

# ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

## INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al manuscrito final de los aspectos geológicos y de riesgos geológicos de la zona de estudio, Topater, en el marco “**Ingreso al sistema de evaluación de impacto ambiental del Plan Seccional Topater**”.

### UBICACIÓN Y ACCESO.

El área de estudio se ubica en la segunda región de Antofagasta en el contexto de la Cuenca de Calama, comprendida entre la borde occidental de la Cordillera de Domeyko, Quebrada de Guatacondo y el límite occidental de la Cordillera Oeste. Esta zona se encuentra a unos 213 km al NE de la ciudad de Antofagasta, aproximadamente entre las coordenadas 20°55’– 20°57’ latitud sur y 68°51’– 68°54’ longitud oeste (ver Fig. 1).

El acceso al área se realiza desde Antofagasta, saliendo desde la ciudad por la Ruta 26 (Salar del Carmen). Se recorren 13 km hasta empalmar con la Carretera Panamericana (Ruta 5 Norte). Se deben recorrer 98 km por esta última vía, hasta conectarse, en el cruce de Carmen Alto, con la Ruta 25 que lleva a Calama. Continuando 48 km por esta ruta se llega a la Ciudad en Cuestión desde donde se puede llegar a los distintos puntos de la Cuenca de Calama.



Fig.1. Mapa de ubicación y acceso

## MARCO GEOLÓGICO

### Introducción

En la depresión del Río Loa se han desarrollado una serie de trabajos en los cuales se ha descrito la geología de la zona, se destacan los trabajos realizados por Naranjo y Paskoff (1981) y

Marinovic y Lahsen (1984), en los cuales se realizan las primeras descripciones de las unidades geológicas presentes en el área. Posteriormente se han desarrollado un serie de trabajos en los cuales se describe, en detalle, la geología de la cuenca de Calama ( May et al., 1997, May et al., 1999; May et al., 2000; Sáez et al. 1999; salinas et al. 1991; Lira, 1991).

En la cuenca de Calama se exponen unidades geológicas de carácter sedimentarias continentales de edad Cenozoico superior, las cuales incluyen unas secuencias de gravas, areniscas, calizas, conglomerados y diatomitas, con intercalaciones de cenizas volcánicas.

Estas unidades se pueden ordenar en formaciones, dentro de las cuales se están la formación Calama, la Formación El Loa, Chiu-Chiu y Quebrada Opache.

## Estratigrafía

### Formación Calama (Mcl), Naranjo y Paskoff (1981).

a) Definición: Esta unidad fue definida por Naranjo y Paskoff (1981) como una “ potente acumulación de gravas de origen torrencial, que afloran en el cerro homónimo, ubicados inmediatamente al este de la ciudad de Calama.

b) Litología: Las rocas que forman esta unidad son conglomerados aluviales, areniscas gruesas y areniscas laminadas. Los conglomerados se disponen en capas de 0.2 a 0.6 m de espesor, son clasto soportado y tiene una matriz de arena gruesa. Las capas son generalmente masivas pero se pueden desarrollar gradación normal e imbricación. Las areniscas gruesas tienen una matriz arenosa, las capas son masivas, con una estratificación paralela o cruzada de bajo ángulo. Ocasionalmente las capas de areniscas tienen un espesor de 5 a 50 cm y lateralmente continúan por más de 100 m.

c) Límites y distribución: La Fm Calama representa los depósitos inferiores de la cuenca de Calama. Esta unidad aflora a lo largo de la cuenca desde la confluencia de los ríos san salvador y loa, hasta la quebrada de Tuina (fig 4 y fig 5). A esta unidad la sobreyacen unidades del Grupo El Loa.

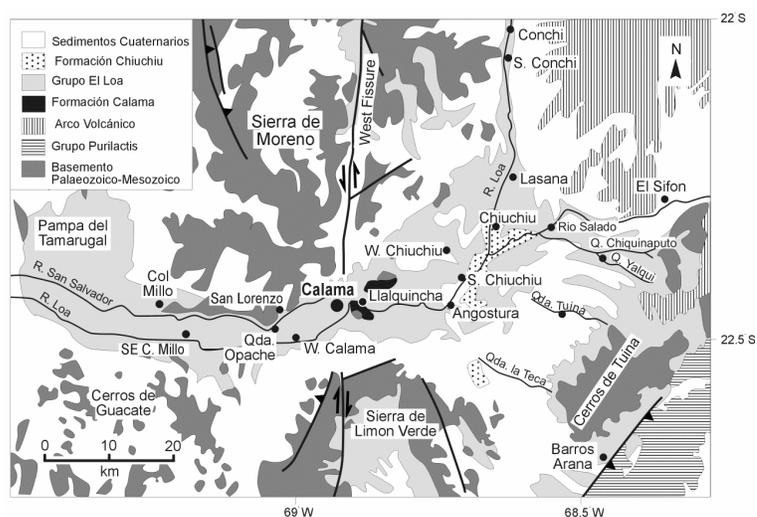


Fig.2. Mapa Geológico general de la cuenca de Calama (tomado de May et al., 1999)

d) Edad: la Formación Calama es asignada al Oligoceno-Mioceno temprano, esto en base a la las diferencias existentes con rocas del eoceno las cuales se presentan bien cementadas a diferencia de la Fm El Loa, la cual esta pobremente cementada.

### ***Grupo El Loa***

a) Definición: este nombre es asignado a un conjunto de formaciones que representan un evento de depositación a escala regional. El nombre de Grupo el Loa es dado por May, et. al (2000) a una secuencia de unidades de al menos 230 m de espesor. Este grupo reúne a las formaciones Llalquincha, Lasana, Miembro Quebrada Teca, Formación San lorenzo, Angostura, Quebrada Opache, Quebrada Chiquinaputo, y ChiuChiu. Para efectos de este trabajo serán descritas las formaciones que afloran en las cercanías de la Ciudad de Calama, estas son la formación Llalquincha, formación Chiuchiu y la Fm. Quebrada Opache.

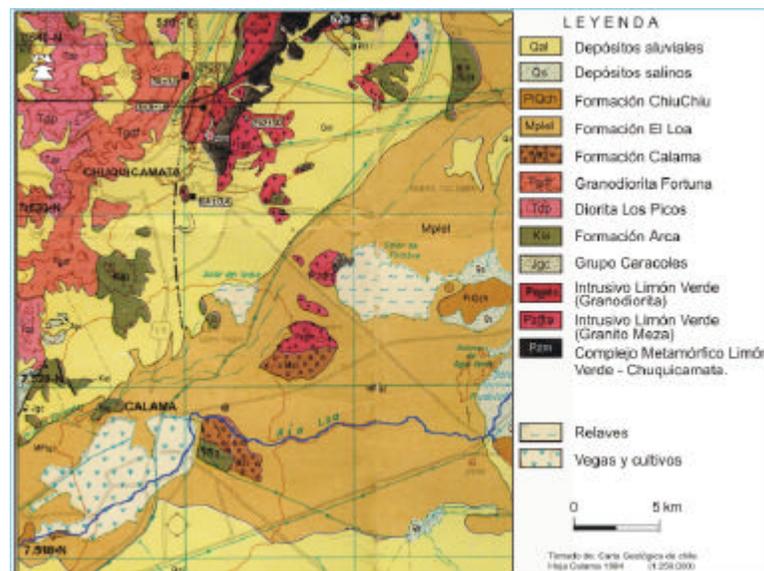
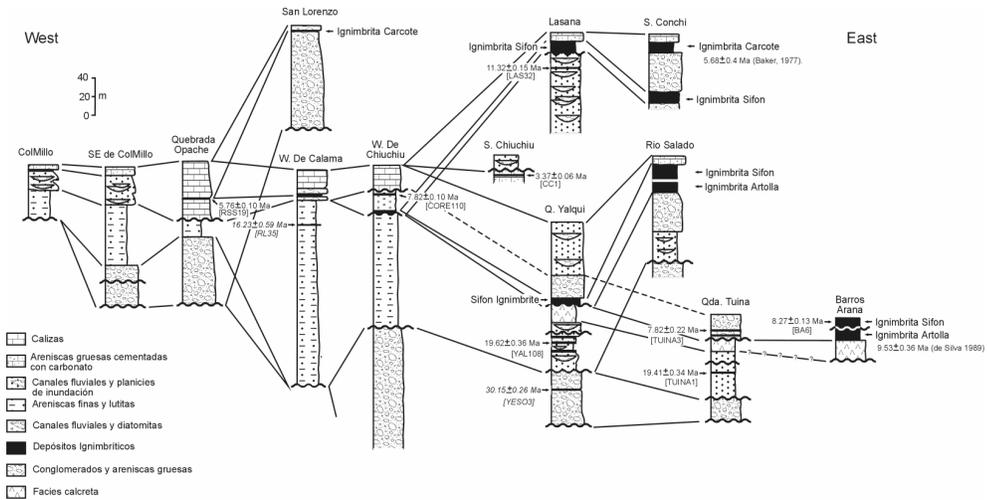


Fig.3. Mapa Geológico simplificado del área en las inmediaciones de Calama. Tomado de Marinovic y Lahsen, 1984.

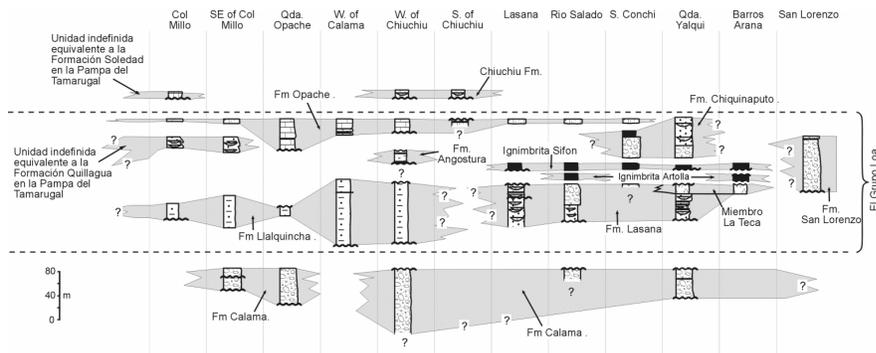
### ***Formación Llalquincha . May et al. 2000***

- a) Definición: Esta unidad toma su nombre del pueblo de Llalquincha localizada a 5 km al este de Calama
- b) Litología: Esta unidad está formada por areniscas rojas intercaladas con lutitas y evaporitas. Las capas presentan espesores de 10 a 50 cm de areniscas y lutitas. Ocasionalmente las areniscas forman canales de más de 1 m de espesor y 40 m de longitud.
- c) Límites y distribución: Esta formación se extiende desde el sur de ChiuChiu hasta las inmediaciones de la ciudad de Calama (fig 6 y7)
- d) La edad de esta formación es obtenida por dataciones de cenizas volcánicas (16.23 ± 0.59 Ma) lo que entrega una edad Mioceno inferior.



**Formación Quebrada Opache. May et al. 2000**

- a) Definición: Se define a esta unidad como la antigua parte superior de la Fm El Loa, la cual esta formada por areniscas y conglomerados carbonáticos que afloran en la Quebrada Opache , a 10 km al suroeste de Calama
- b) Litología: Esta unidad está formada por conglomerados y areniscas con cemento carbonático. La litología corresponde a conglomerados, areniscas guesas las cuales son clasto soportado con cemento de carbonato.
- c) Límites y distribución: Esta unidad se encuentra sobreyaciendo a la fm. Llalquincha , en discordancia angular, e infrayaciendo a la Fm Chichiu, también en discordancia angular (fig 7 y 8).
- d) Edad: La edad de esta unidad está basada en una datación en ceniza volcánica, entregando 5.76 ? 0.10 Ma, con lo cual es asignada al Plioceno superior.



**Formación Chiuchiu. Naranjo y Paskoff (1981).**

- a) Definición: Naranjo y Paskoff (1981) definieron a la Fm. Chiuchiu como una secuencia de limos y arcillas con intercalaciones de dolomitas y yeso, que afloran típicamente en los alrededores de del pueblo de Chiuchiu.
- b) Litología: Esta unidad se presenta formada por conglomerados intercalados con depósitos de relleno, además se presentan areniscas, diatomitas, travertino y cenizas volcánicas retrabajadas. Los depósitos de relleno alcanzan de 0.4 a 1.5 m de espesor y no son más largos de 10 m.
- c) Límites y distribución: Esta unidad representa la parte más central de la cuenca de Calama y aflora sólo en las cercanías de ChiuChiu.
- d) Edad: May et al. 2000 sugiere una edad Plioceno superior -Pleistoceno para esta unidad en base a una datación en cenizas volcánicas

**Formación Arca. Maksaev (1978)**

- a) Definición: Maksaev define esta unidad como un conjunto de rocas andesíticas y sedimentarias que afloran sobre rocas sedimentarias marinas de edad jurásica.
- b) Litología: Esta unidad está formada por andesitas porfídicas con intercalaciones de dacitas porfídicas y brechas volcánicas
- c) Límites y distribución: Esta unidad sobreyace a rocas jurásicas marinas e infrayace a la Formación Calama. La Formación Arca se distribuye en los cerros de Paqui, al oeste de Conchi y en los Cerros de San Lorenzo.
- d) Edad: La edad de esta unidad está basada en una Diorita que intruye a las andesitas. Esta diorita tiene una edad de 68 ± 2.5 Ma, con lo cual es asignada al Cretácico Inferior.

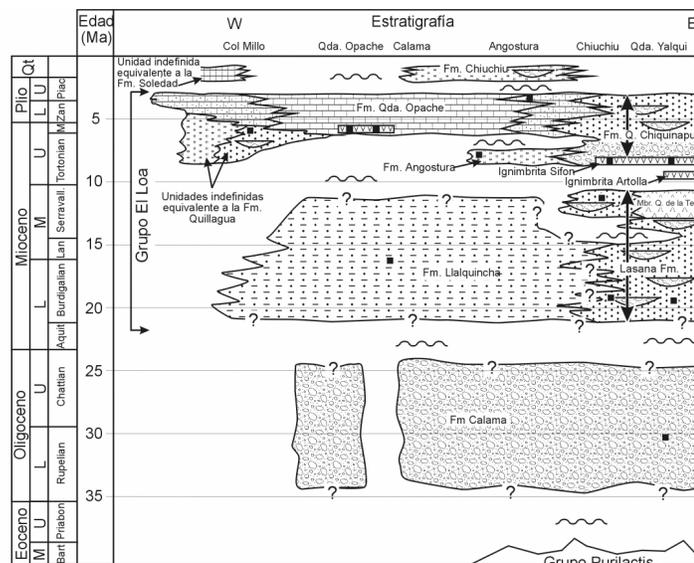


Fig.6. Correlación cronoestratigráfica de las sucesiones del Oligoceno al Reciente en la cuenca de Calama (tomado de May et al. 1999)

## GEOMORFOLOGÍA

El marco geomorfológico de la zona de estudio se encuentra ubicado en la porción oriental del Antearco de los Andes Centrales. En este contexto la zona de estudio forma parte de la llamada Cuenca Calama, la cual se reconoce como una prolongación más al Norte de la Depresión Preandina. La Cuenca Calama presenta una mayor extensión en la dirección EW que en otros segmentos de la Depresión Preandina y está conectada con la Depresión intermedia a través de la Quebrada de Guatacondo, la que interrumpe la Cordillera de Domeyko. La Cordillera de Domeyko constituye un relieve estructural, elevado con respecto de la Depresión Intermedia y la Depresión Preandina que se extiende a lo largo de toda la región. En dirección al Este, la Cuenca Calama está limitada por la Cordillera Occidental, que constituye un relieve de tipo volcánico-estructural (ver Figura).

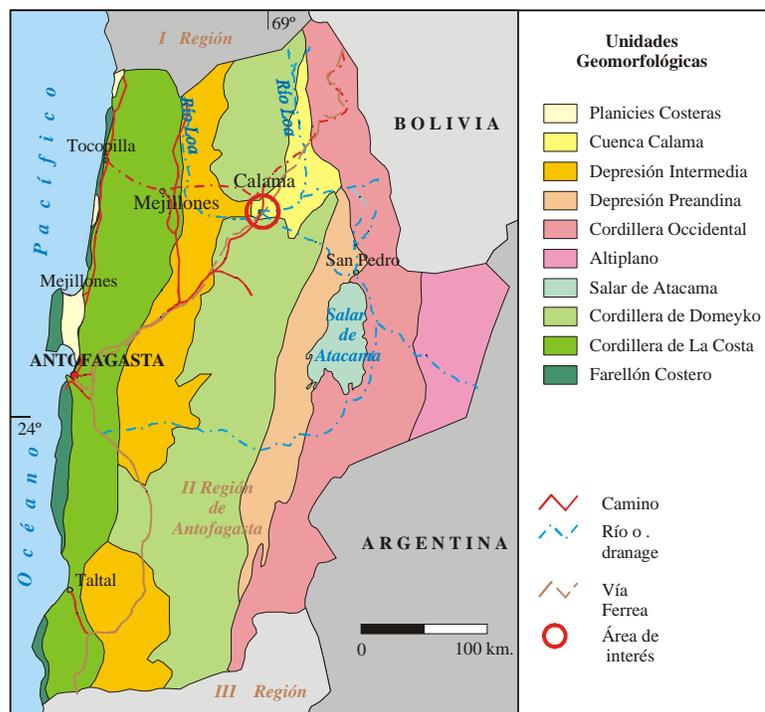


Fig.7. Mapa geomorfológico regional.(Boric,R. 1990)

La Cuenca de Calama es una altiplanicie incidida por varias ríos y quebradas; entre los más importantes: el Río Loa y Río San Salvador; la Quebrada de Opache y la Qda de Yalqui. La Cordillera de Domeyko, la cual está interrumpida por la Quebrada Guatacondo está conformada por varias serranías. En dirección al Norte de dicha quebrada se encuentra la Sierra de Moreno, que constituye una cadena de cerros con una elongación en sentido NS Al Sur de la Quebrada de Guatacondo, está la Sierra Limón verde N-S, que presenta un relieve similar al anterior (ver Figura).

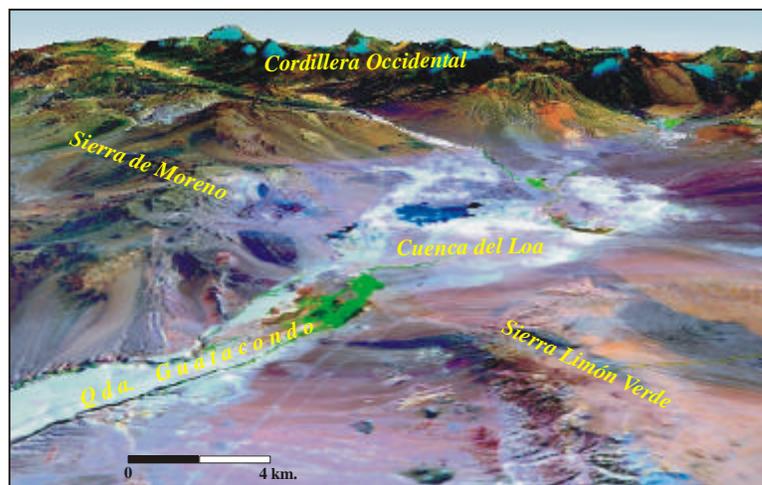


Fig.8. Vista tridimensional de la zona de la Cuenca Calama.

## ***ESTRUCTURAS***

La cuenca de Calama es una cuenca transtensional formada en el antearco andino, rellena por más de 700 metros de sedimentos. Las estructuras presentes en la cuenca se pueden agrupar a un solo sistema de falla conocido como “Sistema de Falla de la Precordillera”.

### ***Sistema de Falla Precordillera.***

Este sistema tiene su origen en el comienzo del Oligoceno (38 Ma.) cuando se registro una compresión ejercida por la subducción de la Placa de Nazca, produciendo un acortamiento en forma perpendicular a la fosa. Esta compresión origina un conjunto de fallas longitudinales de sentido dextral, de las cuales la estructura más característica es la Falla Oeste.

El sistema de falla Precordillera se extiende desde la Pampa del Tamarugal (21° Lat Sur) hasta el extremo sur de la Sierra de Varas (24° Lat Sur). En la zona de la cuenca de Calama, el sistema de falla tiene su máxima representante en la Falla Oeste (fig. 4) la cual corresponde a una estructura de rumbo norte-sur y sentido siniestral, la cual desplaza las rocas que hospedan el yacimiento de Chuquicamata.

En el sector Este de la ciudad de Calama la **Falla Oeste** no tiene representación clara en superficie, pero su traza puede ser prolongada hasta la Sierra Limón Verde ubicada al sur de la Cuenca de Calama. Este obedece a que esta falla afecta con mayor notoriedad al substrato rocoso rígido y no a la cubierta sedimentaria cenozoica. De lo anterior se puede deducir que la falla Oeste no ha tenido un desplazamiento significativo, es decir actividad reciente mensurable, por lo menos desde el Plioceno, en el área de estudio.

## ***CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS SUELOS DE FUNDACIÓN DE TOPATER.***

En el sector de Topater se realizaron perfiles geológicos del basamento y la cubierta sedimentaria que constituye el suelo de fundación del proyecto Topater.

La figura 9 resume la litología que aflora en el extremo noreste de Topater, zona en la cual se exponen 3 unidades geológicas, las que se detallan a continuación:

### **Formación Arca :**

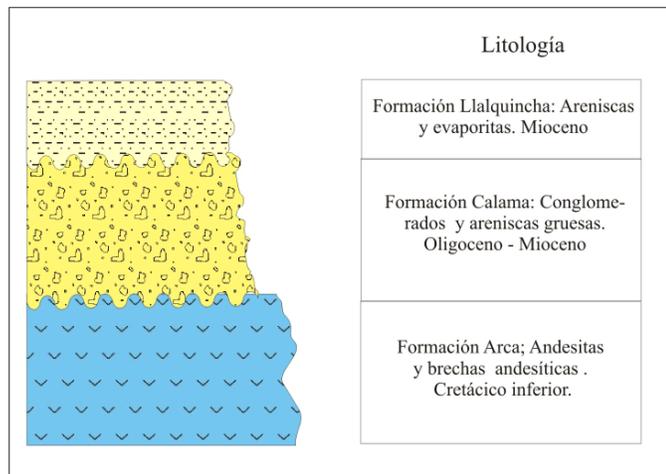


Fig.9. Columna generalizada del sector de Topater – Zona Zm2 y ZU1. Se muestran 3 unidades geológicas-geotécnicas.

Se expone como una secuencia de lavas andesíticas de hasta 4,5 m de potencia total. Las andesitas presentan textura porfídica con fenocristales de horblenda de 0,1 a 0,3 mm de tamaño, algunos de ellos se encuentran parcial a totalmente reemplazados con óxidos de fierro. A menudo la roca se encuentra con fenocristales de plagioclasa arcillizada. Estas rocas presentan en el afloramiento un set de fracturas continuas y penetrativas, a menudo rellenas de yeso y sedimentos. Sobre al Formación Arca y en discordancia angular se dispone la Formación Calama. Esta unidad presenta un grado alto de compactación y el fracturamiento, aunque penetrativo, no afecta la estabilidad del suelo.

### **Formación Calama:**

Aflora como una secuencia de conglomerados y areniscas gruesas de hasta 4 metros de espesor, las cuales son matriz soportada de un color pardo claro, con clastos de 16 cm hasta los 2 cm. Los cuales corresponden a lavas e intrusivos porfídicos. La matriz esta formada en su mayoría por la fracción fina (80%) que por la fracción gruesa (20%).

La Formación Calama está consolidada presentando un grado de compactación medio a alto.

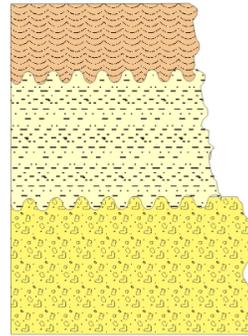
### **Formación Llalquincha.**

Esta unidad esta formada en el área de estudio por areniscas y conglomerados con intercalaciones de evaporitas (Sales solubles), las cuales son indicadoras de un paleo suelo. Esta unidad tiene un espesor variable de entre 30 cm a 1 metro, y está semi-consolidada con un grado de compactación bajo, por lo que es susceptible a disoluciones y colapsos.



Fm Llalquincha

FM Arca.



Litología

Formación Chi-Chiu: Travertinos, calizas, limos. Plioceno-Pleistoceno
Formación Llalquincha: Areniscas y evaporitas. Mioceno
Formación Calama: Conglomerados y areniscas gruesas. Oligoceno - Mioceno

Fig.10. Fotografía 1: Afloramiento del Sector Noreste de Topater. Se distingue las andesitas de la Formación Arca, con un color pardo claro con intenso fracturamiento y sobre ella parte de la Formación Llalquincha, caracterizada por sedimentos coluviales y salinos.

Fig.11. Columna generalizada del sector de Topater – Zona Zm1 y AV. Se muestran 3 unidades geológicas-geotécnicas.

La figura 11 explica las unidades que forman el relleno sedimentario que se encuentra al este del sector Topater. En este sector la mayoría de los afloramientos corresponden a rocas de la Formación Llalquincha, las cuales se distribuyen en capas de gran extensión areal, pero de escasa representación en espesor (1 metro), solo posibles de observar en pequeños cursos de aguas efímeros.

A diferencia del sector norte, esta zona se caracteriza por presentar rocas pertenecientes a la Formación Chui Chui, como travertinos, calizas y limos, los cuales presentan una excelente grado de compactación y alto grado de dureza. A menudo las rocas de la Fm. Chiu Chiu presentan una potencia de 0,5 a 1 metro, pero en el sector sur de Topater afloran 2 cuerpos, con casi 4 metros de espesor.



Fig.12. Fotografía 2: Afloramiento del Sector este de Topater. Se distingue los conglomerados de la Formación Calama bajo sedimentos salinos de la Formación Llalquincha.



Fig.13. Fotografía 3: Afloramiento del Sector este de Topater. Se distingue las calizas y limos de la Formación Chiu- Chiu. Se destaca la alta compactación y dureza de estas rocas.

## **ZONAS DE RIESGOS (ALUVIONAL, SÍSMICO, DESLIZAMIENTOS)**

### ***Definición del Problema a Investigar***

Los procesos geodinámicos y climáticos con reiterada periodicidad provocan numerosas pérdidas de vidas humanas, pérdidas económicas y sociales en todo nuestro planeta, la comuna de Calama no está exenta a estos eventos, razón por lo cual se realizará un estudio que lleve a determinar la probabilidad de ocurrencia de algún evento de esta naturaleza, con el fin de REDUCIR o MITIGAR el impacto en la zona de Topater.

En este marco Chile es un país que ha estado afectado históricamente por desastres naturales, y la Región de Antofagasta no es la excepción, por ejemplo en Junio de 1991 lluvias de inusual ocurrencia e intensidad provocaron voluminosos y destructivos flujos detríticos y de barro en torno al casco urbano de la ciudad de Antofagasta, el aluvión dejó más de 100 víctimas fatales, damnificados y grandes pérdidas económicas.

El sismo de 1995, si bien afectó principalmente al Puerto de Antofagasta y no causó víctimas y grandes pérdidas económicas, no es el sismo que se espera para la zona Norte del país y Sur del Perú. Esta zona ha sido identificada, entre otras áreas del globo, con una alta probabilidad de ocurrencia de un gran sismo; de hecho considerando los registros históricos el último gran terremoto ocurrió en 1877 en Arica y desde entonces no hay registros importantes de sismos INTERPLACAS. Por otra parte, la localización de Chile en el margen sur occidental de la placa Sudamericana, (zona de subducción) donde interactúan la corteza del fondo oceánico y corteza continental y en la cual se desarrolla una intensa actividad sísmica, hace vulnerable a las localidades de Calama y San Pedro de Atacama. Considerando la periodicidad sísmica registrada en la ciudad de Arica (1513 1615 1768 1877) se tiene una media de un sismo mayor cada 121 años, lo cual está indicando que tal evento ocurrirá en cualquier momento.

En vista de lo anterior, se considera de gran importancia evaluar el Riesgo Sísmico y efectos secundarios como Deslizamientos y Derrumbes en la comuna de Calama, Sector Topater. Hemos de considerar la experiencia adquirida en la ciudad de Antofagasta, que junto a otras nueve en el mundo participaron en el Proyecto RADIUS, impulsado por el IDNDR de la Secretaría de las Naciones Unidas y apoyado por el gobierno de Japón, para evaluar el Riesgo Sísmico e interactuar con otras ciudades del mundo. Por otra parte, en la II Región se realizó un estudio de Vulnerabilidad Sísmica en las comunas de Tocopilla, Mejillones y Taltal, desde el punto de vista de los diferentes tipos constructivos, antecedentes que permiten aproximarse en la predicción de eventuales daños asociados a eventos catastróficos.

### ***Objetivos Generales y Específicos***

#### **Objetivos Generales**

Se zonificará la zona de Topater en términos de intensidad sísmica, deslizamiento y derrumbes y riesgo aluvional para la planificación y regulación del uso territorial.

## Objetivos Específicos

Se localizarán las zonas con riesgo potencial de derrumbes y deslizamientos como efecto secundario asociado a un posible evento sísmico.

Se identificarán los tipos de suelo y sustrato rocoso

Se realizará un estudio que permita identificar las áreas con potencial de ser afectadas por un riesgo aluvional.

Procesar y sintetizar la información en Cartas Temáticas mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el software ARC/VIEW . La utilización del SIG permitirá manejar diferentes niveles de información y relacionar estudios Geológicos Urbana y sus alrededores, Estructural, Sísmicos, Geomorfológicos, Calidad Geotécnica de las Formaciones Rocosas, y Geología y Zonificación de Suelos.

## ***Riesgo Aluvional***

### **Marco Teórico de aluviones**

Lluvias de gran intensidad en zonas áridas producen fenómenos de remoción en masa; estos se clasifican por el tipo de movimiento y por el material que ellos involucran, influyen factores como la geología, geomorfología, y el clima, este último se considera como el agente gatillador para la zona de estudio.

Para el norte de Chile, estos fenómenos se producen por lluvias de gran intensidad en un corto periodo de tiempo, lo que desencadena flujos de detritos altamente cohesivos capaces de transportar grandes cantidades de material con clastos de gran volumen y peso.

Los aluviones son un tipo de fenómeno de remoción en masa, los cuales se caracterizan por ser de alta velocidad y sumamente destructivos. Se definen como un flujo torrencial y rápido de agua con una enorme carga de detritos sólidos, el cual avanza debido al efecto de la gravedad a través de un cauce seco o quebrada principal que ha permanecido varios años sin precipitaciones. Estos flujos pueden ir realimentándose a medida que avanzan por las quebradas con aportes de aguas lluvias y/o por aluviones que provienen de quebradas tributarias.

La rápida saturación del suelo provocada por las fuertes lluvias produce una reducción instantánea de la resistencia al corte del suelo del cauce, la que a su vez provoca deslizamiento de una masa sobre otra a lo largo del movimiento por el cauce.

Para el caso específico del norte de Chile estas lluvias tendrían que ser del orden de 30mm, como ocurrió en el aluvión del 18 de junio de 1991 en Antofagasta y en el de Tocopilla el año 1940, 38mm de precipitación (mm/24 hrs). No se encontró información o registros históricos para la ciudad de Calama.

Existen tres factores principales que influyen directamente en la génesis de aluviones:

- Clima (principalmente precipitación y temperatura).
- Geología (principalmente geomorfología, hidrografía y tectónica).

- Actividad Antrópica (principalmente zonas de ocupación y organización de actividades).

### ***Clima***

Considerando los antecedentes entregados en la Memoria Plan Seccional Topater, el Sector de la Comuna de Calama se caracteriza por poseer un clima desértico en altura con una precipitación media anual de 4,5 mm (Periodo de observación 22 años), temperaturas que oscilan entre  $-10^{\circ}$  y  $30, 2^{\circ}$  C, siendo la temperatura media anual de  $13,3^{\circ}$ C. Esporádicamente, por efecto del Invierno Boliviano, se registran precipitaciones durante el verano de moderada intensidad y en periodos de corta duración, lo que favorece la infiltración de las aguas lluvias. No se dispone de datos precisos y antecedentes pluviométricos adecuados, recopilaciones de registros para la II Región se encuentran en el trabajo realizado por Araya (1992), y en el estudio aluvional para la ciudad de Antofagasta realizado por Skorin Ingenieros (1991).

### ***Geología***

Además del factor climático necesario para la ocurrencia de aluviones, influyen también las fuertes pendientes de las quebradas asociado a los rasgos geomorfológicos, situación que no se encuentra en el Sector Topater, ya que las grandes quebradas se encuentran alejadas de la zona en estudio. Por otra parte, la característica relevante y notoria en la zona corresponde a una planicie de suave pendiente (0-5%) y colinas de baja altitud con pendientes entre 5-10%. En la fotografía N°4, se puede observar un cauce que no presenta actividad reciente, tiene una profundidad de 1.20 m como máximo y un ancho de 4 a 5m, localizada en sentido SE-NW cruzando las Zonas ZE2, ZU2, ZM1 y ZU1, a unos 400 m al SW del Camino a San Pedro de Atacama.

Otro aspecto geológico que influye es la disponibilidad de material en el paso de las aguas lluvias, este material tiene relación con la inclinación o manteo que presentan los estratos de las formaciones rocosas. Esta característica favorece el desprendimiento de bloques rocosos, los cuales al acumularse originan potenciales fuentes de material propenso a ser transportado por los flujos aluviales, en la zona en estudio la distribución de los afloramientos rocosos es escaso y con suave manteo, generalmente cercano a la horizontal, situación que no favorece a que este hecho ocurra.(foto N°5)



Fig.14. Fotografía N°4. Vista hacia el NW de antiguo cauce de aguas lluvias.



Fig.15. Foto N°5. Afloramiento de rocas arenosas-calcáreas con intercalaciones centimétricas de yeso. Zona ZU1 y

ZM1, se observa estratificación horizontal.

### ***Actividad Antrópica***

Este factor se refiere a las actividades humanas que influyen directa o indirectamente sobre el fenómeno aluvional, situaciones como utilización de cauces de quebradas para la disposición de basura y la edificación en lugares potencialmente de alto riesgo, tales como en las salidas de quebradas o sobre conos de deyección. La presencia de laboreos de extracción de áridos en los cauces de quebradas, pueden también intensificar el impacto de los flujos. En el área de estudio en el sector NE, entre las Zonas ZU1 y ZU2 (foto N°6) se puede observar disposición de escombros y basura domiciliaria, la que debería ser removida y trasladada a un botadero autorizado, otras áreas con disposición de escombros principalmente se encuentran en el borde de la Avenida Circunvalación entre las Zonas ZE1 y ZU1; y en el extremo SE de la Zona ZE2.



Fig.16. Foto 6. Muestra disposición de escombros.  
Localización entre Zonas ZU1 y ZU2.

### ***HIDROLOGÍA DE LA CUENCA CALAMA.***

La Cuenca Calama constituye una de las grandes mega-ollas hidrográficas que componen el sistema hidrológico de la Segunda Región. Se extiende por el Norte desde de nacimiento de Río Loa, localizado aproximadamente en el Volcán Miño; en tanto por el sur, limita con la Cuenca del Río San Pedro. En dirección al este la Cuenca Calama limita con la Depresión Intermedia a través de la divisoria que recorre la Cordillera de Domeyko, trazada a través de Sierra de Morreno y Sierra Limon Verde, por el Este termina en la divisoria de aguas localizada a través de las altas cumbres de la Cordillera Oriental o Cordillera de los Andes. En esta extensión la Cuenca Calama abarca un área de 20.000 km<sup>2</sup> aproximadamente y se caracteriza por presentar un régimen hidrológico de naturaleza exorreica al ser evacuada por el Río Loa y San Salvador a través de la Cordillera de Domeyko, en una zona localizada inmediatamente al Oeste de la Ciudad de Calama. Esta cuenca es evacuada por un sistema de drenaje complejo cuya rama principal corresponde al Río Loa, el cual drena el área NW de la cuenca. Por otro lado el Río Salado drena el sector Oriental.

El área de estudio se ubica en el borde Occidental de dicha cuenca muy próxima al Río Loa en una zona donde hace abandono de la cuenca en cuestión. Esta zona está afectada principalmente por el sistema de drenajes que desciende desde la Sierra Limón Verde.

### ***Hidrología de la Red de Drenaje de la Sierra Limón Verde- Moctezuma.***

El área que se investiga pertenece al un sistema de drenajes que esta confinado hacia el Sur por la divisoria de aguas de la Sierra Limón Verde y el Cordón Moctezuma y al Norte por el cause del Río Loa. El sistema de drenaje está organizado en varias zonas de drenaje independientes. Estas zonas están delimitadas en la divisoria de aguas desde donde los sistemas de drenaje divergen, la cual es trazada a través de los puntos de mayor cota de la Sierra Limón Verde o en las líneas donde la vertiente de dicha sierra tienen un cambio de orientación. Estas zonas de drenajes se clasifican en Orientales y Occidentales (Ver Mapa. 3), de acuerdo a la dirección del flanco donde pertenecen. Las Zonas de Drenaje Oriental son las de mayor extensión el área de Sierra Limón Verde y se dividen en 4 sistemas principales que drenan en forman variable hacia W, N y NW.

El sistema de drenaje de la zona Oriental que cubre menor área corresponde a la red que afecta a la zona de estudio, el cual se describe como un sistema de geometría sub-paralela, que desciende principalmente del Cordón del Cerro Calama. Una de las ramas principales de sistema de drenajes ubicado inmediatamente al Oeste del zona de drenaje descrita anteriormente, cruza el borde Sur del área de estudio afectando principalmente a la zona ZE1 y menormente a la zona AV.

Considerando lo anteriormente señalado y como se puede observar en los Mapas 3 y 4, **la zona de bajo riesgo** aluvional se localiza al Norte y Sur de Topater, influiría en las zonas ZU1, ZM2 y ZU2 por el norte y a las zonas ZE1 y AV por el sur.

Los depósitos antropogénicos localizados en la ZU2 deberán ser extraídos y trasladados de su posición actual, ya que estos, como se dijo anteriormente potenciarían el riesgo. En el resto del área de estudio el riesgo es muy bajo, ya que es un área de suaves pendientes y en los antiguos cauces de agua como los observados en las zonas ZU2 y ZU1, no existe gran cantidad de sedimentos acumulados.

### ***HIDROLOGÍA:***

En el sector sur de Topater (Zona U1 y AV) se localizan dos afloramientos de agua, a unos 920 m al Este del Río Loa, y corresponden a:

#### **Pozo 1**

El agua aflora en un laboreo de extracción de sílice tipo opalina, chert y cuarzo, en esta cantera el agua se encuentra a 3,5 m de profundidad, actualmente no se observa flujo de agua en el pozo y se encuentra estancada. De acuerdo a observaciones en el terreno el nivel de agua estuvo aproximadamente 0.5 m más arriba, como se puede apreciar en la fotografía N<sup>a</sup> 7, es decir el nivel de aguas subterráneas ha disminuido en cota.

El origen de esta agua puede corresponder a una napa subterránea conectada al río Loa por medio de fracturas, y podría tener una recarga en los periodos de grandes crecidas del río Loa. Otra posibilidad podría corresponder a la existencia de aguas fósiles, es decir una napa de agua sin

recarga importante en el tiempo. Para efectuar un diagnóstico más asertivo se tendría que efectuar un monitoreo del nivel de aguas para certificar que no existe recarga en los periodos de lluvias del invierno boliviano o realizar un bombeo para observar si hay retorno del nivel aguas en algunas horas. Si no hay una recuperación de niveles rápidamente, se puede deducir que correspondería a un medio de baja permeabilidad y escaso fracturamiento. De lo contrario, si hay una recuperación rápida de niveles se podría inferir la existencia de una recarga lateral del acuífero al río o viceversa en el período de crecida del río. No obstante, para sostener esta segunda hipótesis sería necesario realizar una piezometría detallada del área y verificar en otros puntos de agua la relación río-acuífero.



Fig.17. Fotografía 7. Muestra cantera donde se observa nivel de aguas estancadas, Zona ZU1

### **Pozo 2**

Este pozo tiene una profundidad de 1 a 1,5 m y con un diámetro de 3,5 m en una roca de caja correspondiente a un chert y travertino. Las características del agua son de alta salinidad y levemente turbias. Ver (foto 8).



Fig.18. Fotografía 8: Se observa nivel de aguas a 1 metro de profundidad, zona ZU1 y AV.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1.- En el Sector Topater se reconocen tres unidades de roca cuya calidad geotécnica e intensidad sísmica esperada son:

- Areniscas y evaporitas semiconsolidas, intensidad VIII a IX en presencia de agua.
- Areniscas calcáreas, calizas y chert, unidad consolidada y buena calidad, intensidad VII – VIII.
- Andesitas y calizas, roca consolidada, muy buena calidad, intensidad VII.

2.- No existe riesgo potencial de deslizamiento y/o derrumbes como efecto colateral a un sismo de magnitud 8 – 8,5° en la escala Richter. Las características geomorfológicas del área, suaves pendientes y escasa elevación no lo permiten.

3.- Las estructuras tipo Fallas de importancia se encuentran fuera del área de estudio y no muestran actividad reciente según las últimas investigaciones. Esta situación es favorable toda vez que las fallas son potenciales zonas de riesgo, ya que corresponden a una zona de debilidad que exacerba los daños en un medio construido.

4.- Los Pozos 1 y 2, localizados en la zona ZM2, aflora agua de alta salinidad entre 1 a 3,5 m de profundidad. El origen de esta puede corresponder a una napa subterránea conectada al río Loa por medio de fracturas, con recarga en los períodos de crecidas del Río Loa. Otra posibilidad podría corresponder a la existencia de aguas fósiles, es decir una napa de agua sin recarga importante en el tiempo.

5.- El riesgo aluvional es bajo a muy bajo en el Sector Topater considerando la red de drenaje y las observaciones de terreno de antiguos cauces de aguas lluvias. Las zonas de bajo riesgo se localizan al norte y sur de Topater, influyendo en las zonas ZU1, ZM2, ZU2 y ZE1 y AV, respectivamente.

## **RECOMENDACIONES**

1.- El sector ZM2 presenta humedad alta y afloramientos de aguas. De las observaciones efectuadas en terreno se recomienda efectuar un estudio más profundo efectuando un monitoreo del nivel de aguas para certificar que no existe recarga en los períodos de lluvia del invierno boliviano y/o crecida del Río Loa. Otra alternativa es efectuar un bombeo para observar si hay retorno del nivel de aguas en algunas horas; sino hay recuperación de niveles en forma rápida, se puede deducir que correspondería a un medio de baja permeabilidad y fracturamiento. De lo contrario, si hay una recuperación rápida de niveles se podría inferir la existencia de una recarga lateral del acuífero al río o viceversa en el período de crecida del río. Para sostener esta segunda hipótesis se recomienda realizar una piezometría detallada del área y verificar otros puntos de agua la relación río – acuífero.

Esta zona se recomienda destinarla a Áreas Verdes ya que se suma un potencial riesgo sísmico de acuerdo al plano de intensidades y por otra parte se puede originar un efecto kárstico, es decir, disolución de rocas carbonatadas en presencia de agua, lo que puede generar el asentamiento de posibles construcciones sobre este suelo.

2.- Se recomienda extraer los escombros y basura domiciliaria (depósitos antropogénicos) de las zonas ZU2 y ZU1 por el norte de Topater y los depósitos que se encuentran en la zonas ZE1, ZM2 y AV por el sur, para evitar potenciar un riesgo aluvional.

MARÍA SOLEDAD BEMBOW SEGUEL

Geólogo