

# **Propuesta Metodológica para la Caracterización Geotécnica de los Taludes Rocosos del Camino de Acceso al Cerro San Bernardo, Ciudad de Salta**

**Jorge J. Marcuzzi y Luciana Cerusico\***

*jjmarcuzzi@arnet.com.ar*

## **Resumen**

Durante el verano de 2008 como consecuencia de las precipitaciones registradas, en el camino de acceso al cerro San Bernardo se produjeron deslizamientos de taludes rocosos, posiblemente los más importantes de los últimos tiempos, que comprometieron seriamente la estabilidad del mismo. Además de la influencia climática en los procesos de deslizamientos, un aspecto importante que da lugar a estos fenómenos, son las condiciones geológicas y geotécnicas de los macizos rocosos que conforman los taludes del camino, de las que no existen estudios. La situación presente, se traduce en un conjunto de problemas que ponen en riesgo la estabilidad del camino y las obras de infraestructura existentes. Este trabajo propone una metodología de trabajo para analizar la estabilidad de los macizos rocosos.

**Palabras Claves:** Geotecnia, macizos rocosos, taludes, deslizamientos, clasificación geomecánica

## **1. Introducción**

El cerro San Bernardo es parte de la historia de Salta, y lo está en un tiempo de muy larga duración, profundo y multiseccular, del que dan

---

\* Jorge Marcuzzi es profesor de la asignatura Geología y Mineralogía de la Facultad de Ingeniería e Informática de la UCS y profesor de Geotecnia de la Escuela de Geología de la Universidad Nacional de Salta. Luciana Cerusico es alumna de la carrera de Geología de la Universidad Nacional de Salta

cuenta rocas marinas de casi 500 millones de años que lo conforman. Forma parte de la sierra de Mojotoro, relieve orográfico que se extiende al este de la ciudad de Salta y constituye el cierre oriental del Valle de Lerma, cuyas alturas máximas no superan los 2.100 msnm. El cerro San Bernardo con una altura de poco menos de 300 metros, se eleva sobre el piso de la ciudad de Salta cuya altura es de 1.200 msnm, y se ubica en el sector centro-occidental de la sierra de Mojotoro, también conocida como las Serranías de Vélez.

Actualmente, esta unidad sobresaliente del relieve y paisaje urbano de la ciudad de Salta, constituye un ícono relacionado a numerosas actividades de los salteños y esencialmente se lo puede considerar como un mirador natural que permite a los turistas apreciar el paisaje de la comarca, por lo que fue declarado reserva municipal según la Ordenanza Municipal N° 6.134/91. Se encuentra dentro de la ecoregión de Yungas y compone un elemento paisajístico de valor cultural por su importancia social, turística y religiosa.

Como se puede apreciar esta unidad geoambiental cumple con diferentes fines significativos para la actividad social de los salteños, donde el camino de acceso adquiere gran importancia. La traza del mismo fue inaugurada el 20 de febrero de 1933 y su pavimentación comenzó el 24 de febrero de 1971, finalizando en 1972, posee una extensión de 3.796 m y un ancho promedio de calzada de 6,00 m. Los taludes de la traza están constituidos por afloramientos rocosos y suelos, o una combinación de ambos. (Ver fotografías ilustrativas.)

De lo anterior se desprende la importancia que tiene este camino de acceso para el aprovechamiento social de la unidad fisiográfica, y precisamente el objetivo de la presente propuesta metodológica es realizar un estudio para caracterizar desde el punto de vista geotécnico los taludes rocosos y laderas que afloran en el desarrollo de la traza. Los taludes rocosos están constituidos por afloramientos de diferentes litologías y fracturados, que a primera vista por su conformación se considera que pueden ser estables, pero la realidad en los últimos años ha demostrado lo contrario.

En primer lugar, el estudio propuesto apunta específicamente a determinar en base a sus particularidades geológicas, las características geotécnicas de los macizos rocosos presentes en la traza de acuerdo con la metodología de la *International Society for Rock Mechanics* (1981) y desarrollada por Bieniawski (1976), conocida como *Rock Mass Rating* o *RMR*, luego de las modificaciones realizadas

por el mismo autor en 1979, 1983 y 1989; y aceptada mundialmente para describir las condiciones de un macizo rocoso. Luego, una vez conocidas las condiciones geomecánicas del macizo rocoso, empleando el método propuesto por Romana (1985) denominado *Slope Mass Rating* o *SMR*, se clasificarán los taludes de acuerdo a sus diferentes grados de estabilidad o inestabilidad.

La necesidad de estudiar la estabilidad de los macizos rocosos del camino, por la importancia de uso público que tiene, se basa en que no existen antecedentes de estudios sobre el tema. Aspecto que se considera importante, para la seguridad de los usuarios de este circuito turístico, religioso y deportivo, y también de las viviendas construidas en sus laderas y piedemonte. Porque los problemas de deslizamientos de rocas y otros fenómenos asociados en el camino de acceso, por lo menos en los últimos veinte años, constituyen un problema cíclico coligado entre la geología y las condiciones climáticas de la estación lluviosa.

No escapa a los autores, que un estudio para dar una solución a los problemas mencionados constituye una tarea ambiciosa, en la que se deben tener en cuenta de manera conjunta aspectos geotécnicos y de ingeniería detallados, pero la presente propuesta para encarar un trabajo de caracterización geomecánica de los taludes rocosos, aportará los fundamentos geológicos-geotécnicos básicos para elaborar un posible plan integral de remediación.

De acuerdo con lo antes mencionado, la decisión de poner a punto la metodología de trabajo propuesta, se sustenta en la necesidad de realizar un análisis de la estabilidad de los taludes y laderas del camino de acceso al cerro San Bernardo que cumple con una innegable función social, cuya demanda de uso se incrementa en el tiempo. Entonces la metodología propuesta podrá utilizarse como diagnóstico para determinar zonas con diferentes grados de potencialidad para generar procesos de deslizamiento.

## **2. Antecedentes del tema propuesto**

El cerro San Bernardo fue estudiado de manera continua durante los dos últimos siglos, donde los primeros trabajos en este sentido datan de 1789 al presente, pero la mayoría de las observaciones estuvieron orientadas principalmente al aspecto paleontológico y estratigráfico. Los primeros trabajos relacionados con aspectos de la

geología estructural de la Serranía de Mojotoro donde se describen los tipos de plegamiento, fracturas, litología y discontinuidades (diaclasas, planos de estratificación y otras) fueron realizados por Ruiz Huidobro y González Bonorino (1953).

Los autores mencionados identifican además la principal formación rocosa que integra el área de trabajo, caso de la Formación Mojotoro, compuesta por lutitas, areniscas duras, areniscas silíceas y ortocuarcitas, que caracterizan al Paleozoico inferior de la sierra homónima y se apoyan en discordancia angular sobre un basamento asignado al Proterozoico. También señalan que la serranía corresponde a un complejo pliegue anticlinal donde alternan pliegues y escamas, con la existencia de una inversión estructural en el flanco oriental de la sierra, en su tramo central. Más tarde Cueto Vilches (1969) realiza un estudio sobre las diaclasas presentes en las cuarcitas que afloran desde el cerro San Bernardo hasta el río Mojotoro.

En cuanto al tema propuesto, no se tiene conocimiento sobre la existencia de antecedentes de trabajos de investigación sobre la caracterización y análisis de la estabilidad de taludes de macizos rocosos en obras de ingeniería, vinculados a la traza del camino de acceso hasta la cumbre en cerro San Bernardo. Salvo un informe inédito (Marcuzzi 1994) para la Secretaria de Obras Publicas de la Municipalidad de la ciudad de Salta sobre los riesgos geológicos conexos con la urbanización de la ladera occidental del cerro San Bernardo y 20 de Febrero, y trabajos del mismo autor sobre la caracterización geotécnica de las unidades geoambientales del Valle de Lerma.

Más recientemente Bassi et al, (1996) y Cerúsico y Bocca (2004) realizan estudios sobre aspectos estructurales y ambientales del cerro San Bernardo y su relación con la ciudad de Salta. Chafatinos y Nadir (1972) elaboraron una monografía inédita sobre la serranía de Mojotoro que analiza en general los riesgos geológicos de la unidad. Aparte, se tiene conocimiento de la existencia de algunos informes geotécnicos particulares relacionados con obras como la construcción del teleférico, cisternas de aguas y vivienda.

Sintetizando, salvo los trabajos de Marcuzzi et. al (1993, 1994, 1996, 1998 y 2000) relacionados con la temática, se puede decir que existe una importante producción bibliográfica de tesis, trabajos científicos e informes técnicos, en relación con la geología, clima, tectónica, medioambiente, hidrología, riesgos generales y otras

temáticas de la Serranía de Mojotoro, pero en cuanto a investigaciones sobre aspectos geotécnicos para la estabilidad de taludes y laderas no se conocen antecedentes.

### **3. Fundamentación de la elección del tema**

La elección del tema trabajo, se fundamenta en la necesidad de aportar metodologías de estudio sobre temas de geotecnia básicos, para el análisis de problemas de riesgos de la ciudad de Salta, como consecuencia del importante crecimiento demográfico que se dio a partir de los últimos veinte años. Actualmente la población estable de la ciudad se estima en más de setecientos mil habitantes, a lo que se suma el incremento del turismo, aspecto que implica un uso mayor de ciertas unidades del relieve que conforman el Espacio Geológico Urbano (EGU) de la capital provincial.

La creciente demanda de uso del entorno físico natural por la continua urbanización, demanda de espacios de recreación y la necesidad de encarar nuevas obras de infraestructura genera la urgencia, entre otras, de analizar la estabilidad de ciertas unidades del relieve como cursos fluviales, lomadas, serranías y otras. En el caso particular del cerro San Bernardo, este ha sufrido un importante incremento del tránsito vehicular, por lo que la caracterización geotécnica de los taludes y laderas para análisis de su estabilidad, constituye un aspecto importante de la realidad en cuanto a la seguridad de los usuarios.

El camino de acceso al cerro San Bernardo nace el lugar conocido como El Portezuelo, sobre la ruta nacional N° 9 de acceso a la ciudad de Salta, y asciende por la ladera occidental con una traza sinuosa que atraviesa taludes de afloramientos rocosos de diferente litología, grado de fracturación y estabilidad. Donde uno de los principales aspectos de la inestabilidad, se relaciona con el buzamiento de los afloramientos que poseen una orientación definida a favor de la pendiente topográfica, característica natural que potencia deslizamientos. (Ver fotografías.)

Los taludes a lo largo de la traza de casi cuatro kilómetros, presentan diferentes problemas de estabilidad, como derrumbes, deslizamientos de suelos y rocas, procesos de erosión, alteración de drenajes naturales y otros fenómenos que normalmente adquieren mayor impulso durante la estación lluviosa. La magnitud de los deslizamientos en ocasiones reduce el ancho de la calzada, e incluso

han llegado a provocar la obstrucción total de la misma, dificultando o poniendo en riesgo la circulación vehicular. Los procesos mencionados, también determinan cierto grado de riesgo para las edificaciones situadas en la parte baja de las laderas y piedemonte.

De la situación descrita, surge la inquietud de realizar un análisis de las características geotécnicas de los macizos rocosos que forman los taludes y laderas del camino de acceso a la cumbre del cerro San Bernardo. Aspecto que junto con el estudio de los factores ambientales, geológicos y topográficos presentes, permitirá conocer cuál es la condición presente y futura de estabilidad.

## **4. Caracterización del área de trabajo**

### **4.1. Ubicación y vías de acceso**

La zona de estudio se ubica sobre la ladera occidental de la Sierra del Mojotoro, que conforma el borde oriental del Valle de Lerma, donde se encuentra la ciudad de Salta, queda limitada por las coordenadas: 65° 21' 22"- 65° 24' 33" oeste y 24° 44' 17" - 24° 48' 44" sur. El acceso a la zona de estudio resulta fácil hacia ambas laderas, a través de caminos, calles de tránsito diario, caminos secundarios y senderos, en buen estado de conservación. El camino de acceso se origina en el sector conocido como "El Portezuelo", a partir de la ruta nacional N° 9, el mismo recorre el flanco occidental del cerro hasta alcanzar la cima.

### **4.2. Clima**

El clima del área de trabajo, que involucra parte del área urbana de la ciudad de Salta, es de tipo tropical serrano (cálido húmedo a subhúmedo), con veranos lluviosos, inviernos secos y temperaturas moderadas durante todo el año. Los parámetros que lo caracterizan se presentan en la Tabla 1. (Bianchi y Yáñez ,1992).

Los períodos lluviosos se extienden desde octubre hasta abril, y los secos en los meses restantes. La sierra del Mojotoro determina una barrera climática que frena el paso de las masas de aire húmedo provenientes del este, de modo que las lluvias se descargan principalmente sobre las laderas orientales de la serranía y también determina la presencia de microclimas. Lamentablemente no se poseen datos de las precipitaciones en el área de trabajo de la serranía, los

cuales son fundamentales para el estudio de la estabilidad de los taludes.

Tabla 1. Clima del área de trabajo

Temperatura	Precipitación	
Mínima media anual: 10.9°C	Media anual: 16.7°C.	Heliofanía efectiva anual 2.297 horas
Mínima absoluta anual: -6.8°C	Media anual 700 mm	Velocidad media del viento a 2m de altura: 4.6 km/h
Máxima media anual: 23.8°C	Humedad relativa media anual del 72%	
Máxima absoluta anual: 39°C	Humedad relativa máxima media anual: 91%;	
Media anual: 16.7°C.	Humedad relativa mínima media anual: 47%.	

### 4.3. Suelos y Vegetación

Los suelos dominantes son de débil desarrollo con perfiles A-AC-C, de textura fina a media en superficie y gruesa en profundidad. La textura está notablemente influenciada por el relieve local y las condiciones geológicas, por lo que es bastante variable. El drenaje interno varía según las texturas y la geomorfología, poseen alto contenido de materia orgánica y el pH varía entre ácido y alcalino. El grado de erosión es alto por las pendientes. Los suelos a nivel regional se clasifican como regosoles y litosoles.

El área de estudio pertenece al territorio fitogeográfico del dominio amazónico y dentro de este a la provincia de las Yungas (Cabrera y Willink, 1980). La vegetación está muy influenciada por la latitud y el relieve dominante. Corresponde a lo que se denomina como bosque montano, por su desarrollo entre los 1.000 y 2.300 msnm.

### 4.4. Geología

#### 4.4.2 Estratigrafía

La columna estratigráfica expuesta de la Sierra de Mojotoro, comprende la siguiente secuencia: comienza con rocas de la Formación Puncoviscana o basamento precámbrico, luego del Grupo Mesón (Cámbrico), Grupo Santa Victoria (Ordovícico), y culmina con depósitos

cuaternarios (Figura 1). Las formaciones ordovícicas constituyen el Grupo Santa Victoria y, las unidades reconocidas al presente son: La Pedrera, Floresta, Áspero, San Bernardo (de importante contenido fosilífero) y Mojotoro.

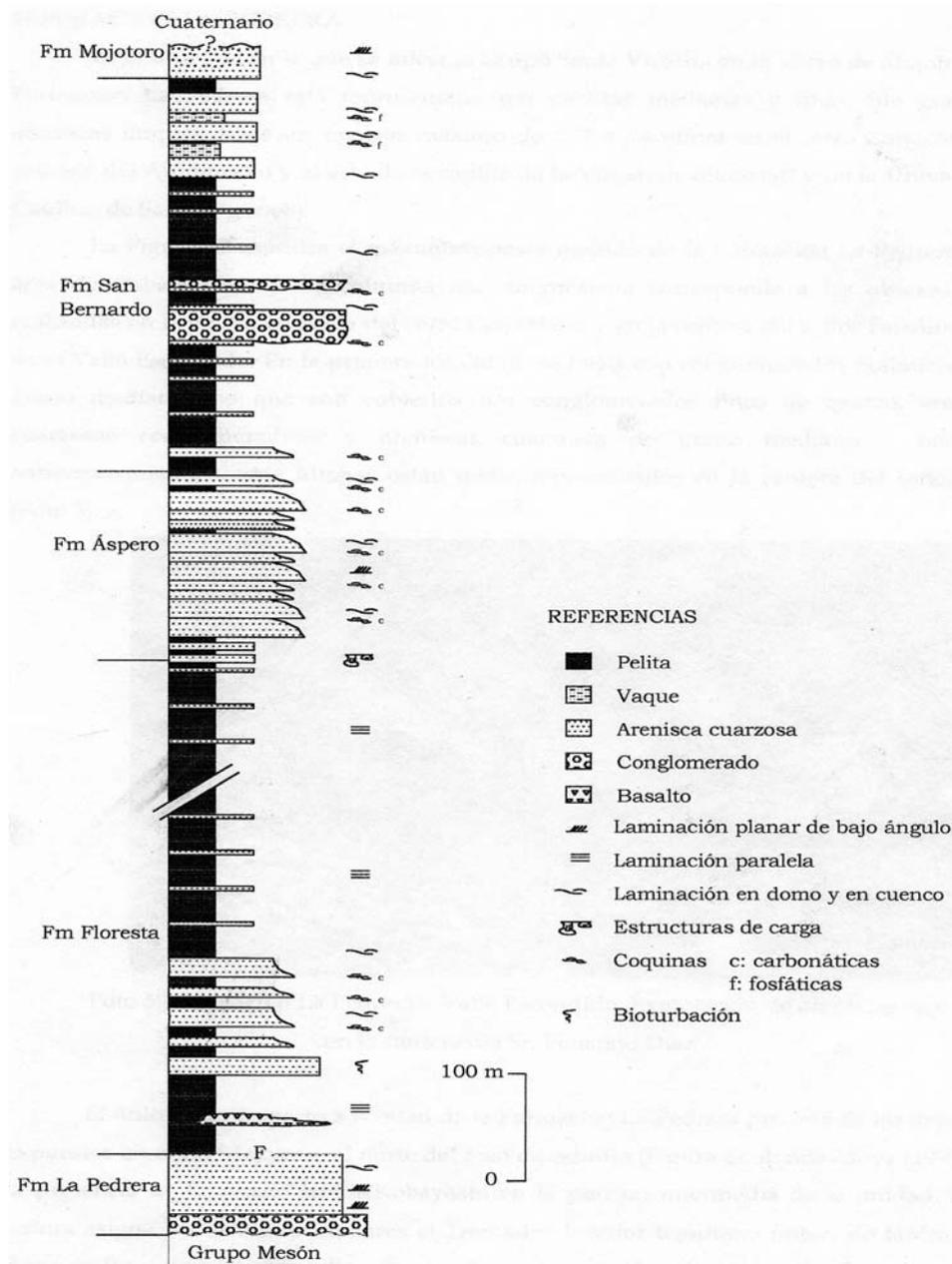


Figura 1. Perfil geológico estratigráfico

En el área de estudio, dominan los afloramientos del Ordovícico inferior, representadas por rocas sedimentarias marinas, constituido por una alternancia de bancos de pelitas (fotografía 1), areniscas (fotografía 2) y cuarcitas (fotografía 3), que se disponen en orientación norte-sur y buzamientos generales hacia el oeste. La disposición estructural de la serranía da lugar a un relieve asimétrico caracterizado por laderas occidentales escarpadas, acordes con el buzamiento de los estratos (30°-40° promedio) orientales y menos inclinadas. La edad de las formaciones es Tremadociana (ladera este) y Arenigiana (ladera oeste del cerro) y se identifican como:

**Formación San Bernardo:** Constituye una unidad esencialmente pelítica, grano y estrato creciente, constituida por lutitas limosas, limolitas y vaques de grano fino y color verde oliva, entre las que intercalan bancos arenosos o areno-psefíticos con gradación positiva geométrica. En el tercio inferior de la Fm San Bernardo, Barrientos, A. 2003; se intercala un intervalo psefítico-psamítico de 25 m de espesor, constituido por secuencias grano decrecientes de 0,30-1,20 m de espesor, marcadamente lenticulares, con base erosiva y techo transicional, compuestas por conglomerados clasto a matriz soportados, que gradan a areniscas micáceas y vaques gruesos, medianas y finas, limolitas y pelitas. La Formación San Bernardo posee un espesor máximo de 436 m y la relación con la Formación Mojotoro, es transicional y, está evidenciada por una sucesión compuesta por secuencias de arenisca-pelita de tendencia grano y estrato-creciente. Ambas se presentan muy fracturadas.

**Formación Mojotoro:** La Formación Mojotoro corresponde a los niveles ordovícicos más jóvenes que afloran en el área de trabajo, cuyos depósitos constituyen el contrafuerte occidental del cerro, con intervalos heterolíticos de arenisca-pelita. Hacia el oeste, en la depresión del Valle de Lerma, dichos niveles yacen bajo acumulaciones fluviales y aluviales del piso del valle, desconociéndose el tipo de relación de techo que podrían presentar. Con un espesor de 50 m, dicha formación se caracteriza por cuarcitas blanquecinas, rosadas y moradas, de estratificación gruesa, en bancos frecuentemente amalgamados con abundantes entrecruzamientos y superficies de reactivación. También presentan alto grado de fracturación.



Fotografía 1 y 2. Deslizamientos de taludes en formaciones rocosas lutíticas de dos sectores del camino de acceso al Cerro san Bernardo.



Fotografías 3 y 4. Deslizamientos de taludes de formaciones rocosas de areniscas y suelos. En la fotografía de la derecha se aprecia la influencia del agua.



Fotografías 5 y 6. Deslizamientos de taludes de formaciones rocosas de cuarcitas fracturadas, en la fotografía de la izquierda se observa la influencia del agua.

#### **4.4.3. Relieve y geomorfología**

El lugar de trabajo se encuentra en el bloque positivo de la sierra de Mojotoro, este bloque tectónico adquirió su conformación actual durante los ciclos diastróficos del Terciario superior y manifestaciones tardías del Cuartario, que elevaron y fracturaron el basamento y lo bascularon hacia el este. Desde entonces la sierra de Mojotoro comenzó a sufrir un proceso de erosión que dio lugar a las geoformas que vemos actualmente, producto de la incisión de una red hidrográfica que se adapta a las formaciones litológicas presentes (Ruiz Huidobro, 1968).

El autor antes mencionado, clasifica a la Sierra de Mojotoro como un plegamiento asimétrico limitado por fallas, cuya estructura define una red de drenaje consecuente que nace sobre la línea de cumbres y desplazada hacia el oeste como consecuencia de su asimetría. La serranía como resultado del plegamiento presenta pendientes más suaves hacia el este y más abruptas hacia el oeste. El buzamiento de los estratos es hacia el oeste, por lo que son solidarios con la pendiente topográfica, dando lugar esta conjunción a cierto grado de inestabilidad de las laderas.

Los taludes sobre los que se emplaza la traza del camino de acceso están conformados por unidades litológicas de naturaleza sedimentaria, las que desde el punto de vista petrológico se clasifican como cuarcitas, pelitas, areniscas y vaques, a los que suprayacen depósitos sedimentarios cuaternarios con texturas de granulometría variable.

En general la estabilidad de las unidades litológicas de la Formación Mojotoro, que conforman los taludes, depende de un conjunto de factores como altura del talud, litología, drenaje interno, grado de fracturación y orientación de los mismos. Así se observan derrumbes y flujos de sedimentos de diversa magnitud al pie de los taludes rocosos que siguen la dirección de buzamiento de los estratos, ubicados en toda la traza y coinciden con litologías propensas al deslizamiento o sedimentos inconsolidados. Los derrumbes de pequeña escala no comprometen la estabilidad del camino, pues por lo general cubren menos de medio carril.

La ladera occidental, por la orientación de los estratos, buzamiento, dirección de buzamiento y topografía, es susceptible a sufrir cíclicamente problemas de deslizamiento por la concurrencia de

los elementos estructurales y del relieve mencionados (ver fotografías ilustrativas). A lo anterior se suman otros factores disparadores, como los efectos de la sismicidad de la comarca y del clima, con lluvias intensas, y el desarrollo de procesos de meteorización.

Las formaciones lutíticas muestran mayor tendencia al desarrollo de derrumbes y deslizamientos, observándose actualmente escarpas de falla en condiciones de inestabilidad, que afectan los niveles de areniscas asociados con lutitas. La mayoría de estas dan lugar a derrumbes y flujos, siguiendo el sentido de la estratificación, y en general conforman depósitos al pie del talud (ver fotografías ilustrativas).

En éste tipo de ambiente, donde existen situaciones climáticas contrastantes entre el verano e invierno, con amplitudes térmicas acentuadas y precipitaciones intensas, la meteorización física y química es importante, que se ve favorecida por la presencia de discontinuidades, especialmente en las formaciones lutíticas. Los procesos de meteorización favorecen los deslizamientos de las masas rocosas por debilitamiento de las mismas, en especial cuanto mayor es la densidad del grado de fracturación. En los deslizamientos los dos factores motores principales son la gravedad y la circulación de agua por las discontinuidades. Los deslizamientos en general tienen lugar a lo largo de las superficies de discontinuidad, cuyo movimiento puede ser rápido o progresivo en el tiempo, debido a los procesos naturales mencionados o por desestabilización antrópica.

#### **4.4.4. Hidrología**

Desde el punto de vista hidrológico, en superficie, en el sector de estudios se observa la presencia de una red de drenaje de poco desarrollo típica de áreas de laderas desarrolladas en rocas de buen grado de diagénesis y competencia, conformada por quebradas de escaso desarrollo, que normalmente son consecuencia de procesos tectónicos, y que encauzan el agua de las precipitaciones pluviales. Parte de los volúmenes de las precipitaciones se infiltran, dando lugar a un flujo subsuperficial a través de las discontinuidades litológicas (ver fotografías 3 y 6) y cuyos efectos tienen una importante incidencia en la estabilidad de los macizos rocosos. La vegetación de las laderas ejerce un efecto protector del suelo durante las lluvias al controlar la erosión hídrica.

## 5. Objetivo general del trabajo

Como paso inicial de la propuesta de trabajo el objetivo general consiste reconocer los afloramientos rocosos presentes en la traza del camino, esto consistirá en los siguientes pasos:

- En primer lugar se procederá a relevar en la traza del camino de acceso a la cumbre del cerro San Bernardo los sectores donde existen afloramientos rocosos visibles que constituyen los taludes y laderas, y de las diferentes litologías que los componen. También se relevarán los drenajes principales y elementos estructurales mayores como fallas, componentes estos de macroescala estructural que son de interés para el análisis general de la estabilidad. Para esta tarea se empleará un GPS.
- En cada afloramiento se determinarán los parámetros básicos de la geometría de un talud, como la altura vertical (V) y la longitud horizontal (H), para determinar la pendiente del plano del talud. También se describirá el talud en cuanto a la posible cubierta de suelos y vegetación, y se verificará si existen indicadores de deslizamientos anteriores. Finalmente en los taludes rocosos identificados, se determinarán sectores representativos para aplicar luego la metodología de caracterización geotécnica de los mismos.
- En los sectores representativos del relevamiento inicial, se procederá a definir la posibilidad de emplear la metodología del relevamiento de las discontinuidades y su análisis mediante la propuesta de la *International Society for Mechanics of Rocks (ISMR)* (1978), que luego permitirá determinar los índices MRM y SMR. Para este paso se empleará una brújula geológica.
- La información geológica de base necesaria para la posterior caracterización de los macizos rocosos, consiste en el relevamiento de la litología presente en cada afloramiento además de una observación preliminar del tipo de discontinuidades existentes, orientación dominante, estado de alteración e indicadores de infiltración de agua. Esta tarea contempla también los espesores de los estratos, su rumbo y buzamiento. Para este trabajo se emplearán fichas de campo diagramadas según los objetivos.
- En gabinete se procesará la información de campo capturada para determinar áreas de similares características geológicas e hidrológicas, para el análisis de estabilidad de los macizos, según los parámetros de clasificación MRM y SMR.

- Los resultados del paso anterior, permitirán elaborar un mapa geológico-geotécnico base de la traza del camino, empleando la simbología propuesta por en la *Guía para la Preparación de Mapas Geológicos Ingenieriles* (UNESCO 1976).
- Finalmente se concebirán las conclusiones sobre la situación de la estabilidad de los macizos por sectores de la traza y las propuestas de acciones de control en las partes que presenten mayor susceptibilidad de deslizamiento.

## 6. Objetivos específicos

El objetivo específico del trabajo es la caracterización geotécnica de los afloramientos rocosos que conforman los taludes del camino de acceso a la cumbre del cerro San Bernardo, para evaluar su potencial de inestabilidad y producir deslizamientos. La inestabilidad de laderas y taludes se puede definir como el movimiento de masas de roca, detritos, o tierra a favor de la pendiente, bajo la influencia directa de la gravedad. En cuanto a los deslizamientos macizos de rocas estos normalmente están en función de las discontinuidades estructurales presentes.

Para lograr el objetivo propuesto, se debe luego de identificar los grupos de afloramientos presentes se procederá a caracterizar geotécnicamente los mismos y establecer el grado de estabilidad por sectores, para luego agruparlos en conjuntos de comportamiento geomecánico similar. La caracterización y clasificación de los macizos se efectúa mediante los sistemas de clasificación geomecánicos existentes, sobre la base de las condiciones geológicas del entorno y el análisis de las discontinuidades presentes en los afloramientos rocosos.

Para este propósito, se empleará el método de análisis conocido como **Índice de Evaluación de Masas de Deslizamiento SMR (*Slope Mass Rating Index*)** (Romana 1985), que parte de la **Clasificación Geomecánica RMR (*Rock Mass Rating System*)**, o clasificación geomecánica de Bienawiski (1983), y sus modificaciones posteriores. El RMR, consiste en la base de la metodología de estudio que permite una clasificación previa de los afloramientos de rocas "in situ". Esta metodología, también se utiliza para la clasificación de los macizos rocosos para la construcción de túneles, de calidad de taludes y de cimentaciones, mediante la determinación del índice de calidad RMR

que es independiente de la estructura, y es corregido por un factor de seguridad.

Es decir que para lograr la caracterización y agrupamiento de los macizos rocosos presentes en el camino de acceso, se partirá de la clasificación RMR propuesta por Bieniawski (1983; 1989) también conocida como sistema de clasificación CSIR, para luego determinar su grado de inestabilidad, de acuerdo con la metodología planteada por Romana (1993) mediante el Índice de Evaluación de Masas de Deslizamiento SMR, que resulta de una adaptación de la primera para el análisis de la estabilidad de taludes rocosos. Finalmente luego de realizado el análisis de estabilidad de los afloramientos se elaborará un mapa de riesgos, agrupando los macizos rocosos con idénticas condiciones geomecánicas y de estabilidad y, las posibles medidas correctivas para los sectores inestables.

El SMR es una herramienta muy práctica para la valoración preliminar de la estabilidad de taludes rocosos según un conjunto de reglas simples que la gobiernan, en base a la medición de ciertos parámetros de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos. No es un sustituto del análisis de detalle que requiere el estudio de taludes, pero puede considerarse como una herramienta sistemática eficaz para describir las condiciones del macizo rocoso. La determinación del SMR, consiste en realizar un ajuste del RMR, por medio de factores que dependen de la orientación relativa de las discontinuidades presentes, donde se agrega un factor extra que es función del método de excavación, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Entonces la evaluación del Índice SMR de las juntas es igual al producto de los siguientes factores:

*F1*: depende del paralelismo entre las juntas y el rumbo de la cara del plano del talud. El rango varía entre 1.00 y 0.15. Estos valores están de acuerdo a la relación:  $F1 = (1 - \sin A)^2$ , donde *A* es el ángulo entre la cara del plano de deslizamiento y la discontinuidad.

*F2*: se refiere al ángulo de inclinación de la discontinuidad y la forma del plano de falla. En un sentido, es una medida probable de la resistencia a la compresión de la discontinuidad. Su valor varía entre 1.00, para juntas con buzamiento mayor que 45°, y 0.15; para juntas con

buzamiento menor  $20^\circ$ . Según la relación  $F2 = (tg^2 B_j)$ , que denota el valor del ángulo de inclinación de la junta.

*F3*: refleja la relación entre la inclinación de la cara de deslizamiento y la inclinación de las juntas.

*F4*: es un factor de ajuste según el método de excavación que se empleó, fijado de manera empírica.

Las condiciones hidrológicas también se deben tener en cuenta, porque gobiernan ciertos casos de la estabilidad, y son función de las condiciones climáticas estacionales. De aquí la importancia de contar con datos de las precipitaciones.

El SMR toma diversos valores límites que denotan distintas condiciones de estabilidad, para diferentes modos de falla o rotura, así para valores de  $SMR < 20$ , la falla es muy rápida y para valores de  $SMR < 10$ , no se producen deslizamientos. Los valores del análisis a su vez permiten ponderar diversas medidas de remediación para soportar el talud inestable. Es decir que el sistema SMR permite realizar una clasificación geomecánica de los taludes y determinar un parámetro de riesgo de los mismos, de acuerdo con los valores que adopten los factores *F1*, *F2*, *F3*.

El análisis del potencial de inestabilidad de un talud rocoso no es una tarea sencilla y, requiere de un cuidadoso trabajo y observación de campo, para comprender la importancia de los factores de inestabilidad que actúan sobre el talud. El resultado puede ser un indicador útil de los límites que se debe imponer al destino de uso normal de un talud.

## 7. Síntesis del Plan de Trabajo

En primer lugar se realizará una recorrida de la traza del camino, para identificar los sectores de taludes rocosos presentes a lo largo de la misma, su constitución litológica, evidencias de la acción de fenómenos de la geodinámica externa e interna que actúan, como así también de evidencias de actividad antrópica que pueda haber contribuido a su inestabilidad. También se considerarán aspectos topográficos y estructurales de los taludes; como presencia de fallas, estratificación, pliegues, discontinuidades, cubierta vegetal, suelos y evidencias de flujo de agua, parámetros estos que influyen en la

inestabilidad de las masas rocosas. Con esta información se confeccionará un plano geológico de situación base.

Lo expuesto en el párrafo anterior permitirá, dividir la traza del camino en sectores de acuerdo con la litología de los afloramientos, de esta manera se sectorizará la misma en unidades elementales de acuerdo a patrones geológicos según las condiciones actuales de los taludes o cortes existentes. Luego los macizos rocosos se clasificarán de acuerdo a las características geomecánicas de los mismos, en base al relevamiento de los parámetros que requieren los sistemas MRM y SMR. De esta manera se obtendrá un esquema sectorizado de la traza del camino en función de las características geomecánicas de los macizos rocosos.

Finalmente después de evaluar los parámetros geotécnicos obtenidos en función de los sistemas MRM y SMR, se clasificarán los taludes de acuerdo con su grado de estabilidad. Los resultados serán volcados en un mapa geotécnico de aptitud que definirá zonaciones en la traza del camino y se realizar las recomendaciones necesarias para evitar los riesgos de deslizamiento o minimizarlos.

## **8. Metodología**

El análisis de la estabilidad geomecánica de los macizos rocosos está condicionado por un conjunto de limitaciones de orden práctico y económico, por lo que las evaluaciones se efectuarán de acuerdo a una metodología relativamente sencilla que proveerá de respuestas razonables a nivel de anteproyecto. Para este fin la mecánica de rocas ha desarrollado un conjunto de técnicas, basadas en características cualitativas e índices numéricos que inciden en el comportamiento del macizo rocoso.

Los métodos propuestos por Bieniawski (1979) y Romana (1993) para obtener el MRM y SMR respectivamente, requieren de la determinación de parámetros básicos que involucran aspectos de campo, laboratorio y gabinete, que seguidamente se describen.

### **8.1. Tareas de campo**

Las tareas de campo, ya mencionados en los objetivos del trabajo, se llevaran a cabo de acuerdo con las técnicas de campo tradicionales de la geología aplicada, empleando brújula geológica, GPS, teodolito,

cintas métricas y otros elementos necesarios. Pero el aspecto fundamental del trabajo se relaciona con el relevamiento de las características de las discontinuidades presentes en los afloramientos de rocas, que comprende los siguientes parámetros:

**Espaciamiento de las discontinuidades:** es la distancia medida entre ellas a lo largo de una línea perpendicular a los planos de discontinuidad, donde se determinará el espaciamiento medio definido por Bieniawski (1989), que mediante el empleo de una cinta métrica consiste en contar a lo largo de un afloramiento rocoso el número de juntas en una distancia fijada, multiplicada por el coseno de los ángulos entre la normal a las juntas y el plano del afloramiento.

**Estado de meteorización de las paredes de las discontinuidades:** consiste en evaluar parámetros como: rugosidad, separación, tipo de material de relleno; persistencia y, alteración de las paredes, según las escalas propuestas por Bieniawski (1989). Estos son fáciles de chequear en campo, con cinco categorías, donde la naturaleza del o los rellenos gobierna el esfuerzo de corte de juntas no acopladas y es un parámetro relativo de la rugosidad.

**Separación de las discontinuidades:** es la distancia perpendicular entre las paredes de rocas de una junta abierta. La separación de juntas gobierna el desplazamiento necesario para movilizar la junta de *stress*.

**Persistencia de las discontinuidades:** esta condición según el esquema planteado por el ISRM, las clasifica en persistentes o continuas y no persistentes o no continuas.

**Agua:** las condiciones hidráulicas, que hacen referencia al potencial de flujo entre las discontinuidades, serán estimadas según la propuesta del RMR.

**Orientación de las discontinuidades:** este parámetro requiere de la orientación espacial de las familias de discontinuidades en base al buzamiento y la dirección de buzamiento, medidas con brújula geológica.

**Orientación del talud:** La orientación de los taludes se realiza según los valores medios estimados de las inclinaciones, donde el error debe estar dentro del rango de  $\pm 5^\circ$ .

La caracterización de los macizos, de acuerdo con el Índice de Calidad RMR se realizará en base a los seis parámetros propuestos por Bieniawski (1979): 1) Resistencia a compresión simple de la roca, 2) RQD (*Rock Quality Designation*), 3) Distancia de separación entre las discontinuidades, 4) Condición de las discontinuidades, 5) Flujo del agua subterránea en las discontinuidades y 6) Orientación de las discontinuidades.

El índice de calidad RMR varía entre 0 y 100, y define cinco clases de roca designadas con números romanos, que se corresponden con cinco calidades del macizo rocoso: I) Muy buena, II) Buena, III) Media, IV) Mala y V) Muy mala. Estos y los diferentes modos de falla, en la mayor parte de los casos son gobernados por las superficies de las discontinuidades.

Luego de definido el RMR, se evaluará la estabilidad de los taludes rocosos mediante la obtención del Índice de Evaluación de Masas de Deslizamiento (SMR Index), herramienta muy útil para la valoración preliminar de la estabilidad de macizos rocosos. El método se sustenta en reglas simples y proporciona pautas para resolver el problema. El método no es un sustituto del análisis riguroso que requiere el análisis de estabilidad de taludes, donde son necesarios métodos analíticos que combinan aspectos geológicos e ingenieriles, pero cumple con los objetivos propuestos.

## **8.2. Trabajos de Gabinete y Laboratorio**

Si bien en base de los datos obtenidos según las metodologías expresadas en los apartados anteriores y con la información geológica de estudios anteriores, se puede proceder a la clasificación geomecánica de los macizos rocosos que conforman los taludes o laderas, son necesarios ciertos ensayos de laboratorio que requieren las metodologías de estudio, además de la identificación petrológica de las muestras.

La metodología de trabajo propuesta para la clasificación de los macizos rocosos y análisis de estabilidad, si bien es aparentemente simple no es fácil de aplicar, porque la obtención de algunos parámetros requiere de técnicas y ensayos que no están al alcance de las posibilidades académicas por los costos o la complejidad de los instrumentos necesarios. Por la razón expuesta se han desarrollado metodologías alternativas que simplifican la determinación de estos parámetros, como ciertos aspectos empíricos en base a la experiencia y

correlación de casos. Estas alternativas han proporcionado resultados bastante coherentes en su aplicación práctica.

Según lo anterior, la resistencia a la compresión simple puede estimarse mediante una cortaplumas o un martillo geológico, de acuerdo con el método propuesto por el ISRM (1978). La metodología indica que los resultados de laboratorio solo son necesarios en rocas blandas, puesto que para rocas duras los valores correlacionables no inducen a grandes errores. Algunos autores (Deere, 1966) han sintetizado los procedimientos y resultados de ensayos económicos, rápidos y fiables para obtener estimaciones de ensayos de compresión uniaxial.

En el caso de estimación del Índice de Calidad de las Rocas, RQD; que se basa en el porcentaje de recuperación de testigos de un sondeo, el cual depende indirectamente del número de fracturas y del grado de la alteración del macizo rocoso, Palmstrom (1975) propuso una correlación aproximada entre el RQD y el recuento volumétrico de discontinuidades por metro cúbico, cuando no se dispone de testigos de perforación. Este, entonces será estimado mediante observación directa de campo, según la fórmula alternativa:

$$\begin{aligned} \text{RQD} &= 115 - 3,3 \times J_v \quad (\text{RQD} > 100) \\ &= \sum v_i J_i / S \end{aligned}$$

donde  $J_v$  es el número de juntas identificadas en el macizo rocoso por  $\text{m}^3$ , y  $S$  es el espaciamiento medio en metros de las discontinuidades de la familia  $i$ (m).

## 9. Conclusiones y recomendaciones

Con la clasificación de los macizos rocosos y taludes por medio de los métodos MRM y SMR, que determina su comportamiento geomecánico y susceptibilidad al deslizamiento volcada sobre la cartografía base de la traza, se determinará una zonificación del camino de acceso al cerro San Bernardo. En esta se podrán observar sectores que de acuerdo con la naturaleza geológica y geotécnica resultaran en la diferenciación de áreas de mayor o menor peligrosidad en relación con la estabilidad de los taludes presentes y se propondrán las recomendaciones básicas dirigidas a minimizar el riesgo, como modificación de las inclinaciones de corte de los taludes existentes,

necesidad de encarar obras de remediación y otras recomendaciones que surjan del estudio.

Los resultados de este trabajo beneficiarán a varias instituciones gubernamentales, como el municipio capitalino, Dirección Provincial de Vialidad, Secretaría de Obras Públicas de la provincia y otros, quienes podrán contar con un diagnóstico base de las características geomecánicas de los macizos rocosos que conforman la traza del camino de acceso al cerro San Bernardo y la potencialidad de riesgos que estos implican. Estos podrán planificar tareas de remediación de taludes inestables y de esta manera resguardar la seguridad de la población y turistas que hacen uso de la traza. También podrá utilizarse como base para la planificación territorial.

### **Bibliografía**

- Bassi et al. Estabilidad de la ladera occidental de la sierra de Mojotoro entre los paralelos 24° 46' 46" y 24° 07' 42" de latitud sur, *IV Reunión de Estudiantes de Geología*, 1996.
- Bianchi, A. R. y Yañez, C.E. Las precipitaciones del Noroeste Argentino. INTA, Salta, 1992.
- Bieniawski, Z.T. Rock Mass Classification in Rock Engineering. Exploration for Rock Engineering, Ed. Z. T. Bieniawski, A.A. Balkema, Johannesburg, pp. 97-106, 1976.
- Bieniawski, Z.T. The Geomechanics Classification in rock engineering applications. En *Proc. 4 th Int. Congr. Rock Mech.*, Montreux, pp 55-95. Balkema, Rotterdam. 1979.
- Bieniawski, Z.T. The Geomechanics Classification (RMR System) in Design Applications to underground Excavation. *Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr.* A. A. Balkema, Rotterdam; pp. 1.33-1.47, 1983.
- Bieniawski, Z.T. *Engineering rock mass classifications. A Complete Manual for Engineerigs and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering.* John Wiley & Sons, New York, 1989.
- Cabrera A. y Willink, A. Biogeografía de America Latina. Secretaría OEA, Programa Reg. De Desarrollo Cientifico y tecnológico. Monografías, n° 13, 1980.

- Cerúsico y Bocca. La Problemática Geoambiental del cerro San Bernardo en la ciudad de Salta. *XI Reunión de Estudiantes de Geología*, 2004.
- Cueto Vilches, J. El diaclasamiento de las formaciones rocosas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Salta. Inédito. 1969.
- Chafatinos, T. y Nadir, R.A. *Riesgos de erosión e inundaciones en el Cerro San Bernardo*. Monografía, Cátedra de Suelos, Escuela de Geología, UNSA, 1972.
- Deere, P.V. Technical description of cores for engineering purposes. *Felsmech Ingenieurgeol.* 1, 16-22, 1966.
- International Society for Rocks Mechanics. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rocks masses. *Int. J. Rock Mechanics and Min. Sci.* Vol-15, 319-318, 1978.
- International Society for Rock Mechanics. Basic Geotechnical Description of Rocks Masses. *Int. Journal Rock Mech.. Min. Sci.* 18, pp.85-110, 1981.
- Marcuzzi, J.J., Argañaraz, R.A., Bejerman, N.J. y Battaglia, R.R. El Empleo de Mapas Temáticos Geológicos Geotécnicos para la Planificación Urbanística de la Ciudad de Salta. *Pub. Esp. Asoc. Arg. Geol. Aplic. Ing.*, 1, pp 151-165, Córdoba, 1993.
- Marcuzzi, J.J., Wayne, W. y Alonso, R. Geologic Hazards of Salta Province, Argentina. *7<sup>th</sup> Congress of International Assoc. of Engineering Geology*, Lisboa, 5-9 Sept. 1994
- Marcuzzi, J.J. *Informe sobre las Características Geotécnicas y Riesgos Geológicos en las laderas de los Cerros San Bernardo y 20 de Febrero, de la ciudad de Salta*, Sec. de Obras Públicas de la Municipalidad de la ciudad de Salta. Decreto P.E.P. N°1783/93. Inédito, 1994.
- Marcuzzi, J.J. *Informe del Desarrollo Urbano y las características geotécnicas de los suelos y riesgos geológicos de la ciudad de Salta*. Sec. de Obras Públicas de la Municipalidad de la ciudad de Salta. Decreto Municipal N°443, Inédito, 1994.
- Marcuzzi, J. J., Nadir, A., Alonso, R., Peralta, M. y Argañaraz, R. Riesgos Geoambientales y Ordenamiento Territorial del Gran Salta. *Actas del XIII Cong. Geol. Arg. y III Cong. de Expl. de Hidrocarburos*, IV:463-479, 1996.
- Marcuzzi J.J., Torrejón, D., Bejerman, N. y Costilla, M. Geotechnical characterization of geoenvironmental units of the great Salta,

- Argentina. *8<sup>th</sup> Con. Of the Int. Assoc. For Eng. Geol. And Environment*. Vancouver, Canadá. Poster Session. 1998.
- Marcuzzi, J.J. Geotechnics Aspects and Geological Hazards of Salta City, Salta County, Argentina. *AEG Annual Meeting*, California. USA, 2000.
- Palmstrom, A. *Characterizing the degree of jointing and rock mass quality*. Internal report. Berdal, Oslo, 1975.
- Reese Voshell, J. Jr., Smith, E., Evans, S. y Hudy, M. Effective and Scientifically Sound Bioassessment: Opinion and Corroboration from Academe. *Human and Ecological Risk Assessment*. Vol 3, (6): 941-954, 1997.
- Romana M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En *Proc. Int. Symp. On the Role of Rock Mech.*, pp 49-53, Zacatecas, 1985.
- Romana, M. A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating. *Comprehensive Rock Engineering*. Vol 3, 575-600, Pergamon, 1993.
- Ruiz Huidobro O. y González Bonorino, F. La Estructura de la Sierra de Mojotoro y la Utilidad de la Cruziana como Indicador Estructural. *RAGA*, T VIII, n 4, pp 217-219, 1953.
- Ruiz Huidobro O. *Descripción Geológica de la Hoja 7e, Salta. Provincias de Salta y Jujuy*. Instituto Nac. de Geología y Minería. Ministerio de Economía y Trabajo. Buenos Aires, 1968.
- UNESCO. *Engineering Geological Maps: A guide to their preparation*. The UNESCO Press.15, Suiza, 1976.