice Q de Barton (1974), se entrega en este trabajo, la caracterización geotécnica y estructural y la definición de soporte, de estos desarrollos subterráneos, que se encuentran ubicados en el área de influencia de los esfuerzos activos, inducidos por la minería a rajo abierto.

El levantamiento geotécnico se ha realizado de acuerdo a la metodología presentada en el Anexo N° 3, en forma simultánea con la excavación de los túneles. Entre los criterios generales para obtención de los parámetros geotécnicos como frecuencia de fractura y RQD, se han considerado las siguientes discontinuidades: fallas abiertas y cerradas, fracturas de más de un metro de extensión, sean estas abiertas o cerradas rellenas con minerales blandos como yeso y/o anhidrita. Además para el índice RQD no se ha considerado roca con resistencia estimada bajo 10 MPa.

Se ha realizado la determinación de la fortificación de los túneles, en base a la clasificación mediante el Índice Q de Barton, ajustada de acuerdo a criterios empíricos, desarrollados en la construcción de túneles en la mina Chuquicamata por más de 20 años, tomando en cuenta el efecto de la minería a rajo abierto, las propiedades de resistencia de las rocas de Chuquicamata y la fuerte influencia de las zonas de fallas importantes, sobre la estabilidad del macizo rocoso.

Se debe considerar que estos túneles son los de mayor profundidad desarrollados en Chuquicamata y por primera vez bajo el fondo del rajo, razón por la cual la evaluación en el tiempo de la fortificación instalada, junto con ensayos geotécnicos en desarrollo, permitirá establecer criterios de fortificación efectiva, para los próximos desarrollos subterráneos de Chuquicamata.

Los túneles de exploración y drenaje de Chuquicamata se han desarrollado principalmente en el pórfido huésped de la mineralización del yacimiento, denominado Pórfido Este que se presenta con alteración clorítica (unidad de alteración CMH), potásica (unidades de alteración Potásica de Fondo y "K-sill"), sericítica (cuarzo-sericítica con texturas preservadas) y cuarzo-sericítica (alteración pervasiva sin texturas preservadas). Limitando el Pórfido Este se presentan por el Oeste la Granodiorita Fortuna, en contacto por la Falla Oeste y por el Este la Granodiorita Elena en contacto intrusivo en la Zona de Deformación Este (contacto preliminar a la espera de un estudio petrográfico detallado). También en esta área se encuentran metasedimentos calcáreos y rocas corneas.

Los desarrollos corresponden principalmente a roca primaria y en menor proporción a una zona de transición a secundario en Pórfido Este con alteración cuarzo-sericítica (Desvío XC-1).

La estructura principal del yacimiento, la Falla Oeste se presenta en el Cruzado Geotécnico N°1 con rumbo Norte-Sur y manteo de 85° a 90° al Oeste, mayor al observado en superficie, pero consistente con las variaciones sinusoidales esperadas en rumbo y manteo. La tendencia estructural principal observada en los túneles es NNW, donde se distingue: la Zona de Deformación Este, al inicio del Túnel de Drenaje, La zona de falla Americana en el Cruzado Geotécnico N°1 y la zona de falla Estanques Blancos, en el extremo Norte del Túnel de Drenaje.

De las unidades geotécnicas definidas en el yacimiento, en los túneles se exponen dos definidas por litología (Granodiorita Elena Sur y Metasedimentos), tres por definición estructural (Zona de Cizalle Intenso, Falla Oeste y Brecha Entre Falla) y cuatro definidas en el Pórfido Este, según el tipo y grado de alteración (Pórfido Este Clorítico, Pórfido Este Potásico, Pórfido Este Sericítico y Roca Cuarzo-Sericítica).

La excavación realizada en el Pórfido Este Clorítico ha presentado buenas condiciones de estabilidad en roca preferentemente de buena calidad geotécnica. La sola excepción la constituye el portal en el banco M-3 con aproximadamente 10 m en roca afectada por la tronadura de la explotación del rajo. El Pórfido Este Potásico, también presenta buena condición geotécnica en su excavación, con la excepción en la zona de influencia de algunas fallas importantes y especialmente en el extremo Norte del Túnel de Drenaje, afectada por múltiples fallas paralelas a la dirección del túnel.

La excavación en Pórfido Este Sericítico se reduce a un tramo menor del Cruzado Geotécnico N°1, en roca de regular calidad geotécnica en la zona de influencia de la Falla Americana. La Roca Cuarzo-Sericítica presenta una estabilidad variable, determinada por su relación entre la proporción de cuarzo y sericita, la ubicación en las zonas de influencia de las fallas Oeste y Americana, y por la presencia de escurrimientos de agua en la zona de transición primario-secundario.

En la zona de la Falla Oeste del Cruzado Geotécnico N°1 se presentan las unidades geotécnicas Falla Oeste, Brecha entre Falla y la Zona de Cizalle Intenso. Esta zona corresponde a roca de mala calidad geotécnica, presentando los mayores problemas a la excavación la Zona de Cizalle Intenso. En efecto, la Falla Oeste propiamente tal, se presenta constituida por dos trazas subverticales cerradas, normales a la dirección del túnel, de 20 cm a 40 cm de espesor, entre las cuales se encuentra una brecha similar a la Zona de Cizalle Intenso pero más compacta. En tales condiciones la excavación se realizó con pernos sistemáticos y malla tejida a la frente. En el tiempo previo a la instalación de marcos (1 a 2 semanas) se observa un contraste entre la zona de falla propiamente tal, más estable y la tendencia de la zona de cizalle intenso a la sobreexcavación por el desprendimiento paulatino de fragmentos irregulares de roca por desconfinamiento.

Los desarrollos realizados en las unidades geotécnicas Metasedimentos y Granodiorita Elena Sur en el área de la curva de inicio del Túnel de Drenaje se presentan condiciones regulares de estabilidad debido al fracturamiento intenso y a la foliación de las rocas metasedimentarias.

El análisis de distribución de sistemas de fallas, al Este de la Falla Oeste, muestra cuatro dominios estructurales del modelo estructural de rajo Chuquicamata que se proyectan hacia los túneles. Estos son los dominios estructurales Nor-Oeste, Estanques Blancos, Balmaceda y Americana. En estos sistemas predomina los altos ángulos e manteo (mayores a 75°) con escasa probabilidad de formación de cuñas inestables en los túneles, siendo la condición mas desfavorable, las zonas con presencia de fallas múltiple paralelas a la dirección de los túneles. Tal condición se observa en la Rampa de Exploración en su inicio, en la curva de inicio de la Rampa de Drenaje y en las cajas de algunas de las estocadas. En el Túnel de Drenaje esto se observa en las cajas de algunas estocadas y en el extremo Norte, donde el túnel tiene dirección $N70^\circ E$, similar a los sistemas de fallas principales del dominio estructural Estanques Blancos. En el Cruzado Geotécnico N°1, las direcciones de los sistemas de fallas principales son normales a la dirección del túnel, sin embargo se dio una condición particular, tras el abandono repentinamente los trabajos a los 232 m de avance, dejando con fortificación mínima, cajas y techo y sin fortificación la frente, después de uno a dos meses se genera una sobrexcaación de la parte superior de la frente, que al cabo de 4 meses produjo el derrumbe paulatino de al menos 5 m de túnel, causando que el reinicio de la excavación se hiciera por el Desvio XC-1.

Al comparar la fortificación definida a través del índice Q de Barton, respecto a la fortificación ajustada a las condiciones de Chuquicamata, se observa la preferencia dada en esta última, a la fortificación con pernos sistemáticos, aumentando en cantidad y largo de los pernos aún en rocas de Buena calidad geotécnica. En cambio se observa una reducción en los tramos fortificados con shotcrete, reemplazados ya sea por pernos sistemáticos en rocas de Regular calidad geotécnica y por marcos metálicos en rocas de Muy Mala calidad geotécnica. Este resultado empírico se puede interpretar debido a la capacidad de los pernos lechados instalados sin tensar, de trabajar en forma progresiva con la deformación. Sin embargo, la presencia en profundidad de puntuales con aguas ácidas hace recomendable considerar alternativas para estos casos.

Transcurridos entre 3 y 4 años de la ejecución de los desarrollos, la estabilidad y el estado de la fortificación se ha mantenido en buenas condiciones, adecuadas para la ejecución de nuevos trabajos de exploración del cuerpo mineralizado de los Sulfuros Profundos (nuevos desarrollos de túneles, perforación de sondajes y realización de ensayos geotécnicos). Habiendo continuado la explotación del rajo Chuquicamata, con tranadura de bancos a distancias lineales de 400 m a 1.000 m, esta no muestra efectos importantes sobre la estabilidad de las labores y sobre la fortificación. Solo en zonas de calidad geotécnica regular con fuerte fracturamiento o zonas de influencia de fallas importante, se observan mallas, puntualmente cargadas con roca desprendida de la bóveda o las cajas. Sin embargo, sí se observa deterioro en la fortificación instalada en zonas con escurrimientos de agua, fundamentalmente en el Cruzado Geotécnico N° 1, que consiste en la oxidación de pernos de roca y malla tejida. Esta fortificación esta actualmente siendo evaluada, considerando la

acidez de las aguas presentes (PH de 3 a 5 de acuerdo a mediciones realizadas por el Servicio de Hidrogeología de la Dirección de Geotecnia, Codelco Norte).

IX. CONCLUSIONES

En el periodo comprendido entre el 6 de marzo 2003 y el 30 de octubre 2005, se realizó la ejecución 6.200 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración, el Túnel de Drenaje y el Cruzado Geotécnico N°1 de la Mina Chuquicamata. El levantamiento geotécnico y estructural realizado a estos desarrollos entrega los siguientes resultados:

- La Rampa de Exploración de 3.200 m de extensión con una pendiente general de 15% se ha desarrollado en el sector Sur y Central Este del yacimiento Chuquicamata, principalmente en el Pórfido Este, huésped de la mineralización de cobre y molibdeno del yacimiento Chuquicamata. Subordinadamente también se excavaron rocas estériles del borde Este de Chuquicamata como la Granodiorita Elena y una unidad de sedimentos calcáreos y clásticos mesozoicos, afectadas por metamorfismo dinámico y de contacto.
- En la Rampa de Exploración se distinguen cuatro unidades geotécnicas (U.G.) correspondientes a los tipos litológicos y a los tipos de alteración predominante dentro del Pórfido Este. Estas son: el Pórfido Este Clorítico (PEC) correspondiente al 68,6% de la extensión de la rampa, sin mineralización económica en el margen Este del Pórfido Este. El Pórfido Este Potásico (PEK) correspondiente al 26,6% de la extensión de la rampa, preferentemente en el sector central del yacimiento. Los Metasedimentos (MET) con un 1,7% de la extensión de la Rampa, en la curva de inicio del Túnel de Drenaje. Y la Granodiorita Elena Sur (GES) ubicada inmediata a la misma curva con el restante 3,1% de la rampa.
- La calidad geotécnica de la roca en la Rampa de Exploración, de acuerdo a la clasificación basada en el índice Q de Barton presenta la siguiente distribución: 3,3% Calidad Mala (Q entre 0,1 y 1), 38,8% Calidad Regular (Q entre 1 y 10), 57,6% Calidad Buena (Q entre 10 y 40) y 0,3% Calidad Muy Buena (Q mayor que 40). Las calidades de Regular a Muy Buena se relacionan preferentemente a las unidades geotécnicas PEC y PEK, en tanto que la calidad geotécnica de Regular a Mala se relaciona directamente con las unidades MET y GES ubicadas en la Zona de Deformación Este (ZDE) del yacimiento.

- El Túnel de Drenaje de 2.650 m de extensión y una pendiente general de 15%, se ha desarrollado en el sector Central Norte del yacimiento Chuquicamata, principalmente en el Pórfido Este y en menor proporción en los metasedimentos. En él se distinguen tres unidades geotécnicas (U.G.) correspondientes al Pórfido Este Clorítico (PEC) con un 28,9% de la extensión del túnel, el Pórfido Este Potásico (PEK) correspondiente al 55,1% de la extensión del túnel, preferentemente en el sector Norte del yacimiento y la unidad de Metasedimentos (MET) con un 16% del túnel.
- La calidad geotécnica de la roca en el Túnel de Drenaje, de acuerdo a la clasificación basada en el índice Q de Barton presenta la siguiente distribución: 1,1% Calidad Mala (Q entre 0,1 y 1), 35,3% Calidad Regular (Q entre 1 y 10) y 63,9% Calidad Buena (Q entre 10 y 40). Las calidades de Regular a Buena se relacionan preferentemente a las unidades geotécnicas PEC y PEK, en tanto que la calidad geotécnica de Regular a Mala se relaciona con la unidad MET.
- El Cruzado Geotécnico N° 1 de una extensión de 400 m, atraviesa de Este a Oeste el cuerpo mineralizado de Chuquicamata en su extremo Sur a la cota 2150 m s.n.m., alcanzando hasta la Granodiorita Fortuna al occidente de la Falla Oeste. En el cruzado se presenta la siguiente distribución de unidades geotécnicas: 47% de Roca Cuarzo-Sericítica (RQS), 26,3% de Pórfido Este Potásico (PEK), 11,9% de Pórfido Este Clorítico (PEC), 9,5% de Pórfido Este Sericítico (PES), 4,6% de Zona de Cizalle Intenso (ZCI) en roca de la granodiorita Fortuna en la zona de mayor influencia de la Falla Oeste y 0,7% correspondiente a la Falla Oeste (FO) y su Brecha Entre Falla (BEF).
- La calidad geotécnica de la roca en el Cruzado Geotécnico N° 1, de acuerdo a la clasificación basada en el índice Q de Barton, presenta la siguiente distribución: 1,4% Calidad Muy Mala (Q inferior a 0,1), 9,1% Calidad Mala (Q entre 0,1 y 1), 42,9% Calidad Regular (Q entre 1 y 10) y 46,6% Calidad Buena (Q entre 10 y 40). Donde la Mala y muy Mala calidad geotécnica se relaciona a las unidades geotécnicas RQS, ZCI, FO y BEF en las zonas de las fallas Oeste y Americana.
- La distribución general de calidades de los túneles desarrollados, de acuerdo al índice Q de Barton es la siguiente: 0,1% Calidad Muy Mala (Clase de soporte R5), 2,8% Calidad Mala (Clase R4), 37,6% Calidad Regular (Clase R3), 59,3% Calidad Buena (Clase R2) y 0,2% Calidad Muy Buena (Clase R1). Por su parte las unidades geotécnicas presentan la siguiente distribución 48,2% PEC, 38,5% PEK, 7,6% MET, 3,1% RQS, 1,6% GES, 0,6% PES 0,3% ZCI y 0,1% FO + BEF.
- De acuerdo al índice Q de Barton aplicado al gráfico de determinación de soporte (Grimstad y Barton, 1993), para los desarrollos considerados de Chuquicamata se obtienen 4.676 m sin fortificación (74,7%), 1509 m con pernos sistemáticos y shotcrete (24,1%) y 72,2 m con pernos sistemáticos y shotcrete reforzado (1,2%).

- Los sistemas estructurales presentes en los desarrollos subterráneos, se presentan, en general, concordantes con los dominios estructurales definidos en superficie para el yacimiento. La Rampa de Exploración se presenta en su mayor extensión en el Dominio Nor-Oeste y su extremo Norte en el Dominio Balmaceda. El Cruzado Geotécnico N° 1 se presenta bajo los dominios estructurales Nor-Oeste y Americana. Por último el Túnel de Drenaje se extiende en los dominios Nor-Oeste, Balmaceda y Estanques Blancos. En general las fallas se presentan subverticales o con altos ángulos de manteo, generando inestabilidad en túneles de dirección paralelas al rumbo de las fallas, condición que solo se da puntualmente en los desarrollos considerados.
- La fortificación instalada en los desarrollos subterráneos consideran un 96,4% en pernos sistemáticos y malla tejida, un 3,1% requirió además de la proyección de Shotcrete y el 0,5% de la instalación de marcos metálicos. Se instalaron marcos metálicos en la zona de la Falla Oeste en roca de Mala y Muy Mala calidad geotécnica y en la zona del portal al Banco M-3 del rajo. La proyección de Shotcrete fue requerida en roca de calidad geotécnica Mala y en menor proporción en roca de Regular calidad.
- Respecto a la condición hidrogeológica, las excavaciones se desarrollaron principalmente en roca seca, con zonas muy localizadas de goteos y escurrimientos no mayores a 2 litros por minuto. Estos se encuentran en el Túnel de Drenaje, extremo Norte de los desarrollos y en el Cruzado Geotécnico N° 1.

X REFERENCIAS

Alvarez, O., Miranda, J. y Guzmán, P., 1980. Geología del Complejo Chuquicamata. Minería de Cobres Porfídicos. Congreso Cincuentenario. Instituto de Ingenieros de Mina de Chile, Santiago. 314-363 pp.

Ambrus, J., 1979. Emplazamiento y Mineralización de los Pórfidos Cupríferos de Chile., Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Salamanca, España. Tesis de doctorado, inédita.

Ambrus, J. y Soto, H., 1974. Estudio Geológico del Molibdeno en Chuquicamata Chile. STVDIA GEOLOGICA, VIII. 45-83 pp.

Aracena, I., 1981. Geología y Alteración del Complejo Plutónico del Sector Norte del Yacimiento de Chuquicamata. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile. 83 pp.

Arnott, A. M., 2003. Evolution of the Hydrothermal Alteration at the Chuquicamata Porphyry Copper System, Northern Chile. Dalhousie University, Halifax, Canada. Tesis de Doctorado, Inédita.

Baeza, L., 1984. El Basamento Cristalino de la Sierra Limón Verde. Segunda Región de Antofagasta. Consideraciones Genéticas. Revista Geológica de Chile N° 22.

Ballard, J., Palin, J.M., Williams, I., Campbell, I. & Faunes, A., 2001. Two Ages of Porphyry Intrusion Resolved for the Super-giant Chuquicamata Copper Deposit of Northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, Mayo 2001, vol 29, 5, 383-386 pp.

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, Vol. 6 N°4, 189-236 pp.

Bieniawski, Z., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civ Eng.*, N° 15, 335-344 pp.

Bieniawski, Z., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp.

Brown, E., 1981. *Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press.

Caine, J., Evans, J. & Forster, C., 1996. Fault Zone Architecture and Permeability Structure. *Geology*, November 1996, V.24, N°11, 1025-1028 pp.

Camus, F., 2003. *Geología de los Sistemas Porfídicos en los Andes de Chile*. SENAGEOMIN, Santiago de Chile, 267 pp.

Collado, J., Lattus, J. y Rodríguez, J., 2005. Estudio Estructural Preliminar, Mina Chuquicamata 2005. Informe interno, Subgerencia de Geología, Codelco Norte.

Deere, D., Hendron, A., Patton, F. & Cording, E., 1967. Design of Surface or Near Surface Excavations in Rocks. *Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics*. Aime, New York.

Dirección de Geología, Codelco Norte, 2005. Modelo Geológico y Estimación de Recursos del Depósito Chuquicamata, año 2005. Informe Inédito.

Dirección de Geología, Codelco Norte, 2006. Actualización Geológica del Proyecto Transición a Minería Subterránea. Informe Inédito.

Dirección de Geotecnia, Codelco Norte, 2005. Caracterización Geotécnica del Yacimiento Chuquicamata, año 2005. Informe Inédito.

DERK S.A., 2005. Informe final: Servicio de Caracterización Geotécnica Rampa de Exploración y Rampa de Drenaje. Mina Chuquicamata. Informe Inédito. Dirección de Geotecnia, Codelco Norte.

Dilles, J., Tomlinson, A., Martin, M. & Blanco, N., 1997. El Abra and Fortuna Complexes: A Porphyry Copper Batholith Sinistrally Displaced by the Falla Oeste. Actas VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3, 1883-1887 pp.

Faunes, A., Hintze, F., Siña, A., Véliz, H., Vivanco, M. & Geological Staff 2005. Chuquicamata, Core of a Planetary Scale Cu-Mo Anomaly; in Potter, T.M. (Ed), Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global perspective; PGC Publishing, Adelaide.

Flores, G. y Karzulovic, A., 2004. Guías Geotécnicas para una Transición Desde Rajo Abierto a Minería Subterránea. Caracterización Geotécnica. Tarea 4. Taller ICS-II. Informe Inédito. Dirección de Geotecnia, Codelco Chile División CodelcoNorte.

Fuenzalida, H., 1957. Calizas del Loa, en Lexique Stratigraphique International, Chile. Center de Rech. Scientifique. Vol. V, Fasc 7, 195-196 pp.

Fuenzalida, H., 1965. Clima en Geografía Económica de Chile. CORFO, Santiago. Tomo I, 98-152 pp.

Galli, C., 1957. Las Formaciones Geológicas en el Borde Occidental de la Puna de Atacama, Sector Tarapacá. Minerales, Vol. 12, N° 56, Santiago, 1426 pp.

García, F., 1967. Geología del Norte de Chile. Simposio Geosinclinal Andino. Sociedad Geológica de Chile, N° 3. Santiago, 138 pp.

Grimstad, E. & Barton, N., 1993. Updating of the Q-System for NMT. Kompen, Opsahl & Berg (eds). Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete, *Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes*. Norwegian Concrete Association, Oslo.

Herrera, R.E., 2006. Caracterización y Calificación Geotécnica Según los Índices RMR y RMRL Para el Macizo Rocoso Ubicado al Oriente de la Falla Oeste. Mina Chuquicamata, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Católica del Norte. Inédito.

Hoek, E., 1994. Strength of Rock and Rock Masses, ISRM News Journal, 2 (2), 4-16 pp.

Hoek, E. & Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. 34(8). 1165-1186 pp.

Hollister, V., 1978. Geology of Porphyry Copper Deposit of the Western Hemisphere. New York, Aime, 219 pp.

Laubscher, D., 1990. A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 90 N° 10, 257-273 pp.

Lindsay, D., Zentilli, M. & Rojas de la Rivera J., 1995. Evolution of an Active Ductile to Brittle Shear System Controlling Mineralization at the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit, Northern Chile. International Geology Review, vol. 37, 945-958 pp.

Lira, G., 1989. Geología del Área Preandina de Calama con Énfasis en la Estratigrafía Paleogeografía del Mesozoico 22° a 22° 45' Latitud Sur. Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Departamento de Geología y Geofísica. Santiago, Chile. Inédita.

Lopez, V., 1939. The Primary Mineralization at Chuquicamata, Chile. Economic Geology , Vol. 34, 674-711 pp.

Lowell, J. & Guilbert, J., 1970. Lateral and Vertical Alteration Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. Economic Geology, vol. 65, 373-408 pp.

Maksaev, V. y Zentilli, M., 1988. Marco Metalogénico Regional de los Megadepósitos de Tipo Pórfido Cuprífero del Norte Grande de Chile. Actas V Congreso Geológico Chileno, Tomo I, B181-B212 pp.

Maksaev, V., 1990. Metallogeny, Geological Evolution and Thermochronology of the Chilean Andes Between Latitudes 21° and 26° South and the Origin of the Major Porphyry Copper Deposits. Universidad Dalhousie, Halifax. Nueva Escocia. Tesis de Doctorado.

Maksaev, V., Tomlinson, A. y Blanco, N., 1994. Estudio Geológico de la Franja Longitudinal Comprendida entre Quebrada Blanca y Chuquicamata. SERNAGEOMIN. Informe Inédito.

Marinovic, N., Lahsen, A., 1984. Hoja Calama, Región de Antofagasta. Servicio de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 58.

Naranjo, J. y Paskoff, 1981. Estratigrafía de los Depósitos Cenozoicos de la Región de Chiu-Chiu, Calama. Desierto de Atacama. Revista Geológica de Chile, N° 13-14. 79-85 pp.

Niemeyer, H., 1999. Informe Geológico Estructural Zona de Falla Asociada a la Falla Oeste. Mina Chuquicamata. Informe Inédito. Superintendencia de Ingeniería Geotécnica, División Chuquicamata de Codelco Chile.

Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L., Lindsay, D. y Zentilli, M., 2001. Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. Economic Geology, vol. 96, 249-270 pp.

Pallauta, J., 1982. Análisis de Estabilidad y Desarrollo de los Taludes del Sector Sur-Oriental, Mina Chuquicamata. Memoria para optar al título de Geólogo. Fac. De Cs. Fis. y Mat., Dpto. de Geología y Geofísica, Univ. De Chile. 97 pp.

Palmström, A., 1982. The Volumetric Joint Count a Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing. Proc. 4th Congr. Int. Association of Engineering Geology. New Delhi. Vol.2, 221-228 pp.

Pardo, R. y Rivera, S., 1999. Programa de Exploración Básica de Seguimiento Distrito de Chuquicamata. Informe de Resultados, 2° Región. Gerencia de Exploraciones. Oficina Calama, Codelco Chile. Informe Inédito.

Primer Taller Geotécnico Interdivisional, 1997. Estandares para la Caracterización Geotécnica de Rocas, Estructuras y Macizo Rocoso. División Chuquicamata de Codelco Chile. Informe Interno Codelco Chile.

Rayo, C., 2007. Sectorización Geotécnica del Túnel de Drenaje Etapa 2, Expansión Norte de Mina Sur, División Codelco Norte. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Inédito, 106 pp.

Renzetti, B., 1957. Geology and Petrogenesis at Chuquicamata, Chile. Tesis PH. D., Indiana University, 71 pp.

Reutter, K-J., Chong, G. y Scheuber, E., 1993, The West Fissure and the Precordilleran Fault System of Northern Chile. Andean Geodinamics, International Symposium 3rd, Oxford. UK, 21-23 de Septiembre 1999 RSTOM- University of Oxford, Extended Abstracts, 237-240 pp.

Reutter K-J., Scheuber, E. y Chong, G., 1996. The Precordilleran System of Chuquicamata, Northern Chile: Evidence for Reversals Along Arc-parallel Strike-slip Fault. Tectonophysics, vol. 259, 213-228 pp.

Reynolds, P., Ravenhurst, C., Zentilli, M. y Lindsay, D., 1998. High-Precision ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of Two Consecutive Hydrothermal Events in the Chuquicamata Porphyry Copper System, Chile. Chemical Geology, vol. 148, 45-60 pp.

Sillitoe, R., 1973. The Tops and Bottoms of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, Vol. 68, 799-815 pp.

Sillitoe, R. & McKee, E., 1996. Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province. *Economic Geology*, vol. 91, 164-179 pp.

Superintendencia Ingeniería Geotécnica. 1997. Estandares para la Caracterización Geotécnica de Rocas, Estructuras y Macizos Rocosos. Primer Taller Geotécnico Interdivisional, Organizado por la División Chuquicamata de Codelco Chile. La Serena.

Sylvester, A., 1988. Strike-Slip Faults. *Geological Society of American Bulletin*, vol. 100, 1666-1703 pp.

Tapia, J., 1980. Distribución y Control de la mineralización en el Yacimiento Chuqui Norte. II Región de Antofagasta. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geociencias. Universidad del Norte. 96 pp.

Thomas, A., 1978. Geología de la Zona El Inca. Codelco Chile, División Chuquicamata. Superintendencia de Geología. Informe Inédito, 35 pp.

Tomlinson, A., Mpodosis, C., Cornejo, P., Ramírez, C., y Dumintro, T., 1994. El Sistema de fallas Sierra Castillo-Agua Amarga: Transpresión sinistral Eocena en la Precordillera de Potrerillo, El Salvador. VII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, Univ. de Concepción, Concepción, Chile. 1459-1463 pp.

Tomlison, A., & Blanco, N., 1997a. Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System, Precordillera, Chile: Part1, Synmineral History. *Actas VIII Congreso Geológico Chileno*, vol. 3, 1873-1877 pp.

Tomlison, A.J., & Blanco, N., 1997b. Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System, Precordillera, Chile: Part2, Postmineral History. *Actas VIII Congreso Geológico Chileno*, vol. 3, 1878-1882 pp.

ANEXOS

ANEXO N° 1

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO ÍNDICE Q (Barton et al., 1974)

ANEXO N° 2

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO GSI (Hoek (1994))

ANEXO N° 3

**PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN GEOTÉCNICA DE FRENTES DE AVANCE Y
LEVANTAMIENTO GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DE TUNELES**

ANEXO N° 4

**PLANOS GEOTÉCNICOS DE LOS TÚNELES DE EXPLORACIÓN Y DRENAJE. MINA
CHUQUICAMATA**

ANEXO N° 1

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO ÍNDICE Q (Barton et al., 1974)

En este anexo se describe el índice Q de calidad de roca (Tunnelling Quality Index), desarrollado por Barton et al, en 1974 con modificaciones menores de Grimstad & Barton en

1993. El método de clasificación de rocas de Barton et al. (1974), se desarrolló para estimar la fortificación de túneles en función del índice Q de calidad geotécnica, definido por:

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

Donde el primer cociente corresponde a una estimación del tamaño de los bloques que conforman el macizo rocoso, el segundo cociente corresponde a una estimación de la resistencia al corte entre los bloques, y el tercer cociente representa lo que Barton et al. (1974), denominan esfuerzos "activos". Los parámetros que definen estos cocientes son:

RQD (Rock Quality Designation): Es la designación de la calidad de la roca definida por Deere et al. (1967), que puede variar de 0 (macizos rocosos de muy mala calidad) a 100 (macizos rocosos de excelente calidad). El cálculo del RQD del macizo rocoso se determina en base al levantamiento geotécnico, de los testigos de sondajes geotécnicos, como el porcentaje de la suma de los largo de los tramos de testigos mayores a 10 cm de largo, respecto al largo de un tramo perforado. Debe tenerse en consideración que los intervalos de 5 puntos para RQD son suficientemente precisos (por ejemplo: 100, 95, 90, etc.) y si el RQD es menor o igual a 10, entonces debe asignarse al RQD el valor 10. Cuando no se disponga de testigos de sondaje, el RQD puede ser calculado como el promedio de tres medidas ortogonales (por ejemplo dos medidas perpendiculares en una caja y la tercera ortogonal en la frente), o estimado del número de discontinuidades por unidad de volumen J_v mediante la siguiente relación propuesto por Palmström (Barton et al., 1974), para macizos rocosos libres de arcilla:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \text{ (aprox.)}$$

J_n : Es un coeficiente asociado al número de sets de estructuras presentes en el macizo rocoso (Joint Set Number), que puede variar de 0,5 (macizo masivo o con pocas estructuras) a 20 (roca totalmente disgregada o triturada). El coeficiente J_n se calcula según la forma que se indica en la Tabla A1.1 teniendo presente en el caso de intersecciones de túneles el valor de J_n debe multiplicarse por 3 y en el caso de portales de túneles el valor J_n debe multiplicarse por 2.

J_r : es un coeficiente asociado a la rugosidad de las estructuras presentes en el macizo rocoso (Joint Roughness Number), que puede variar de 0,5 (estructuras planas y pulidas) a 5 (estructuras poco persistentes espaciadas a mas de 3 m). Se calcula en función de la rugosidad de las estructuras más débiles. Si éstas están favorablemente orientadas, entonces deberá escogerse el set más débil de todas las estructuras desfavorablemente orientadas para evaluar J_r . El valor de J_r debe calcularse como se indica en la tabla A1.2. teniendo presente que:

a) Si el espaciamiento de las estructuras del set considerado es mayor a 3 m, debe sumarse 1 al valor de J_r .

b) En caso de estructuras planas y pulidas que presenten lineamientos, podrá considerarse que J_r es igual a 0,5 solo si los lineamientos son favorables al desplazamiento.

Tabla A1.1: Valores del coeficiente J_n

Caso	Condición	J_n
A	Macizos rocosos masivos, sin o con muy pocas estructuras.	0,5 a 1
B	Macizo rocoso con un único set de estructuras.	2
C	Macizo rocoso con un set de estructuras más estructuras aleatorias	3
D	Macizo rocoso con dos sets de estructuras	4
E	Macizo rocoso con dos sets de estructuras más estructuras aleatorias	6
F	Macizo con tres sets de estructuras	9
G	Macizo con tres sets de estructuras más estructuras aleatorias	12
H	Macizo rocoso con cuatro o más sets de estructuras, con muchas estructuras aleatorias, con bloques cúbicos etc.	15
J	Macizo rocoso totalmente desintegrado, similar a un suelo granular	20

Tabla A1.2: Valores del coeficiente J_r

Caso	Condición	J_r
a) Hay contacto entre las paredes de las estructuras		
b) Desplazamientos de corte, menores de 10 cm producen contacto entre las paredes de las estructura		
A	Estructuras discontinuas o que presentan puentes de roca	4
B	Estructuras onduladas y rugosas (o irregulares)	3
C	Estructuras onduladas y lisas	2
D	Estructuras onduladas y pulidas	1,5
E	Estructuras planas y rugosas	1,5
F	Estructuras planas y lisas	1
G	Estructuras planas y pulidas	0,5
c) Los desplazamientos de corte, no producen contacto entre las paredes de las estructuras		
H	Estructuras con rellenos arcillosos de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas de las estructuras	1
I	Estructuras con rellenos de roca molida y/o materiales granulares de espesor suficiente como para impedir el contacto entre las cajas e las estructuras	1

J_a : es un coeficiente asociado a la condición o grado de alteración de las estructuras presentes en el macizo rocoso (Joint Alteration Number), que puede variar de 0,75 (vetillas selladas en roca dura con rellenos resistentes y no degradables) a 20 (estructuras con rellenos potentes de arcilla). Se calcula en función de la alteración de las estructuras más débiles, es decir de las que están más favorablemente orientadas al deslizamiento. El valor de J_a se calcula de acuerdo a la tabla A1.3.

J_w : es un coeficiente asociado a la condición de agua en las estructuras presentes en el macizo rocoso (Joint Water Reduction Factor), que puede variar de 0,05 (flujo notorio de agua, permanente o que no decae en el tiempo) a 1 (estructuras secas o con flujos mínimos de agua). El valor de J_w se calcula de acuerdo a la Tabla A1.4.

Tabla A1.3: Valores del Coeficiente J_a

Caso	Condición	φ_{res}	J_a
a) Hay contacto entre las paredes de las estructuras			
A	Estructuras bien trabadas y selladas con rellenos duros, impermeables, y que no se ablandan (e.g. cuarzo, epidota, etc.).		0,75
B	Estructuras con paredes no alteradas, que solo presentan pátinas.	25° a 35°	1
C	Estructuras con paredes ligeramente alteradas. Pátinas de materiales que no se ablandan y libres de finos: arenas, roca molida, etc.	25°-30°	2
D	Estructuras con pátinas limo arenosas, con poco contenido de arcillas, que no se ablandan.	20°-25°	3
E	Estructuras con pátinas de minerales arcillosos de baja fricción y que se ablandan (e.g. caolinita, micas, etc.). Estructuras con pátinas de clorita, talco yeso, grafito, etc. Estructuras con pequeñas cantidades de arcillas expansivas (pátinas discontinuas, de 1 a 2 mm de potencia).	8°-16°	4
b) Desplazamiento de corte menores que 10 cm producen contacto entre las paredes de las estructuras			
F	Estructuras con rellenos de arena y/o roca molida, libres de arcilla.	25°-30°	4
G	Estructuras con rellenos de arcillas muy preconsolidadas, que no se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	16°-24°	6
H	Estructuras con rellenos de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan (rellenos continuos, con espesores < 5 mm).	12°-16°	8
J	Estructuras con rellenos de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita, rellenos continuos, con espesores < 5 mm). El valor de J_a depende del contenido de arcillas expansivas, de la exposición al agua, etc.	6°-12°	8 a 12
c) Los desplazamientos de corte no producen contacto entre las paredes de las estructuras			
K	Estructuras con rellenos de roca desintegrada o brechizada y de arcillas muy preconsolidadas, que no se ablandan	6°-24°	6
L	Estructuras con rellenos de roca desintegrada o brechizada y de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan	6°-24°	8
M	Estructuras con rellenos de roca desintegrada o brechizada y de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita, rellenos continuos). El valor de J_a depende del contenido de arcillas expansivas, de la exposición al agua, etc.	6°-24°	8 a 12
N	Estructuras con rellenos de salbanda limosa o arenosa con poco contenido de arcilla que no se ablandan		5
O	Estructuras con rellenos potentes de arcillas muy preconsolidadas, que no se ablandan.	6°-24°	10
P	Estructuras con rellenos potentes de arcillas algo a poco preconsolidadas, que se ablandan.	6°-24°	13
R	Estructuras con rellenos potentes de arcillas expansivas (e.g. montmorillonita). El valor de J_a depende del contenido de arcillas expansivas, de la exposición al agua, etc.	6°-24°	13 a 20

Tabla A1.4: Valores del Coeficiente J_w

Caso	Condición	P_w (MPa)	J_w
A	Túneles secos o con infiltraciones menores (e.g. 5 lt/min localmente o solo en algunos sectores).	< 0,1	1
B	Infiltración y presiones moderadas, que ocasionalmente causan el lavado del relleno de las estructuras	0,1 a 0,25	0,66
C	Infiltraciones y presiones importantes en roca competente con estructuras sin relleno.	0,25 a 1,0	0,5
D	Infiltración y presiones importantes que causan lavado de los rellenos de las	0,25 a	0,33

	estructuras.	1,0	
E	Infiltraciones muy importantes o agua a presión gatillada por la tronadura pero que decae en el tiempo.	> 1,0	0,1 a 0,2
F	Infiltración excepcionalmente altas o agua a presión continúan sin decaer en el tiempo	> 1,0	0,05 a 0,1

SRF: Es un coeficiente asociado al posible efecto de las condiciones de esfuerzo en el macizo rocoso (Stress Reduction Factor), que puede variar de 0,05 (concentraciones importantes de esfuerzos en roca competente) a 20 (condiciones favorables a la ocurrencia de estallidos de roca). El factor SRF se calcula de la forma que se indica en Tabla A1.5.

Tabla A1.5: Valores del Coeficiente SRF

Caso	Condición	SRF		
a) Zonas débiles intersectan la excavación subterránea, lo que puede causar aflojamiento (loosening) del terreno cuando el túnel sea excavado.				
A	Aparecen múltiples zonas débiles que contienen salbanda arcillosa o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy sueltas (cualquier profundidad)	10		
B	Zonas débiles aisladas con arcilla o roca químicamente descompuesta (profundidad menor o igual a 50 m)	5		
C	Zonas débiles aisladas con arcilla o roca químicamente descompuesta (profundidad mayor a 50 m)	2,5		
D	Múltiples zonas de cizalle, con roca suelta en su periferia, en un macizo rocoso competente y libre de arcillas (cualquier profundidad)	7,5		
E	Zonas de cizalle aisladas, en un macizo rocoso competente y libre de arcillas (profundidad menor o igual a 50 m)	5		
F	Zonas de cizalle aisladas, en un macizo rocoso competente y libre de arcillas (profundidad mayor a 50 m)	2,5		
G	Macizo rocoso muy fracturado, con estructuras abiertas sueltas que definen bloques en forma de cubos (cualquier profundidad)	5		
b) Macizos rocosos competentes con problemas de concentración de esfuerzos		UCS/S_1	TS/S_1	SRF
H	Estado tensional de baja magnitud, próximo a la superficie, fracturas abiertas.	>200	<0,01	2,5
J	Estado tensional de moderada magnitud, condición de esfuerzos favorables	10-200	0,01-0,3	1,0
K	Estado tensional de alta magnitud, estructuras bien trabadas (usualmente favorables para la estabilidad, aunque puede presentar problemas en las paredes del túnel)	5-10	0,3-0,4	0,5-2,0
L	Macizo rocoso masivo que presenta lajamientos moderados una hora después del desarrollo de la excavación subterránea.	3-5	0,5-0,65	5-50
M	Macizo rocoso masivo que presenta lajamientos e incluso estallidos de roca poco después del desarrollo de la excavación subterránea.	2-3	0,65-1	50-200
N	Macizo rocoso masivo que sufren notorios estallidos de roca y deformaciones inmediatas después del desarrollo de la excavación subterránea.	<2	>1	200-400
c) Macizos rocosos que fluyen plásticamente bajo altas presiones (squeezing rock).				
O	El flujo plástico genera presiones moderadas.	1-5		5-10
P	El flujo plástico genera presiones importantes.	>5		10-20
d) Macizos rocosos expansivos (swelling rock), expansión o hinchamiento debido a reacciones químicas causadas por el agua.				
Q	El hinchamiento genera presiones moderadas.	5-10		
R	El hinchamiento genera presiones importante.	10-15		

El factor SRF puede considerarse como una medida de:

- a) La presión causada por el material suelto, en el caso de un túnel que atraviesa una zona de cizalle o un macizo arcilloso y de mala calidad geotécnica.
- b) La concentración de esfuerzos que se produce en la periferia de túneles excavados en macizos rocosos competentes.
- c) Las presiones asociadas al flujo plástico (squeezing) o al hinchamiento (swelling) que encuentran túneles que cruzan macizos arcillosos poco competentes bajo un estado de tensión importante, o macizos rocosos arcillosos y expansivos.

Se tener presente que:

- i) Los valores de SRF deben reducirse en un 25% a 50% si las zonas de cizalle relevantes solo influencia el túnel pero no lo intersectan.
- ii) Si el estado tensional es muy anisotrópico entonces:

Si $5 \leq S_1/S_3 \leq 10$ disminuya en un 20% los valores de la resistencia en compresión uniaxial y la resistencia en compresión de la roca intacta, UCS y TS, usados para evaluar SRF.

Si $10 < S_1/S_3$ disminuya en un 40% los valores de la resistencia en compresión uniaxial y la resistencia en tracción de la roca intacta, UCS y TS, usados para evaluar SRF.
- iii) La base de datos del método incluye pocos casos en que la profundidad del techo del túnel respecto a la superficie del terreno es menor que el ancho del túnel. Si este es el caso entonces SRF debe incrementarse de 2,5 a 5 (ver H).

El uso del índice Q permite calificar la calidad geotécnica de los macizos rocosos en una escala logarítmica, que varía de 0,001 a 1.000, y considera nueve clases:

- Macizos de calidad **Excepcionalmente Mala ($Q \leq 0,01$)**
- Macizos de calidad **Extremadamente Mala ($0,01 < Q \leq 0,1$)**
- Macizos de calidad **Muy Mala ($0,1 < Q \leq 1$)**
- Macizos de calidad **Mala ($1 < Q \leq 4$)**
- Macizos de calidad **Regular ($4 < Q \leq 10$)**
- Macizos de calidad **Buena ($10 < Q \leq 40$)**

- Macizos de calidad **Muy Buena (40<Q≤100)**
- Macizos de calidad **Extremadamente Buena (100<Q≤400)**
- Macizos de calidad **Excepcionalmente Buena (Q>400)**

Para relacionar el valor del Índice Q con la fortificación requerida para asegurar la estabilidad de un desarrollo subterráneo, Barton et al. (1974) definieron un parámetro adicional que llamaron Dimensión Equivalente de la Excavación D_e . Este se obtiene como:

$$D_e = \frac{\text{Diámetro o Alto (m)}}{\text{ESR}}$$

Donde, ESR corresponde al la Razón de soporte (Excavation Support Ratio), cuyo valor relaciona el uso de la excavación y el nivel de seguridad requerido al sistema de soporte para mantener la estabilidad de la excavación. En la Tabla A1.6 se muestran los valores recomendados para ESR actualizados por Grimstad & Barton (1993).

Tabla A1.6: Valores de ESR

Caso	Tipo de desarrollo subterráneo	ESR
A	Labores mineras temporales	2 – 5
B	Labores mineras permanentes, túneles para la conducción de agua (excluyendo túneles de presión), túneles piloto, cruzados y cabeceras de grandes excavaciones.	1,6 – 2
C	Cavernas de almacenaje, plantas de tratamiento de agua, autopistas y ferrovías menores, túneles de acceso.	1,2 – 1,3
D	Centrales eléctricas, autopistas y ferrovías mayores, recintos de defensa civil, portales, intersecciones.	0,9 – 1,1
E	Centrales nucleares, estaciones ferroviarias, recintos públicos y deportivos, fabricas, túneles principales con cañerías de combustibles.	0,5 – 0,8

La dimensión equivalente D_e y el valor de Q permiten definir la fortificación recomendada mediante el grafico de estimación de soporte de Grimstand & Barton (1993, Figura A1.1).

Barton entrega además información adicional referida a recomendaciones de largo de pernos, máximo extensión del tramo sin fortificar y la presión de soporte al techo.

El largo de los pernos puede ser estimado por la relación siguiente:

$$L = \frac{2 + 0,15 B}{\text{ESR}}$$

Donde L es el largo de los pernos y B es el ancho de la labor.

La máxima extensión recomendada del tramo sin fortificar esta dada por:

$$\text{Máximo span (sin soporte)} = 2 \text{ ESR } Q^{0,4}$$

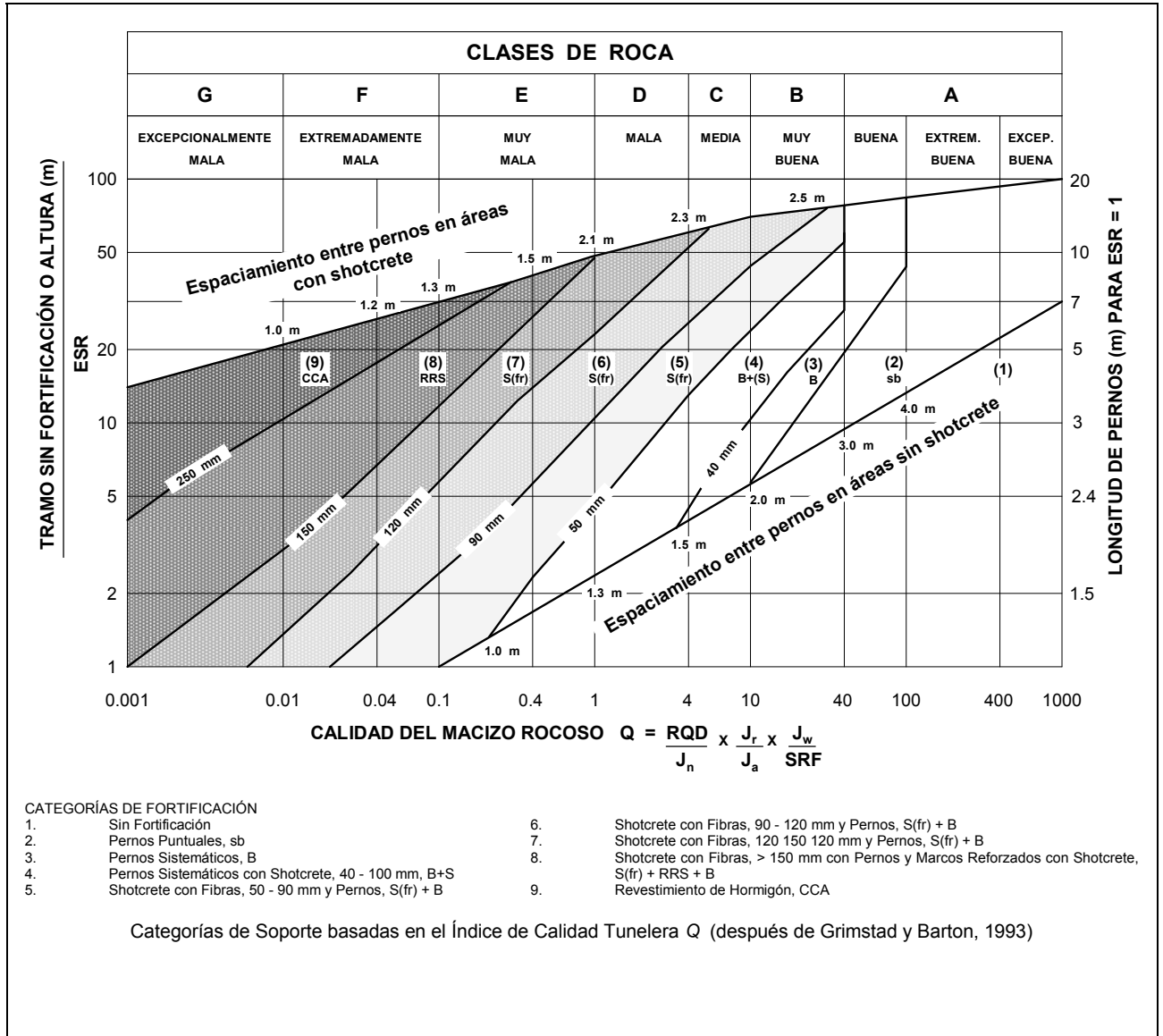


Figura A1.1: Gráfico de estimación de soporte según Grimstad & Barton (1993)

La presión permanente de soporte al techo esta dado por:

$$P_{\text{roof}} = 2/3 (J_n)^{1/2} (J_r)^{-1} Q^{-1/3}$$

ANEXO N° 2

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO GSI (Hoek (1994))

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende tanto de las propiedades de la roca intacta, como también de los grados de libertad de deslizamiento y rotación entre las partes que la conforman. Estos grados de libertad están controlados por la forma geométrica de los trozos de roca intacta, como de las condiciones en que se encuentran las superficies de contacto. Así un macizo rocoso compuesto por trozos angulares, limitados por superficies rugosas limpias, es mucho más resistente que un macizo rocoso con trozos redondeados rodeado por material alterado y meteorizado. El índice de resistencia geológica, **GSI**, fue desarrollado para evaluar la resistencia del macizo rocoso mediante este criterio desarrollado por Hoek desde 1994. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos:

RMS es la “estructura del macizo rocoso”, definida en términos de su blocosidad y grado de trabazón.

JC es la condición de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso

La evaluación del GSI se hace por comparación de lo observado en terreno con una cartilla de condiciones típicas Tabla A2.1 que puede variar de 0 a 100, lo que permite definir 5 clases de macizos rocosos:

- Macizos de calidad Muy Mala, Clase V, GSI de 0 a 20.
- Macizos de calidad Mala, Clase IV, GSI de 20 a 40.
- Macizos de calidad Regular, Clase III, GSI de 40 a 60.
- Macizos de calidad Buena, Clase II, GSI de 60 a 80.
- Macizos de calidad Muy Buena, Clase I, GSI de 80 a 100.

Respecto al uso del índice GSI para la caracterización geotécnica el macizo rocoso es conveniente indicar lo siguiente:

- a) No es aplicable a aquellos casos en que el comportamiento del macizo rocoso presenta un claro control estructural.
- b) No considera la resistencia en compresión uniaxial de la roca.

- c) No considera el espaciamiento entre las estructuras, ya que éste está implícitamente incluido al evaluar la blocosidad del macizo rocoso.
- d) El índice GSI debe definirse en un rango y no como un valor específico.
- e) El índice GSI puede estimarse en base al índice Q (Barton, et al., 1974), suponiendo que el macizo rocoso esta seco y el estado tensional es moderado, con lo que los parámetros $J_w = 1$ y $SRF = 1$. El valor resultante del índice Q' se relaciona con el índice GSI de la siguiente forma:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44$$


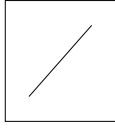
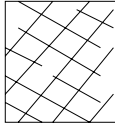
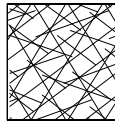

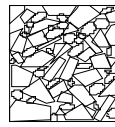

<p>INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA</p> <p>De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades, seleccione el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia, GSI, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para GSI, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.</p> <p>ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO</p>		<p>CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES</p> <p>MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)</p> <p>BUENA Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro</p> <p>REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas</p> <p>MALA Superficies lisas y azalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes</p> <p>MUY MALA Superficies lisas y azalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blancos</p> <p>EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES </p>				
 <p>INTACTO O MASIVO (INTACT OR MASSIVE) MACIZO ROCOSO MASIVO <i>IN SITU</i> O ESPECIMENES DE ROCA INTACTA, CON ESCASAS DISCONTINUIDADES AMPLIAMENTE ESPACIADAS</p>	<p>90 I/VG</p> <p>80</p>	<p>I/G</p>	<p>N/D</p>	<p>N/D</p>	<p>N/D</p>	
 <p>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS ORTOGONALES ENTRE SÍ</p>	<p>B/VG</p>	<p>70 B/G</p> <p>60</p>	<p>B/F</p>	<p>B/P</p>	<p>B/VP</p>	
 <p>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS DE VARIAS CARAS ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS</p>	<p>VB/VG</p>	<p>50 VB/G</p>	<p>VB/F</p>	<p>VB/P</p>	<p>VB/VP</p>	
 <p>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS</p>	<p>BD/VG</p>	<p>BD/G</p>	<p>40 BD/F</p> <p>30</p>	<p>BD/P</p>	<p>BD/VP</p>	
 <p>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS</p>	<p>D/VG</p>	<p>D/G</p>	<p>D/F</p>	<p>20 D/P</p>	<p>D/VP</p>	
 <p>FOLIADO-LAMINADO-CIZALLADO (FOLIATED/LAMINATED/SHEARED) ROCAS DEBILES CON CIZALLE TECTONICO Y PRESENCIA DE FOLIACIONES O LAMINACIONES FINAS. ESQUISITICIDADES POCO ESPACIADAS QUE PREDOMINAN SOBRE OTROS JUEGOS DE DISCONTINUIDADES, RESULTANDO UNA COMPLETA AUSENCIA DE BLOQUES</p>	<p>N/D</p>	<p>N/D</p>	<p>S/F</p>	<p>S/P</p>	<p>10 S/VP</p>	

Tabla A2.1: Cartilla de determinación del índice GSI (Hoek & Brown, 1997)

ANEXO N° 3

PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN GEOTÉCNICA DE FRENTE DE AVANCE Y LEVANTAMIENTO GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DE TUNELES

La revisión geotécnica de frentes y el levantamiento geotécnico-estructural de túneles constituyen dos actividades a realizar en labores subterráneas para la captura de información geotécnica. Sin embargo, se realizan en condiciones diferentes en función del ciclo operativo de desarrollo, del control de los peligros involucrados y la precisión de la información geotécnica obtenida.

La revisión geotécnica de frentes se realiza preferentemente, una vez terminada la extracción de marina de un disparo convencional, ocasionalmente, antes del inicio de la marina (si hubiera que considerar la colocación de fortificación sin sacar la marina) y en caso de excavación mecánica, en un horario acordado con la Inspección Técnica de Obra (ITO) y la empresa constructora. Constituye un procedimiento rápido, de 10 a 15 minutos, en condiciones de frente recientemente acuñada, donde se puede ingresar hasta donde se encuentra fortificada la bóveda del túnel. La información geotécnica obtenida permite realizar la clasificación geotécnica de la roca y evaluar si la fortificación de proyecto es la adecuada para asegurar la estabilidad del túnel.

El levantamiento geotécnico de túneles se realiza preferentemente a más de 20 m de la frente, en labores subterráneas fortificadas y acuñadas, empleando el instrumental geotécnico necesario para precisar la información geotécnica, base del modelamiento geotécnico del proyecto. Esta actividad se realiza en periodos de 1,5 a 3 horas para cubrir de 10 m a 30 m de avance del respectivo túnel.

1. Metodología de Revisión Geotécnica de Frentes de Avance

La caracterización geotécnica de macizo rocoso se realiza mediante visitas diarias a los frentes de avance de las excavaciones, donde se determina la calidad geotécnica de la roca del último tramo excavado. Esta se realiza sobre la base de la clasificación geotécnica establecida por Barton, Lien y Lunde en 1974 (Anexo N° 1). La calidad de roca estimada, es informada a la ITO (Inspección técnica de la Obra) quienes disponen la fortificación requerida para la estabilidad de la excavación, de acuerdo al diseño de fortificación de proyecto. Además, si la condición geotécnica de la frente lo amerita, el geólogo-geotécnico puede hacer recomendaciones de fortificación adicionales a las de proyecto, las que quedan explicitadas en el libro de comunicaciones con la ITO.

La revisión geotécnica de frentes, considera la caracterización geológica y geotécnica de la frente incluyendo litología, alteración, meteorización, discontinuidades, presencia de humedad y escurrimientos de agua. Otros parámetros geotécnicos y mineros considerados son:

FF: Frecuencia de fractura por metro lineal.

IRS: Resistencia a la compresión uniaxial no confinada, estimada mediante martillo geológico que se obtiene de la auscultación directa de las paredes del túnel, de acuerdo a la tabla de estimación de Brown (1981) que se presenta a continuación:

Tabla A3.1: Estimación del Resistencia del Macizo Rocosó (Brown, 1981)

Clase	Descripción	Identificación de terreno	IRS (MPa)
R0	Roca Extremadamente Blanda	El material se puede marcar con la uña.	0,25 a 1
R1	Roca Muy Blanda	El material se desmenuza al ser golpeado con la punta del martillo geológico. Con un cortaplumas es fácil tallar el material.	1 a 5
R2	Roca Blanda	Al golpear con la punta del martillo geológico se producen pequeñas marcas en el material. Es difícil tallar el material con un cortaplumas.	5 a 25
R3	Roca Moderadamente Resistente	No se puede tallar el material con un cortaplumas. Se requiere un golpe fuerte del martillo geológico para fracturar el material.	25 a 50
R4	Roca Resistente	Se requiere más de un golpe del martillo geológico para fracturar el material.	50 a 100
R5	Roca Muy Resistente	Se requiere muchos golpes con el martillo geológico para fracturar el material.	100 a 250
R6	Roca Extremadamente Resistente	Al golpear el material con el martillo geológico este no se fractura, y solo saltan esquirlas.	> 250

GSI: Índice Geológico de Resistencia, desarrollado por Hoek en 1994. Este índice de calidad geotécnica se determina sobre la base de dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad del macizo rocoso respecto a una cartilla de condiciones típicas que puede variar de 0 a 100 (Anexo N° 2).

RQD: Índice de calidad de roca de Deere et al. (1967) que se mide en las cajas del túnel o mediante la estimación de la cantidad de discontinuidades por unidad de volumen J_v (Anexo N°1).

Medias Cañas: porcentaje de perforaciones del contorno en paredes y techo visibles después de la tronada.

Calidad de la tronadura: Daño producido en el macizo rocoso por la tronadura en función de la sobreexcavación en paredes y techo.

De acuerdo con el valor obtenido para el índice de calidad de roca Q, se determina la clase de soporte (R), dentro de las cinco categorías que se presentan en la **Tabla A3.2.**

Tabla A3.2. Calidades geotécnicas del macizo rocoso de acuerdo al índice NGI-Q

Índice "Q"	Categoría Modificada de Barton et al 1974.		Categorías Geotécnicas Barton et al. 1974	Características Geotécnicas adaptadas a Chuquicamata.
	Clase	Denominación		
>40	R1	Muy Buena	Extremadamente Buena, Excepcionalmente Buena y Muy Buena	Roca masiva a débilmente fracturada (<4 f/m), sana y dura. Planos de fracturas cerrados y sin rellenos.
10 a 40	R2	Buena	Buena	Roca escasa a moderadamente fracturada (2 a 7 f/m), sana a débilmente descompuesta, dura. Planos de fractura con ocasionales pátinas de relleno, delgadas.
1 a 10	R3	Regular	Regular y Mala	Moderado a fuerte fracturamiento (5 a 15 f/m), débil a moderadamente descompuesta o meteorizada, relativamente dura. Todos los planos tienen rellenos de yeso, calcita, óxidos de Fe, y a veces, minerales arcillosos.
0,1 a 1	R4	Mala	Muy Mala	Fuerte a intenso fracturamiento (>10 f/m), moderada a fuertemente descompuesta o meteorizada, con ocurrencia de zonas de fallas con roca triturada o desintegrada. La mayoría de los planos presentan rellenos de yeso, óxidos de Fe y arcilla.
<0,1	R5	Muy Mala	Excepcionalmente Mala y Extremadamente Mala	Completamente descompuesta o meteorizada, con plena alteración a minerales arcillosos, blanda. Ocurrencia de importantes zonas de fallas y/o roca arcillosa disgregable con la mano.

Todos los parámetros geotécnicos, son registrados en terreno, en la cartilla de clasificación geotécnica (Tabla A3.3).

La información estructural es registrada con azimut y manteo según la regla de la mano derecha, considerando una declinación de 12° 51' al Oeste, correspondiente a la dirección Norte del sistema de coordenadas locales de Codelco-Norte.

Las estructuras se registran, distinguiendo fallas mayores (VIF, fallas con una zona de influencia igual o superior a 0,5 m), fallas intermedias (FT, fallas con desplazamiento superior a los 10 cm. e influencia inferior a 0,5 m), diaclasas o fracturas (FT, discontinuidades con desplazamiento inferior a 10 cm.), vetas y vetillas, con su correspondiente caracterización geométrica y geotécnica.

Tabla A3.3: Cartilla de clasificación geotécnica

CARTILLA DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE TÚNELES

LABOR _____ DESDE _____ HASTA _____ Hoja _____

CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO Q (Barton, 1974,1994)

RQD = _____ ff = _____ Tron. _____ MCañ. _____				J_n Índice de sistemas de fracturamiento Masivo: muy pocas fracturas Valor 0,5 a 1			
Relaciones según Palmström (1974) y Priest & Hudson (1972)				Un sistema 2 Un sistema + estructuras aleatorias 3 Dos sistemas 4 Dos sistemas + estructuras aleatorias 6 Tres sistemas 9 Tres sistemas + estructuras aleatorias 12 Mas de tres sistemas 15 Macizo rocoso desintegrado similar a un suelo granular 20 Portales = 2*J _n Intersecciones = 3*J _n , 2*J _n			
J_v <6 6 7,8 9 10,11 12	ff 0-1-2 2-3-5 2-3-6 3-4-8 4-5-9 4-6-11	RQD 100 95 90 85 80 75	J_v 13,14 15 16,17 22,23 24 25,26	ff 5-7-12 5-7-13 5-8-14 7-11-18 8-12-21 8-13-21	RQD 70 65 60 55 50 45		
Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF) =							
J_r Índice de rugosidad		Valor		J_a Índice de alteración		Valor	
Contacto bajo desplaz. de corte de menos de 10 cm		4		Contacto entre paredes		0,75	
Estructuras discontinuas o con puentes de roca		3		Estructuras bien trabadas y selladas, relleno duro (qz,ep)		1	
Estructuras onduladas, rugosas o irregulares		2		Paredes inalteradas, solo con pátinas locales		2	
Estructuras onduladas, lisas		1,5		Ligera alteración, sin arcilla		3	
Estructuras onduladas, pulidas (slickensided)		1,5		Estructura con poco contenido de arcillas		4	
Estructuras planas, rugosas		1		Rellenos arcillosos o similares		4	
Estructuras planas, lisas		0,5		Contacto antes de desplazamiento de 10 cm		4	
Est. planas, pulidas (slickensided), fav. al desliz.		1		Salbanda no arcillosa		4	
Sin contacto por desplazamiento sobre 10 cm				Contacto antes de 10 cm o sin contacto entre paredes		6	
J_w Coeficiente reductor por agua		Valor		Relleno arcilloso duro		8	
Excv. Seca o infiltración < 5 l/min. Presión local < 1 Kg/cm ²		1		Fallas con rellenos arcillosos blandos		8-12	
Caudal medio, lavado de algunas fracturas P=1 a 2,5 Kg/cm ²		0,66		Fallas con rellenos arcillosos expansivos		Sin contactos entre paredes	
Caudal importante con frac. Limpias P= 2,5 a 10 Kg/cm ²		0,5		Sin contactos entre paredes		5	
Caudal importante con lavado de fracturas P=2,5 a 10 Kg/cm ²		0,33		Fallas con relleno duro de arcillas limosas o arenosas		10	
Caudal inicial excepcional decrece P> 10 Kg/cm ²		0,2-0,1		Fallas gruesas con relleno arcilloso duro		13	
Caudal inicial excepcional se mantiene P> 10 Kg/cm ²		0,1-0,05		Fallas gruesas con relleno arcilloso blandos		13-20	
Fallas gruesas con relleno arcilloso expansivo				Terreno expansivo ("swelling")		Valor	
SRF Factor reductor de esfuerzo (h=cobertura)		Valor		Con presión expansiva moderada		5-10	
Roca competente con problemas de esfuerzos		2,5		Con presión expansiva alta		10-15	
Esfuerzos bajos cerca de la superficie		1		Zonas débiles que interceptan la excavación			
Esfuerzos medianos		0,5-2		Múltiples zonas débiles con arcillas en roca suelta		10	
Altos esfuerzos, gran cobertura		5-50		Aisladas con arcilla o roca descompuesta (h< 50m)		5	
Desprendimientos moderados de roca, lajamiento a 1 h.		50-200		Aisladas con arcilla o roca descompuesta (h> 50m)		2,5	
Fuertes desprendimientos de roca, estallido de roca				Múltiples zonas de cizalle sin arcilla en roca competente		7,5	
Terreno fluyente ("squeezing")				Zonas de cizalle aisladas en roca competente (h< 50m)		5	
Con moderadas presiones		5-10		Zonas de cizalle aisladas en roca competente (h> 50 m)		2,5	
Con altas presiones		10-20		Terreno con bloques sueltos y fracturas abiertas		5	
R1: Q>40 Muy Buena R2: Q=10-40 Buena R3: Q=1-10 Regular R4: Q=0,1-1 Mala R5: Q< 0,1 Muy Mala							
Estructura	Rumbo/manteo	RMD	Influencia	Relleno	Persistencia	Espaciamiento	Observaciones
IRS(estimado) = _____ MPa GSI = _____ U.G. = _____ ESR = _____ D_e = _____							
Comentarios:							
_____ _____ _____ _____							

FECHA _____ HORA _____ NOMBRE _____ FIRMA _____

1.1 Desarrollo de la actividad

Ingresando al sector de la frente, se realizará la evaluación geotécnica, para lo cual, el Geólogo-Geotécnico hará un bosquejo de la disposición espacial de las estructuras del sector y estimará la frecuencia de fracturas y del índice RQD, mediante la medición directa en las cajas o empleando la estimación de la cantidad de estructuras por unidad métrica de volumen (J_v definido por Pamström en Barton et al., 1974). Si las condiciones de iluminación son adecuadas, se deben tomar fotografías digitales de los rasgos geotécnicos relevantes con indicación de escala.

La evaluación de la resistencia del macizo rocoso (IRS) se debe efectuar en una o ambas paredes mediante el uso del martillo geológico. En las paredes también se deben realizar las mediciones de las estructuras mediante brújula Brunton, y revisar las condiciones geotécnicas de las estructuras (Rugosidad J_r , Alteración J_a , Humedad J_w). Para la determinación de la Unidad Geotécnica, es conveniente el uso del aspersor de agua para mejorar la visibilidad en algunos sectores del macizo rocoso. La cartilla de clasificación geotécnica incluye también la estimación del Índice de Resistencia Geológica, GSI.

2. Metodología del Levantamiento Geotécnico-Estructural de túneles

El levantamiento Geotécnico-Estructural de Túneles consiste en la captura de los mismos parámetros geotécnicos de la revisión geotécnica de frentes. Sobre la base de puntos de amarre topográfico en proyección horizontal. Se emplea el formato de levantamiento Geotécnico-Estructural para Labores Subterráneas (Tabla A3.4), y la representación gráfica en proyección horizontal en un plano a escala 1:100 (Figura A3.1) de la gradiente del túnel, donde se incluye los rasgos topográficos, geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos y estructurales del macizo rocoso que circunda la excavación subterránea. Este se realiza de acuerdo a la disponibilidad operacional de las excavaciones y una vez que se hayan puesto marcas topográficas de avance horizontal espaciadas cada 5 m. Usualmente, estas condiciones se dan sobre 15 m atrás de la frente.

2.1 Desarrollo de la actividad

En el lugar del levantamiento se extenderá la huincha de 25 m a 50 m ajustada a las marcas de metraje del túnel. El Geólogo-Geotécnico debe incorporar la información geotécnica al formato de la Tabla A3.4. En este formato se registra la unidad de captura de información denominada Celda Geotécnica. La celda geotécnica es el soporte de captura de datos que consiste en tramos de túnel en que el macizo rocoso presente condiciones geotécnicas homogéneas. La orientación e inclinación de las estructuras y otros rasgos geotécnicos deben medirse mediante Brújula Brunton convenientemente declinada de acuerdo a la declinación magnética referida a las coordenadas locales de Codelco-Norte.

Los rasgos geológicos a mapear se registran de acuerdo a la distancia que indique la huincha, que ya está referenciada, a cada lado de la labor. El plano de información a

levantar debe estar a la altura de la gradiente (1,5 m del piso). De acuerdo a esto, pudieran existir estructuras geológicas mapeadas fuera de la labor y quedar al interior del pilar, es el caso por ejemplo de estructuras subparalelas a la labor y de baja pendiente que al proyectarlas al plano de mapeo aparecerían insertos en el pilar.

Tabla A3.4: Formato de Levantamiento Geotécnico-Estructural Para Labores Subterráneas.

FORMATO LEVANTAMIENTO GEOTECNICO-ESTRUCTURAL PARA LABORES SUBTERRANEAS																																																																																														
Mapeado por :			Túnel:			Sector:			Fecha: / /			Página: /																																																																																		
INICIO Este:		Norte:		Cota:		FINAL Este:		Norte:		Cota:		Celda:																																																																																		
METRAJE INICIO:				METRAJE FINAL:				AZIMUT:				PENDIENTE:																																																																																		
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="6">CELDA GEOTECNICA N° :</th> <th colspan="6">SISTEMA DE CLASIFICACION GEOMECANICA PARA TUNELES</th> </tr> <tr> <td>Litología:</td> <td>IRS:</td> <td colspan="2">GSI:</td> <td>N° de juegos de diaclasas:</td> <td>N° alteración de diaclasas:</td> <td colspan="4">Factor de reducción de tensión: SRF:</td> </tr> <tr> <td>Alteración:</td> <td colspan="2">Martillo Schmidt:</td> <td>RMR(89):</td> <td>Jn:</td> <td>Ja:</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Ambiente:</td> <td colspan="2">RQD Vis:</td> <td>MRMR:</td> <td colspan="7"></td> </tr> <tr> <td>Unidad Geotécnica:</td> <td>RQD Med:</td> <td>FF:</td> <td>Inest:</td> <td colspan="2">N° de rugosidad de diaclasas:</td> <td colspan="2">N° reducción del agua en diaclasas:</td> <td colspan="4">Q Barton :</td> </tr> <tr> <td>Dominio Estructural:</td> <td colspan="2">Condición de Agua:</td> <td>Frec. Inest:</td> <td>Jr:</td> <td colspan="3">Jw:</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td colspan="12">Descripción Geomecánica:</td> <td colspan="4"></td> </tr> </table>								CELDA GEOTECNICA N° :						SISTEMA DE CLASIFICACION GEOMECANICA PARA TUNELES						Litología:	IRS:	GSI:		N° de juegos de diaclasas:	N° alteración de diaclasas:	Factor de reducción de tensión: SRF:				Alteración:	Martillo Schmidt:		RMR(89):	Jn:	Ja:					Ambiente:	RQD Vis:		MRMR:								Unidad Geotécnica:	RQD Med:	FF:	Inest:	N° de rugosidad de diaclasas:		N° reducción del agua en diaclasas:		Q Barton :				Dominio Estructural:	Condición de Agua:		Frec. Inest:	Jr:	Jw:							Descripción Geomecánica:																			
CELDA GEOTECNICA N° :						SISTEMA DE CLASIFICACION GEOMECANICA PARA TUNELES																																																																																								
Litología:	IRS:	GSI:		N° de juegos de diaclasas:	N° alteración de diaclasas:	Factor de reducción de tensión: SRF:																																																																																								
Alteración:	Martillo Schmidt:		RMR(89):	Jn:	Ja:																																																																																									
Ambiente:	RQD Vis:		MRMR:																																																																																											
Unidad Geotécnica:	RQD Med:	FF:	Inest:	N° de rugosidad de diaclasas:		N° reducción del agua en diaclasas:		Q Barton :																																																																																						
Dominio Estructural:	Condición de Agua:		Frec. Inest:	Jr:	Jw:																																																																																									
Descripción Geomecánica:																																																																																														
Caracterización Estructuras Mayores (VIF - FT - VETAS)																																																																																														
Estructura	RMD	Persistencia (m)		Abertura (mm)	Rugosidad JRC(10cm)	Planaridad JRC(10m)		Influencia (m)		Tipo Relleno	Espesor Relleno (cm)	Condición de Agua	Categoría	Terminación		Observaciones																																																																														
		Rumbo	Manteo			Máximo	Modal	Mínimo	Izquierda					Derecha	Ti		Tf																																																																													
Caracterización Discontinuidades Menores (Joints Sets)																																																																																														
Set Joint	RMD	Persistencia (m)		Espaciamiento (cm)			Abertura (mm)	Rugosidad JRC(10cm)	Planaridad JRC(10m)	Tipo Relleno	Espesor Relleno (cm)	Alteración Paredes	Condición Relleno	Terminación																																																																																
		Rumbo	Manteo	Máximo	Modal	Mínimo								Ti	Tf																																																																															
SJ1																																																																																														
SJ2																																																																																														
SJ3																																																																																														
SJ4																																																																																														
SJ5																																																																																														
Croquis - Observaciones											Factor D =		Condición de Desarrollo																																																																																	
											<input type="checkbox"/> 0 > 80 % Medias cañas <input type="checkbox"/> 0.3 < 80 % Medias cañas <input type="checkbox"/> 0.8 Sin medias cañas y sobreexcavado > 1 m																																																																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Condición de Agua</td><td>Terminación</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> S Seco</td><td><input type="checkbox"/> J Término en otra estructura</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> H Humedo</td><td><input type="checkbox"/> R Término en roca</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> M Mojado</td><td><input type="checkbox"/> T Truncada</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> G Goteo</td><td></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> F Flujo</td><td></td></tr> </table>		Condición de Agua	Terminación	<input type="checkbox"/> S Seco	<input type="checkbox"/> J Término en otra estructura	<input type="checkbox"/> H Humedo	<input type="checkbox"/> R Término en roca	<input type="checkbox"/> M Mojado	<input type="checkbox"/> T Truncada	<input type="checkbox"/> G Goteo		<input type="checkbox"/> F Flujo		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Rugosidad</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> SK Espejo de Falla</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> S Suave</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> SR Suave Rugoso</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> R Rugoso</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> VR Muy Rugoso</td></tr> </table>		Rugosidad	<input type="checkbox"/> SK Espejo de Falla	<input type="checkbox"/> S Suave	<input type="checkbox"/> SR Suave Rugoso	<input type="checkbox"/> R Rugoso	<input type="checkbox"/> VR Muy Rugoso	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Planaridad</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> P Planar</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> PS Planar Suave</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> O Ondulosa</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> OS Ondulosa Suave</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> OF Ondulosa Fuerte</td></tr> </table>		Planaridad	<input type="checkbox"/> P Planar	<input type="checkbox"/> PS Planar Suave	<input type="checkbox"/> O Ondulosa	<input type="checkbox"/> OS Ondulosa Suave	<input type="checkbox"/> OF Ondulosa Fuerte	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Alteración Paredes</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> U Sin</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> S Escasamente</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> M Moderadamente</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> H Altamente</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> C Completamente</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> R Suelo residual</td></tr> </table>		Alteración Paredes	<input type="checkbox"/> U Sin	<input type="checkbox"/> S Escasamente	<input type="checkbox"/> M Moderadamente	<input type="checkbox"/> H Altamente	<input type="checkbox"/> C Completamente	<input type="checkbox"/> R Suelo residual	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Condición del Relleno</td></tr> <tr><td>Calidad</td><td>Tamaño</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> P Pátinas</td><td><input type="checkbox"/> G Grueso</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> B Blando</td><td><input type="checkbox"/> M Medio</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> D Duro</td><td><input type="checkbox"/> F Fino</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> S Sabanda</td><td></td></tr> </table>		Condición del Relleno	Calidad	Tamaño	<input type="checkbox"/> P Pátinas	<input type="checkbox"/> G Grueso	<input type="checkbox"/> B Blando	<input type="checkbox"/> M Medio	<input type="checkbox"/> D Duro	<input type="checkbox"/> F Fino	<input type="checkbox"/> S Sabanda		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Tipo de Relleno</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> A Arcillas de Fallas</td><td><input type="checkbox"/> E Goettitas Arcillosas</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> T Arcillas de Alteración</td><td><input type="checkbox"/> G Roca Molida</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> O Oxidos de Cobre</td><td><input type="checkbox"/> C Calclita</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Y Yeso</td><td><input type="checkbox"/> S Sulfuros</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> J Jarocitas Arcillosas</td><td><input type="checkbox"/> M Oxidos de Manganeso</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> H Hematitas Arcillosas</td><td><input type="checkbox"/> Q Cuarzo</td></tr> </table>				Tipo de Relleno	<input type="checkbox"/> A Arcillas de Fallas	<input type="checkbox"/> E Goettitas Arcillosas	<input type="checkbox"/> T Arcillas de Alteración	<input type="checkbox"/> G Roca Molida	<input type="checkbox"/> O Oxidos de Cobre	<input type="checkbox"/> C Calclita	<input type="checkbox"/> Y Yeso	<input type="checkbox"/> S Sulfuros	<input type="checkbox"/> J Jarocitas Arcillosas	<input type="checkbox"/> M Oxidos de Manganeso	<input type="checkbox"/> H Hematitas Arcillosas	<input type="checkbox"/> Q Cuarzo																										
Condición de Agua	Terminación																																																																																													
<input type="checkbox"/> S Seco	<input type="checkbox"/> J Término en otra estructura																																																																																													
<input type="checkbox"/> H Humedo	<input type="checkbox"/> R Término en roca																																																																																													
<input type="checkbox"/> M Mojado	<input type="checkbox"/> T Truncada																																																																																													
<input type="checkbox"/> G Goteo																																																																																														
<input type="checkbox"/> F Flujo																																																																																														
Rugosidad																																																																																														
<input type="checkbox"/> SK Espejo de Falla																																																																																														
<input type="checkbox"/> S Suave																																																																																														
<input type="checkbox"/> SR Suave Rugoso																																																																																														
<input type="checkbox"/> R Rugoso																																																																																														
<input type="checkbox"/> VR Muy Rugoso																																																																																														
Planaridad																																																																																														
<input type="checkbox"/> P Planar																																																																																														
<input type="checkbox"/> PS Planar Suave																																																																																														
<input type="checkbox"/> O Ondulosa																																																																																														
<input type="checkbox"/> OS Ondulosa Suave																																																																																														
<input type="checkbox"/> OF Ondulosa Fuerte																																																																																														
Alteración Paredes																																																																																														
<input type="checkbox"/> U Sin																																																																																														
<input type="checkbox"/> S Escasamente																																																																																														
<input type="checkbox"/> M Moderadamente																																																																																														
<input type="checkbox"/> H Altamente																																																																																														
<input type="checkbox"/> C Completamente																																																																																														
<input type="checkbox"/> R Suelo residual																																																																																														
Condición del Relleno																																																																																														
Calidad	Tamaño																																																																																													
<input type="checkbox"/> P Pátinas	<input type="checkbox"/> G Grueso																																																																																													
<input type="checkbox"/> B Blando	<input type="checkbox"/> M Medio																																																																																													
<input type="checkbox"/> D Duro	<input type="checkbox"/> F Fino																																																																																													
<input type="checkbox"/> S Sabanda																																																																																														
Tipo de Relleno																																																																																														
<input type="checkbox"/> A Arcillas de Fallas	<input type="checkbox"/> E Goettitas Arcillosas																																																																																													
<input type="checkbox"/> T Arcillas de Alteración	<input type="checkbox"/> G Roca Molida																																																																																													
<input type="checkbox"/> O Oxidos de Cobre	<input type="checkbox"/> C Calclita																																																																																													
<input type="checkbox"/> Y Yeso	<input type="checkbox"/> S Sulfuros																																																																																													
<input type="checkbox"/> J Jarocitas Arcillosas	<input type="checkbox"/> M Oxidos de Manganeso																																																																																													
<input type="checkbox"/> H Hematitas Arcillosas	<input type="checkbox"/> Q Cuarzo																																																																																													

El levantamiento Geotécnico-Estructural debe considera la siguiente información:

- Identificación del sector a mapear (metraje, sector, proyecto, etc.).
- Contorno de las labores, considerando su proyección horizontal.
- Litología (identificar los tipos de roca y contactos litológicos).
- Tipo y grado de alteración (determinación cualitativa).
- Unidades Geotécnicas (identificar de acuerdo a unidades definidas por la Dirección de Geotecnia).
- Traza de estructuras intermedias y mayores a nivel de la gradiente del túnel, indicando:
 - Orientación (Rumbo/manteo, Dip/DipDir, etc.)
 - Categorización (VIF, FT)

- Influencia
 - Continuidad
 - Abertura
 - Rugosidad (a escala de 0,2 m)
 - sinuosidad (a escala de la caja del túnel)
 - Alteración
 - Tipo de relleno
 - Espesor de relleno
 - Tipo de terminación
 - Indicadores cinemáticos
- Trazas de diaclasas indicando:
 - Orientación (Rumbo/manteo, Dip/DipDir, etc.)
 - Frecuencia de fracturas (por juego de diaclasa)
 - Condición de agua.
 - Trazas de vetas y foliación si corresponde.
 - Contornos de zonas con humedad, indicando estimación de caudales.
 - Parámetros geotécnicos para la clasificación según el Q de Barton.
 - Clasificación Geotécnica GSI.
 - Estimación del Índice de Resistencia a la Compresión uniaxial (IRS) de la roca.
 - Contornos de cuñas de roca inestables.




FORMATO LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LABORES SUBTERRANEAS																
Mapeado por :	Túnel:	Sector:	Fecha: / /	Página: /												
																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Leyenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Joint Set</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Falla Vif</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Falla Ft</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Veta Sulfuro</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Veta Cuarzo</td> </tr> </tbody> </table>	Leyenda			Joint Set		Falla Vif		Falla Ft		Veta Sulfuro		Veta Cuarzo				
Leyenda																
	Joint Set															
	Falla Vif															
	Falla Ft															
	Veta Sulfuro															
	Veta Cuarzo															
				Escala:1:100												

Figura A3.1: Formato de mapeo Geotécnico-Estructural de túneles

La frecuencia de fracturas y el índice RQD, se miden directamente en las cajas o mediante el conteo de estructuras por unidad métrica de volumen (J_v). Si las condiciones de iluminación son adecuadas, se deben tomar fotografías digitales de los rasgos geotécnicos relevantes con indicación de escala. La evaluación de la resistencia del macizo rocoso (IRS) se debe efectuar en una o ambas paredes mediante el uso del martillo geológico.

Para la determinación de la Unidad Geotécnica, el tipo de roca, la alteración y las condiciones de los planos de fallas y fracturas, es conveniente el uso del aspersor de agua para mejorar la visibilidad en algunos sectores del macizo rocoso. En el mapeo de las Unidades Geotécnicas Básicas se debe indicar el contacto de una unidad con otra. Además se debe clasificar la unidad de acuerdo a los criterios definidos por la Dirección de Geotecnia de la División Codelco Norte, según tipo de litología y tipo y grado de alteración, definiéndose de tal manera las siguientes unidades geotécnicas:

- Granodiorita Fortuna (GDF)
- Zona de Cizalle Moderado (ZCM)
- Zona de Cizalle Intenso (ZCI)

- Roca Cuarzo Sericítica – Cuarzo menor que Sericita (RQS (Q<S))
- Roca Cuarzo Sericítica – Cuarzo igual que Sericita (RQS (Q=S))
- Roca Cuarzo Sericítica – Cuarzo mayor que Sericita (RQS (Q>S))
- Pórfido Este Sericítico (PES)
- Pórfido Este Potásico (PEK)
- Pórfido Este Clorítico (PEC)
- Granodiorita Elena Sur (GES)
- Brecha Entre Falla (BEF)

ANEXO N° 4

PLANOS GEOTÉCNICOS DE LOS TÚNELES DE EXPLORACIÓN Y DRENAJE. MINA CHUQUICAMATA

- LÁMINA N° 1. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Rampa Exploración. Mina Chuquicamata. Planta N° 1. Noviembre 2005.
- LÁMINA N° 2. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Rampa de exploración y Túnel de Drenaje. Mina Chuquicamata. Planta N° 2. Noviembre 2005.
- LÁMINA N° 3. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Túnel de Drenaje. Mina Chuquicamata. Planta N° 3. Noviembre 2005.
- LÁMINA N° 4. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Cruzado Geotécnico N° 1. Mina Chuquicamata. Planta N° 4. Noviembre 2005.
- LÁMINA N° 5. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Dominios Estructurales Túneles de Exploración. Mina Chuquicamata. Noviembre 2005.
- LÁMINA N° 6. Caracterización Geotécnica y Estructural. Rampa de Exploración y Túnel de Drenaje. Fortificación Instalada Túneles de Exploración. Mina Chuquicamata. Noviembre 2005.