

ANEXO 7

EVALUACIÓN RIESGOS GEOLÓGICOS PROYECTO CASERONES

LUMINA COPPER CHILE S.A.

**INGENIERÍA BÁSICA
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVE
PROYECTO CASERONES**

INFORME N° IBGG-RET-000-GO-004

**EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS
PROYECTO CASERONES**

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCION
A	Nombre Firma	SR	CLR/SBV	SBV	Coordinación Interna
	Fecha	20.06.09	20.06.09	20.06.09	
B	Nombre Firma	SR	CLR/SBV	SBV	Revisión y Aprobación LUMINA
	Fecha	04.09.09	04.09.09	04.09.09	
0	Nombre Firma	SR	CLR/SBV	SBV	Emitido para Factibilidad
	Fecha	16.09.09	16.09.09	16.09.09	

ARCADIS Geotécnica / ARCADIS Idetec
Eliodoro Yáñez 1893, Providencia. Santiago
Teléfono: 56-02-3816000
Fax: 56-02-3816001
www.arcadis.cl

ARCADIS Idesol
María Luisa Santander 0440, Providencia. Santiago
Teléfono: 56-02-3783540
Fax: 56-02-2250603
www.idesol.cl

**INGENIERÍA BÁSICA
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVE PROYECTO CASERONES**

**ESTUDIO DE RIESGOS GEOLÓGICOS DE LA PLANTA
CONCENTRADORA Y DEL DUMP LEACH**

CONTENIDO

1	RESUMEN	4
2	INTRODUCCIÓN	7
3	GEOLOGIA	8
4	GEOMORFOLOGÍA	17
	4.1 INTRODUCCIÓN	17
	4.2 HIDROGRAFÍA	17
	4.3 RELIEVE	19
	4.4 FORMAS Y DEPÓSITOS	19
	4.5 PENDIENTES	21
5	CLIMA	22
	5.1 INTRODUCCIÓN	22
	5.2 CLIMA ACTUAL	22
	5.3 CLIMA LOCAL	23
	5.4 PALEOCLIMA	26
	5.5 CALENTAMIENTO GLOBAL	27
	5.6 CONCLUSIONES SOBRE EL FACTOR CLIMÁTICO	28
6	EVENTOS GEOLÓGICOS OCURRIDOS EN SITIOS DEL PROYECTO	28
	6.1 CAMINO RAMADILLAS	28
	6.1.1 Contexto Geológico y Geomorfológico	28
	6.1.2 Riesgos Geológicos	30
	6.2 SECTOR CAMPAMENTOS.....	30
	6.2.1 Campamento de operaciones	30
	<i>6.2.1.1 Contexto Geológico y Geomorfológico</i>	<i>30</i>
	<i>6.2.1.2 Riesgos Geológicos</i>	<i>31</i>
	6.2.2 Campamento de Construcción	32
	<i>6.2.2.1 Contexto Geológico y Geomorfológico</i>	<i>32</i>
	<i>6.2.2.2 Riesgos Geológicos</i>	<i>33</i>
	6.3 ACOPIO DE ARENAS	35
	6.3.1 Contexto Geológico y Geomorfológico	35
	6.3.2 Riesgos Geológicos	37
	6.4 DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA	37
	6.4.1 Contexto Geológico Geomorfológico	37
	6.4.2 Riesgos Geológicos	38
	6.5 ÁREA PLANTA Y DUMP LEACH	41
	6.5.1 Contexto geológico y geomorfológico	41
	6.5.2 Riesgos geológicos	41
	6.6 ÁREA MINAY BOTADERO.....	41

7	ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS DEL PROYECTO.....	41
7.1	INTRODUCCIÓN	41
7.2	METODOLOGÍA GENERAL	41
7.3	MATRIZ DE RIESGOS GEOLÓGICOS.....	41
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
8.1	CONCLUSIONES	41
8.2	RECOMENDACIONES.....	41
9	REFERENCIAS	41

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 1	MAPA DE RIESGO GEOLÓGICO ACTUALIZADO
ANEXO 2	VARIACIÓN DIARIA DE LA ISOTERMA 0°C

1 RESUMEN

En el área de Proyecto Caserones los riesgos geológicos más habituales son del tipo Riesgos Declarados, o sea, eventos geológicos que han ocurrido al menos una vez en el pasado geológico en el sector de interés o en áreas inmediatamente vecinas y que han sido reconocidos por evidencias geológicas de terreno.

En contraposición, se entiende como Riesgo Potencial, un riesgo que puede generarse en una zona o sector específico, que no tiene evidencias de ocurrencia anterior pero existe la posibilidad de concurrencia de factores gatillantes.

En general los Riesgos Geológicos más comunes en el área del proyecto se asocian a eventos geológicos de remociones de masa de variados tipos.

El objetivo de este informe, a la luz de la reubicación de algunas instalaciones, está orientado a una puesta al día de la caracterización de los Riesgo Geológicos y una posterior estimación cuantitativa sobre el riesgo de su ocurrencia y los efectos que pudieren tener sobre el Proyecto en cada una de sus partes o en su totalidad. Por lo tanto, este informe prevalece sobre los anteriores informes debido a la incorporación de nuevos antecedentes.

En el área de estudio se distinguen dos sectores geológicamente bien diferenciados:

- Una zona occidental, relativamente más baja y angosta con pendientes más suaves, compuesta por rocas estratificadas sedimentarias y volcánicas jurásicas monoclinales hacia el oeste y cubiertas en discordancia angular por rocas volcánicas cretácicas dispuestas subhorizontalmente sobre ellas.
- Una zona oriental, más alta y abrupta que corresponde a rocas intrusivas paleozoicas que soportan retazos de una cubierta volcánico-clástica triásica dispuesta en discordancia de erosión que conforma afloramientos discontinuos sobre el intrusivo paleozoico.

El límite entre las dos zonas se ubica aproximadamente a lo largo del curso inferior de la quebrada La Brea.

Una serie de diaclasas, fracturas y fallas afectan intensamente a las unidades de roca presentes en el área, especialmente a los granitoides paleozoicos.

La cubierta de depósitos cuaternarios es importante, tanto como depósitos coluviales de ladera, de fondo de valle y/o depósitos de remociones en masa los que son de origen variado y frecuentes en el área de estudio debido al fracturamiento ya mencionado y al intenso fenómeno de gelivación que se advierte en el área, especialmente en el sector Oriental.

El área del proyecto está emplazada en la cuenca hidrográfica del río Ramadillas – afluente del río Pulido y éste del río Copiapó – y de sus subcuencas afluentes las que albergan cursos de agua menores que en conjunto diseñan una **red de drenaje de tipo dendrítico**, con una rama seudoparalela formada por las quebradas La Brea y La Escarcha, en el sector nororiental; la **amplitud del relieve** del área del proyecto es de 1.750 m, considerada como fuerte.

El punto culminante del área es el Cerro Chico de Caserones con 4.700 m de altura, aproximadamente.

La mayor parte de las obras del proyecto se encuentran en la subcuenca de la quebrada Caserones.

En el área del proyecto los fenómenos de riesgos geológicos están estrechamente ligados a las condiciones climáticas imperantes durante su ocurrencia.

Respecto de los riesgos geológicos para el área del Proyecto, los antecedentes climáticos, confirman la observación de que los eventos de remociones en masa más importantes observados en el área ocurrieron en un pasado con un clima mucho más húmedo - el doble que el actual - condiciones que se fueron degradando paulatinamente hasta la situación actual. Por otra parte las predicciones de la evolución del clima para el resto del siglo XXI, de acuerdo a los pronósticos más creíbles, en un escenario de cambio extremo muestran que las condiciones de pluviometría serían afectadas hasta en un 15% (aumento/disminución) en cantidad para la unidad climática en que se enmarca el área del proyecto y aún cuando se produzca un alzamiento de la isoterma 0°C a nivel local, los volúmenes de precipitaciones no llegarán a ser comparables con los que contribuyeron a producir las corrientes de barro y/o crecidas aluvionales observadas en las quebradas Caserones y La Brea.

Los eventos geológicos identificados en este informe y trabajos anteriores corresponden los observados en varias visitas a terreno durante 2008 y parte de 2009 realizadas por los autores y otros profesionales de **ARCADIS**.

Las conclusiones y recomendaciones de este informe actualizado de los Riesgos geológicos del área del proyecto son:

- Existen evidencias de eventos geológicos desde hace unos 1.000 años AC que constituyen Riesgos Declarados.
- Los riesgos geológicos detectados son:
 - ✓ Reptación de bloques rocosos y de depósitos periglaciares por geliflujión,
 - ✓ Derrame de detritos periglaciares difusos y encauzados
 - ✓ Caída de rocas y/o derrumbe de rocas
 - ✓ Flujos torrenciales de detritos
 - ✓ Erosión y/o socavamiento
 - ✓ Crecidas aluvionales
 - ✓ Flujos de barro y/o detríticos.

Del análisis de la importancia, probabilidad de ocurrencia y vulnerabilidad para cada riesgo geológico se tiene que los riesgos de mayor relevancia para el proyecto son la Caída de Rocas y/o Derrumbe de Rocas y el Derrame de Depósitos Periglaciares, los que se pueden manejar con medidas de prevención y operativas.

- Otros riesgos geológicos de muy menor relevancia son las crecidas aluvionales y los derrames periglaciares encauzados los que serían controlados mediante medidas de prevención y operativas.
- Otros riesgos geológicos tales como derrames detríticos difusos y de reptación son de un orden de magnitud muy menor de modo que se manejarán dentro de las operaciones de mantención de obras y caminos.
- Otros tipos de Riesgo Geológico tales como flujos de barro y/o de detritos ocurrieron en condiciones de clima y disponibilidad de material muy distintas a las actuales y por lo tanto hoy en día su probabilidad de ocurrencia es extremadamente baja debido a lo cual no se consideran medidas de prevención.

El Campamento de construcción está ubicado en un sitio en donde ocurren Caídas de Roca y posibles Derrame de Depósitos Periglaciares siendo el riesgo de ambos eventos de importancia moderada por lo que se recomienda analizar la posibilidad de ubicar una nueva instalación.

El Campamento de Operaciones se ubica en un lugar sometido a un riesgo bajo de flujo de Detritos Periglaciares Encauzado y Difuso, de baja y moderada respectivamente, por lo tanto se recomienda estudiar su reubicación.

El Camino de acceso principal estaría sometido a Derrame de Depósitos Periglaciares, de importancia moderada, Crecidas Aluvionales y erosión y socavamiento, los dos últimos de baja importancia. Todos ellos son controlables con medidas de control y alerta temprana.

El área del Dump Leach y planta estarían sometidos a riesgos de Derrame de Depósitos Periglaciares y reptación de bloques por soliflucción, de estos riesgos sólo el primero se considera de importancia moderada, mientras que el otro es de importancia baja. Todos son controlables con medidas durante la operación.

El Acopio de Arena podría ser afectado por erosión y socavamiento en la quebrada Angélica/Caserones y derrame de detritos periglaciares. El primero puede ser mitigado por la construcción de diques o piscinas de retención escalonadas en la quebrada Angélica. El segundo sólo requeriría de un control operacional. En cuanto al flujo de barro mencionado en la quebrada Caserones se estima que es un riesgo sometido a variaciones climáticas de amplitud milenaria y que bajo las actuales condiciones no tiene posibilidad de ocurrencia, al menos durante la vida del proyecto por lo que no se recomienda acción alguna.

El depósito de Lamas sólo sería afectado por probables Caídas de Rocas y/o derrumbes en su borde occidental, considerado de importancia moderada y probabilidad moderada y cuya mayor peligrosidad se refiere sólo a la etapa de construcción del muro del depósito de lamas.

El área de la mina, así como el sector del Botadero (nacientes de quebrada La Brea) no presentan evidencia alguna de riesgos geológicos, ni declarados ni potenciales.

2 INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de minerales económicamente explotables se ubican, generalmente, en la mediana y alta montaña en donde las pendientes juegan un papel importante en la dinámica geomorfológica. En el desarrollo de los proyectos mineros se ocupan áreas extensas y están por lo tanto expuestos a eventos de movimientos en masa.

Un evento geológico pasa a constituirse en Riesgo Geológico desde el momento que se plantean actividades humanas de cualquier tipo en el área de ocurrencia de ese evento y que pueden ser sometidas a un stress físico durante la ocurrencia del evento. En efecto la definición clásica de Riesgos Geológicos éstos se entienden como “aquellos procesos, eventos o situaciones que se dan en el medio geológico y que pueden producir daños a una comunidad” (Ayala et al, 1987) En este informe se considera Riesgo Geológico a todos los eventos geológicos susceptibles de generar impacto negativo sobre el proyecto y que han sido identificados en o cercanos al área del proyecto.

En el área de Proyecto Caserones los riesgos geológicos más habituales son del tipo Riesgos Declarados, esto es eventos geológicos que han ocurrido al menos una vez en el sector de interés o en áreas inmediatamente vecinas y que han sido registrados como tales.

En el uso de **ARCADIS**, a Riesgo Declarado se opone Riesgo Potencial, que consiste en un riesgo que puede generarse en una zona o sector específico, pero del que no hay registro de su ocurrencia pero que, sin embargo, tiene una probabilidad de ocurrencia o de actualización.

En general los Riesgos Geológicos más comunes en el área del proyecto se asocian a eventos geológicos de remociones de masa de variados tipos. Estos riesgos han sido ya discutidos en informes geológicos y de riesgo elaborados previamente por **ARCADIS**, (2008 - 2009), los que se figuran en la Tabla N° 2.1, y por lo tanto, no son retomados aquí en detalle.

Tabla N° 2.1
Trabajos anteriores sobre estudios de Riesgos Geológicos en el área del proyecto y en sus sitios específicos.

Fecha	Informe	Referencia
17/09/08	3339-0000-GE-INF-008	Geología del Proyecto
31/03/09	3339-0000-GE-INF-002	Riesgos geológicos del área del Proyecto
20/06/09	IBGG-RET-065-GO-001	Camino principal acceso proyecto
20/06/09	IBGG-RET-045-GO-002	Campamento construcción
20/06/09	IBGG-RET-046-GO-003	Campamento operaciones
20/06/09	IBGG-RET-664-GO-001	Depósito La Brea
14/07/09	IBGG-RET-674-GO-001	Acopio de Arena
14/07/09	IBGG-RET-900-GO-001	Planta y Dump Leach

El objetivo de este informe, a la luz de la reubicación de algunas instalaciones, está orientado a una puesta al día de la caracterización de los Riesgo Geológicos y una posterior estimación cuantitativa sobre el riesgo de su ocurrencia y los efectos que pudieren tener sobre el Proyecto en cada una de sus partes o en su totalidad. Por lo tanto, este informe prevalece sobre los anteriores informes debido a la incorporación de nuevos antecedentes.

Luego del análisis de la información producida por **ARCADIS** en los informes de la tabla 1.1 se hace necesaria su evaluación respecto de su influencia e importancia para el Proyecto. Consecuentemente con lo anterior, el informe se organiza en torno a los capítulos Geología, Geomorfología y Clima para enseguida presentar los Riesgos Geológicos por área o sitio y posteriormente concluir con un capítulo sobre la evaluación de dichos riesgos geológicos.

3 GEOLOGIA

A nivel regional, en el área de estudio se distinguen dos sectores geológicamente bien diferenciados:

- Una zona occidental, relativamente más baja y angosta con pendientes más suaves, compuesta por rocas estratificadas sedimentarias y volcánicas jurásicas con una actitud monoclinial hacia el oeste de 25° a 30° (Fotografía N° 3.1) y que son cubiertas en discordancia angular por rocas volcánicas cretácicas dispuestas subhorizontalmente sobre ellas.
- Una zona oriental, más alta y abrupta que corresponde a rocas intrusivas paleozoicas, en esta zona las plutonitas paleozoicas soportan retazos de una cubierta volcano-clástica triásica dispuesta en discordancia de erosión y que conforman “parches” o afloramientos discontinuos sobre el intrusivo paleozoico (Fotografía N° 3.2).



Fotografía N° 3.1. Panorama de la secuencia de la Formación Lagunillas hacia el sur desde la cuchilla NW de la quebrada La Brea, Se aprecia la actitud regular y monoclinial al oeste de las capas sedimentarias.



Fotografía N° 3.2. Panorama hacia el SE desde la ladera NW de la quebrada La Brea mostrando las secuencias volcano-sedimentarias sobreyaciendo los granitoides paleozoicos.

El límite entre las dos zonas se ubica aproximadamente a lo largo del curso inferior de la quebrada La Brea.

Una serie de diaclasas, fracturas y fallas afectan intensamente a las unidades de roca presentes en el área, especialmente a los granitoides paleozoicos.

La cubierta de depósitos cuaternarios es importante, tanto como depósitos coluviales de ladera, de fondo de valle y/o depósitos de deslizamientos en masa los que son de origen variado y frecuentes en el área de estudio debido al fracturamiento ya mencionado y al intenso fenómeno de gelivación que se advierte en el área, especialmente en el sector Oriental.

Las unidades estratificadas involucradas en el área del proyecto consisten en (Figura N° 3.1):

- I. Una secuencia volcano-clástica, principalmente andesítica, de color verde a negro en afloramiento que se correlaciona con la Formación La Ternera del Triásico Superior-Liásico. Esta unidad sobreyace directamente en contacto depositacional sobre granitoides paleozoicos formando.
- II. Sobre la unidad anterior sobreyace, en aparente concordancia, una secuencia sedimentaria roja (Fotografía N° 3.3) compuesta por areniscas rojas y conglomerados rojos a rosados, con intercalaciones volcánicas, y que se ubica principalmente hacia el oeste de la quebrada La Brea. Esta secuencia ha sido asignada a la Formación Lagunillas del Jurásico. Hacia el oeste predominan facies continentales rojo-moradas e intercalaciones volcánicas.
- III. Una secuencia potente, compuesta por niveles volcánicos, ignimbritas y niveles volcano-clásticos, sobreyace en discordancia aparente a la Formación Lagunillas y se continua hacia el oeste hasta la ladera oriental del valle del río Vizcachas de Pulido. Esta unidad se asigna a la Formación Quebrada Seca del Cretácico Superior. Algunos afloramientos dispersos de rocas volcánicas y volcano-clásticas, distribuidos sobre el macizo granítico paleozoico y a los que se asocian cuerpos subvolcánicos dioríticos a microdioríticos, en la parte más oriental del área de estudio, cerca de la mina, se asimilan a esta unidad.

De acuerdo a las observaciones de terreno, estas unidades mesozoicas, se disponen sobre una paleosuperficie irregular labrada sobre los granitoides paleozoicos y son recortadas a su vez por filones de andesita a microdiorita de edad indeterminada.

Las rocas intrusivas corresponden a monzogranitos a sienogranitos y sienodioritas de grano grueso, color rosado a gris claro, con variaciones a facies filonianas de igual composición pero textura más fina. En el sector de la mina se han descrito facies con textura auto-clástica relacionadas a zonas de alteración hidrotermal y mineralización. Las plutonitas paleozoicas son intruidas por filones andesíticos a microdioríticos verde oscuros y por filones dacíticos estos últimos asociados a la mineralización.



Fotografía Nº 3.3. Panorama de la ladera NW de la quebrada La Brea mostrando la Formación Lagunillas (miembro Cocambico) sobreyaciendo a la Formación La Ternera, parte derecha de la foto. Vista tomada hacia el WNW.

Las zonas de alteración hidrotermal en el sector de la mina y quebrada Caserones constituyen eventuales fuentes de material suelto de roca alterada.

En la Figura Nº 3.1 siguiente se ilustra la columna litoestratigráfica virtual del área del Proyecto Caserones

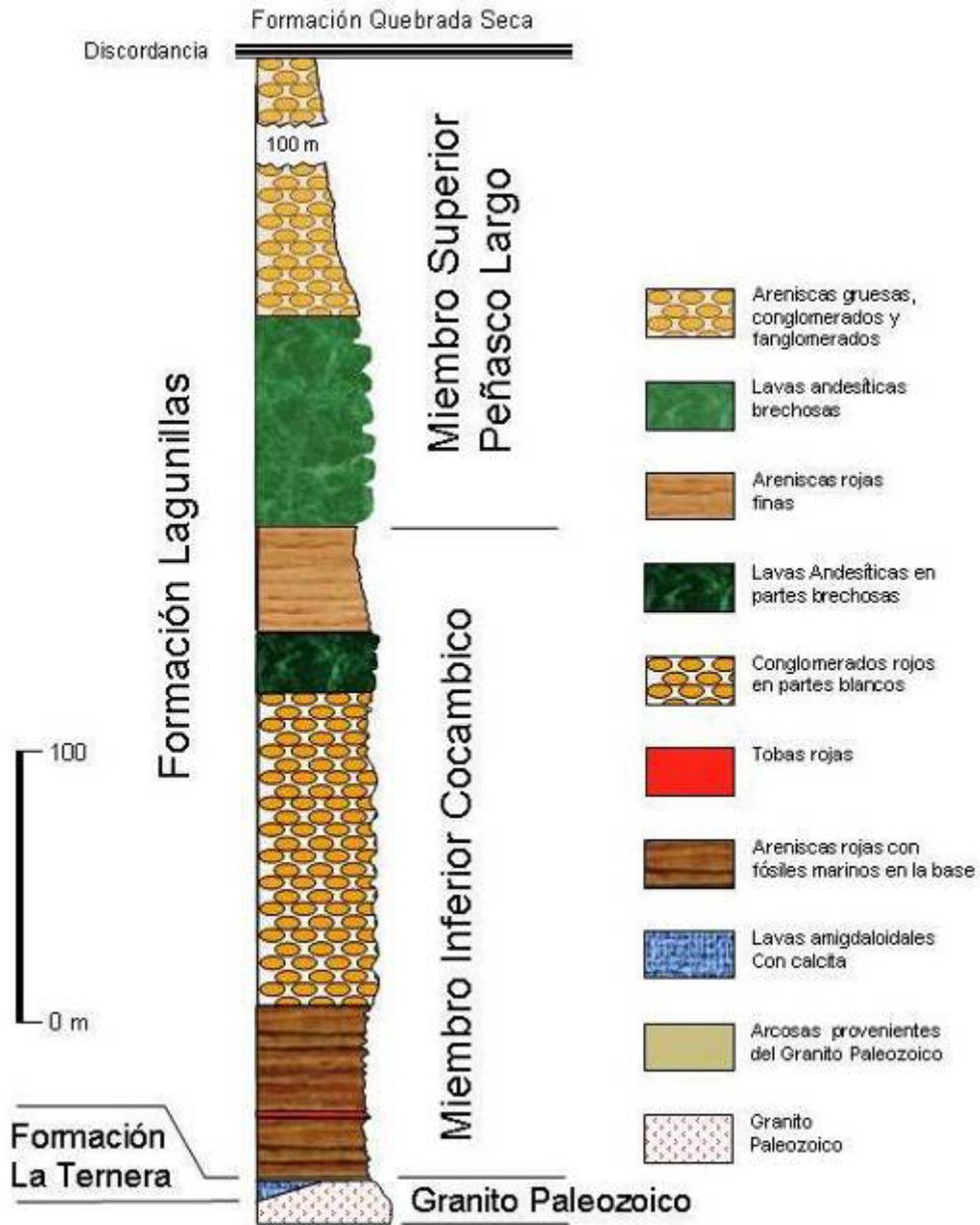


Figura N° 3.1. Columna Litoestratigráfica Virtual del Área del Proyecto Caserones.

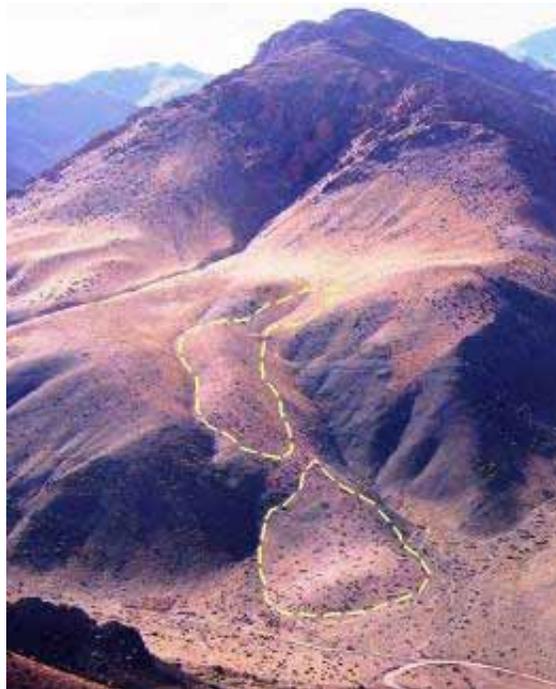
Los depósitos no consolidados que conforman la cubierta cuaternaria actual corresponden a:

- **Escombros de falda**, estos depósitos conforman una parte importante de toda la superficie del área, se trata de depósitos coluviales proximales (Fotografía N° 3.4), depositados en laderas constituidos por material fino a grueso con poca participación, en general, de arcillas, las que están presentes en baja proporción, principalmente debido a la remoción de éstas por el agua durante la época de deshielo; estos depósitos se encuentran en equilibrio metaestable y en algunas ocasiones sobrepasan los 30° de inclinación. En los cortes de caminos en muchas ocasiones se puede observar la alternancia de materiales finos y gruesos lo que es típico de coluvios en estado de solifluxión. Algunas veces estos depósitos conforman en superficie verdaderos planos o corredores de derrumbes y otras veces aparecen cortados por canaletas de erosión sobre todo en las partes más altas.



Fotografía N° 3.4. Panorama general del área de la mina Caserones mostrando la cubierta coluvial sobre los granitoides paleozoicos. Vista hacia el norte.

- **Deslizamientos.** Poco frecuentes, se observan en algunos sectores, por ejemplo, sobre la ladera oriental de la quebrada La Brea, en donde, aguas arriba del actual campamento, se pueden apreciar como depósitos coluviales que cubren afloramientos de la Formación La Ternera, (**Fotografía N° 3.5**). Un deslizamiento antiguo se aprecia en el lugar donde se instalará el futuro Campamento de Construcción (**Fotografía N° 3.6**) en la ladera N del río Ramadillas.



Fotografía Nº 3.5. Deslizamiento en masa antiguo y en parte rodado, en la ladera SE de La Brea, aguas arriba del campamento. Se aprecia el lóbulo frontal terminal sobre depósitos del fondo del valle.



Fotografía Nº 3.6. Probable Deslizamiento antiguo en la ladera norte del río Ramadillas. La línea punteada marca el lugar desde donde se habría desplazado el material. Obsérvese la superficie superior ondulada característica de remoción en masa. En punteado amarillo se destaca el área afectada por caída de rocas actualmente.

Conos de talud, son conos pequeños estrechos de alta pendiente y de espesores considerables en la parte baja del cono, en su salida a las quebradas de las que son tributarios (Fotografía N° 3.7), la mayoría de ellos, especialmente en el sector de la quebrada Caserones, han sido erosionados en su base por avenidas o crecidas en el cauce principal al que desembocan (Fotografía N° 3.8).

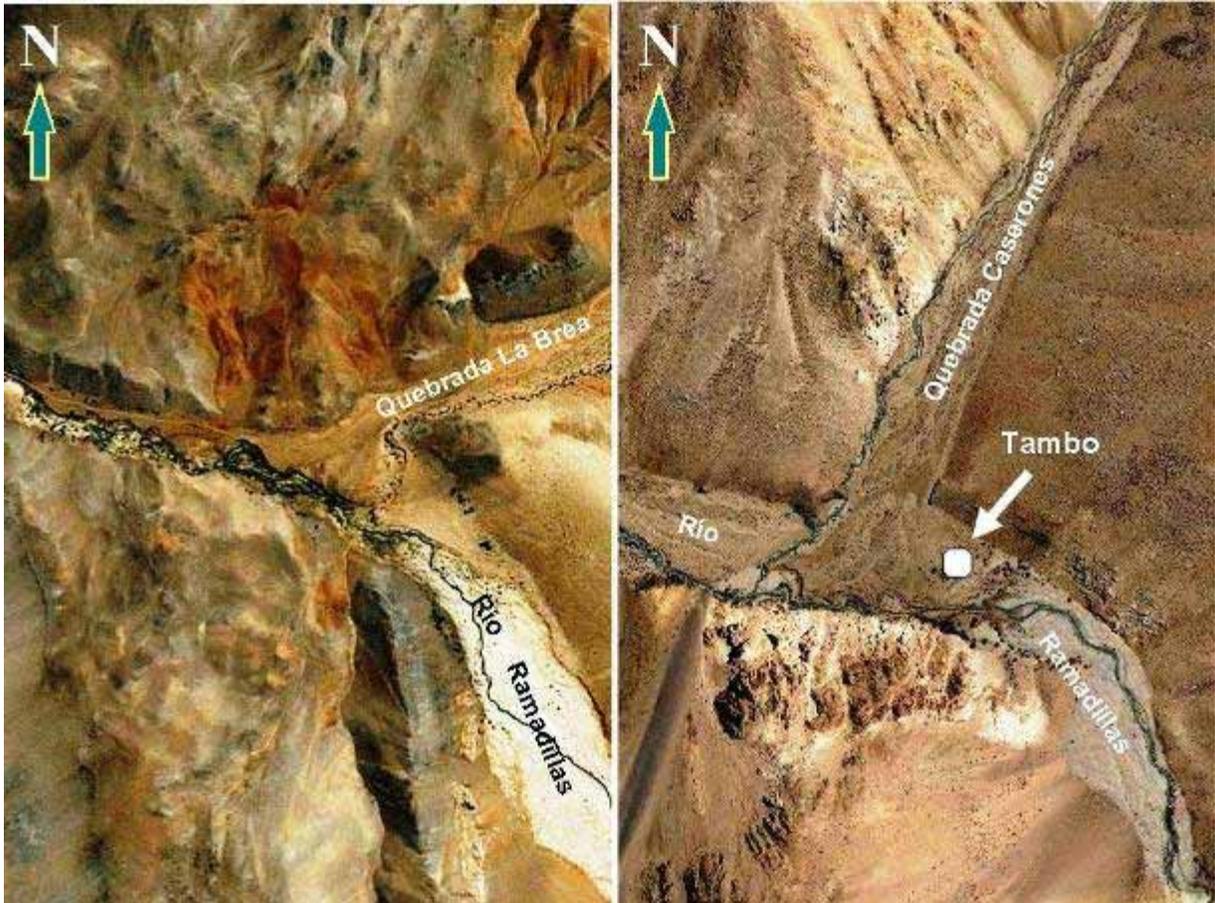


Fotografía N° 3.7. Panorama de detalle de los conos de talud en la quebrada Angélica. Se aprecia el espesor decamétrico de los depósitos y un pequeño derrumbe, a la izquierda de la foto, sobre el camino.



Fotografía N° 3.8. Panorama general del sector de la confluencia de la quebrada Angélica con la quebrada Caserones. Se aprecia a la izquierda la quebrada Caserones y a la derecha la quebrada Angélica, en ella se advierte claramente una canaleta de erosión que corta a los conos de talud y a los depósitos de la quebrada Caserones, la que habría sido originada por un aluvión o un flujo detrítico.

- **Depósitos de fondo de valle**, constituyen el relleno de los valles principales tales como el río Ramadillas y quebradas La Brea La Brea Caserones, además de otras menores; corresponden a depósitos de variada composición granulométrica, la que acentúa el carácter episódico torrencial de estos depósitos que ocurren principalmente durante crecidas del cauce que contienen, son materiales altamente porosos y permeables y poco resistentes a la erosión causadas por avenidas aluvionales y/o corrientes de barro como se puede apreciar en la salida de las quebradas La Brea y Caserones al río Ramadillas (**Fotografía N° 3.9**).



Fotografía N° 3.9. Panoramas aéreos de las salidas de las quebradas Caserones y La Brea al río Ramadillas. Se aprecia la similitud morfológica de ambos sectores en donde los flujos de detritos y/o barro estrecharon el valle del río Ramadillas desplazando el cruce del río hacia la ladera sur del valle. (Fuente: imágenes Google Earth procesadas)

Geotectónicamente el sector cordillerano a esta latitud del Norte Chico corresponde a una serie de franjas tectónicas limitadas por fallas inversas de alto ángulo con inclinación hacia el oeste, que comprometen hasta el basamento premesozoico, y generalmente con el bloque occidental (colgante) constituido por intrusivos paleozoicos montándose sobre la cobertura mesocenoica del bloque oriental (yacente). Este estilo de deformación en compresión genera dentro de cada franja arqueamientos estructurales y comúnmente pliegues en la cobertura mesozoica.

Dentro de este esquema, el área del proyecto se ubica en una franja tectónica cuyo límite occidental es el valle del río Vizcachas de Pulido el cual corre a lo largo del contacto tectónico entre el granito paleozoico, por el oeste y la formación Quebrada Seca por el este. Hacia el este del sector de la mina Una serie escalonada de falla inversas de alto ángulo convergencia este y ubicadas en el sector fronterizo (Jensen, 1976), definen el límite oriental del bloque Caserones – Río Ramadillas.

Las discontinuidades estratigráficas regionales más evidentes en el área son:

- La acordancia o disconformidad de la depositación mesozoica sobre el basamento granítico paleozoico, evidenciada por los depósitos de ortoconglomerados monomíticos basales de la Formación La Ternera.
- La discordancia de erosión entre la Formación La Ternera y la Formación Lagunillas sobreyacente, evidenciada por la depositación de un nivel conglomeradito basal compuesto de material granítico y que es seguido rápidamente por algunos niveles de calcarenitas fosilíferas.
- La discordancia angular entre la Formación Lagunillas y la Formación Quebrada Seca, evidenciada por la angularidad evidenciada entre los estratos de las respectivas unidades.

En toda el área se observan una serie de fracturas y o fallas que afectan a las rocas allí presentes. Sin embargo las diferentes orientaciones del fracturamiento regional se manifiestan con mayor intensidad en la superficie cubierta por los granitoides paleozoicos, los que muestran un fuerte e intenso fracturamiento polidireccional, el que es resultante de la superposición de sistemas de fracturas regionales, asociadas a fallas, sobre un estilo de fracturamiento propio de los granitoides paleozoicos y debido más probablemente al diaclasamiento intrínseco durante el enfriamiento del intrusivo.

Las estructuras más importantes detectadas a nivel regional corresponden a un sistema EW. En efecto, las fallas detectadas como tales en el área del proyecto son fallas de orientación EW y con indicadores cinemáticos de desplazamiento en el rumbo: la falla Siete Curvas, claramente expuesta en una de las curvas del camino Campamento-Mina pero sin desplazamiento determinado y la falla de las nacientes de la quebrada Cocambico muestra un desplazamiento en sentido dextral, de unos 200 a 300 m acompañado de un alzamiento relativo del bloque sur.

Una probable falla de rumbo NS a NNE-SSW que controlaría el emplazamiento de los cuerpos intrusivos del complejo magmático Oligoceno-mioceno de Caserones Quebrada La Brea, sería la única estructura de este tipo en la parte oriental del área de estudio

4 GEOMORFOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

El paisaje de la región del proyecto se organiza en torno al río Ramadillas y sus afluentes principales (Figura N° 4.1) los que han elaborado sus cauces sobre rocas principalmente intrusivas. El modelado regional es el resultado de la acción de dos **sistemas morfoclimáticos de erosión** que se han sobrepuesto. El sistema de erosión **glacial y nival** ha ejercido su acción durante el Pleistoceno dando origen a las formas principales del relieve que son los anfiteatros de erosión glacial (**circos glaciares**). A este sistema se ha impuesto, incluso antes del término de las glaciaciones, el sistema de erosión **periglacial de altura**, proveyendo los mayores volúmenes de detritos (**gelifractos**).

En el sector de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas no existen evidencias de erosión glacial; la altura es menor y existe la presencia de una vegetación particularmente desarrollada en los cursos de agua mayores (quebradas La Brea y La Escarcha). Aún cuando el sistema de erosión periglacial todavía se hace sentir, el agua puede ejercer su acción de descomposición a través de la meteorización química de las rocas, sobre todo en los sectores más bajos.

4.2 HIDROGRAFÍA

El área del proyecto está emplazada en la cuenca hidrográfica del río Ramadillas – afluente del río Pulido y éste del río Copiapó – y de sus subcuencas afluentes las que albergan cursos de agua menores que en conjunto diseñan una **red de drenaje de tipo dendrítico**, con una rama seudoparalela formada por las quebradas La Brea y La Escarcha, en el sector nororiental.

El río Ramadillas es el curso de agua principal, de disposición cercana a noroeste, y posee como afluentes más importantes la quebrada Caserones, por el noreste, en el extremo suroriental del mapa, y las quebradas La Brea y La Escarcha, provenientes también del noreste. A los cursos de agua citados se debe agregar, por su importancia geomorfológica, la quebrada Angélica, afluente por el este de la quebrada Caserones.

El río Ramadillas y las quebradas La Brea y Caserones son los únicos cursos de agua de régimen permanente; el resto sólo escurre esporádicamente cuando llueve en los sectores bajos, o con el deshielo, en el sector oriental más alto.

El curso del río Ramadillas tiene una orientación SE-NW y una longitud de 18.575m (18,5 Km.), desde su confluencia con la quebrada Caserones, en el SE, hasta el sector del campamento proyectado, esto es, siete kilómetros aguas abajo de su confluencia con la quebrada La Brea. Su gradiente hidráulico es de 2,9° (5%) hasta el primer punto citado, y de 3,3° (5,8%) hasta su confluencia con la quebrada La Brea. Esta última tiene una longitud de 8,8 Km., desde sus cabeceras hasta la confluencia con el río, y un gradiente hidráulico de 9,7° (17%).

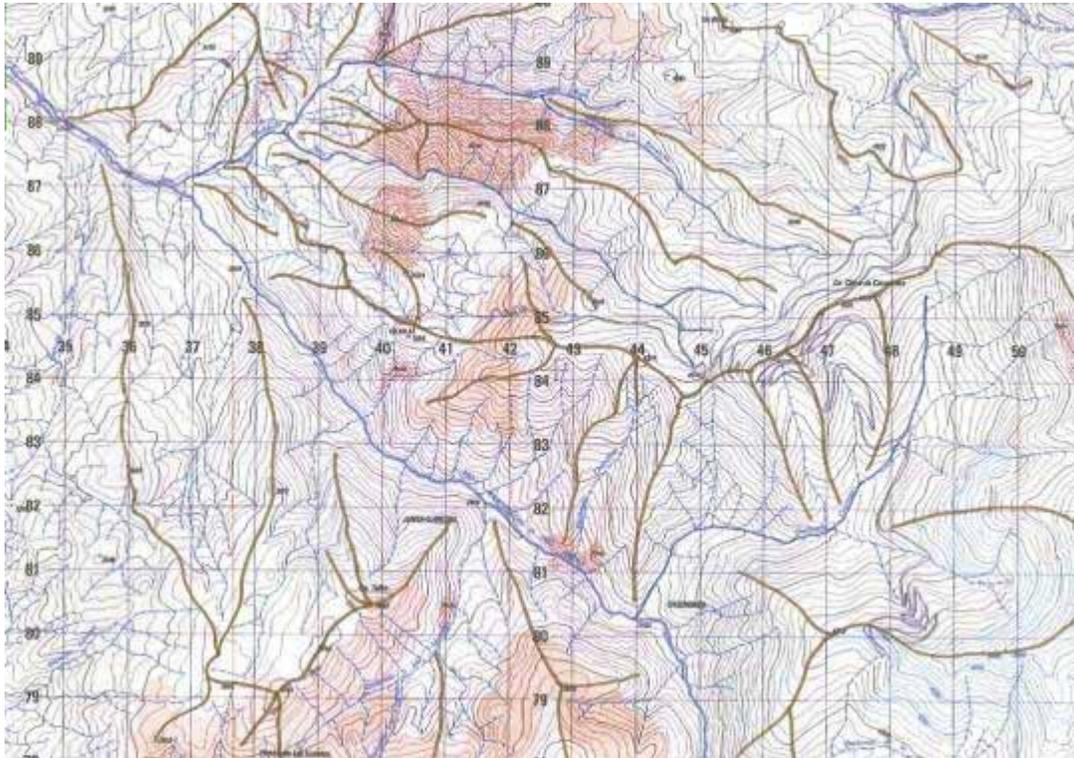


Figura N° 4.1. Bosquejo fisiográfico del área del proyecto Caserones mostrando la red de drenaje y las líneas divisorias de aguas (Hoja CASERONES. Escala 1:50.000).

La quebrada La Escarcha tiene una longitud de 10,1 km y un gradiente hidráulico de $8,7^\circ$ (15,3%); la quebrada Caserones tiene una longitud de 8 km desde sus nacientes hasta su confluencia con el río Ramadillas, y una pendiente longitudinal de $8,7^\circ$ (15,2%). La quebrada Angélica tiene un desarrollo longitudinal de 3,25 km y un gradiente hidráulico de $14,6^\circ$ (26%), valor que es importante retener.

La subcuenca de la quebrada Caserones posee tres quebradas afluentes desde el norte, cuyas características son las siguientes: La quebrada del Medio, tiene una longitud de 2.800m y un gradiente hidráulico de $11,1^\circ$ (19,6%), y una orientación NS; la quebrada Yacimiento, tiene una orientación NNW, una longitud de 2.500m aproximadamente, y un gradiente hidráulico de $13,5^\circ$ (24%). La tercera quebrada, la más oriental, presenta una orientación casi meridiana y una longitud aproximada de 2.275m; su gradiente hidráulico es de $24,7^\circ$ (46%).

Las fuertes pendientes de la quebrada Caserones dan cuenta claramente del poder erosivo de las lenguas glaciares (glaciares de circo y de ladera) que se alojaron en esos valles. Las quebradas La Brea y La Escarcha poseen, como ya se vio, recorridos más largos y pendientes más bajas, con afluentes relativamente importantes, subparalelos a los cursos principales.

4.3 RELIEVE

La región del proyecto se despliega desde la cota 2.250 m.s.n.m. en el sector del campamento proyectado, hasta casi los 5.000 m en el extremo este. La **amplitud del relieve**, es decir, la diferencia entre las cotas más bajas y las más altas, medida a lo largo del curso del río Ramadillas es 1.750 m, considerada como fuerte. En la subcuenca de la quebrada Caserones esta amplitud es menor, 800 m, aún cuando todavía importante para un ancho medio de la cuenca de 5km y una longitud de algo más de 6km.

El punto culminante del área es el Cerro Chico de Caserones con 4.700 m de altura, aproximadamente.

La mayor parte de las obras del proyecto se encuentran en la subcuenca de la quebrada Caserones. La divisoria de aguas de la vertiente norte de la subcuenca, que incluye gran parte de la vertiente derecha del valle del río Ramadillas, se dispone groseramente de este a oeste, desplazándose sinuosamente desde el este, pasando por el Cerro Chico de Caserones, hasta rematar prácticamente en el lecho del río Ramadillas, a escasos dos mil metros aguas arriba de su confluencia con la quebrada La Brea, a una cota cercana a los 2.700 m.s.n.m.

Las quebradas La Brea y La Escarcha forman dos subcuencas subparalelas separadas por un **interfluvio** cuya divisoria se orienta aproximadamente ESE-WNW, desde las cabeceras de ambas quebradas – situadas a una cota del orden de 4.400 m – hasta una cota aproximada de 2.800 m al oeste. La confluencia de ambas quebradas se sitúa a 2.750 m.s.n.m. La amplitud media del relieve para estas dos cuencas varía entre 400 y 500 m, los que corresponden a una amplitud media.

4.4 FORMAS Y DEPÓSITOS

Las formas que caracterizan el modelado del área del proyecto son los anfiteatros de erosión glacial o circos glaciares, situados en la subcuenca de la quebrada Caserones y, particularmente, aquella que hoy día aloja a la quebrada Angélica.

En la primera subcuenca mencionada es posible identificar, a lo menos ocho circos glaciares, unos mejor preservados que otros; el más importante de todos es aquel que aloja a la quebrada Angélica, importante porque ha permitido a este curso de agua ejercer una acción erosiva intensa que se mantiene hasta hoy, y que se materializa por un cauce de perfil transversal en V, profundo y estrecho.

El poder erosivo de la quebrada Angélica notablemente más importante que la sedimentación y acumulación de detritos se ha sustentado en su fuerte pendiente longitudinal y ha sido puesta en evidencia por la socavación ejercida sobre el cono de deyección de la quebrada Caserones; en la profundización de su lecho y en su modesto cono de deyección visible en la confluencia con el río Ramadillas.

Esta quebrada está rodeada por taludes de fuerte pendiente cubiertos por potentes acumulaciones de detritos periglaciares, los que constantemente están alimentando el curso de agua en su continua labor de socavación y erosión (Figura N° 4.1).

Un circo glaciar es una depresión abierta o nicho topográfico dominado por paredes **supraglaciares** abruptas, elaboradas por el hielo acumulado en el sitio (**hielo de nieve**); en la actualidad estos circos, y en general las laderas, están tapizadas de **gelifractos** (depósitos periglaciares) formando **rampas de depositación** o **canchales** o incluso lóbulos que no tienen el desarrollo suficiente para constituir “**glaciares de rocas**”.

Lo anterior afirma el hecho de que en toda el área del Proyecto Caserones no existen ni glaciares (s.s.) ni glaciares de roca.



Fotografía Nº 4.1. Vista de la subcuenca de la quebrada Caserones desde la quebrada Angélica. Nótese las acumulaciones detríticas (depósitos periglaciares) y las fuertes pendientes de las cabeceras de la cuenca.

4.5 PENDIENTES

Este factor de riesgo ha sido representado en el Mapa de Pendientes (fuera del texto), en el cual se han definido los siguientes rangos de pendientes, expresados en grados sexagesimales, parcialmente apoyados en definiciones establecidas por Joly (1997):

- a) Pendiente de 0 a 10°
- b) Pendiente de 10 a 15°
- c) Pendiente de 15 a 25°
- d) Pendiente de 25 a 30°
- e) Pendiente > 30°.

Si se observa el mapa de pendientes se puede constatar una cierta relación entre las pendientes más abruptas y la altura relativa de la región. Así, por ejemplo, las pendientes de 25° y mayores que 30° se concentran principalmente en los sectores central y oriental; excepcionalmente se las observa en el sector de los proyectados campamento y campamento de operaciones.

Por su parte, las pendientes inferiores a 15° se encuentran al norte de la quebrada La Escarcha y al norponiente del tramo noreste de la quebrada La Brea y en el lecho del río Ramadillas, de la quebrada Angélica y de las otras quebradas mayores.

Al norte de la divisoria aludida más arriba y paralelamente a ella, se distribuyen pendientes intermedias de 15 a 25°, del mismo modo que en los interfluvios de las quebradas La Escarcha y La Brea, y entre sus afluentes más importantes. Pendientes con valores semejantes o inferiores se observan al interior de las cuencas de la quebrada Caserones y de sus dos vecinas por el oeste.

Las pendientes superiores a 30° corresponden a las cabeceras de los anfiteatros de erosión glaciár, confirmando de paso lo expresado en la definición de estos nichos morfológicos. La tercera y cuarta subcuencas ubicadas al oeste de la quebrada Caserones también presentan fuertes pendientes superiores a 30°.

Las subcuencas mencionadas anteriormente, correspondientes a las quebradas del Medio y Yacimiento, que enfrentan al Depósito de Arena proyectado, ubicado sobre el tramo final de la quebrada Caserones, poseen pendientes superiores a 30°, del mismo modo que los límites orientales de la cuenca de la quebrada anteriormente citada y de la cuenca de la quebrada Angélica. En esta última se comprueba como la pendiente favorece la socavación y la erosión, en detrimento de la sedimentación.

5 CLIMA

5.1 INTRODUCCIÓN

En el área del proyecto los fenómenos de posibles Riesgos Geológicos están estrechamente ligados a las condiciones climáticas imperantes durante su ocurrencia, de ahí que conocer el clima actual, su variación durante el Cuaternario y su evolución futura es de gran importancia para la evaluación de la importancia de los riesgos geológicos.

El concepto de clima se entiende como el ambiente atmosférico constituido por la serie de los estados de la atmósfera por encima de un lugar en una sucesión habitual (Sorre, 1943)

5.2 CLIMA ACTUAL

La variación climática en Chile es controlada esencialmente por movimientos de masas de aire provenientes desde el Pacífico y que se internan hacia el continente en dirección NE. La temperatura y humedad características de las masas de aire son influenciadas fuertemente por las temperaturas de las aguas oceánicas, las que dependen en su mayor parte de la variación en el rumbo y de la profundidad estacional de la corriente de Humboldt. Estas masas de aire, al adentrarse en el continente son fuertemente influenciadas por el efecto orográfico que se produce cuando las masas de aire encuentran a su paso montañas y cordilleras y son forzadas a subir para continuar su camino, produciendo las llamadas precipitaciones orográficas. Que resultan de la condensación y enfriamiento de la masa de aire ascendente durante su cruce de la Cordillera de Los Andes.

En forma acíclica, entre 3 a 7 años, se produce la migración hacia el sur de todo el conjunto de las celdas climáticas del Pacífico Sudoriental y un ascenso de la temperatura de las aguas oceánicas superficiales, es el fenómeno climático conocido como El Niño Oscilación Sur (ENOS) el que causa un significativo aumento de las precipitaciones en las áreas afectadas a todo el ancho de la faja del territorio chileno.

La influencia del relieve en la variación EW de las condiciones climáticas a lo largo de Chile ha permitido ha permitido la definición de fajas climáticas basados en los criterios establecidos por Köppen (1948)(Ref. 8) y Fuenzalida (1965) (Ref.4) las que se diferencian por temperatura, humedad y condiciones de precipitación. La Clasificación actual de Los Climas de Chile se puede ver en www.meteochileclimas.cl/climas. El área del proyecto se ubica climáticamente en la frontera entre dos franjas climáticas las que corresponden a:

- ✓ Faja del clima Desértico Marginal Bajo (BWh)
- ✓ Faja del clima Desértico Marginal de Altura (BWH)

Clima Desértico Marginal Bajo (BWh)

“Este clima corresponde a la mayor parte de la IIIª Región, cubriendo la zona que va desde donde comienzan las tierras altas de la cordillera hasta donde alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. De Copiapó al norte es de una rigurosa sequedad, en cambio de Copiapó al sur, la inexistencia de la cordillera de la Costa permite alguna forma de efecto marítimo en la humedad sin nubosidad, que atenúa las características desérticas. La amplitud térmica es mucho mayor que en el litoral. La diferencia entre el mes más cálido y el más frío es de 7° a 8° C en Copiapó y Vallenar mientras que se estima inferior a 6° en la zona costera. Mucho mayor es la amplitud térmica diaria que alcanza del orden de 13° a 15° C, lo que es una buena muestra de la continentalidad.

Las zonas con este clima se ubican bajo el nivel de la inversión de temperatura, con temperaturas moderadas y humedad suficiente para permitir la generación de algún tipo de vegetación de estepa en los sectores bajos.

Las precipitaciones aumentan con la latitud y con la altura, concentrándose en los meses de invierno. Los totales anuales llegan a 12 mm en Copiapó (291 metros de elevación), 19 mm en El Salvador (2.400 m), 32 mm en Vallenar (470 m) y 34 mm en Los Loros (948 m)”.

Clima Desértico Marginal de Altura (BWH)

“Se manifiesta sobre los 2.000 m de altura. El régimen térmico es más frío pero las oscilaciones térmicas son menores que en el desierto marginal bajo, debido a la altura. La humedad relativa es baja.

Las precipitaciones son más abundantes en este clima y se producen casi exclusivamente en los meses de invierno, de mayo a agosto. Estas son de origen frontal y muchas veces son nivosas. Las temperaturas bajas y las precipitaciones nivales hacen que la línea de nieves eternas se ubique entre los 5.000 y 6.000 m, por lo que a los más altos picachos de la cordillera de la región, localmente se les denomine "nevados", como el Incahuasi, Tres Cruces, Ojos del Salado, etc.”

En el área del Proyecto Caserones coexisten así dos tipos climáticos con condiciones de aridez a semiaridez en las precipitaciones pero con una fuerte influencia orográfica.

5.3 CLIMA LOCAL

El área del Proyecto Caserones se ubica mayormente en la faja climática de Desértico Marginal Bajo. Sin embargo, El clima de Desértico Marginal Altura, aparece en la parte más oriental del área del proyecto (sector Mina) por lo que el área de influencia queda por debajo del límite de nieves eternas ubicadas entre los 5.000 y 6.000 m de altura. Las cotas máximas que se alcanzan en el área del proyecto alcanzan los 4.600 m.

Con motivo de los trabajos iniciales para el estudio y desarrollo del proyecto Caserones, Lumina Copper Chile, instaló en 2006 dos estaciones meteorológicas: una ubicada en la parte baja de la quebrada La Brea, en el campamento actual de exploración, y otra instalada en la parte más alta en el sector conocido como Curva Negra.

En la Tabla N° 5.1 siguiente presenta las coordenadas y altitud respectivas de las estaciones meteorológicas del Proyecto Caserones. Las tablas siguientes muestran los datos climáticos recolectados por cada estación según se detalla más adelante.

Tabla N° 5.1
Estaciones Meteorológicas en el Área del Proyecto.

Estación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud m s.n.m.	Sector
Campamento	438.626	6.888.155	2.750	La Brea
Curva Negra	445.225	6.884.380	4.280	Caserones

Datum: PSAD 56.

La información meteorológica presentada corresponde a mediciones realizadas entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2007, la que fue incorporada en el EIA del proyecto, desde donde se tomaron los antecedentes aquí presentados.

Estación Curva Negra

La temperatura media anual es de -0,3° C. El mes más cálido es enero, el cual posee una temperatura media de 5,3° C. Sin embargo, la temperatura máxima media fue registrada en el mes de febrero, alcanzando un valor de 17,1° C. El mes más frío es agosto, con una temperatura media de -6,6° C y una temperatura mínima media de -18,0° C. En cuanto a las precipitaciones, se registran 45,9 mm anuales (Tabla N° 5.2). Estos datos, correspondientes a un solo año de mediciones, si bien no tienen valor estadístico alguno, son consistentes con los valores de temperatura media, oscilación térmica diaria y anual, así como las precipitaciones que se consideran típicas del Clima Desierto Marginal de Altura.

Tabla N° 5.2
Variables Meteorológicas Estación Curva Negra.

Estación Curva Negra (445.225 E; 6.884.380 N; 4.280 m m.s.n.m.)						
Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa Media (%)	Velocidad del Viento Media (m/s)	Precipitación (mm)
	Media	Máxima Media	Mínima Media			
Enero	5,3	15,1	-3,8	37,3	4,3	6,60
Febrero	4,2	17,1	-5,8	32,2	5,3	0,50
Marzo	4,1	14,7	-4,2	30,3	6,4	3,80
Abril	1,3	12,8	-8,1	29,0	8,1	0,00
Mayo	-4,4	6,6	-13,6	45,2	10,8	20,0
Junio	-5,6	7,9	-15,0	47,2	12,4	12,9
Julio	-5,3	8,5	-15,5	31,3	9,4	0,10
Agosto	-6,6	-2,7	-18,0	24,7	12,5	0,70
Septiembre	-2,7	8,7	-14,6	23,0	11,6	1,30
Octubre	0,7	11,7	-13,6	22,6	8,9	0,00
Noviembre	2,0	13,9	-11,6	20,1	5,6	0,00
Diciembre	3,2	13,5	-5,0	26,6	4,7	0,00
Anual	-0,3	11,1	-10,7	30,8	8,3	45,9

Estación Campamento

La temperatura media anual es de 10,9° C. El mes más cálido es enero, con una temperatura media de 16,4° C. Sin embargo, la temperatura máxima media ocurrió en febrero, alcanzando un valor de 28,3° C. El mes más frío es agosto, con una temperatura media de 5,0° C. La temperatura mínima media fue registrada en el mes de agosto, alcanzando un valor de -7,7° C. En cuanto a las precipitaciones, se registran 54,9 mm anuales. Del mismo modo que en el caso de la estación Curva Negra, los datos obtenidos en esta estación para el período enero-diciembre 2007 son consistentes con las características definidas para el Clima Desierto Marginal Bajo.

Tabla Nº 5.3
Variables Meteorológicas Estación Campamento.

Estación Campamento (438.626 E; 6.888.155 N; 2.750 m.s.n.m.)						
Mes	Temperatura (° C)			Humedad Relativa Media (%)	Velocidad del Viento Media (m/s)	Precipitación (mm)
	Media	Máxima Media	Mínima Media			
Enero	16,4	26,1	6,2	26,8	2,3	0,30
Febrero	15,4	28,3	4,7	24,7	2,2	1,00
Marzo	14,9	25,7	6,1	21,9	2,2	0,00
Abril	12,5	24,9	2,7	18,1	2,1	0,00
Mayo	7,5	20,1	-3,1	28,0	2,0	44,90
Junio	5,6	18,4	-3,7	31,7	1,8	0,04
Julio	5,7	20,1	-5,6	19,2	2,0	0,10
Agosto	5,0	16,9	-7,7	15,0	2,4	0,00
Septiembre	8,7	21,5	-3,5	15,5	2,5	8,60
Octubre	12,1	24,1	-1,9	15,3	2,5	0,00
Noviembre	13,2	25,8	-2,2	15,9	2,4	0,00
Diciembre	14,3	24,7	4,4	20,4	2,4	0,00
Anual	10,9	23,0	-0,3	21,0	2,2	54,9

Si se consideran las temperaturas promedio anuales para las dos estaciones se puede sugerir que la ubicación de la isoterma 0° se desplaza durante el año entorno a las cotas de 2500 y 4800 m.s.n.m., lo que es coincidente con los datos de oscilación diaria de la isoterma regional de Atacama y de las mediciones diarias en el área del proyecto en donde la variación diurna de la isoterma 0°C se mueve para un día cualquiera entre los 3250 y 4800 m.s.n.m como se muestra en el anexo 2. En la Figura Nº 5.1 se presentan las cotas topográficas que materializan la ubicación más probable de la isoterma 0°C actual en el área del Proyecto. Dadas las mediciones de variación de la isoterma 0°C hechas en la estación meteorológica del proyecto es posible concluir que gran parte del día la isoterma se ubica entre los 3000 y 3500 m.s.n.m. en el área del proyecto y que el ascenso diurno de la isoterma hasta los 4800 m.s.n.m. se debe principalmente al calentamiento por insolación durante el mediodía.

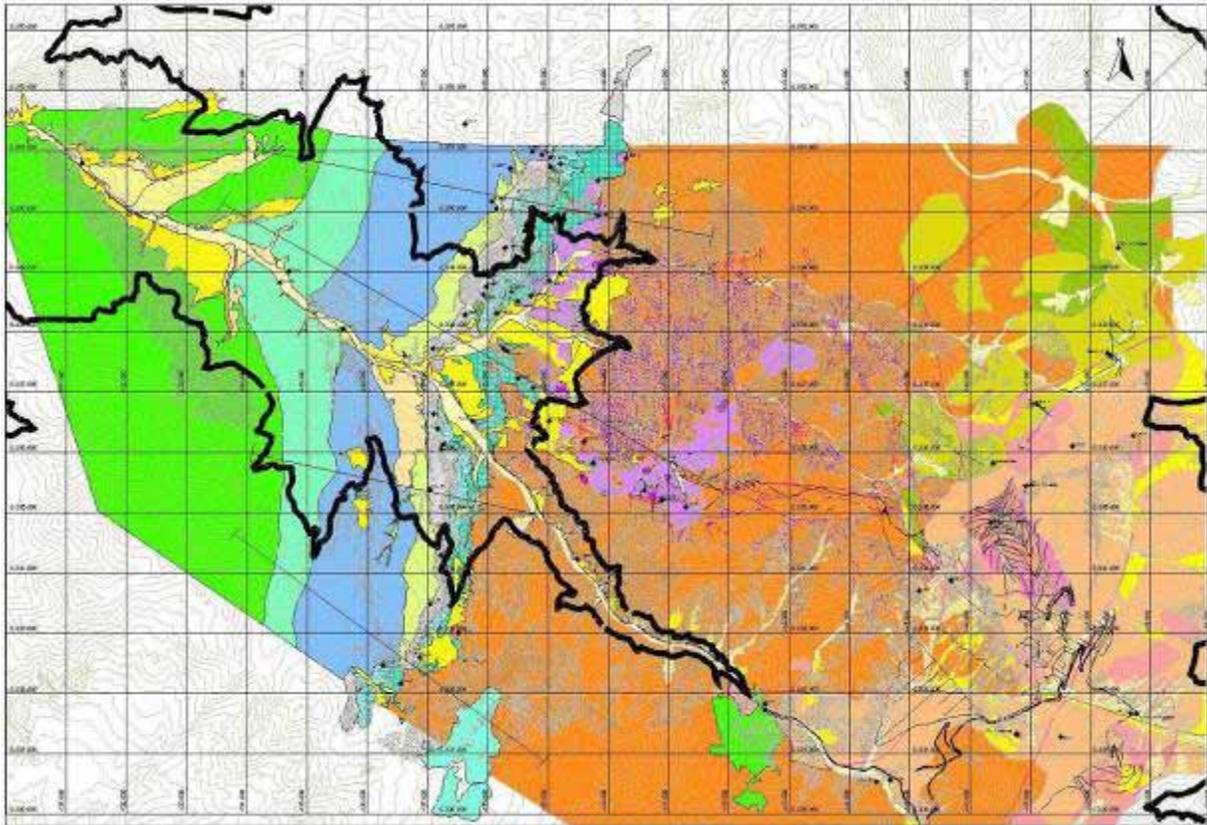


Figura N° 5.1. Esquema geológico y topográfico del proyecto Caserones materializando las curvas topográficas correspondientes a las alturas (3000 y 4800) estimadas más probables para la ubicación diaria de la isoterma 0°C.

5.4 PALEOCLIMA

La evolución del clima en el pasado es importante para la estimación de los Riesgos Geológicos en el área del proyecto. En efecto, muchos de las remociones en masa observadas en el área del proyecto podrían ser el legado de climas pasados más húmedos y templados que las condiciones actuales. Las estimaciones de frecuencia de ocurrencia de los eventos reconocidos deben ser ajustadas para reflejar las variaciones en el tiempo de las condiciones climáticas. Del mismo modo, para aquellas instalaciones de larga duración, las alteraciones climáticas de rango milenario deben ser consideradas para la evaluación de futuros eventos de remociones en masa.

La observación del relieve a nivel regional indica que en el pasado geológico reciente existieron períodos de mayor humedad que el actual y que esas condiciones climáticas favorecieron el desarrollo de glaciares en el área oriental del proyecto y los fenómenos de remoción en masa observados en las desembocaduras de las quebradas Caserones y La Brea al río Ramadillas.

De acuerdo con Maldonado y Rozas (2008)(Ref. 8), las condiciones de aridez-humedad, relativas al clima actual, han ido variando en el Norte de Chile en ciclos milenarios los que han conducido a la situación climática presente. Es más, Grosjean et al. (1998) (Ref. 4) afirman que condiciones mucho más húmedas que las actuales habrían existido en la zona cordillerana de Copiapó-Vallenar hacia los 3000 a 1800 años desde el presente (1000 años A.C. hasta 200 D.C.) y que un avance glacial importante habría tenido lugar unos 2600 años atrás.

Los estudios de paleobotánica (Latorre et al., 2003) (Ref. 7) sugieren que las precipitaciones en el Norte de Chile, hacia los 4000 a 2000 años atrás eran aproximadamente el doble que las observadas hoy día.

Estos trabajos confirman lo indicado más arriba en cuanto a que condiciones más húmedas entre 10000 y 2000 años atrás favorecieron la ocurrencia de importantes remociones en masa eventos que hoy día no podrían tener lugar bajo las condiciones climáticas actuales.

5.5 CALENTAMIENTO GLOBAL

Los antecedentes aquí discutidos se basan en los resultados del estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI encargado por CONAMA al departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (Ref.1). En este estudio se considera el análisis del clima observado durante la parte final del siglo XX y su proyección hacia fines del presente siglo teniendo en cuenta las actuales tasa de emisiones antrópicas a la atmósfera.

Se estudiaron dos escenarios posibles, uno con emisiones moderadas (B2) y otro con emisiones altas (A2), para los períodos de 2011-2030 y 2046-2065.

Como es de esperar, en ambos escenarios dominan los cambios positivos (calentamiento) en todas las regiones, siendo mayores para el escenario más extremo A2. El cambio de temperatura media del escenario A2 respecto al clima actual sobre Chile continental varía entre 2° y 4°C, siendo más acentuado hacia las regiones andinas y disminuyendo de norte a sur. Sólo en la Región Austral bajo el escenario B2 hay sectores pequeños con calentamiento menor a 1°C. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano excediendo los 5°C en algunos sectores altos de la Cordillera de los Andes particularmente en verano.

En el Norte Chico el incremento de las precipitaciones extiende su dominio bajo el escenario B2 abarcando toda la faja del territorio chileno entre los 20 y 33°S en otoño, pero en invierno afecta solo a la región andina con mayor incremento (15%) en la mitad norte.

Hay dos aspectos que destacan: uno derivado del cambio en temperaturas y otro de los cambios en precipitación. El primero tiene que ver con la reducción del área andina capaz de almacenar nieve. Considerando que la isoterma de 0°C se eleva por el proceso de calentamiento, las crecidas invernales de los ríos con cabecera andina se verán incrementadas por el consiguiente aumento de las cuencas aportantes y la reserva nival de agua se verá disminuida.

5.6 CONCLUSIONES SOBRE EL FACTOR CLIMÁTICO

Respecto de los riesgos geológicos para el área del Proyecto los antecedentes climáticos, confirman la observación de que los eventos de remociones en masa más importantes observados en el área ocurrieron en un pasado con un clima mucho más húmedo - el doble que el actual, Maldonado y Rozas (2008)(Ref. 8) y Latorre et al. (2003) (Ref. 7) - condiciones que se fueron degradando paulatinamente hasta la situación actual. Por otra parte las predicciones de la evolución del clima para el resto del siglo XXI, de acuerdo a los pronósticos más creíbles, en un escenario de cambio extremo muestran que las condiciones de pluviometría serían afectadas hasta en un 15% (aumento/disminución) en cantidad para la unidad climática en que se enmarca el área del proyecto y aún cuando se produzca un alzamiento de la isoterma 0°C a nivel local, los volúmenes de precipitaciones no llegarán a ser comparables con los que contribuyeron a producir las corrientes de barro y/o crecidas aluvionales observadas en las quebradas Caserones y La Brea.

6 EVENTOS GEOLÓGICOS OCURRIDOS EN SITIOS DEL PROYECTO

En este capítulo se describen y se caracterizan los eventos que han sido reconocidos y que podrían afectar la infraestructura del proyecto.

Los eventos geológicos reconocidos abarcan la gama total de eventos geológicos que pueden constituir Riesgos Geológicos en el área del Proyecto y han sido determinados sobre la base de los trabajos anteriores realizados por **ARCADIS** para el proyecto (Tabla 1). Los datos obtenidos en terreno en estos informes son considerados relevantes para evaluar los riesgos geológicos.

Los eventos geológicos identificados en este informe y trabajos anteriores corresponden los observados en varias visitas a terreno durante 2008 y parte de 2009 realizadas por los autores y otros profesionales de **ARCADIS**.

En el **Anexo 1** se presenta una reducción del mapa de Eventos y Riesgos Geológicos (Plano IBGG-PLA-000-GO-004) asociados al área del proyecto Caserones.

6.1 CAMINO RAMADILLAS

6.1.1 Contexto Geológico y Geomorfológico

En su progresión hacia el NW, el río Ramadillas corta, aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Brea, formaciones mesozoicas. Sin embargo, en sus inicios, en la confluencia con la quebrada Caserones, el río escurre en rocas intrusivas paleozoicas hasta alcanzar la intersección con la quebrada citada en primer término.

A 1.750 m aguas abajo del cruce con la quebrada Caserones, en la ladera SW del valle, se disponen retazos de capas de rocas volcánicas de la formación Quebrada Seca (Kqs), asignada al Cretácico, que cubren una reducida superficie del macizo intrusivo.

Hacia el NW, aguas abajo de su confluencia con la quebrada La Brea, el río ha elaborado su cauce, en rocas sedimentarias y volcánicas de la Formación Lagunillas (Jl) e inmediatamente aguas abajo del Campamento de Construcción, en las volcanitas de la Formación Quebrada Seca (Kqs).

El valle del río Ramadillas ha estado, aparentemente, ajeno a la acción de la erosión glacial del Pleistoceno, aun cuando el tramo estudiado se inicia a una cota superior a los tres mil metros, altura a la cual es frecuente encontrar rasgos de ese tipo de modelado, tal como ocurre, por ejemplo, al interior de la cuenca de la quebrada Caserones.

Es probable que la erosión periglacial actuando desde fines del Pleistoceno hasta hoy y, especialmente, un cambio climático hacia condiciones más húmedas que las actuales, haya permitido la reactivación de la erosión fluvial y pluvial, dándole al valle el modelado que exhibe en la actualidad y borrando las evidencias de la morfología glacial previa.

En el área del proyecto sólo se conservan rasgos del modelado glacial en el sector delimitado por la divisoria de agua que pasa por el Cerro Chico de Caserones (4.175 m.s.n.m.) y remata en el río Ramadillas a 3.594 m.s.n.m; el curso del río por el SW hasta su confluencia con la quebrada de la Olla y la línea fronteriza, al oriente. Es al interior de este espacio geográfico donde abundan los circos glaciares de grandes dimensiones y que albergaron en el pasado, sobre todo, glaciares de circo y glaciares de ladera.

El río Ramadillas es un curso de agua de régimen permanente; tiene una longitud cercana a los 23 km, entre la quebrada Caserones, al SE, y el río Pulido al NW, siendo su orientación general SE-NW. El gradiente hidráulico entre los dos extremos señalados es de 2,6° (4,5%); entre Caserones y el cruce con la quebrada La Brea es de 3° (5,3%), y entre esta última y el río Pulido es 2,2° (3,8%).

El río posee numerosas quebradas afluentes. Por el NE se cuenta la quebrada Caserones, la quebrada Chorrillos, quebrada La Brea y la quebrada Los Cachiyuyos. En este sector existen otras ocho a diez quebradas afluentes de más de 2 km de longitud. Por el SW en cambio, sólo existe la quebrada Las Lletas y unas diez quebradas sin nombre de más de 2 km de largo.

El conjunto formado por el curso de agua troncal y sus afluentes, conforman una red hidrográfica de tipo dendrítico.

La amplitud del relieve varía a lo largo del curso del río Ramadillas; en las cercanías de la quebrada Caserones la amplitud es alta, superior a 1.500 m; entre la quebrada Caserones y la quebrada La Brea ésta es de 750 m, es decir, media. Algo aguas abajo de la quebrada La Brea la amplitud del relieve vuelve a subir a 1.150 m; desciende a un valor medio (780 m) bajo el Cerro Ramadillas, a media distancia de la confluencia del río Pulido y, finalmente al llegar al kilómetro 0, conserva una amplitud de relieve de valor medio (895 m).

6.1.2 Riesgos Geológicos

El riesgo geológico más importante para el camino proyectado es la posibilidad de ocurrencia de crecidas aluvionales en el valle del río Ramadillas. Existe no obstante una diferencia en cuanto a la vulnerabilidad de la obra según el tramo del río que se considere. En el curso superior del río, entre la quebrada Caserones y la quebrada La Brea, el trazado del camino proyectado no posee suficiente espacio para su plataforma debido a la cercanía al cauce del río y al encajonamiento del valle, quedando prácticamente al mismo nivel del lecho. Aguas abajo del cruce con la quebrada La Brea, el camino tiene la posibilidad, casi permanente, de situarse sobre el lecho del río y disminuir de este modo su grado de vulnerabilidad.

La crecida aluvional de carácter torrencial (por crecida aluvional se entiende una crecida excepcional con un contenido de sólidos mucho más alto que el de una crecida normal) constituye el riesgo geológico principal: se trata de un riesgo declarado, de carácter esporádico, de alta importancia relativa y de baja a moderada probabilidad de recurrencia. Las consecuencias de la recurrencia de este riesgo serían graves para las personas y para la vía, ya que ésta podría ser destruida por la crecida aluvional. Este riesgo se controla construyendo el camino de acceso considerando una diferencia de cota de al menos 5 m sobre el fondo del valle o con medidas operacionales de tránsito y/o alerta temprana si es que no fuera posible respetar la cota sugerida.

Existe un riesgo geológico permanente que consiste en el derrame de detritos en las laderas por cuya base pasará el camino; es un riesgo de débil importancia relativa, semipermanente y de consecuencias menores para la obra, las cuales se traducirían en obstrucciones parciales del camino. La movilización de los detritos coluviales de las laderas se efectúa por gravedad y, en los sectores altos, por la acción del hielo intersticial. Las lluvias ocasionales, torrenciales en las zonas áridas, movilizan las partículas del suelo dando origen a flujos de detritos; de ahí que no sea recomendable emplazar una obra en medio de una quebrada aunque esta sea una quebrada actualmente seca y no funcional. El control de este riesgo se ejercerá de acuerdo con las medidas de mitigación o control que surgirán del comportamiento del riesgo durante los primeros años de utilización del camino.

6.2 SECTOR CAMPAMENTOS

6.2.1 Campamento de operaciones

6.2.1.1 Contexto Geológico y Geomorfológico

El sitio de ubicación original del Campamento de Operaciones se encuentra en la vertiente sur occidental del valle del río Ramadillas, a la altura del kilómetro 9 del camino de acceso, en la base misma de la ladera. En altura, el sitio se dispone entre las cotas 2.450 y 2.500 m.s.n.m.

Según el mapa geológico regional de escala 1/20.000 preparado por **ARCADIS**, el sitio del campamento está constituido por rocas estratificadas de la formación Quebrada Seca (Kqs) atribuida al Cretácico Superior. Es necesario consignar no obstante, que el sitio está cubierto principalmente por depósitos coluviales, observándose sólo puntualmente algunos modestos afloramientos.

Un kilómetro aguas abajo de este punto, en la misma ladera, es posible observar las lavas, tobas, brechas y conglomerados de la formación Quebrada Seca que mantean suavemente hacia el sur oeste.

Tal como se expresara anteriormente, el sitio destinado a la construcción del Campamento de Operaciones para el Proyecto Caserones, se encuentra en la base de la ladera sur oeste del valle del río Ramadillas, ladera relativamente rectilínea cuya pendiente general es de 18°, aproximadamente.

La ladera es surcada por dos quebradas que descienden del SSW y confluyen a la cota 2.600 m.s.n.m. aproximadamente, para formar un solo cauce que se abre en abanico sobre el campamento. Estas quebradas tienen una expresión geomorfológica evidente y es posible identificarlas en la cartografía disponible.

Se trata de quebradas actualmente secas, de régimen esporádico, generalmente torrencial, tal como ocurre en las regiones áridas, limitadas a un cauce estrecho. La pendiente longitudinal de la quebrada principal es algo inferior a 13°. Cerca de la base de la ladera se agrega una corta quebradilla de no más de 700 m de longitud, que ha aportado detritos fluvio-torrenciales al sistema.

La amplitud del cauce principal en las cercanías de la cota 2.700 m.s.n.m. es del orden de 60-70 m. Las quebradas descritas no presentan un relleno detrítico evidente debido, probablemente, al hecho que no son funcionales desde hace un período de tiempo relativamente considerable, y porque existe un desarrollo incipiente de vegetación que tiende a fijar el suelo con sus raíces.

El material detrítico susceptible de ser movilizado se encuentra en una especie de cono de escombros de talud/cono de deyección que se extiende lateralmente entre las dos quebradas, formando un interfluvio detrítico originado sin duda, por derrames y desbordamientos torrenciales post-holocénicos de ambos cursos de agua. El sitio del proyecto está ubicado en medio de esta unidad geomorfológica.

Es posible caracterizar el modelado de la vertiente sur occidental del valle del río Ramadillas, como una superficie de pendiente moderada en la cual se destaca el derrame de detritos periglaciares hacia la base del talud. No está ausente de los procesos morfogenéticos de las laderas la caída esporádica de rocas, fenómeno de remoción en masa que localmente puede alcanzar grandes proporciones.

6.2.1.2 Riesgos Geológicos

En el sitio del Campamento de Operaciones del Proyecto Caserones se ha identificado un flujo torrencial de detritos que es un riesgo geológico declarado, intermitente, de importancia moderada y baja probabilidad de ocurrencia.

Las evidencias físicas de este riesgo son los detritos coluvio-torrenciales que cubren la ladera entre las dos quebradas descritas; estos materiales fueron derramados por las quebradas en períodos de lluvias torrenciales, abundantes y breves, en el pasado reciente. Aun cuando en la actualidad las quebradas no son funcionales, existe una probabilidad débil, sin duda, que permite pensar en una recurrencia del fenómeno, el que tendría catastróficas consecuencias para las infraestructuras que allí se construyan por el hecho de que existe una gran disponibilidad de detritos coluviales susceptibles de ser movilizados y encauzados por las quebradas hacia el sitio, por lo tanto parece adecuado revisar la ubicación del campamento de operaciones.

6.2.2 Campamento de Construcción

6.2.2.1 Contexto Geológico y Geomorfológico

El sitio de ubicación original del Campamento de Construcciones del Proyecto Caserones se ubica a la altura del kilómetro 7,5 del camino de acceso a la mina, en la orilla nororiental del valle del río Ramadillas. El acceso se efectúa por un camino de tierra que se desprende del camino principal que, cruzando el río, llega a la parte baja del sitio, a los 2.400 m.

En el mapa geológico escala 1/ 20.000 elaborado por **ARCADIS Geotécnica**, el sitio del Campamento de Construcción está inserto en rocas estratificadas de la Formación Quebrada Seca (Cretácico Superior) constituida por alternancias de lavas principalmente andesíticas, tobas, brechas y conglomerados. La disposición estructural de las capas es subhorizontal, coronando la ladera NNE del sitio (Fotografía N° 6.1).

El sitio del proyecto tiene forma irregular o casi ovalada en planta, cuyo eje principal tiene un largo de algo más de un kilómetro y orientado en dirección noroeste, paralelo al curso del río Ramadillas. Su superficie es irregular, con montículos de distribución aleatoria, dejando escasos espacios relativamente planos (**Fotografía N° 3.6**).

Un perfil topográfico imaginario dispuesto en dirección noreste, indica que la pendiente natural es rectilínea-cóncava, con una sección superior relativamente rectilínea, de 11 a 12° de inclinación, descendiendo progresivamente a 9° y a menos de 2° en la sección basal cóncava.



Fotografía N° 6.1. Rocas estratificadas de la Formación Quebrada Seca formando el coronamiento de la ladera del sitio, los bancos pardo-rojizos son conglomerados.

La sección rectilínea de la ladera está materializada por los depósitos coluviales los que adoptan una pendiente continua de unos 7°.

La disposición semicircular de la ladera del sitio, sugeriría la presencia de un circo glaciar muy degradado o la cicatriz de un deslizamiento; por otra parte, el relieve irregular de la base de la ladera en el sitio del campamento, correspondería a depósitos detríticos no consolidados producidos por antiguos fenómenos de remoción masa, y no a la roca fundamental de disposición subhorizontal, tal como ha quedado establecido precedentemente o como se observa en la ribera sur poniente del valle del río Ramadillas (**Fotografía N° 3.6**).

Sobre esta superficie irregular se han acumulado bloques rocosos heterométricos provenientes de derrumbes y caída de rocas desde la cornisa rocosa del talud, dando origen al riesgo geológico principal del sitio, que se describirá a continuación.

La Fotografía N° 6.1 muestra la alternancia de conglomerados y lavas andesíticas grises muy “heladizas”, es decir, más fácilmente degradadas por la gelivación o crioclastismo. Este fenómeno reduce la roca a fragmentos (“gelifractos”) que constituyen los depósitos coluviales periglaciares grises del talud, al mismo tiempo permite la caída de los bloques fracturados, al quitarle la base de apoyo. Es un proceso geomorfológico que se ha continuado en el tiempo con mayor o menor intensidad y que es, actualmente activo. En otros términos, es un proceso de carácter intermitente

6.2.2.2 Riesgos Geológicos

En el sitio destinado a la instalación del Campamento de Construcción (Fotografía N° 6.1) del proyecto Caserones se ha identificado un riesgo geológico declarado, de moderada a alta importancia relativa y de débil a moderada probabilidad de recurrencia. Se trata de caída de rocas y derrumbe rocosa (Fotografía N° 6.2)

El material fuente son las rocas volcánicas y sedimentarias de la formación Quebrada Seca que por su fracturamiento y meteorización proporcionan detritos y bloques rocosos heterométricos que cubren casi la mitad del área disponible. Los volúmenes más importantes se encuentran en los sectores topográficamente deprimidos y cercanos a la ladera, aunque la velocidad de caída de algunos bloques ha permitido que hayan remontado pendientes, sobrepasándolas.

El color pardo rojizo de los materiales rocosos acumulados identifica, generalmente, a conglomerados (Fotografía N° 6.3). Las rocas grises suelen corresponder a lavas andesíticas, meteorizadas y muy fracturadas.

El grado de fracturamiento y de meteorización, la gelivación de las rocas, aún activa en la actualidad, favorecen la inestabilidad del macizo rocoso y la caída de bloques.

La extensión superficial de la caída de rocas, la disponibilidad de materiales rocosos, y la existencia de pendientes favorables apuntan a la conveniencia de revisar el sitio para la instalación del Campamento de Construcción del proyecto Caserones.

La evaluación de la recurrencia del fenómeno de remoción en masa en el contexto de una evolución geomorfológica cuyos eventos no pueden ser datados de manera absoluta, limita la evaluación antedicha a un mero análisis cualitativo, riguroso sin duda, pero no cuantificable. Por lo tanto, parece aconsejable estudiar y analizar otras alternativas de ubicación para el campamento de construcción.



Fotografía N° 6.2. Vista de las rocas de la Formación Quebrada Seca en la parte superior de la ladera, del talud coluvial y del material detrítico de los derrumbes y caída de rocas acumulados en la base deprimida de la ladera.



Fotografía N° 6.3. Bloques rocosos de tamaños métricos corresponden esencialmente a conglomerados como el que muestra la foto.

6.3 ACOPIO DE ARENAS

6.3.1 Contexto Geológico y Geomorfológico

El sitio destinado a la instalación del Acopio de Arena se encuentra en la curva que desarrolla la quebrada Caserones luego de su confluencia con la quebrada Angélica, y aguas arriba de la confluencia con el río Ramadillas.

De acuerdo con el mapa geológico elaborado por **ARCADIS**, la quebrada Angélica y su continuación en la quebrada Caserones, marcaría un contacto entre dos intrusivos de litologías diferentes. El borde sur y sur oriente de la quebrada Angélica se encuentra en terrenos intrusivos paleozoicos constituidos por monzogranitos leucocráticos y granodioritas (Pzmg) de color gris claro; la vertiente norte, a lo largo de una distancia del orden de 2 km a partir de la confluencia Angélica/ Caserones, está constituida por granitos rojos y sienogranitos paleozoicos (Pzsg); luego retoma la unidad de monzogranitos.

Una probable falla de rumbo E-W (extensión de la Falla Cocambico), aproximadamente, estaría controlando el trazado del sistema Angélica/Caserones más que el contacto entre los intrusivos, toda vez que los granitos rojos sólo forman el núcleo del macizo montañoso situado al interior de la curva de las quebradas anteriormente citadas.

Los depósitos cuaternarios no consolidados tienen una amplia distribución en el área; los depósitos coluviales periglaciales son los más importantes y cubren profusamente las laderas. En el curso superior de la quebrada Angélica, ésta dispuso, en el pasado reciente, de un importante relleno fluvio-torrencial del que se conservan algunos pináculos que se yerguen en los costados del cauce de la quebrada. Estos materiales han sido erosionados por la quebrada misma y por la erosión pluvial, concentrada y difusa.

El sector de confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas, corresponde a un antiguo flujo de barro que empujó el cauce del río Ramadillas hacia el sur y contra la vertiente sur occidental del valle. Se conserva hasta hoy un retazo del flujo de barro ubicado en el borde sur este del cono de deyección, formando una acumulación de unos 3-4 m de altura, de superficie relativamente plana, constituido por un depósito matriz soportado dentro del cual se observan algunos clastos decimétricos, generalmente angulosos.

En este sector se puede observar un tambo que fue construido al menos unos 400 años atrás por aborígenes y que constituye patrimonio arqueológico. Es interesante destacar que el tambo ha sido construido sobre el cono del flujo de barro antiguo y que su estado de conservación indica que no ha sido afectado por posteriores eventos de remoción en masa (Fotografía N° 3.9).

El sitio destinado al emplazamiento del Acopio de Arena se encuentra en la curva que describe la quebrada Caserones, anteriormente descrita, en un valle generalmente angosto, rodeado por altas cumbres. La amplitud del relieve, es decir, la diferencia entre las cotas más bajas y las más altas, es del orden de 850 -1.000 m, medida entre la quebrada Angélica y la cumbre del macizo montañoso situado al sur, lo que representa una fuerte amplitud.

La quebrada Angélica nace de un antiguo circo glaciar¹, actualmente libre de hielo, de unos 2,4 km de amplitud en dirección meridiana. Su eje, materializado por la misma quebrada, tiene una dirección general WNW (N 80° W), aproximadamente.

La pendiente longitudinal de la quebrada entre sus nacientes y la confluencia con la quebrada Caserones es de 16°; por su parte, la pendiente longitudinal de la última quebrada nombrada hasta la confluencia con el río Ramadillas, es de sólo 10°. La pendiente longitudinal promedio del sistema Angélica/Caserones es de 14°.

La fuerte pendiente longitudinal de la quebrada Angélica se ha manifestado en el transcurso del tiempo por la intensa erosión de sus depósitos fluvio-torrenciales, y por la erosión y socavamiento del cono de deyección de la quebrada Caserones en su confluencia. El socavamiento también es visible en la curva del Acopio de Arena, en la base de los depósitos coluviales de la ladera norponiente.

Las pendientes de la ladera sur, sur oriente y oriente de las quebradas mencionadas hasta aquí, varían entre un máximo de 32° en las nacientes de la quebrada Angélica; 22° al sur de la confluencia con la quebrada Caserones y, 23° en dirección este, en las cercanías de la confluencia con el río Ramadillas. Por el norte las pendientes son, en general, ligeramente más abruptas: 26° en las nacientes de la quebrada Angélica; 28° aguas abajo de la confluencia Angélica/ Caserones, bajando a 23° antes de girar la curva. Aumenta a 31 y 32° en la curva misma e incluso, hasta 33° en la ladera occidental, próxima a la confluencia con el río.

¹ Originalmente ocupado por un glaciar de circo, sin valle glacial.

6.3.2 Riesgos Geológicos

Se han identificado tres riesgos geológicos: a) erosión y socavamiento, importante de la quebrada Angélica/Caserones; b) flujo de barro de la quebrada Caserones y c) derrame de detritos.

El primero (a) es un riesgo declarado de carácter intermitente, de baja importancia relativa y de moderada probabilidad de recurrencia.

La incerteza de la estimación cuantitativa de la probabilidad de recurrencia del riesgo, aun cuando ésta ha sido considerada como baja, obliga en cierta forma, a adoptar medidas precautorias como sería la construcción de diques o piscinas escalonadas en la quebrada Angélica, destinados a neutralizar la energía de la quebrada y contener los detritos para evitar tener que realizar la limpieza periódica de las obras de encauzamiento del cauce.

El flujo de barro (b), ubicado en la confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas, fácilmente puede confundirse con un simple cono de deyección torrencial. Sin embargo, los restos de la corriente de barro que se observan inmediatamente aguas abajo y en el borde oriental de la quebrada, ponen en evidencia la importancia que tuvo dicho evento en el pasado. La propia quebrada se ha encargado de erosionar casi por completo el antiguo flujo de barro. Este es un riesgo geológico declarado, de carácter episódico, de moderada importancia relativa y de débil probabilidad de recurrencia y que puede ser mitigado por la construcción de los diques o piscinas arriba mencionados. Una vez que el muro de arena alcance un cierto desarrollo este riesgo se anularía

Por último, el derrame de detritos periglaciares (c), que es una constante en las laderas de gran parte de la superficie ocupada por el proyecto, es un riesgo declarado, episódico, de débil importancia relativa y de débil probabilidad de recurrencia. La caída y derrame de detritos se reproduce cada vez que, por cualquiera razón, se corta la continuidad de la ladera cubierta por estos materiales, por lo tanto, este riesgo debe ser evaluado en sus medidas de control y mitigación durante la construcción del proyecto.

6.4 DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA

6.4.1 Contexto Geológico Geomorfológico

El muro del depósito de lamas está situado sobre la quebrada La Brea, 1.600m en línea recta al NE de su confluencia con el río Ramadillas, y a una cota aproximada de 2.875 m.s.n.m.

La quebrada La Brea materializa el contacto entre un intrusivo paleozoico en el SE, y una secuencia estratigráfica volcano-sedimentaria del Jurásico. En el sector NW, correspondiente al apoyo izquierdo del muro, depósitos coluviales (Qc) cubren monzogranitos leucocráticos y granodioritas de color gris claro (Pzmg) del Paleozoico. Subiendo en cota, por el mismo lado, se encuentran areniscas jurásicas (J1a), además de una delgada capa de andesitas (J1v).

En el sector NW, correspondiente al estribo derecho, el muro se apoya en una secuencia estratificada constituida, de abajo hacia arriba, por areniscas rojas basales (J1a), conglomerados con intercalaciones de areniscas (J1c) y, por último, andesitas (J1v). La secuencia forma parte de la formación Lagunillas atribuida al Jurásico (Lias).

La secuencia jurásica presenta un rumbo general N 25-30° W y un manto de 25° SW.

Los depósitos cuaternarios no consolidados corresponden, esencialmente, a depósitos coluviales periglaciares que cubren principalmente la vertiente sur oriental del sitio.

En el área occidental del proyecto Caserones, en el sitio del depósito de lamas en la quebrada La Brea, las evidencias de la erosión glacial son inexistentes y, probablemente, fueron borradas por la acción periglacial posterior y actual, conjuntamente con el trabajo de las aguas encauzadas por la quebrada misma.

Por otra parte, las diferencias litológicas entre ambas vertientes de la quebrada La Brea, también se manifiestan en la sección transversal de ésta, ya que establecen una clara asimetría geomorfológica. Las pendientes de la vertiente sur oriental, desarrolladas sobre los intrusivos paleozoicos, son algo más tendidas que las de la vertiente opuesta. De SW a NE las pendientes varían entre 25° y 14°; en cambio, en la vertiente NW del valle, en la serie sedimentaria jurásica, las pendientes fluctúan entre 27° y 35°, claramente más abruptas, lo que favorece, en conjunto con la estratificación de las unidades sedimentarias y volcánicas, el derrumbe y/o caída de rocas, mientras que en la ladera SE sólo se darían fenómenos de reptación de bloques.

La quebrada La Brea, cuyo curso está orientado en dirección NE aproximadamente, entre el muro del depósito y su confluencia con el río Ramadillas, posee un régimen hidrográfico permanente y presenta un gradiente hidráulico del orden de 9,7°.

La amplitud topográfica del relieve en el sector del depósito de lamas es de 250-300 m, considerado geomorfológicamente como débil.

6.4.2 Riesgos Geológicos

El estudio de terreno y de las imágenes satelitales, ha permitido identificar tres tipos de riesgos geológicos en el área del depósito de lamas La Brea, los que han sido representados en el mapa de riesgos, de escala 1/10.000 (IBGG-PLA-000-GO-004) y reproducido en a escala menor en el anexo 1.



Fotografía N° 6.4. Reptación de detritos y de bloques rocosos en una ladera situada aguas abajo del muro del depósito de lamas, en la vertiente sur oriental del valle. La mayor parte de los bloques rocosos corresponden a intrusivos.

El primero de estos riesgos es la reptación de detritos y de bloques rocosos que se observa en algunos taludes de la ladera izquierda del valle (SE) (Fotografía N° 6.4). Se trata de un riesgo declarado, relativamente permanente, lento y de débil importancia relativa. La reptación de detritos y bloques es un fenómeno geomorfológico ligado al sistema de erosión morfoclimático llamado periglaciario de altura, actualmente funcional; de ahí entonces, que se considere como cuasi permanente.

Las consecuencias de este riesgo geológico sobre las personas y las obras del proyecto, revisten escasa importancia, por lo que no se recomiendan medidas de prevención y/o remediación.

En la vertiente norponiente del valle, favorecido por la existencia de la secuencia estratificada de rocas jurásicas, se han producido derrumbes de rocas, en principio, con modesto desarrollo superficial (Fotografía N° 6.5 y Fotografía N° 6.6).



Fotografía Nº 6.5. Derrumbe de bancos de areniscas rojas liásicas en la ladera norponiente del valle de la quebrada La Brea, prácticamente, sobre el eje del muro del depósito de lamas.

El riesgo de caída de rocas y derrumbes, asociado únicamente a la ladera derecha (NW) del valle, es un riesgo geológico declarado, esporádico, de moderada importancia relativa y de moderada probabilidad de recurrencia.

El fenómeno se produce por la presencia de discontinuidades tales como los planos de estratificación y las fracturas, verticales e inclinadas hacia valle, lo cual permite la generación de cuñas inestables.

Este riesgo tiene un carácter potencial en otros sectores de afloramiento de las rocas triásico-jurásicas (formaciones La Ternera y Lagunillas) a lo largo de la ladera NW.



Fotografía N° 6.6. Cono de escombros de talud con bloques rocosos provenientes de cotas superiores y de otras litologías.

La quebrada La Brea, de régimen permanente, no posee un cauce muy amplio pero sí, un lecho mayor relativamente ancho constituido, principalmente, por bloques rocosos insertos en una matriz generalmente pobre respecto de los clastos. En el sector de confluencia sin embargo, se observa la presencia de un importante cono de deyección que corresponde a un antiguo flujo de detritos, generalmente matriz soportado (Fotografía N° 6.7)

Dicho flujo es posterior a cualquier flujo o aluvión encauzado por el río Ramadillas, ya que el cauce de este último fue empujado hacia el SE por el flujo de barro y detritos de la quebrada La Brea.



Fotografía N° 6.7. Vista del flujo de detritos de la quebrada La Brea y su acción sobre el curso del río Ramadillas. En el segundo plano de la fotografía se observan los nichos de despegue de antiguos derrumbes.

El flujo de detritos de la quebrada La Brea se considerado como un riesgo geológico declarado, esporádico en el tiempo, de moderada importancia relativa y baja probabilidad de recurrencia. La probabilidad de ocurrencia es considerada baja a muy baja, por lo que no se consideran medidas de prevención.

6.5 ÁREA PLANTA Y DUMP LEACH

Las obras proyectadas se ubican en el valle y cuenca de la quebrada Caserones, aguas arriba de su confluencia con la quebrada Angélica, entre las cotas 3.900 y 4.400 m m.s.n.m. Se accede fácilmente al lugar por los caminos interiores de la mina.

6.5.1 Contexto geológico y geomorfológico

Tanto el valle como la cuenca de la quebrada Caserones se labraron en rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) – monzogranitos leucocráticos y granodioritas de color gris claro – en gran parte. En las divisorias de agua, las rocas son cubiertas por depósitos cuaternarios periglaciales.

La cuenca de la quebrada Caserones corresponde a un modelado elaborado por un glaciar de valle de modesta extensión pero con un amplio circo glaciar. Este circo es adyacente por el nororiente con el de la quebrada Angélica y por el oeste con otra serie de valles glaciares similares.

La quebrada Caserones, de régimen permanente aunque de modesto caudal, evacua las aguas y sedimentos de su amplia cuenca. Su perfil transversal es una curva catenaria que tiene un ancho cercano a los tres kilómetros; su eje de orientación casi meridiana, tiene más de 4 km de longitud.

La cuenca que se describe tiene un perfil transversal ligeramente disimétrico, con una vertiente occidental de 24° de pendiente; la vertiente oriental presenta pendientes variables entre 20°, 24° y 27°. Aguas arriba de la confluencia con la quebrada Angélica, la quebrada Caserones posee un tramo de unos 800 m de largo que es común con una cuenca glaciaria vecina hacia el poniente, debido a la desaparición del interfluvio que las separaba.

La pendiente longitudinal de la quebrada Caserones hasta su intersección con la quebrada Angélica, es inferior a 9°.

6.5.2 Riesgos geológicos

En el sitio de ubicación actual de la Planta Concentradora y Dump Leach se han identificado dos tipos de riesgos geológicos, de débil importancia relativa.

La abundancia de materiales detríticos periglaciares que cubren las laderas, hacen posible su desplazamiento gravitacional, como en el caso de los derrames de detritos periglaciares, aunque no están ausentes los fenómenos ligados al hielo intersticial o la arrollada difusa durante el deshielo primaveral. Se trata de un riesgo declarado de débil importancia relativa, intermitente y de débil probabilidad de ocurrencia.

La reptación por gelifluxión de depósitos periglaciares constituye también un riesgo geológico de débil importancia relativa, permanente, aunque muy lento. Este riesgo está asociado a la presencia de hielo intersticial en el suelo, formando especies de almohadillas o pequeños lóbulos que descienden lentamente y que provocan modestas caídas de rocas en los cortes de los caminos.

Estos dos riesgos se controlan con una adecuada vigilancia y mantenimiento operacional.

6.6 ÁREA MINAY BOTADERO

En estos dos sectores, se aprecia un relieve más suave que en los anteriores y la ausencia de geoformas que pudieran generar remociones en masa, es por esto que se considera que en estas dos áreas no existen riesgos geológicos y por lo tanto no serán tratadas mas in extenso.

7 ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS GEOLÓGICOS DEL PROYECTO

7.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se determinaron las obras del proyecto susceptibles de sufrir el impacto de un evento geológico determinado y por lo tanto sujetas a riesgo geológico.

En este capítulo se analizan dichos riesgos geológicos en la perspectiva de su estimación en cuanto a su probabilidad de ocurrencia, peligrosidad y vulnerabilidad, de acuerdo con Varnes (1984) (Ref. 9) y Corominas (1988) (Ref. 2) y presentadas más adelante, para finalmente estimar el riesgo específico y el riesgo total.

7.2 METODOLOGÍA GENERAL

Para este capítulo se consideran sólo los riesgos Geológicos asociados a los eventos geológicos descritos en el capítulo anterior y a partir de los cuales se construye una matriz en la que se evalúan y jerarquizan los eventos posibles de riesgo geológicos de acuerdo con la ocurrencia actual o pasada (histórica y/o geológica), la probabilidad de concurrencia actual y futura de los factores gatillantes, así como los volúmenes de material involucrado, con esto se estima la importancia del Riesgo Geológico.

7.3 MATRIZ DE RIESGOS GEOLÓGICOS

En esta matriz, que entrega la estimación cuantitativa de la importancia intrínseca del **Riesgo**, se considera para cada **ubicación de las obras e infraestructuras**, independientes de su ubicación el volumen o masa del evento generado, la ocurrencia del evento y la concurrencia de los factores geológicos y climáticos que pueden gatillar un evento en particular.

El **Volumen** en m^3 resulta del cálculo de la superficie afectada por el evento geológico de acuerdo con lo observado en terreno y a una estimación de los espesores del material movilizado. Para un mejor cálculo se asignan valores de coeficiente de **1 a 5** para las magnitudes de volúmenes, en donde **1** es igual a un $V < 100 m^3$, **2** es igual a $100 < V < 1.000 m^3$, **3** es igual a $1.000 < V < 10.000$, **4** es igual a $10.000 < V < 100.000$ y **5** es igual a $V > 100.000 m^3$.

La **Ocurrencia** actual, probable o pasada se traduce en una escala de **0,5** para las ocurrencias antiguas sin registros recientes (últimos 2000 años), de **1** para ocurrencias probables (futuras) y de **2** para ocurrencias actuales (últimos 5 años).

La **Concurrencia de factores** corresponde a la existencia actual o futura de los factores que inciden en la generación del evento estimada sobre la base de las condiciones climáticas actuales y respecto de las condiciones climáticas probables durante la ocurrencia del evento y la posibilidad que en el futuro se den o repitan los factores gatillantes. En este factor se considera que **no** es 0,5, **posible** es 1 y **sí** es 2.

La importancia del **Riesgo Geológico** corresponde, entonces, al producto de los parámetros indicados, para la obra afectada, los que consisten en el volumen, ocurrencia y concurrencia de factores.

La **Importancia del Riesgo Geológico** es, de acuerdo a los parámetros considerados, tomada como intrínseca para todo el proyecto e indica el grado de influencia de cada Evento en el Proyecto y de este modo permite ordenarlos en base a una categorización numérica independiente de otras consideraciones. Numéricamente sus valores mínimo y máximo corresponden a **0** y **20**, considerándose que entre 0 y 7 la importancia es **baja**, entre 7 y 14 **moderada** y entre 14 y 20 es **alta**.

La matriz resultante para obtener la importancia de cada riesgo considerado es como sigue (Tabla N° 7.1):

Tabla N° 7.1
Matriz de Importancia de los Riesgos geológicos para el área del Proyecto Caserones.

Evento Geológico	Ubicación u Obras afectadas	Volumen en m ³	Ocurrencia	Concurrencia de Factores	Importancia Riesgo Geológico
Reptación de depósitos periglac. x geliflujión	Dump Leach	1 a 10 (1)	Actual (2)	Si (2)	Baja (4)
	Planta				
Reptación de bloques rocosos	Depósito de Lamas	0.5 a 10 (1)	Actual (2)	Posible(1)	Baja (2)
Derrame de detritos periglaciares difusos	Camino	0,5 a 100 (2)	Actual (2)	Si (2)	Moderada (8)
	Planta				
	Campamentos				
Derrame de detritos periglaciares encauzado	Dump Leach,	215.000 (10)	Antiguo (0.5)	No (0.5)	Baja (2,5)
	Planta				
Caída de rocas y/o derrumbe de rocas	Campamento Construcción	180 a 300 (2)	Actual (2)	Si (2)	Moderada (8)
	Depósito de Lamas				
Flujo torrencial de detritos	Campamento de Operaciones	2.300 (3)	Antiguo (0.5)	Posible (1)	Baja (1.5)
Erosión y socavamiento	Planta	Indet. (1)	Actual (2)	Si (2).	Baja (4)
	Acopio de Arena				
	Camino				
Crecidas aluvionales	Dump Leach	60.000 (4)	Antiguo (0.5)	Posible (1)	Baja (2)
	Planta				
	Camino				
Flujos de Barro en cauces principales	Planta	5000 (3)	Antiguo (0.5)	No (0.5)	Baja (0,75)
	Acopio de Arena				

De la tabla anterior se concluye que los riesgos de mayor Importancia son Caída de Rocas y/o Derrumbes de Roca y el Derrame de Detritos Periglaciares Difusos.

Otros eventos geológicos, aunque de aspecto impresionante a primera vista, tales como la erosión y socavamiento, apreciables en la quebrada Angélica y en la parte media de la quebrada caserones, así como los flujos detríticos de las quebradas La Brea y Caserones, no constituyen riesgos de alta importancia, toda vez que son, o bien eventos de ocurrencia actual pero con un grado de impacto menor en el proyecto, caso de la erosión y/o socavamiento, o bien corresponden a fenómenos de una muy baja ocurrencia o que no tiene posibilidad de ocurrir de modo alguno bajo las condiciones climatológicas actuales, como es el caso de los flujos de detritos antes mencionados.

Como conclusión de la estimación del Riesgo Geológico para el proyecto en cuanto a la posible influencia que pueda tener para el desarrollo del proyecto, se puede decir que se debe prestar especial atención a los fenómenos de Caída y/o Derrumbes de Roca y al Derrame de Detritos Periglaciares Difusos.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones de este informe actualizado de los Riesgos geológicos del área del proyecto son las siguientes:

- Existen en el área evidencias de eventos geológicos desde hace unos 1000 años AC y que constituyen Riesgos Declarados. No se evidenció en el área del proyecto ningún tipo de Riesgo Potencial.
- Los tipos de riesgos geológicos evidenciados son todos correspondientes a fenómenos de remoción en masa cuyos factores gatillantes son principalmente la gravedad y el agua intersticial o de precipitaciones.
- Los riesgos geológicos detectados son:
 - ✓ Reptación de bloques rocosos y de depósitos periglaciares por geliflujión,
 - ✓ Derrame de detritos periglaciares difusos y encauzados
 - ✓ Caída de rocas y/o derrumbe de rocas
 - ✓ Flujos torrenciales de detritos
 - ✓ Erosión y/o socavamiento
 - ✓ Crecidas aluvionales
 - ✓ Flujos de barro y/o detríticos.
- Del análisis de la importancia, probabilidad de ocurrencia y vulnerabilidad para cada riesgo geológico se tiene que los riesgos de mayor relevancia para el proyecto son la Caída de Rocas y/o Derrumbe de rocas que pueden afectar el campamento de construcción y el Derrame de Depósitos Periglaciares.

- Otros riesgos geológicos de muy menor relevancia son las crecidas aluvionales, para las que se ha supuesto un período de retorno conservador, y los derrames periglaciares encauzados.
- Otros riesgos geológicos tales como derrames detríticos difusos y de reptación son de un orden de magnitud tal que se manejarán dentro de las operaciones de mantención de obras y caminos.
- Otros tipos de Riesgo Geológico tales como flujos de barro y/o de detritos ocurrieron en condiciones de clima y disponibilidad de material muy distintas a las actuales y por lo tanto hoy en día su probabilidad de ocurrencia es extremadamente baja.

8.2 RECOMENDACIONES

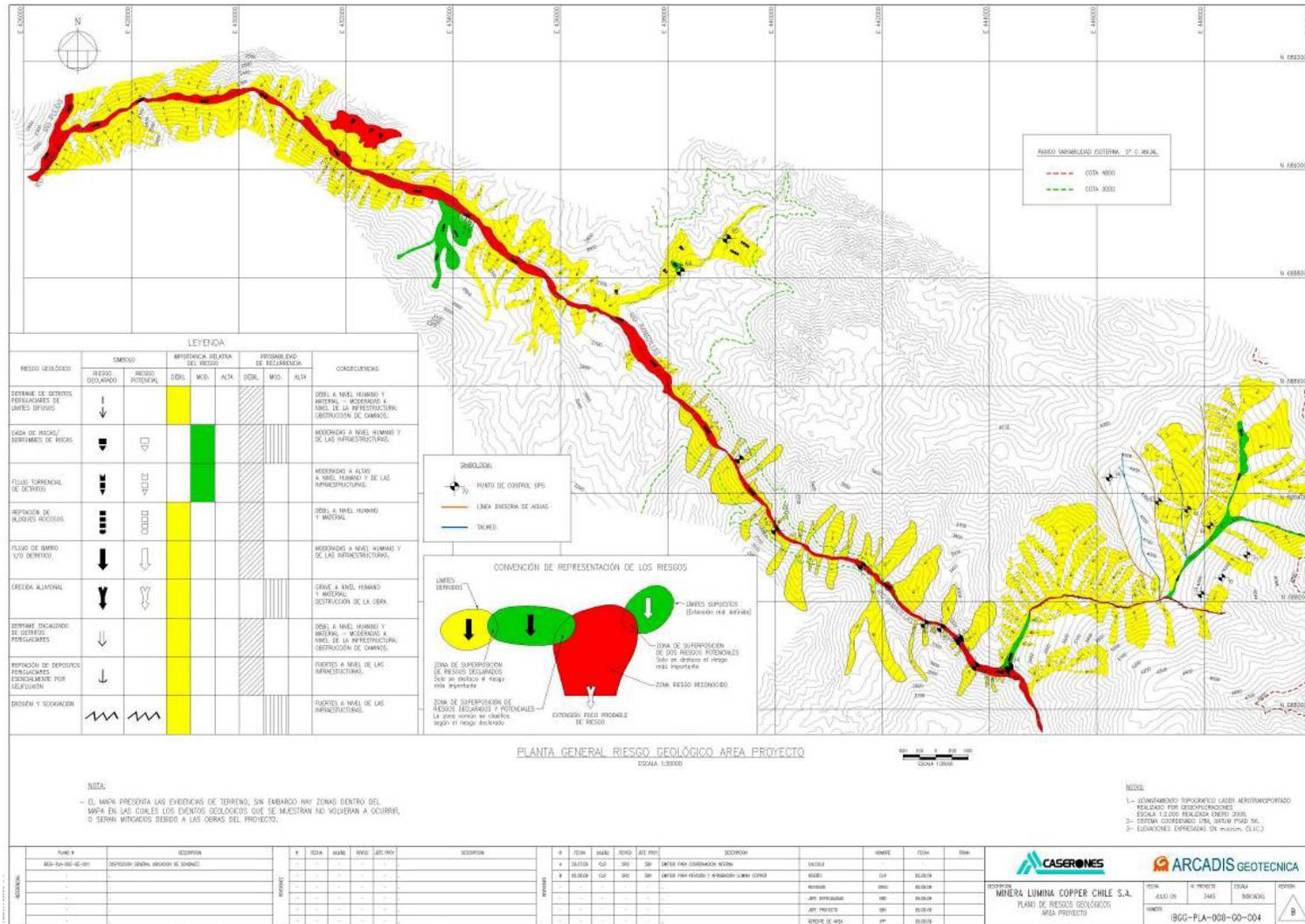
El Campamento de construcción está ubicado en un sitio en donde ocurren Caídas de Roca y posibles Derrame de Depósitos Periglaciares siendo el riesgo de ambos eventos de importancia moderada por lo que se recomienda analizar la posibilidad de ubicar una nueva instalación.

- El Campamento de Operaciones se ubica en un lugar sometido a un riesgo bajo de flujo de Detritos Periglaciares Encauzado y Difuso, de baja y moderada respectivamente, por lo tanto se recomienda estudiar su reubicación.
- El Camino de acceso principal estaría sometido a Derrame de Depósitos Periglaciares, de importancia moderada, Crecidas Aluvionales y erosión y socavamiento, ambos de baja importancia. Todos ellos son controlables con medidas de control y alerta temprana.
- El área del Dump Leach y planta estarían sometidos a riesgos de Derrame de Depósitos Periglaciares y reptación de bloques por soliflucción, de estos riesgos sólo el primero se considera de importancia moderada, mientras que el otro es de importancia baja.
- El Acopio de Arena estaría sujeto riesgos de derrames de detritos, erosión y socavamiento y a flujos de barro, de estos riesgos el derrame de detritos es considerado de alta probabilidad de ocurrencia pero de poca importancia, mientras que la erosión y socavamiento se mitigarían con piscinas o diques de retención de sólidos en la quebrada Angélica. El flujo de barro no se considera por su muy escasa probabilidad de ocurrencia durante la vida del proyecto.
- El depósito de Lamas sólo presenta riesgos de reptación de bloques en su parte oriental y caída de rocas o derrumbes en su borde occidental, la recomendación en este caso es que se deberá prestar atención a la caída de rocas durante la construcción del muro y posteriormente durante eventuales operaciones de mantenimiento.
- El área de la mina, así como el sector del Botadero (nacientes de quebrada La Brea) no presentan evidencia alguna de riesgos geológicos, ni declarados ni potenciales.

9 REFERENCIAS

1. Ayala, F.J.; Durán, J.J. y Peinado, T. (1987) Editores. Riesgos geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
2. Depto. Geofísica. U. de Chile (2006). Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI. CONAMA
3. Corominas, J. (1988). Criterios para la confección de Mapas de Peligrosidad de Movimientos de Ladera. In Riesgos Geológicos Ed. Ayala Carcedo et al. 1988. IGME.
4. Fuenzalida, H., 1965. Clima. En: Geografía Económica de Chile. Texto Refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Stgo. pp: 99-152.
5. Grosjean, M.; Geyh, M. A.; Messerl, B.; Schreier, H. & Veit, H. (1998). A Late-Holocene (<2600 BP) glacial advance in the South-Central Andes (29°S), Northern Chile. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 194:247-258.
6. Jensen, O., (1976). Memoria de título. Univ. de Chile
7. Joly, F. (1997). Glossaire de géomorphologie. Base de donnés sémiologiques pour la cartographie. ARMAND COLIN. Paris.
8. Köeppen, W. (1948). Climatología. Primera edición en español. Editorial Fondo de Cultura Económica. México. 477 pp.
9. Latorre, C.; Betancourt, J. L.; Rylander, K. A.; Quade, O. & Matthei, O. (2003). A Vegetation History from the Arid Prepuna of Northern Chile (22-23° S) over the last 13,500 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 194:223-246.
10. Maldonado, A. y E. Rozas (2008). Clima y Paleoambiente durante el Cuaternario Tardío en la Región de Atacama. (In Squeo, F.A; Arancio, G y Gutiérrez, J.R. eds.(2008) : Libro rojo de la flora nativa y sitios prioritarios para su conservación:Región de Atacama) Ed Universidad La Serena
11. SORRE, M., 1943. Les Fondements Biologiques de la Géographie Humaine. Paris: Colin.
12. Varnes, D. J. 1984. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. Natural Hazard. UNESCO

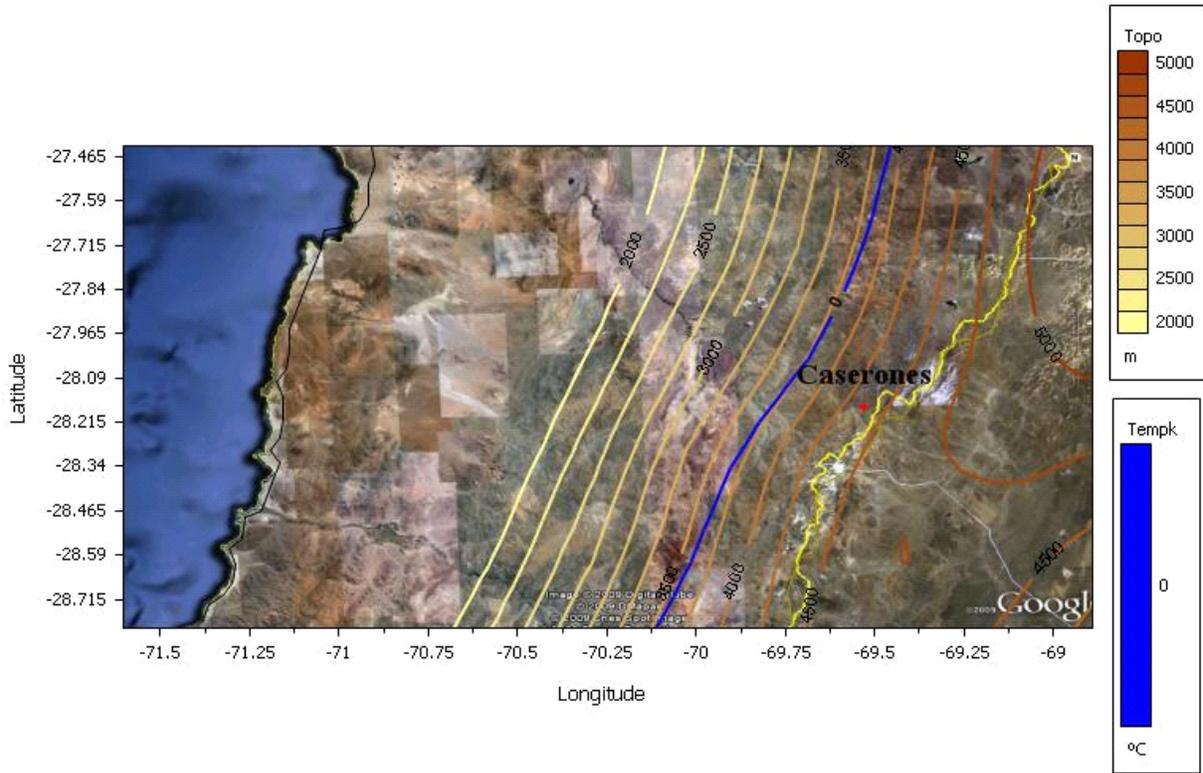
**ANEXO 1
MAPA DE RIESGO GEOLÓGICO
ACTUALIZADO**



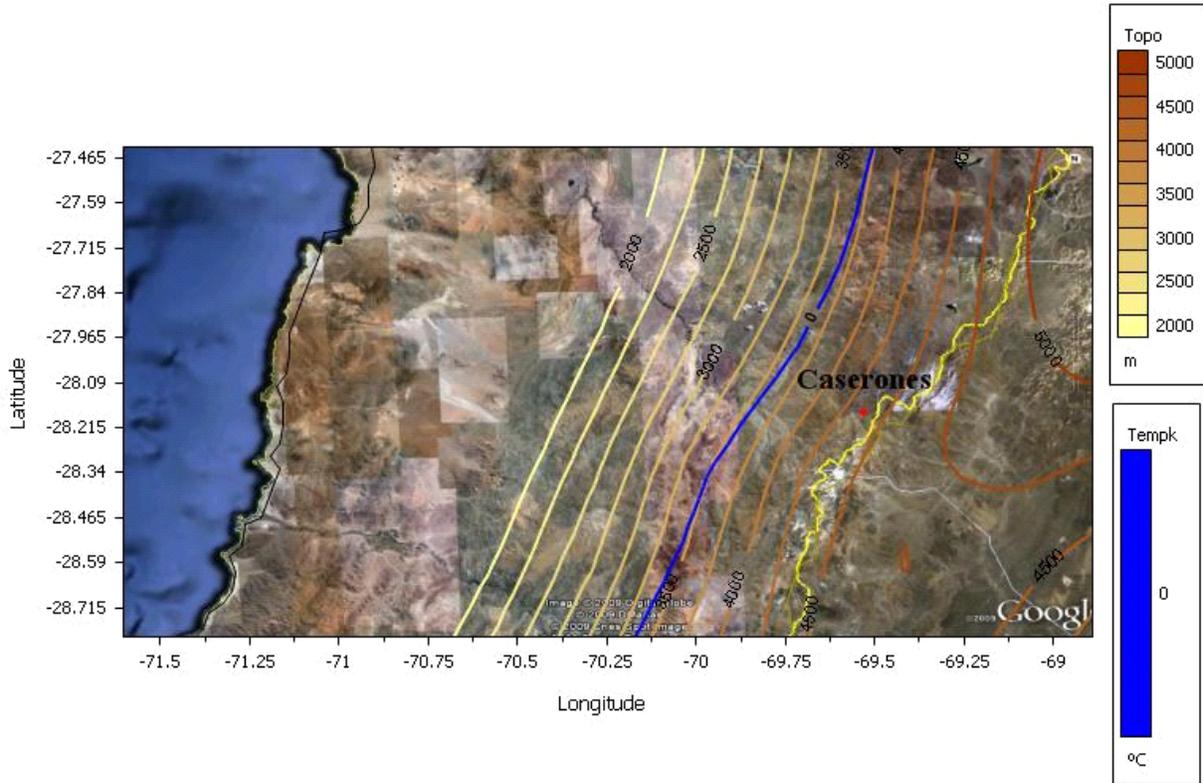
ANEXO 2
VARIACIÓN DIARIA DE LA ISOTERMA 0°C

ISOTERMA CERO ZONA PROYECTO CASERONES

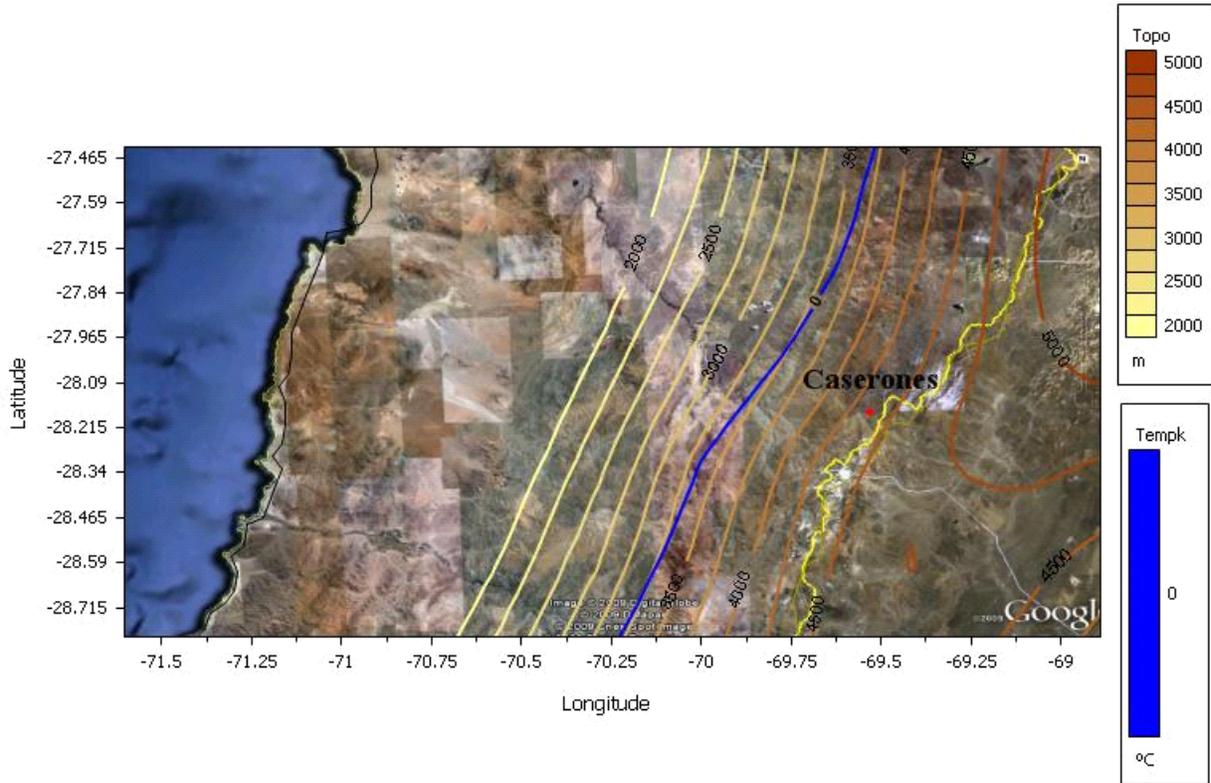
7 de Septiembre 20:00 hrs.



8 de Septiembre 02:00 hrs.



8 de Septiembre 08:00 hrs.



8 de Septiembre 20:00 hrs.

