

Zonificación Geotécnica Aplicada a Taludes Rocosos en el Cordón de Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina.

Enrique Quintana Crespo¹, Franco Primo Soffietti²

¹*Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.- Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Dirección Provincial de Vialidad. Córdoba, Argentina.*

²*Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.*

Fecha de recepción del manuscrito: 11/07/2020

Fecha de aceptación del manuscrito: 30/10/2020

Fecha de publicación: 31/10/2020

Resumen— El cordón de Sierra Chica forma parte de la región montañosa de la Provincia de Córdoba, con orientación meridional, limitado hacia el Oeste por el valle de Punilla, y hacia el Este por un piedemonte en transición hacia la Llanura Pampeana. En la zona de estudio presenta una geoforma con relieve escarpado en la ladera occidental, y suave en la oriental. El complejo metamórfico que integra la mayor parte del subsuelo rocoso ha sufrido el impacto de varios ciclos tectónicos generando macizos fracturados, alterados y meteorizados. La zonificación geotécnica realizada permitió la identificación y caracterización de unidades cartográficas en escala regional y de detalle: Series Litológicas, Complejos y Tipos Litológicos. En esta última unidad se diferenciaron los Tipos Geotécnicos, en base a la homogeneidad de sus propiedades físico-mecánicas, que fueron utilizadas para determinar la estabilidad de los cortes generados por la obra vial. Se estableció la existencia de 5.655 metros cuadrados de superficies de taludes en condición de inestabilidad (con coeficientes de seguridad menores a 1,20); 25.700 metros cuadrados de superficies estables; y 65.500 metros cuadrados igualmente estables, pero con un coeficiente de seguridad mucho más elevado que lo requerido por las especificaciones técnicas de la obra.

Palabras clave— zonificación, litología, geoformas, macizos rocosos.

Abstract— Sierra Chica it's a part of mountainous area at the Province of Córdoba, with a southern orientation, limited to the West by the Punilla Valley, and to the East by a piedmont in transition to the Pampean Plain. In the study area it presents a geoform with steep relief on the western slope, and smooth on the eastern one. The metamorphic complex that integrates most of the rocky subsoil has suffered the impact of several tectonic cycles generating fractured, altered and weathered massifs. The geotechnical zoning done allowed the identification and characterization of cartographic units on a regional and detailed scale: Lithological Series, Complexes and Lithological Types. In this last unit, the Geotechnical Types were differentiated, based on the homogeneity of their physical-mechanical properties, which were used to determine the stability of the cuts generated by the construction of the road. The existence of 5,655 square meters of slope surfaces in instability conditions (with safety coefficients less than 1.20) was established; 25,700 square meters of stable surfaces; and 65,500 square meters equally stable, but with a much higher safety coefficient than required by the technical specifications of the road.

Keywords— zoning, lithology, geoforms, rock massifs

INTRODUCCIÓN

La zonificación geotécnica consiste en la delimitación areal de cuerpos geológicos, con un grado de homogeneidad en su comportamiento geotécnico que depende fundamentalmente de la escala de trabajo.

La escala regional permite obtener valiosa información relacionada con los aspectos geoestructurales y litológicos, tal como el origen ígneo, metamórfico o sedimentario de los macizos rocosos y los procesos geodinámicos históricos o activos presentes en la región de estudio. La estabilidad de un talud rocoso es afectada por factores tales como la orientación del campo de esfuerzos regionales, el signo de los esfuerzos (compresión – tracción) y la presencia de fallas o zonas de cizalla.

La fuente de datos en la escala regional proviene, por lo general, de cartas geológicas y de imágenes satelitales. Los sistemas actuales de adquisición y manejo de datos georreferenciados permiten avanzar con facilidad en el proceso de acercamiento desde la escala regional a la

local y retroalimentar a la primera con los datos obtenidos mediante trabajo de campo de detalle. Las imágenes tomadas por drones desde alturas superiores a los cien metros son muy adecuadas para la definición de aquellas geoformas que podrían ser afectadas por cortes generados por obras de ingeniería y brindar un marco de referencia para los datos de campo relevados directamente sobre los taludes rocosos.

El juego de unidades taxonómicas definidas por la International Association of Engineering Geology (IAEG 1976, 1981) presenta un carácter jerárquico que permite reflejar esencialmente el condicionamiento de cada unidad a las características de la que la precede, facilitando el cambio de escala de trabajo desde la etapa de factibilidad geotécnica hasta el proyecto definitivo, la construcción y el relevamiento posterior de una obra de ingeniería.

Estas unidades de mapeo geotécnico han sido definidas del siguiente modo (IAEG, 1981):

Serie Litológica (SL): Comprende un grupo de Complejos Litológicos formado bajo condiciones paleogeográficas y geotectónicas similares. Se utilizan en mapas de pequeña escala (< 1:200.000).

Complejo Litológico (CL): Unidades de mapeo en pequeña a mediana escala (1:10.000 a 1:200.000). Comprende un número de Tipos Litológicos relacionados genéticamente, y desarrollados bajo las mismas condiciones paleogeográficas y geotectónicas.

Tipo Litológico (TL): Unidades de mapeo apropiadas para escalas regionales y medias, (1:5.000 a 1:10.000). Comprende un número de Tipos Geotécnicos estrechamente relacionados, con homogeneidad en su composición, textura y estructura, pero no necesariamente en su estado físico.

Tipo Geotécnico (TG): Escala de trabajo de mayor detalle (<1:5.000). Se definieron mediante el estudio de taludes rocosos generados por la obra vial. El TG presenta uniformidad en su litología y en sus características geotécnicas.

Antecedentes

La zonificación geotécnica ha sido utilizada en el territorio provincial de Córdoba, Argentina, para planificación urbana en zonas de llanura (Rocca y Quintana Crespo, 1999) y como base para la planificación ambiental de zonas de montaña (Peritano y Quintana Crespo, 2015; Quintana Crespo y Olivera Montes, 2015).

Uno de los trabajos más completos fue el desarrollado en la provincia de Córdoba por Del Río et al., (1982) con motivo de los estudios geotécnicos efectuados para la obra del Túnel de Restitución en el Complejo Hidroeléctrico de Río Grande. La importancia de la obra permitió la realización de ensayos in situ y de laboratorio, y establecer modelos de comportamiento geotécnico que constituyen un marco de referencia para los macizos rocosos del territorio provincial. La zonificación geotécnica se basó en la diferenciación de dos ambientes geológicos: el Ambiente Cerro Pelado (ACP) formado por gneis migmatítico y el Ambiente Contraembalse (AC) de gneis bandeado cubierto por regolito, separados ambos por fallas, y caracterizados cada uno de ellos por geoformas específicas: cerros en forma de domo y lomadas suaves respectivamente. En cada uno de los ambientes definidos mediante el análisis geológico y tectónico regional se consideraron las variaciones litológicas, de grado de meteorización y la existencia y tipo de relleno de las discontinuidades y su frecuencia.

Otros antecedentes de estudios de zonificación geotécnica se encuentran en los trabajos publicados por Quintana Crespo y Navarro (2015, 2016), donde se aplicaron para la determinación de la calidad de la conservación de una zona rural impactada por la minería, siguiendo la metodología de Centeno et al., (1994).

En forma más específica se han llevado a cabo zonificaciones geotécnicas para estudio de estabilidad de taludes rocosos en ferrocarriles (Quintana Crespo, 2010a; b), para autovías de montaña (Balbis, 2016; Balbis y Cerutti, 2019) y para movimientos de laderas (Beltramone, 2005).

Objetivos

El objetivo del presente trabajo consistió en realizar una zonificación geotécnica utilizando técnicas de

cartografía a distintas escalas, con el fin de caracterizar las condiciones de estabilidad de taludes en el área central del cordón de Sierra Chica mediante la determinación de unidades de mapeo geotécnico.

Área de estudio

El área de estudio se extiende entre los 64°37' y los 64°16' de longitud oeste y los 31°00' y los 31°38' de latitud sur, comprendiendo un área de 2.170 km² que cubre la parte central del cuerpo montañoso de Sierra Chica, cordón perteneciente a las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Fig. 1).

Las unidades de mapeo geotécnico de mayor jerarquía, las SL, fueron definidas para toda el área de estudio, donde se observa el predominio de rocas metamórficas (gneises, metatexitas e intrusivos graníticos del basamento cristalino), y geoformas características de montaña con elongación submeridional como resultado de la tectónica de compresión que afectó al cordón de Sierra Chica. Otras series subordinadas en extensión areal y geomorfológica, corresponden a unidades de piedemonte, sedimentos de llanura, fluviales, y coberturas eólicas.

Todo el basamento cristalino de Sierra Chica fue afectado por estos sistemas de fallas inversas longitudinales y transversales, que han venido manteniendo actividad durante el Terciario y Cuaternario generando sobrecorrimientos, así como la estructura imbricada que caracteriza el pie occidental. Finalmente queda compuesta una estructura morfogenética de "bloque de falla" sujeto a compresión y ascenso vertical (Carignano et al. 1999; Rabassa et al. 2010, 2014).

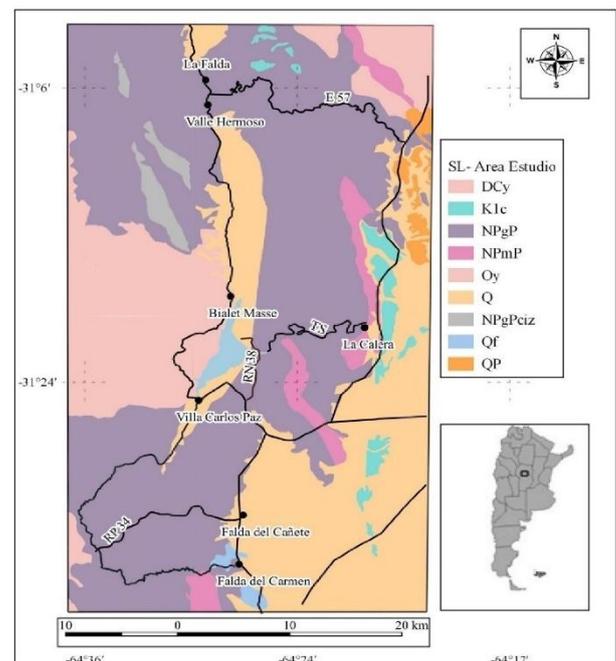


Fig. 1: Área de estudio y Series Litológicas. DCy: Granitoides Achalianos K1c: Sedimentitas continentales. NPgP: Complejo metamórfico La Falda; NPmP: Formaciones El Manzano y Mármoles; Oy: Granitoides Famatinianos; Q: sedimentos cuaternarios; NpgPciz: Metamorfitas zona cizalla; Qf: Cuaternario fluvial; QP: Piedemonte

Para la definición de las unidades de mapeo geotécnico de mayor detalle –Complejos y Tipos Litológicos– el área de estudio se limitó a la zona de

influencia de la RP34 E (Ruta Provincial 34 Este – Camino de las Altas Cumbres), establecida en base a las cuencas hídricas que atraviesa y que reciben el impacto de la obra vial.

METODOLOGÍA

Los nuevos métodos de adquisición de datos, tales como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), las fotografías aéreas tomadas con dron, desde alturas entre 50 y 120 metros y los Sistemas de Información Geográfica, permiten realizar análisis regionales y luego enfocarlos localmente de manera dinámica, de modo tal que las escalas de trabajo se modifican automáticamente, adaptándose a la estrategia del relevamiento requerido.

El análisis regional se desarrolló mediante la utilización de cartas geológicas producidas por el Instituto de Geología y Recursos Minerales del SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino). Las cartas utilizadas fueron las siguientes: Carta Geológica Los Gigantes- 3166-30 (1:100.000); Córdoba-3163 III (1:250.000); Valle de Calamuchita- 3166-36 (1:100.000), y Pampa de Olaen- 3166-24 (1:100.000).

La Carta Geológica Córdoba y Valle de Calamuchita, presentan una versión impresa del año 2006; la Carta Geológica Los Gigantes del año 2007 y la Carta Pampa de Olaen del año 2010. Todas están realizadas en Proyección Gauss – Krugger, con un Datum altimétrico (vertical) P.A.R.N. referido al nivel del mar como horizonte hipsométrico adoptado en el año 1924 para Mar del Plata; y un Datum Geodésico (horizontal) Campo Inchauspe, 1969.

El análisis geomorfológico se llevó a cabo mediante los Modelos Digitales de Elevación MDE-Ar-v2.0-30m, (disponibles en <https://www.ign.gov.ar>) producidos por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) que cubre la totalidad del territorio continental nacional, y cuya referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16), con una resolución espacial de 30 metros y una precisión vertical de aproximadamente dos metros.

Las cuencas hídricas se delimitaron utilizando el Módulo Grass de Qgis (Quantum Gis). Para ello se utilizaron los MDE del IGN, correspondientes a la zona de estudio: 3166-36-1-a/c y 3166-35-2-d/b.

Para la escala local se utilizaron los MDE aerofotogramétricos refinados que distribuye el IGN, con una resolución espacial de cinco metros y una precisión vertical submétrica.

El relevamiento geológico – geotécnico en taludes rocosos, se efectuó en campo con imágenes de dron DJi - Spark 4 -que permite tomas subverticales (85°) - desde 120 m de altura, apropiado para el análisis de laderas y horizontales a 1,50 m de la pared rocosa para el estudio de taludes generados (Fig. 2).

Para el acceso (ascenso y descenso) y relevamiento de discontinuidades en taludes (Fig. 3) se utilizó la metodología de Ortega y Quintana Crespo (2019). Los datos se volcaron a una planilla tipo (Tabla 1 y 2) confeccionada para cada sector de cada talud analizado.

El geoposicionamiento de los sitios de estudio se llevó a cabo mediante la utilización del software View Ranger,

que permite contar con un GPS (sistema de posicionamiento global) con una precisión del orden de los tres metros en escala horizontal, considerada adecuada para el relevamiento de las unidades cartográficas. El trabajo de georeferenciación cartográfica se realizó mediante el software Qgis, en Coordenadas Geográficas (Grados, Minutos y Segundos), con Elipsoide de referencia WGS84.

La determinación de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta se obtuvo mediante el uso del Martillo de Schmidt o Esclerómetro. El modelo de Esclerómetro utilizado fue el WM-250, de James Instruments, con 0.9 kg de peso y 267 mm de largo (con el vástago replegado). El modelo corresponde al tipo N, con una energía de impacto de 2,207 Nm, recomendado por la International Society of Rock Mechanics (ISRM) a partir del año 2009, por ser menos sensible a las irregularidades de las superficies ensayadas y más adecuado para el uso en macizos rocosos (Aydin, 2009), que los martillo tipo L (de menor energía de impacto) utilizados hasta ese momento.

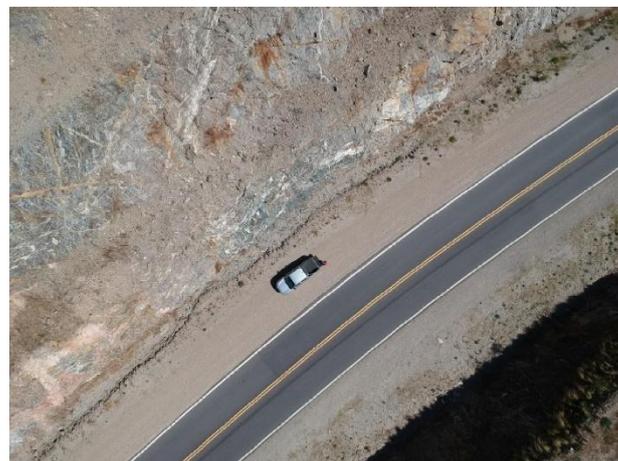


Fig. 2: Fotografía de dron subvertical (85°). Altura de toma 120 m. EG 30 (-60°28'16''O – 31°32'32''S). Altura de talud 25m.



Fig. 3: Relevamiento de datos geotécnicos en altura. Ascenso por falla en cuña

. Talud EG 23 (64°30.060 O - 31° 31.754 S)

TABLA 1: PLANILLA DE IDENTIFICACIÓN DEL TALUD ROCOSO Y ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA.

Identificación: RP34E - EG 23	Progresiva: 11.200 km	Coordenadas: 31° 31.754 S – 64°30.060 O
Talud Izquierdo Rumbo Medio: 30 °	Altura: 32 mts. (4 bancos) Longitud Total: 260 mts	Elevación: 842 m s.n.m



Croquis de ubicación del talud.

Características litológicas: Tipo Litológico 3.2: Gneis color gris claro, masivo. TG: 3.2.2 Gneis masivo

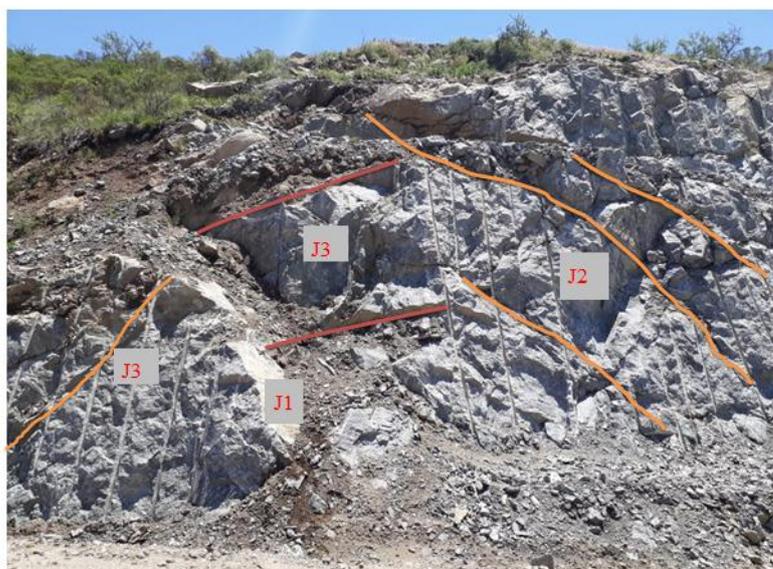
Ensayos de Esclerometría:

RN₁ (Rebote Esclerómetro) = 60 – 58 – 50 – 58 – 60 – 50 – 64 – 48 – 60 – 54 (en macizo golpe horizontal F 6.1)
RN_{1m} = 56 N_{1c} = 55

RN₂ (Rebote Esclerómetro) = 36 – 48 – 46 – 48 – 44 – 46 – 48 – 46 – 50 – 42 (en discontinuidad golpe hacia abajo F 6.2)
RN_{2m} = 45 N_{2c} = 46



Ubicación del Esclerómetro en el plano.



Juegos de discontinuidades relevados.

Para obtener los valores de resistencia a partir del número de rebotes del martillo se siguió la metodología de Miller (1965) obtenida originalmente para martillos tipo L. Para aplicar este método fue necesario convertir los valores resultantes de la esclerometría de R_N a R_L a partir de la correlación obtenida por Ayday y Göktan (1992), según la expresión:

$$R_L = (R_N - 7,124) / 1,249 \quad (1)$$

donde R_N = número de rebotes proporcionado por un martillo tipo N y R_L = número de rebotes obtenidos por un martillo tipo L.

TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE HOEK Y BROWN. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS INTRÍNSECOS DEL MACIZO.

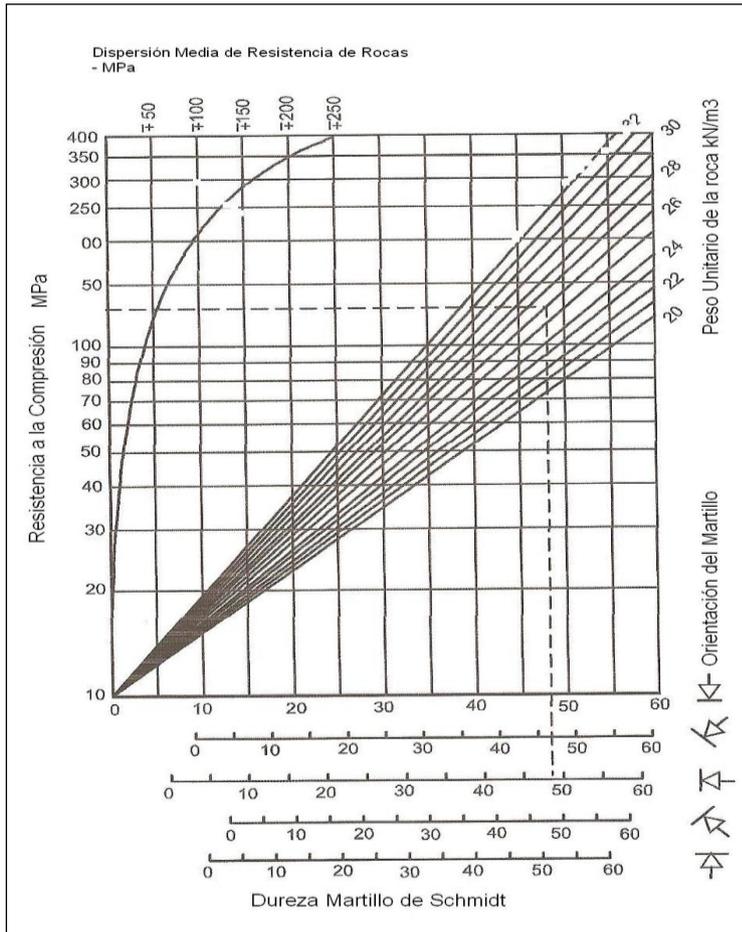


Gráfico de Miller (1965)

Para $R_{N1} = 55$ (Martillo tipo N)

$$(R_N - 7.124) / 1.249 = R_L = 38$$

Goktan y Ayday (1993)

De acuerdo al Gráfico de Miller (1965) para $R_L = 38$

$$R_c = 80 \pm 25 \text{ MPa}$$

Para el valor de $R_{N2} = 46$ (Martillo tipo N)

$$(R_N - 7.124) / 1.249 = R_L = 31$$

De acuerdo al Gráfico de Miller (1965) para $R_L = 31$

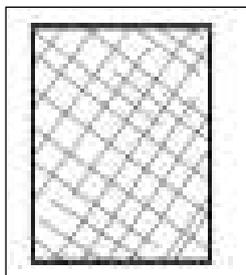
$$R_c = 62 \pm 15 \text{ MPa}$$

Clasificación de Hoek y Brown (Programa Roclab de Rocscience):

Resistencia a la compresión simple de la roca intacta $\sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$

(se adopta el máximo valor de resistencia del macizo de acuerdo a RL_{1c} y a datos propios del relevamiento de campo: golpes de martillo)

Geological Strength Index (GSI)



Clase 2: Bloques cúbicos, inalterados, formados por 3 juegos de discontinuidades bien trabados.

Subclase M-MB: GSI varía entre 85 y 65 cuando las condiciones superficiales de las discontinuidades son muy buenas: rugosas, no meteorizadas, ni alteradas;

$$GSI = 80$$

Se considera una altura de talud medio para el sector de 15 m., y se estima un Peso Unitario del macizo = $0,022 \text{ MN/m}^3$.

Constante de Hoek-Brown

$$mi = 31$$

RESULTADOS

Ángulo de Fricción: $\phi' = 68^\circ$

Cohesión: $c' = 2.12 \text{ MPa}$

CALIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

El método de Hoek y Brown

Este método publicado en 1980 (Hoek y Brown, 1980) y modificado por Hoek et al., (2002) ha sido utilizado para la obtención de los parámetros geotécnicos de los macizos rocosos. Se trata de un criterio de falla no lineal, empírico, que permite valorar la rotura de un macizo rocoso y estimar la resistencia pico de los mismos.

El criterio es válido para macizos rocosos compuestos por bloques angulares intertrabados en los que el proceso de falla está dominado por el deslizamiento y rotación del bloque sin fallas significativas de la roca intacta, bajo tensiones de confinamiento bajas a moderadas.

Datos de Ingreso

Como datos de entrada el método considera parámetros de la roca intacta: resistencia a la compresión no confinada (σ_{ci}) y la constante intrínseca m_i y de las condiciones del macizo: el Índice Geológico de Resistencia (GSI) (Hoek y Brown, 1980).

El criterio se expresa en la siguiente ecuación:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

donde σ'_1 y σ'_3 son las tensiones efectivas principales del macizo rocoso; σ_{ci} es la resistencia a la compresión no confinada, m_i es la constante de la roca intacta; m_b resulta de la reducción de m_i mediante la aplicación de s y a , que son dependientes de GSI y D:

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (3)$$

$$a = 1/2 + 1/6 (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

Datos de Salida

El criterio de Hoek y Brown (1980) permite obtener los siguientes valores del macizo rocoso: Resistencia a la compresión simple σ_{cm} , Módulo elástico de deformación E_m y los valores de cohesión (c') y fricción (φ).

Para la aplicación del método en taludes se debe conocer el valor de σ'_{3max} , que es el mayor esfuerzo de confinamiento sobre el cual la relación entre el criterio de Hoek-Brown y el de Mohr-Coulomb es aplicable. El valor de σ'_{3max} apropiado para definir los valores de cohesión y fricción en taludes rocosos, dependerá del factor de seguridad adoptado, la forma y la ubicación de la superficie de falla, fue definido por Hoek y Brown (1980), mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right) - 0,91 \quad (5)$$

donde σ'_{cm} es la resistencia del macizo rocoso, γ es el peso unitario de la masa rocosa y H la altura del talud.

Limitaciones del método

Para la aplicación del método a los taludes de la zona de estudio se debieron distinguir las situaciones previstas por Brown (2008), en relación a:

(1) El criterio no es de aplicación en los casos donde existe una o dos familias de discontinuidades principales que gobiernan el comportamiento del macizo. Ejemplo Talud EG 24- J1 (Fig. 4). Sí puede aplicarse en los casos en que la masa rocosa este afectada por 3 o más juegos de discontinuidades similares en persistencia. Por ejemplo: Talud EG 23 en la Tabla 3.

(2) Para rocas resistentes y masivas, con rotura frágil y valores del GSI mayores a 75, y para rocas débiles o muy tectonizadas con GSI por debajo de 30 y baja resistencia a la compresión, σ_{ci} , el criterio se debe aplicar con precaución.

(3) El factor de perturbación D está sujeto a errores significativos si se aplica a la totalidad del macizo rocoso en lugar de únicamente a una zona perturbada de unos pocos metros. Por ej. en el talud EG 25 de la Fig. 5 (Coord. 31° 32.213' S – 64° 28.866' O), la parte superior (gneis masivo) ha sido excavado con voladuras y técnicas de precorte (D = 0,7), en cambio la parte inferior (gneis esquistoso) mediante excavación mecánica (D = 0,5).



Fig. 4: Altura en la fotografía: 25 m. Talud EG 24 (31°31.559 S – 64°29.689 O).



Fig. 5: Altura en la fotografía: 18 m. Talud EG 25 (31° 32.213' S – 64° 28.866' O). Factor de perturbación D diferenciado.

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Se realizó de acuerdo a la metodología sugerida por IAEG (1976) mediante la delimitación de unidades de mapeo geotécnico. Para el análisis regional se utilizaron las Series Litológicas, definiéndose su homogeneidad litológica y geoestructural en base a la información provista por las cartas geológicas.

El análisis litológico refleja la presencia de macizos rocosos que integran el núcleo del cordón montañoso de Sierra Chica con edades variables (Tabla 3): Precámbrico, Ordovícico, Devónico, Cretácico, Neógeno y Cuaternario (Hoja Geológica Córdoba-3163 III, 2006).

Las condiciones geoestructurales definidas para las Series Litológicas responden a eventos tectónicos proterozoicos relacionados con el metamorfismo regional que produjeron rocas cataclásticas y ultramilonitas plegadas, tales como el Lineamiento Carapé, Quebrada Honda, etc. (Fig. 6). Además, fallas inversas terciarias como la de Sierra Chica, que han generado fajas cataclásticas con un ancho de decenas a centena de metros, representadas por brechas y microbrechas con harina de falla de color rojo y verde, y rocas de aspecto filonítico, intensamente cloritizadas y muscovitizadas. (Martino et. al, 2012).

COMPLEJOS LITOLÓGICOS

Los Complejos Litológicos son unidades de mapeo que surgen de la subdivisión de las Series Litológicas. La información provista por las cartas geológicas presenta una escala adecuada para la definición de Complejos Litológicos, no obstante, el área de estudio se restringió a la zona de influencia de la RP34 E para construir un marco de referencia para los datos recolectados en los taludes rocosos.

En el tramo de la RP34 E analizado, la Serie Litológica de mayor representación areal es la NPgP, integrada por macizos rocosos metamórficos de grado medio a alto: gneises y metatexitas del Proterozoico superior a medio; su geoforma característica corresponde al cordón montañoso de Sierra Chica con orientación submeridional y pendientes entre 25° y 53° en la ladera occidental y entre 17° y 25° en las laderas orientales.

En la Serie NPgP se distinguieron los siguientes complejos:

CL - Complejo Metamórfico La Falda (Fig. 7). Ubicado sobre la Carta Geológica Córdoba-3163 III. Paragneis feldespático, cuarzo biotítico muscovítico, bandeado intercalado con ortogneis leucotonalítico, escasos mármoles y rocas calcosilicáticas. Paleozoico (Cámbrico Inferior).

CL - Complejo Metamórfico Sierra Chica. Ubicado sobre la. Se trata de gneises biotíticos, granatíferos del Paleozoico (Cámbrico Inferior a Medio); y Metatexitas Granatíferas Cordieríticas del Paleozoico (Cámbrico Inferior a medio). Tamaño de grano grueso. Roca de alto grado de metamorfismo y estado masivo, con alguna foliación muy gruesa. Presentan texturas cataclásticas y miloníticas de metamorfismo dinámico (Fig. 8).

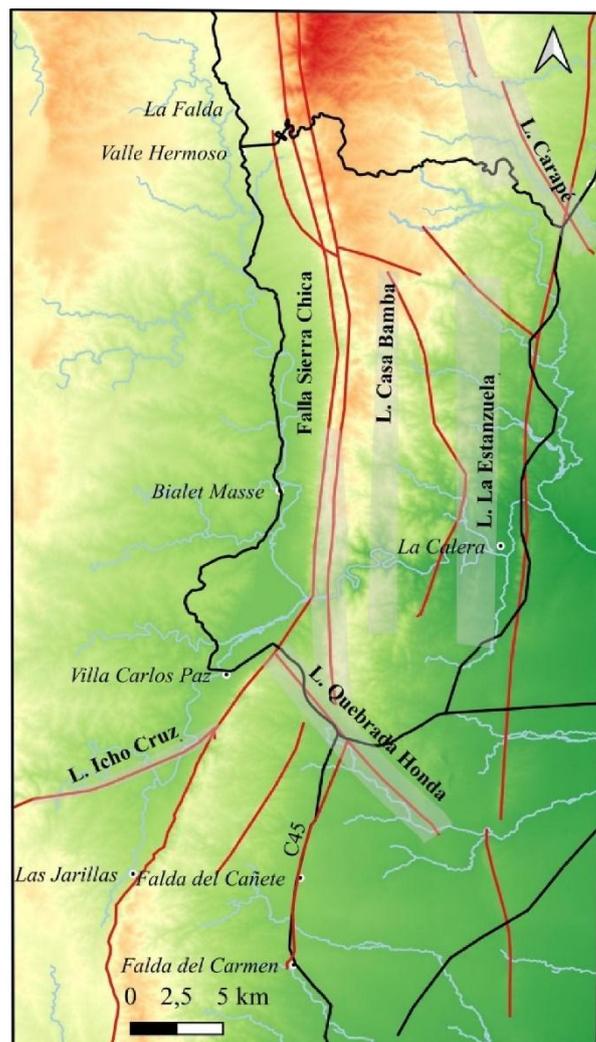


Fig. 6: Estructuras regionales. Principales fallas. Falla de Sierra Chica (líneas rojas) y Lineamientos Estructurales: L. Quebrada Honda, L. La Estanzuela, L. Icho Cruz, L. Casa Bamba.

TIPOS LITOLÓGICOS Y TIPOS GEOTÉCNICOS

En los Complejos Litológicos definidos se diferenciaron Tipos Litológicos simultáneamente con los Tipos Geotécnicos (Fig. 9 y 10). Estos últimos presentan el mayor grado de homogeneidad litológica y sus propiedades físicas (Cohesión y Fricción, Resistencia a la compresión y Módulo de Elasticidad) fueron caracterizadas estadísticamente a partir de los parámetros obtenidos para la aplicación del método de Hoek y Brown (1980): GSI (Geological Strength Index,; Resistencia a la compresión no confinada (σ_{ci}) y la constante intrínseca m_i .

El estudio se ha restringido a los TL y TG con características rocosas, donde debieron realizarse cortes por lo general mediante explosivos, dejando de lado aquellos formados por sedimentos no consolidados. En los cortes generados por la RP34 E se ha llevado a cabo la clasificación de los macizos rocosos mediante el método de Hoek y Brown.

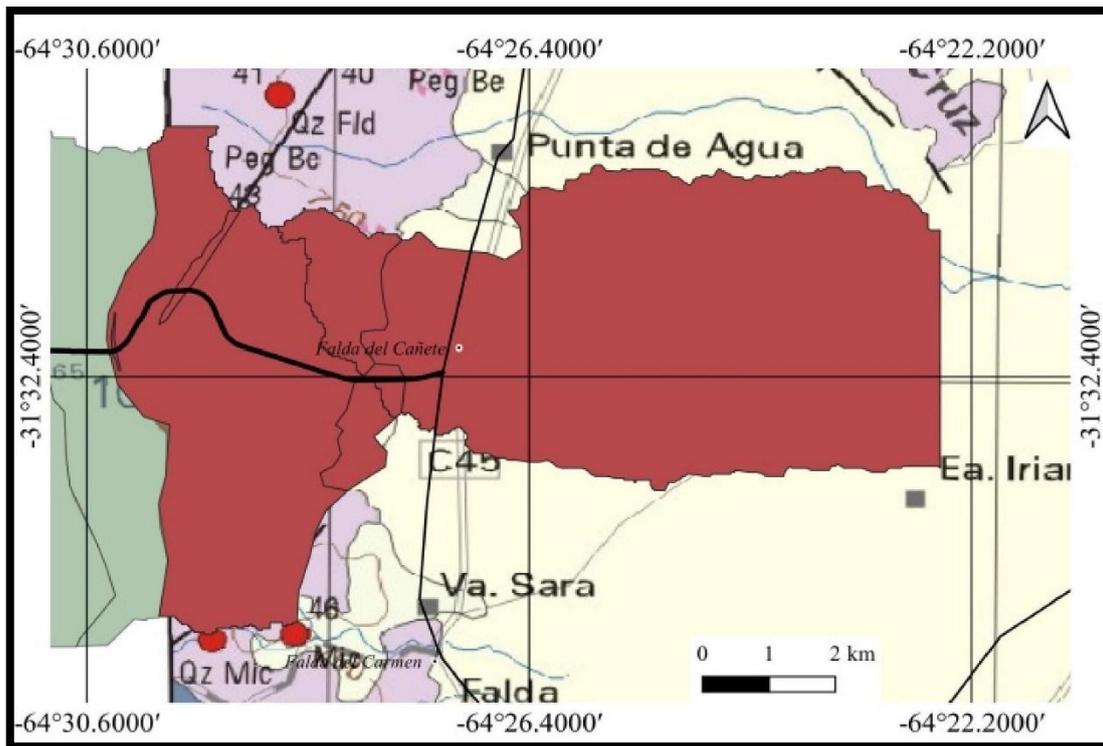


Fig. 7: CL La Falda, (color bordó) sobre Carta Geológica Córdoba 3163 III.

CL3 - Complejo Metamórfico La Falda

Dentro del CL 3 se realizó la siguiente clasificación:

TL 3.1 - Material regolítico caracterizado por fragmentos rocosos del basamento cristalino, con grado de meteorización muy elevado. En ciertos casos se observa un suelo residual esquelético, con un horizonte A incipiente en la parte superior. Forma la parte superior de los taludes que son generalmente trabajados con un perfil 1V:1H y excavados mediante maquinaria, sin explosivos.

TG 3.1.1: Corresponde a la fracción limosa de los sedimentos coluvionales donde se manifiesta también un aporte eólico.

TG 3.1.2: Corresponde a la fracción más gruesa de los sedimentos coluvionales, con una matriz limosa, pero presencia de fragmentos rocosos.

TG 3.1.3: Está formado por material regolítico con presencia de una matriz de roca fina y fragmentos rocosos gnéisicos.

TL 3.2 - Gneises masivos y esquistosos con meteorización superficial y alteración asociada a intrusiones de cuerpos pegmatíticos. Suelen presentar un grado de deformación elevado, produciéndose variaciones laterales entre ambos tipos de gneises. Están afectados por fallas pequeñas o medianas que producen la fragmentación elevada del material y alteración en los planos de falla. Con la profundidad, el confinamiento produce menor apertura de los planos de esquistosidad.

TG 3.2.1: Gneises esquistosos afectados por lineamientos tectónicos afines a la esquistosidad, con grado de fracturación elevado, lo cual permite la acción de la meteorización en todo el macizo rocoso (Fig. 11).

TABLA3: SERIES LITOLÓGICAS DEFINIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Series	Nombre	Ambiente	Edad	Litología	Unidades
NPgP	Metamorfitas de grado medio a alto.	Orogenia Pampeana	Proterozoico medio a superior	Gneises y Metatexitas	Complejo metamórfico La Falda y Cruz del Eje
NPmP	Mármoles Pampeanos	Orogenia Pampeana	Proterozoico superior	Mármoles	Formaciones El Manzano y Mármoles
N2c	Sedimentitas continentales	Ambiente continental fluvial.	Neógeno	Areniscas, conglomerados y arcilitas	Grupo Santa María
Oy	Granitoides Famatinianos	Margen convergente, Arco magmático continental.	Ordovícico	Granodioritas, Tonalitas	Complejos Magmáticos Nuñorco, Sañogasta, Valle Fértil y equivalentes
K1c	Sedimentitas continentales	Ambiente continental fluvial.	Cretácico	Areniscas y conglomerados	Grupo El Gigante, Fm. Río Copacabana Saldán
DCy	Granitoides achalianos	Margen convergente	Devónico – Carbonífero	Monzogranitos	Batolito de Achala, Comechingones.
Q	Sedimentos Cuaternarios		Pleistoceno Holoceno	Gravas, limos y arenas Limos y arenas	Fm. Pampeana Fm La Invernada Piedemonte Fm Río La

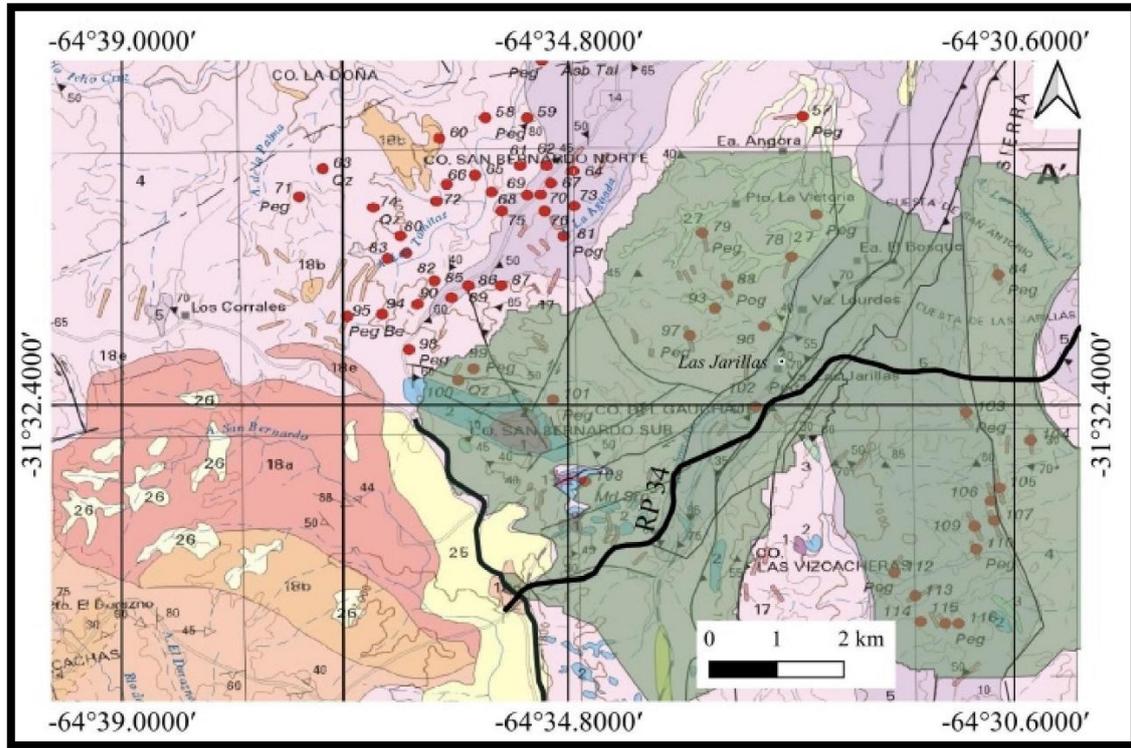


Fig. 8: CL Sierra Chica en color verde sobre Carta Geológica Los Gigantes 3166-30.

TG 3.2.2: Gneises masivos, con fracturación discontinua, bloques grandes, bajo grado de meteorización. Con intrusivos pegmatíticos o aplíticos en condición similar de fracturación (Fig. 12).

En cuanto al TG 3.2.1 tanto el ángulo de fricción medio (47°) como la cohesión media (0,16 MPa) presentan una dispersión elevada, propia de las condiciones de heterogeneidad de este tipo de rocas, donde la orientación de la esquistosidad afecta, entre otras cosas, a la profundidad de meteorización y consecuentemente a los valores de cohesión y fricción (Tabla 4).

En la población analizada para el TG 3.2.2, se descartó el valor de cohesión y fricción de aquellas zonas del macizo afectadas por fallas, que fueron consideradas independientemente (Fig. 13). El TG3.2.2F, fue identificado en el EG 26, donde, por el plano de falla, se ha intruido un cuerpo pegmatítico que constituye una cadena de cerros alineados, en la que se destaca el C° Don Daniel (Fig. 14). Un resumen de los resultados de los TG 3.2.1 y 3.2.2 es mostrado en la Tabla 5.

Tabla 4: Cohesión y Fricción de las unidades TG 3.2.1 y TG 3.2.2.

EG	TG	Sup. (m ²)	RCS	GSI	mi	ϕ (°)	c' (MPa)
22	3.2.2*	1455	28	25	17	37	0,08
	3.2.2	3315	84	73	30	66	1,44
23	3.2.1	816	14	15	18	23	0,04
	3.2.2	3744	92	67	33	65	1,4
24	3.2.1*	4200	14	35	13	31	0,13
	3.2.2	2400	48	65	33	61	0,57
25	3.2.1	800	28	60	13	54	0,25
	3.2.2	1200	62	80	33	68	1,33
26	3.2.1	672	28	45	13	52	0,1
	3.2.2	1176	40	60	33	66	0,24
32	3.2.1	2720	28	60	13	54	0,25
	3.2.2	1280	45	70	33	65	0,57
31	3.2.1	1280	28	50	13	54	0,12
	3.2.2	1280	45	50	33	64	0,16
30	3.2.1	720	31	60	13	58	0,23
	3.2.2	192	31	60	23	62	0,2

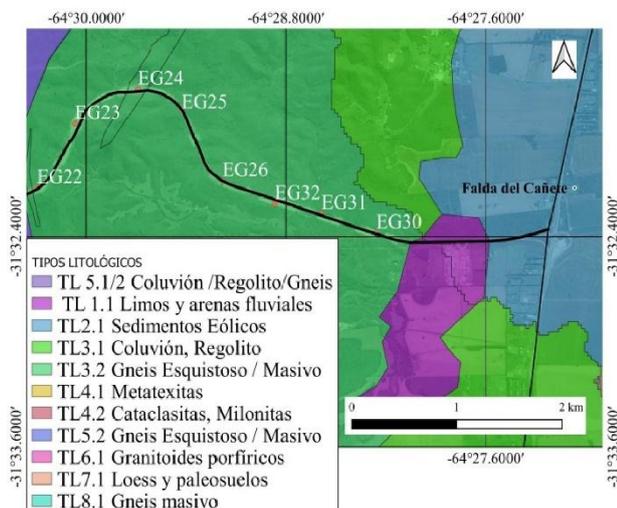


Fig. 9: Estudios geotécnicos realizados en taludes correspondientes a los diferentes Tipos Litológicos referenciados en la Tabla 8.

3.2.3 48 95 75 16 64 1,84

Tabla 5: VALORES DE COHESIÓN Y FRICCIÓN EN LOS TG 3.2.1 Y TG3.2.2.

TG	c' (MPa)		φ (°)	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
3.2.1	0,16	0,56	47	13,18
3.2.2	0,74	0,53	65	2,12

Complejo Litológico CL 4

Este CL está compuesto por Metatexitas Granatíferas Cordieríticas. Paleozoico (Cámbrico Inferior a medio).

TL 4.1 - Metatexitas masivas. Macizo rocoso de muy buena calidad, con bloques grandes, inalterados.

TG 4.1.1: Metatexitas masivas. Es el macizo rocoso de mejor calidad que se encuentra en toda la zona de estudio. Rocas homogéneas, masivas, con elevado grado de metamorfismo. El TG 4.1.1 ha sido identificado en los EG 17, 18 y 19, determinándose los parámetros que se muestran en la Tabla 6. La Resistencia a la Compresión Simple (RCS) ha sido determinada por Esclerometría.

El EG 17 se encuentra en el talud más cercano a la Falla de Sierra Chica, siendo notoria la presencia de fallas transversales horizontales y fallamientos localizados que afectan la integridad del macizo. La calidad del material rocoso es elevada, y las superficies de las discontinuidades son por lo general buenas, por lo que las mayores variaciones se podrán observar en el GSI, para la clasificación de Hoek y Brown.

TL4.2 - Corresponde a la faja de deformación cataclástica producida por la Falla de Sierra Chica que genera el resalto topográfico de la ladera occidental de

esa cadena orográfica. Las cataclasitas originadas por la deformación de la roca presentan fractura, rotación y fragmentación de los granos minerales originales, con intensidad variable en función de las tensiones actuantes. En el proceso la roca metamórfica queda formada por fragmentos de tamaño variable inmersos en una matriz más fina de composición similar.

El TG 4.2.1 ha sido identificado como brechas tectónicas y cataclasitas de grano grueso, con bloques angulares de resistencia friccional elevada, en los EG 15 y EG 16, realizados en taludes de 48 m de altura, con cota en la base de 883 m.s.n.m. Al pie del talud EG15 se puede observar ultracataclasitas (arcilla o jaboncillo de falla) (Fig. 15).

Estos taludes son los de mayor altura y se construyeron en la primera etapa de la obra contando con más de 4 años de antigüedad para la época en que se realizó el relevamiento.

Los bloques rocosos insertados dentro de la masa presentan zonas donde predominan con respecto a la masa y otros en los que ocurre a la inversa. Los valores de resistencia a la compresión simple, GSI y m_i , fueron determinados en sitios representativos de cada sector, arribándose de acuerdo de la metodología de Hoek y Brown a valores de fricción y cohesión del macizo similares (Tabla 7).

TG 4.2.2 En el sector de fundación de los viaductos la roca encontrada en profundidad corresponde a milonitas y gneis, generados por el intenso metamorfismo dinámico desarrollado en coincidencia con el pie de la Falla de Sierra Chica.

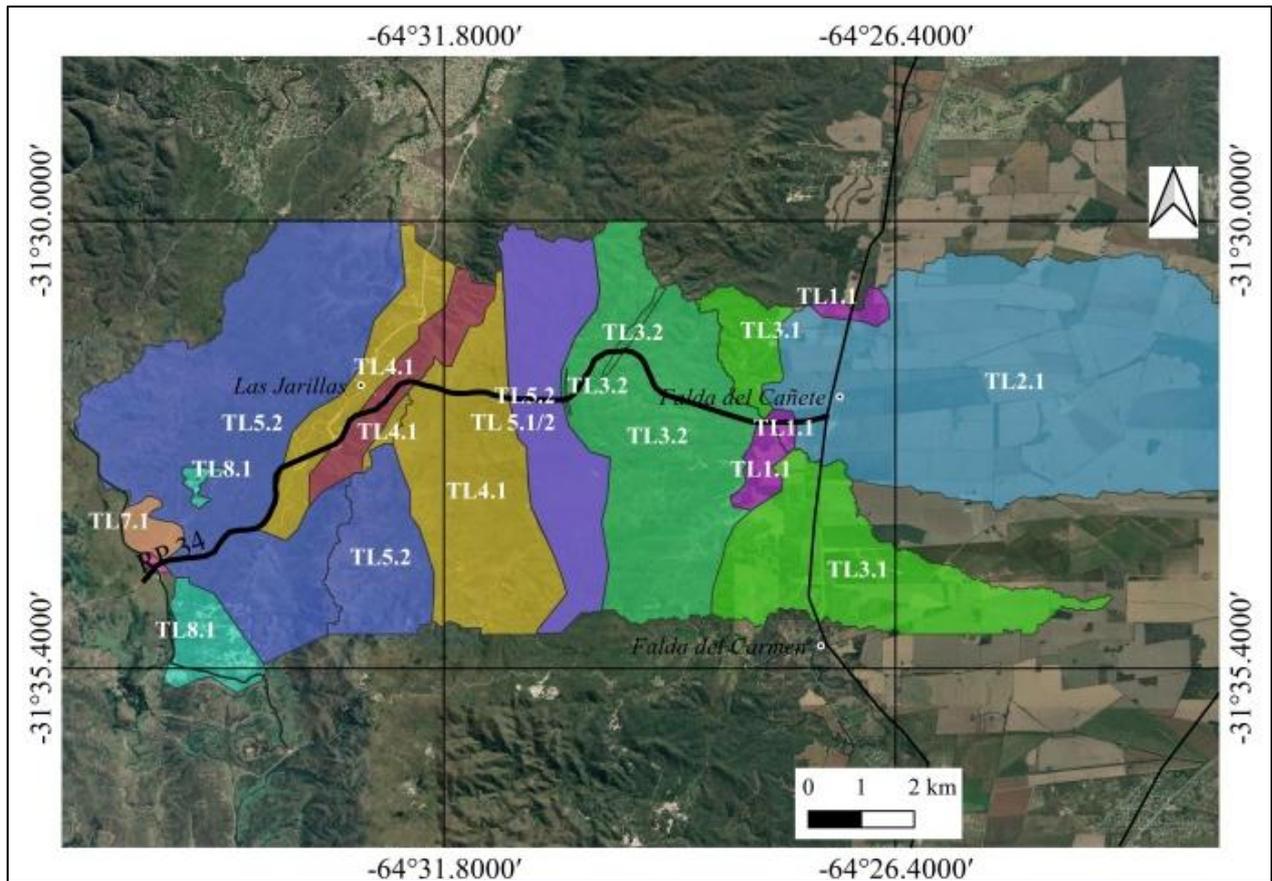


Fig. 10: Ubicación de Tipos Litológicos en el área de estudio.



Fig. 11: Gneis esquistoso. Altura de banco = 8.00 m. Talud EG26.
Coordenadas: 31° 32.081S - 64°29.181 O

Complejo Litológico CL 5

Este CL está compuesto por Gneises biotíticos, granatíferos, sillimaníticos, cordieríticos. Paleozoico (Cámbrico Inferior a Medio).

TL 5.1 - Presenta las mismas características que el TL 3.1, formado por material regolítico con presencia de una matriz de roca fina y fragmentos rocosos gnéisicos. Constituyen la parte superior de los cortes y son excavados mediante maquinaria pesada, con perfil 1V:1H.

TL5.2 - presenta las mismas características que el TL 3.2, y se encuentra presente tanto en la cuenca del A° Almacuna (vertiente oriental de Sierra Chica) como en la

del A° San Antonio (vertiente occidental de Sierra Chica).

Debido a la existencia de la Falla de Sierra Chica se han tratado por separado los perfiles geológicos obtenidos de los cortes del macizo (Fig. 15).

En la cuenca del A° Almacuna se encuentran presente los TG 5.2.1 y 5.2.2 en los EG 20 y 21, determinándose los siguientes parámetros (Tabla 8).



Fig. 12: Gneises masivos en grandes bloques. Talud EG14
Coordenadas: 64.5629° O - 31.5501°S



Fig. 13: TG 3.2.2F. Influencia de las zonas de falla. Talud EG 26 (31° 32.081S – 64°29.181 O). Altura de talud: 32 m.

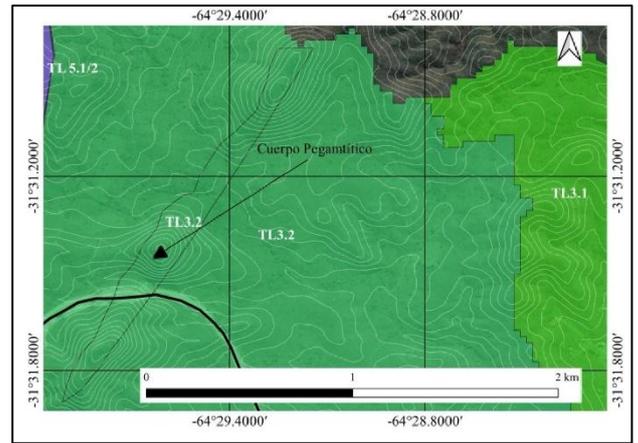


Fig. 14: TG 3.2.1F, con influencia de falla regional e intrusión de un cuerpo pegmatítico.

En el EG 20, el TG 5.2.1 se distribuye como una capa superior al TG 5.2.2, caracterizándose el primero por una marcada esquistosidad subhorizontal, a lo largo del todo el corte. Por ello las áreas conformadas por cada tipo geotécnico se dividieron en dos partes iguales.

La fricción en los gneises masivos del TG 5.2.2 presenta un valor medio de 62° y la cohesión un valor medio de 0,58 MPa. En cuanto al TG 5.2.1 el ángulo de fricción medio es de 47°, y la cohesión media igual 0,19 MPa.

TABLA 6: PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN DE HOEK Y BROWN PARA EL TG 4.1.1

EG	H (m)	Sup. (m ²)	RCS	GSI	m _i	φ (°)	c (MPa)
17	24	2400	36	65	30	61	0,41
		648	31	55	28	57	0,25
		2832	42	75	33	64	0,77
18	24	3000	31	55	28	57	0,25
		1800	36	65	30	61	0,41
		2400	42	75	33	64	0,77
		1680	42	75	33	64	0,77
19	24	720	42	75	33	64	0,77
		600	42	75	33	64	0,77
		240	42	75	33	64	0,77
		120	42	75	33	64	0,77
		1560	42	75	33	64	0,77
		240	42	75	33	64	0,77
Promedio			39	70	32	62	0,63
Desv. Estándar			4	7	2	2,47	0,20

TABLA 7: CALIFICACIÓN DE LOS TG 4.2.1 CONFORME A LOS PARÁMETROS DE HOEK Y BROWN.

E.G.	Sup. (m ²)	H (m)	RCS (MPa)	GSI	m _i	φ (°)	c' (MPa)
15 – I	3500	35	45	35	24	43	0,27
15 – II	4000	50	45	20	24	35	0,16
16 – I	3500	35	55	35	24	43	0,27
16 – II	5000	50	55	20	24	35	0,16



Fig. 15: Talud rocoso en zona de falla de Sierra Chica, (Coord.: -64°33'; -31°32'33") con presencia de rocas muy fracturadas y cataclasitas. Altura de talud = 8 m.

TABLA 8: CALIFICACIÓN DE LOS TG 5.2.1 Y 5.2.2 CONFORME A LOS PARÁMETROS DE HOEK Y BROWN. CUENCA DEL ARROYO ALMACUNA

EG	Sup. (m ²)	T.G.	H (m)	RCS (MPa)	GSI	m _i	φ (°)	c' (MPa)
20	1320	5.2.1	24	28	50	13	47	0,19
	1320	5.2.2	24	95	50	33	62	0,4
	300	5.2.1	24	28	50	13	47	0,19
	300	5.2.2	24	95	50	33	62	0,4
21	1140	5.2.1	24	28	50	13	47	0,19
	1140	5.2.2	24	95	50	33	62	0,4
	80	5.2.2	8	95	75	33	66	1,5
	680	5.2.2	34	95	55	33	68	0,33
	1360	5.2.2	34	95	75	33	66	1,5
	680	5.2.2	34	95	75	33	66	1,5
	850	5.2.2	34	95	40	33	56	0,35
	480	5.2.2	8	95	55	33	68	0,33
600	5.2.2	8	95	55	33	68	0,33	
Promedio		5.2.1					47	0,19
Desv. Est.		5.2.1					0	0
Promedio		5.2.2					62	0,58

Desv. Est.	5,22	3,7	0,52
------------	------	-----	------

En la cuenca del A° San Antonio se encuentran presente los TG 5.2.1 y 5.2.2 en los EG 12, 13 y 14, determinándose los siguientes parámetros (Tabla 9).

Complejo Litológico CL 6

El CL 6 está compuesto por Granitos Porfídicos de grano medio, con biotita y muscovita.

TL 6.1 - Se trata de los primeros afloramientos del batolito granítico de Achala, escasamente representados en el área de estudio. No existen cortes en esta litología.

Complejo Litológico CL 7

Depósitos de conos de deyección. loess, calcretes, arenas medias, gravas fluviales no consolidadas. (Cuaternario. Pleistoceno Medio). No existen cortes en esta litología

TL7.1 - Materiales gruesos del piedemonte occidental de Sierras Chicas. Pueden observarse en los cortes del nuevo camino de Las Jarillas a San Antonio de Arredondo. No existen cortes en esta litología.

TABLA 9: CALIFICACIÓN DE LOS TG 5.2.1 Y 5.2.2 CONFORME A LOS PARÁMETROS DE HOEK Y BROWN. CUENCA DEL ARROYO SAN ANTONIO.

EG	Sup. (m ²)	H (m)	RCS (MPa)	GSI	m _i	φ (°)	c' (MPa)
12-1 (5.2.2)	2125	25	91	60	33	66	0,75
12-2 (5.2.2)	6360	40	91	65	33	63	0,88
12-3 (5.2.2)	4360	40	91	65	33	63	0,88
12-4 (5.2.3)	2360	40	50	80	28	63	1,32
12-5 (5.2.2)	4000	40	108	65	33	64	0,91
13-1 (5.2.2)	450	15	109	65	32	68	0,77
13-2 (5.2.1)	1650	15	47	65	13	56	0,52
13-3 (5.2.2)	1650	15	83	75	33	68	1,24
14-1 (5.2.1)	1350	15	47	65	13	56	0,52
14-2 (5.2.2)	1350	15	83	75	33	68	1,24
Promedio (5.2.1)						56	0,52
Desv. Est. (5.2.1)						0	0
Promedio (5.2.2)						66	0,98

Desv. Est.(5.2.2)	2,2	0,19
-------------------	-----	------

Complejo Litológico CL 8

Corresponde a la Serie NPmP: mármoles calcíticos y dolomíticos, dentro del basamento cristalino. Son explotados en canteras de la zona de Bosque Alegre. No existen cortes en esta litología

TL 8.1 - Mármoles calcíticos, dolomíticos. Observados en el estudio EG11, donde ha ocurrido una caída de bloques generada por un diaclasamiento profundo que existe en este filón subvertical, donde también pueden observarse anfibolitas.

RESULTADOS

El resumen de las unidades cartográficas definidas, se presenta la Tabla 10.

Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

Se realizaron más de 600 determinaciones del número de rebotes del Martillo de Schmidt (Esclerometro). En la Fig. 16 se muestran las distribuciones normales de σ_{ci} para cada TG obtenido en la etapa de evaluación. En la leyenda del gráfico se muestran los valores promedios de cada TG. Se observa que la presencia de esquistosidades en los gneises de los C.L. 3 y 5 disminuye significativamente los valores de σ_{ci} . La resistencia a la compresión simple promedio del T.G. 3.2.1 (gneis esquistoso) es 2.68 veces menor que el gneis masivo del T.G. 3.2.2. La misma relación entre los T.G. 5.2.1 y 5.2.2 es de 2.16.

La metodología propuesta por Deere y Miller para obtener σ_{ci} a partir del número de rebotes presenta mayor dispersión de resultados mientras más resistente es la roca. Esta tendencia puede verse en la Fig. 17, donde en términos generales se observa que, a menor σ_{ci} , más angosta es la campana de distribución.

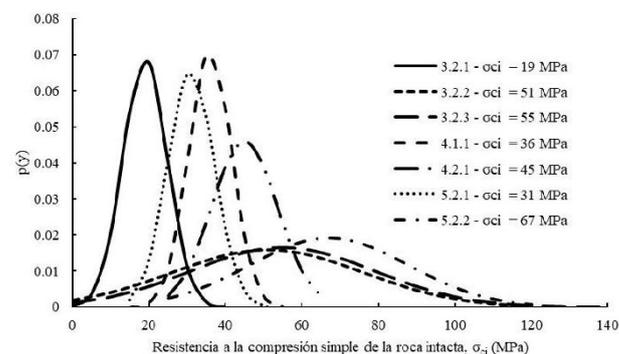


Fig. 16: Distribución normal de la resistencia a la compresión simple de cada TG.

APLICACIÓN A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES ROCOSOS

Los Tipos Geotécnicos definidos mediante el relevamiento de los taludes generados para la obra vial de montaña RP34 E muestran resultados de cohesión y

fricción del macizo rocoso que se pueden integrar en tres grupos.

La Granja.
Fluvial.
Holoceno

arenas
fluviales.

TABLA 10: RESUMEN DE UNIDADES CARTOGRÁFICAS DEFINIDAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Serries Litológicas	Complejos Litológicos	Cartas SEGEMAR	TL	TG	Materiales	
NPgP	3/4: Complejo Metamórfico La Falda.	Córdoba	3.1	3.1.1	Coluviación	
				3.1.2	Cubierta meteorizada	
				3.1.3	Regolito	
			3.2	3.2.1	Gneis Esquistoso	
				3.2.2	Gneis Masivo	
				3.2.3	Pegmatitas	
			4.1	4.1.1	Metatexitas	
				4.2	4.2.1	Cataclasitas
					4.2.2	Milonitas
	5.1	Los Gigantes	5.1.1	Gneis Esquistoso		
			5.1.2	Gneis Masivo		
			5.1.3	Pegmatitas		
	NPmP	Formación El Manzano. Mármoles	Córdoba	8.1	8.1.1	Mármoles
Mármoles calcíticos y dolomíticos		Los Gigantes	8.1	8.1.1	Mármoles	
N2c		Córdoba			Sedimentos Neógenos Fm. Cosquín	
Oy	Granito Candonga	Córdoba			Granito Candonga	
K1c	Formación Saldán.	Córdoba			Sedimentos Cretácicos	
DCy	6: Granitoides porfíricos gruesos	Córdoba	6.1	6.1.1	Batolito de Achala	
	Complejo Granítico Achala	Los Gigantes	6.1	6.1.1 6.1.2	Batolito de Achala	
	Complejo Granítico Achala	Calamuchita			Batolito de Achala	
Q	7: Fm Pampeana. Pleistoceno Superior.	Córdoba	7.1		Formación Pampeana. Loess	
	2: Fm. La Invernada. Loess. Pleistoceno Superior	Córdoba	2.1	2.1.1	Sedimentos eólicos.	
	1: Fm. Río	Córdoba	1.1	1.1.1	Limos y	

Es posible identificarlos con criterio semafórico: rojo para aquellos valores bajos ($c < 0,16$ MPa y $\phi < 40^\circ$) que representan materiales afectados por fallas inversas; amarillo ($c < 0,30$ MPa y $\phi < 50^\circ$) que incluye en gran parte a los gneises esquistosos y cataclasitas de zona de falla de Sierra Chica y finalmente verde, para los gneises masivos y metatexitas ($c > 0,30$ MPa y $\phi > 55^\circ$) como se observa en la Tabla 11.

TABLA 11: CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS GEOTÉCNICOS EN BASE A SU COHESIÓN Y FRICCIÓN

TG	Sup. (m2)	ϕ (°)		c' (MPa)	
		Medio	Desv. Est.	Medio	Desv. Est.
3.2.1	7.000	47	13,18	0,16	0,56
3.2.1 F	4.200	31	-	0,13	-
3.2.2	14.600	65	2,12	0,74	0,53
3.2.2 F	1.500	37	-	0,08	-
3.2.3	48	64	-	1,84	-
4.1.1	18.200	62	2,47	0,63	0,2
4.2.1	16.000	43	-	0,27	-
5.2.1E	2.760	47	-	0,19	-
5.2.2E	7.490	62	3,7	0,58	0,52
5.2.1O	3.000	56	-	0,52	-
5.2.2O	19.800	66	2,2	0,96	0,2
5.2.3	2.360	63	-	1,32	-

La estabilidad de los taludes rocosos se puede analizar a la luz de los datos obtenidos en esta etapa de evaluación determinando su coeficiente de seguridad. Los macizos de Sierra Chica han sido sometidos a tres importantes ciclos orogénicos que los han fracturado, plegado, cizallado, etc. Consecuentemente en la mayoría de los taludes, existen 3 o más juegos de discontinuidades, con un tamaño medio de bloque de $0,50 \text{ m}^3$, por lo que se considera de aplicación el criterio de Hoek y Brown.

De acuerdo a las definiciones de proyecto, los taludes de la RP34 E, han sido construidos con pendiente 1H:2V, con bancos de 8,00 m. de altura y bermas de 2,5 m de ancho.

Para el análisis de la estabilidad de los taludes construidos sobre los distintos Tipos Geotécnicos, se realizó una modelación considerando el caso de un talud de 64 metros de altura en 6 bancos y 16 metros de ladera superior, con pendiente 2V:1H.

Las condiciones sísmicas se representaron a través de un coeficiente de carga sísmica horizontal igual a 0.12, positivo en la dirección de la falla y un coeficiente vertical de 0,05 positivo en sentido descendente. De ese modo la carga sísmica estará representada por el peso de la cuña o faja deslizante por los coeficientes respectivos. Estos coeficientes son derivados del Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes-CIRSOC 103 valorados en función de la proximidad de la Falla de Sierra Chica.

En cuanto al agua subterránea, se ha supuesto la existencia de una capa freática con relativa cercanía al perfil excavado.

Se han calculado los factores de seguridad derivados del desarrollo de superficies consideradas “profundas”, es decir que afecten al macizo rocoso a una cierta distancia respecto de la superficie del corte. Se han considerado como factores de seguridad de aplicación los siguientes valores:

- a) Factor de seguridad en condiciones estáticas: 1,50.
- b) Factor de seguridad nivel freático alto: 1,20.
- c) Factor de seguridad en condiciones sísmicas: 1,15.

La modelación ha sido realizada para una condición de equilibrio límite bajo el modelo de Bishop por el sistema de dovelas.

Los TG identificados con color rojo y con la letra F para significar zonas de falla (TG 3.2.1F y 3.2.2F), analizados en condiciones sísmicas y con nivel freático alto, muestran FS menores a 1,20 (Tabla 12 y Fig. 17), con lo cual no presentan condiciones de equilibrio global, para las condiciones supuestas de homogeneidad y constancia en los parámetros resistentes.

TABLA 12. COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE TALUDES PARA CADA TIPO GEOTÉCNICO.

TG	Sup. (m2)	ϕ (°) Promedio	c' (MPa) Promedio	F.S.
3.2.1	7.000	47	0,16	1,72
3.2.1 F	4.200	31	0,13	1,08
3.2.2	14.600	65	0,74	3,82
3.2.2 F	1.500	37	0,08	0,81
3.2.3	48	64	1,84	10,2
4.1.1	18.200	62	0,63	3,36
4.2.1	16.000	43	0,27	1,39
5.2.1E	2.760	47	0,19	1,93
5.2.2E	7.490	62	0,58	4,4
5.2.1O	3.000	56	0,52	4
5.2.2O	19.800	66	0,96	6,2
5.2.3	2.360	63	1,32	7,7

Esto significa que, para construir el talud proyectado se deben tomar medidas de soporte y estabilización de un área de 5.655 m².

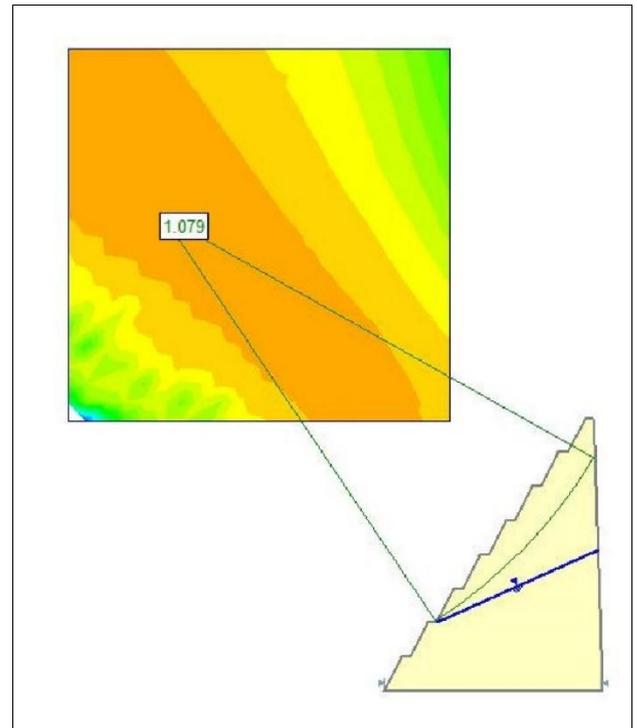


Fig. 17: Factor de seguridad del TG 3.2.2F con condición sísmica y presencia de agua freática a media altura del talud. Talud EG24 (64°30' y 31°31'29) afectado por una falla regional.

Los taludes identificados con color amarillo se analizaron siempre en iguales condiciones de sismicidad y agua subterránea, obteniéndose valores de Factor de Seguridad que superan el mínimo solicitado para este tipo de obras, significando que una superficie de cortes de 25.760 m², se encuentra en buenas condiciones de estabilidad global (Fig. 18).

En cuanto a los taludes identificados en verde los FS calculados superan entre un 200% y un 1000% a los solicitados para este tipo de obra. La superficie de los taludes incluidos es de 65.500 m² (Fig. 19).

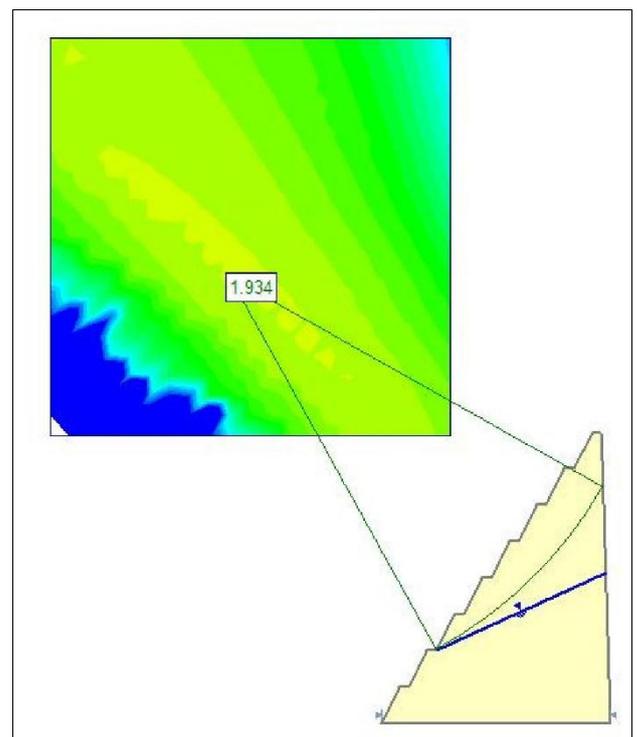


Fig. 18: TG 5.2.1E – Se aplica al caso del Talud EG 21. (64°30'39" – 31° 32'09") Factor de seguridad en condiciones sísmica y con presencia de agua freática.

CONCLUSIONES

La zonificación geotécnica realizada sobre el macizo rocoso de Sierra Chica permitió establecer diferentes unidades de mapeo acordes a la escala de trabajo. De ese modo se delimitaron las Series Litológicas, SL: NPgP; NPmP; N2c; Oy; K1c; DCy; Q; manteniéndose las nomenclaturas de las cartas geológicas tomadas como base para el análisis.

Por su parte en la Serie NPgP se diferenciaron los Complejos Metamórficos La Falda y Sierra Chica y en ellos, los Tipos Litológicos, TL3.1 (Regolito); TL3.2 (Gneis esquistoso, gneis masivo y pegmatitas); TL4.1 (Metatexitas, Cataclasitas y Milonitas) y TL5.1 (Gneis Esquistoso, Gneis Masivo y Pegmatitas).

La definición de los Tipos Geotécnicos se llevó a cabo mediante el relevamiento in situ de taludes rocosos utilizando la metodología de Hoek y Brown, para lo cual se supuso a los macizos homogéneos en sus propiedades físico-mecánicas. La tectónica compleja que afectó a la zona de estudio produjo esas condiciones a través de varios juegos de discontinuidades sin orientaciones preferenciales.

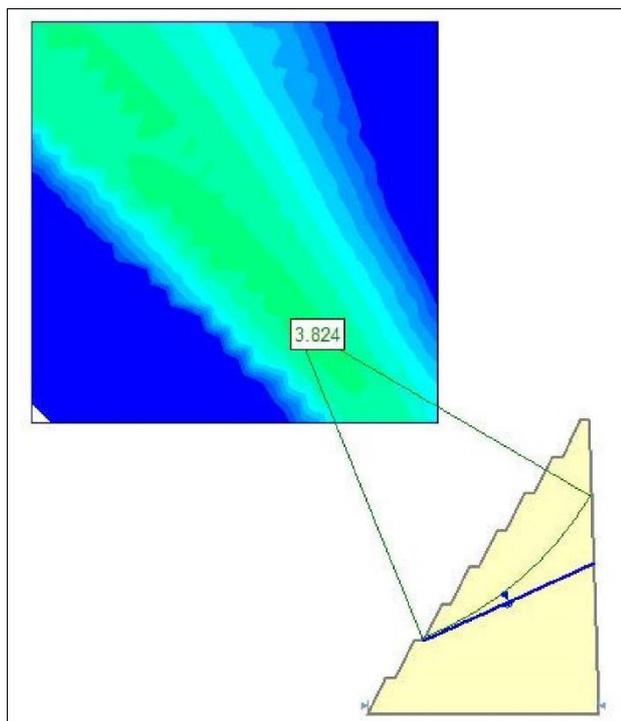


Fig. 19: TG 3.2.2 – Se aplica al caso del Talud EG26 (64° 29'10" – 31° 32' 05) Factor de seguridad en condiciones sísmica y con presencia de agua freática.

La determinación de la resistencia a la compresión simple del material rocoso se llevó a cabo mediante la ejecución de más de 600 ensayos de esclerometría. Se determinó que la presencia de esquistosidad en los gneises disminuye significativamente los valores de resistencia a la compresión simple σ_{ci} , al igual que el grado de alteración y meteorización.

El análisis de equilibrio global de los taludes rocosos permitió unificar a los Tipos Geotécnicos en tres grupos: los que presentan inestabilidad (coeficiente de seguridad menor a 1,20; aquellos que se pueden considerar estables (coeficiente de seguridad mayor a 1,20) y un grupo muy grande de taludes donde los coeficientes de seguridad se encuentran muy por encima de los valores necesarios para asegurar condiciones de estabilidad (entre 3,4 y 10,0).

En base a ello se demostró que los macizos rocosos formados por litologías metamórficas como gneises, anfibolitas y metatexitas, presentan propiedades geotécnicas similares diferenciándose por el grado de meteorización, alteración por zonas de falla y fallamientos propiamente dichos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de Córdoba por la licencia por año sabático otorgada a uno de los autores, a la Universidad Católica de Córdoba por la aprobación del proyecto de investigación, en el marco del cual se realizó este trabajo; y a la Dirección Provincial de Vialidad que permitió la publicación de datos técnicos.

REFERENCIAS

- [1] Ayday C, Göktan Rm (1992). Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field testing. In: *Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization*, Chester, UK, September 1992, pp 47–50.
- [2] Aydin A (2009). ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. *Int J Rock Mech Min Sci* 46:627–634.
- [3] Balbis A., 2016. Estudio geológico- geotécnico para Variante Costa Azul. Disponible en: <https://adarsa.org.ar/wp-content/uploads/2020/04/variante-costa-azul-anexo4-estudio-geologico.pdf>.
- [4] Balbis A., Cerutti J. (2019) Definition of geological-geotechnical models in slope stability studies applied to road projects in complex geological zones. *14th International Congress of Rock Mechanics and Rock Engineering*. ISRM. Foz do Iguaçu. Brazil.
- [5] Beltramone C. (2005), Dinámica de las vertientes en la ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(1):009-015
- [6] Brown, E. T. (2008). Estimating the mechanical properties of rock masses. *Proc. SHIRMS 2008, Australian Centre or Geomechanics, Perth*, 3-22
- [7] Carta Geológica Córdoba-3163 III. 1:250.000 (2006) Instituto de Geología y Recursos Minerales. Segemar.
- [8] Carignano, C., Cioccale, M. Y Rabassa, J. (1999). Landscape antiquity of the Central Eastern Sierras Pampeanas (Argentina): Geomorphological evolution since Gondwanic times. *Zeitschrift für Geomorphologie, NF*, Supplement Band 118: 245–268
- [9] Centeno J., Fraile M., Otero M., Pividal A. (1994). *Geomorfología Práctica*. Ed. Rueda. Madrid.
- [10] Del Río J. C., Sarra Pistone R., Cravero R. (1982) Estudio de estabilidad del túnel de restitución del Complejo Hidroeléctrico Río Grande I. Córdoba. *Actas ASAGAI*. Vol II. p.49-67.
- [11] IAEG International Association of Engineering Geology. Commission on Engineering Geological Maps. 1976. *Engineering geological maps; a guide to their preparation*. 79 pages. ISBN:92-3-101243-6
- [12] IAEG International Association of Engineering Geology. Rock and soil description for engineering geological mapping. 1981. *Bull. Int. Ass. Engng Geol.* 24, 227 – 234.

- [13] Hoek, E. y Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div.*, ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- [14] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
- [15] Lencinas A., (1971). Geología del Valle de Punilla entre Bialet Massé y La Cumbre, Provincia de Córdoba. *Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba*. Tomo I. N° 2.
- [16] Martino R. Guereschi A. Y Carignano C. (2012). Influencia de la Tectónica Preandina sobre la Tectónica Andina: el caso de la Falla de la Sierra Chica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (2): 207 – 221.
- [17] Miller, R. P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. PhD Thesis, University of Illinois.
- [18] Ortega H. Y Quintana Crespo E., (2019) Material Didáctico para la Diplomatura en Geotecnia y Perforaciones. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. (Ed. Digital).
- [19] Peritano L., Autor 1, (2015). Modificación de la calidad y la vulnerabilidad ambiental de los recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de la Sierra Chica". *Segundo Encuentro Interdisciplinario de Investigaciones Ambientales de la Universidad de Córdoba*. EIDIPA+UNC.
- [20] Quintana Crespo E. (2010). Estudios preliminares para la implementación de un sistema de protección contra desprendimientos rocosos en un tendido ferroviario de montaña. Conferencia sobre deslizamientos de terreno y peligros asociados. ASAGAI (Asoc. Arg. Geología Aplicada a la Ing) Córdoba. Ed. Digital.
- [21] Quintana Crespo E. (2010). Implementación de un sistema de protección contra desprendimientos rocosos en un tendido ferroviario de montaña. *XX CAMSIG (Congreso Argentino de Mecánica de suelos e Ing. Geotécnica) SAIG (Sociedad Arg. de Ing. Geotécnica)* Mendoza. Ed. Digital.
- [22] Quintana Crespo E., Olivera Montes P., (2015). Urbanizaciones en Zonas de Montaña. Caso de Estudio: Localidad de Cuesta Blanca, Provincia de Córdoba. *Segundo Encuentro Interdisciplinario de Investigaciones Ambientales de la Universidad de Córdoba*. EIDIPA+UNC.
- [23] Quintana Crespo E., Navarro M.E., (2015). Determinación de la Calidad para la Conservación de áreas impactadas por la minería en la zona de San Agustín, Provincia de Córdoba, Argentina" *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Medio Ambiente*. N° 35. p. 87 ISSN 1851-7838.
- [24] Quintana Crespo E., Navarro M.E., (2016). Aplicación de una Metodología de Calidad para la Conservación a la Selección de Sitios para Enterramiento Sanitario en la Provincia de Córdoba." *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol 3. N° 1. pp. 21-36.
- [25] Rabassa, J. (2010). Gondwanic Paleolandscapes: long-term landscape evolution, genesis, distribution, and age. *Geociências* 29: 541–57.
- [26] Rabassa, J. (2014). Same concepts on Gondwana Landscapes: Long-term landscape evolution, genesis, distribution and age.
- [27] Rocca R.J. y Quintana Crespo E (1999). Zonificación geotécnica de Córdoba mediante análisis estadístico de perfiles geotécnicos. *Rev. Geol. Aplicada a la Ingeniería y Medio Ambiente*. Vol 13:137-150.