

Retroanálisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos metamórficos del Cordón de Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina.

Enrique Quintana Crespo^{1,3}, Franco Primo Soffietti^{2,3}

¹*Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

²*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba - CONICET, Córdoba, Argentina*

³*Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 13/12/2021

Fecha de aceptación del manuscrito: 29/08/2022

Fecha de publicación: 30/12/2022

Resumen— Los macizos rocosos que constituyen el cordón de Sierra Chica han sido objeto de estudios geotécnicos para la ejecución de obras viales durante los últimos diez años. Los análisis de estabilidad realizados para la construcción de taludes rocosos se llevaron a cabo mediante modelos geotécnicos basados en las teorías de equilibrio límite y en la determinación de factores de seguridad. Estos métodos requieren de una correcta caracterización del macizo rocoso, es decir de un modelo geológico que represente los materiales y los procesos involucrados en la estabilidad. El objetivo del presente trabajo es conocer el mecanismo, modelo y geometría de las inestabilidades de taludes rocosos en el sector de la RP 34 que atraviesa el cordón de Sierra Chica. Por esta razón, se desarrollaron retroanálisis de deslizamientos y caídas de bloques ocurridos después de una etapa operativa de tres años. Para los retroanálisis se tuvieron en cuenta condiciones críticas de agua subterránea y condiciones sísmicas propias de la zona de estudio. Se consideraron posibilidades de fallas globales en taludes generados para la obra y de fallas locales en aquellos sitios en los que ocurrieron derrumbes de cuñas rocosas. Los materiales más críticos para la estabilidad se encontraron en la vertiente occidental de la Sierra Chica, desde su pie en el que se ubican materiales de falla: micro y macrobrechas, hasta la parte media donde hay presencia de cataclasitas, milonitas y ultramilonitas. La caracterización geotécnica de cada una de estas rocas se llevó a cabo mediante retroanálisis obteniéndose valores de sus propiedades intrínsecas para condiciones críticas.

Palabras clave— zonificación, litología, estabilidad de taludes, macizos rocosos.

Abstract— The rock masses that constitute the Sierra Chica mountains have been the object of geotechnical studies for the execution of road works during the last ten years. The stability analyses for the construction of rock slopes were carried out using geotechnical models based on limit equilibrium theories through determination of safety factors. These methods require a properly characterization of the rock mass, that is, a geological model that represents the materials and mechanical processes involved in stability. The objective of the present paper is to know the mechanism, model and geometry of the rock slopes instabilities in the section of the provincial route 34 that crosses Sierra Chica mountains. For this reason, back-analyses of landslides and rock falling sites were developed, after an operational period of three years. Critical groundwater conditions and local seismic conditions were taken into account for the back-analyses. Possibilities of global faults in built slopes and local faults in zones of wedge shape rock falls, were also considered. The most critical materials for stability were found on the western landform of the Sierra Chica, from its foot where fault materials are located, e.g., micro and macrobreccias, to the middle part where cataclasites, mylonites and ultramylonites are present. The geotechnical characterization of each of these rocks was carried out through back-analysis, obtaining values of their intrinsic properties for critical conditions.

Keywords— zonification, lithology, slope stability, rock mass

INTRODUCCIÓN

Los análisis de estabilidad realizados para la construcción de taludes rocosos en obras viales de montaña se llevan a cabo mediante modelos geotécnicos basados en las teorías de equilibrio límite y en la determinación del factor de seguridad (FS), que es la relación entre fuerzas resistentes y fuerzas deslizantes que actúan a lo largo de una superficie de potencial deslizamiento.

La mayoría de los métodos de cálculo precisan de una correcta caracterización del macizo rocoso, es decir de un

modelo geológico que represente correctamente los materiales y los procesos involucrados en la estabilidad.

La metodología de Hoek y Brown (1980) se ha mostrado muy eficaz para la obtención de los parámetros intrínsecos de los macizos presentando ciertas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Su aplicación en los macizos rocosos metamórficos del cordón de Sierra Chica, provincia de Córdoba ha permitido establecer una base de datos regionales en las diversas escalas de estudio de las obras viales de montaña (Quintana Crespo y Soffietti, 2020).

La extrema variabilidad de las rocas que componen el basamento cristalino de Sierra Chica, con presencia de esquistos, gneises e intrusivos graníticos, da lugar a fallas en taludes y laderas que pueden interpretarse mediante modelos geotécnicos muy diversos, algunos utilizados para suelos o rocas débiles (esquistos y gneises esquistosos

meteorizados) y otros para rocas muy duras (granitos, filones pegmatíticos, mármoles, etc.). Igualmente, la presencia de fallas geológicas regionales, tales como la falla de Sierra Chica generan condiciones para derrumbes y deslizamientos asociados a la mala calidad geotécnica del material de falla y a las elevadas pendientes de los abruptos de falla.

El objetivo del presente trabajo es conocer el mecanismo, modelo y geometría de las inestabilidades de taludes rocosos en el sector de la RP 34 que atraviesa el cordón de Sierra Chica. Por esta razón, se desarrollaron retroanálisis de deslizamientos y caídas de bloques ocurridos después de una etapa operativa de tres años. El retroanálisis de la ladera occidental de dicho cordón serrano se llevó a cabo en un sector donde se produjo la rotura de un talud generado para la construcción de la Ruta Provincial 34, lo que permitió, conocer el mecanismo, modelo, geometría de la inestabilidad y el comportamiento mecánico de los materiales del talud.

Los resultados obtenidos fueron extrapolados a otros taludes de similares características que presentaron derrumbes a partir del primer año de construcción del camino y que también fueron objeto de retrocálculos; para lo cual se determinó la geometría del talud, antes y después de los derrumbes mediante modelos de elevación digital obtenidos a partir de imágenes de dron y se obtuvieron los parámetros resistentes de los macizos rocosos (cohesión y ángulo de fricción) que cumplen la condición de equilibrio estricto del talud ($FS = 1,0$) a lo largo de la superficie de rotura. Los parámetros geotécnicos correspondieron al talud EG17 fueron evaluados en dos circunstancias: al momento de su construcción se realizó un análisis de estabilidad global, considerando el desarrollo de una falla circular y posteriormente en dos sectores donde se localizaron derrumbes se efectuó un análisis de estabilidad local, mediante la evaluación de falla en cuña.

ANTECEDENTES

Los macizos rocosos que constituyen el cordón de Sierra Chica han sido objeto de estudios geotécnicos para la ejecución de las obras viales ejecutadas en el territorio provincial en los últimos diez años: Camino de El Cuadrado, Camino de Altas Cumbres; como así también los estudios de adecuación de la estabilidad de los taludes del Tren de las Sierras, (Quintana Crespo y Soffietti, 2020; Quintana Crespo y Navarro, 2020; Quintana Crespo, 2010a, b; Balbis y Cerutti, 2019; Balbis, 2016).

Los procesos de remoción en masa ocurridos en las laderas naturales previamente a la construcción de estas obras (Beltramone, 2005) permitan prever que las condiciones de los macizos rocosos presentarían dificultades constructivas en el momento de la excavación de los taludes rocosos, como así también en su posterior estabilidad.

Para el análisis específico de los sitios en los que han ocurridos deslizamientos de laderas, derrumbes y caídas de rocas en taludes generados para obras viales, se partió de un análisis geotécnico regional realizado por Quintana Crespo y Soffietti (2020), de donde se obtuvieron valores de los parámetros intrínsecos de las principales unidades de mapeo geotécnico definidas en un área de estudio ($64^{\circ}37'$ a $64^{\circ}16'$ de longitud oeste y $31^{\circ}00'$ a $31^{\circ}38'$ de latitud sur)

que cubre la parte central del cuerpo montañoso de Sierra Chica, cordón perteneciente a las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. Se determinaron las unidades de mapeo geotécnico correspondientes a series litológicas (Fig.1), complejos y tipos litológicos. La distribución geográfica de los tipos litológicos se muestra en la Fig. 2 y la Tabla 1 presenta el esquema de correlación entre complejos y tipos litológicos, y las propiedades geotécnicas de los tipos geotécnicos. La determinación de las unidades de mapeo geotécnico se llevó a cabo sobre las Cartas Geológicas Los Gigantes- 3166-30 (1:100.000) y Córdoba-3163 III (1:250.000). Los Complejos Litológicos 3 y 5 corresponden a los complejos metamórficos La Falda (en la Carta Córdoba) y Sierra Chica (en la Carta Los Gigantes) respectivamente y están integrados mayoritariamente por gneises masivos y esquistosos. En cuanto al CL 5, ubicado en la Carta Los Gigantes, corresponde a rocas metamórficas de alto grado (metatexitas). En la zona de la falla de Sierra Chica, a milonitas y cataclasitas. Los tipos geotécnicos que se caracterizan en base a sus propiedades geotécnicas específicas son aquellos que se identificaron en el trabajo de campo sobre los taludes rocosos construidos a lo largo de la RP 34. El desarrollo completo del estudio ha sido publicado en Quintana Crespo y Soffietti (2020).

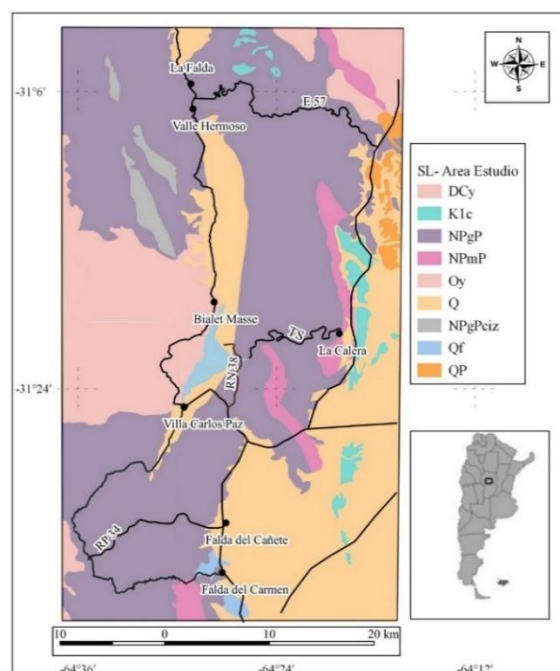


Fig. 1: Área de estudio y Series Litológicas. DCy: Granitoides Achalianos K1c: Sedimentitas continentales. NPgP: Complejo metamórfico La Falda; NPMp: Formaciones El Manzano y Mármoles; Oy: Granitoides Famatinianos; Q: sedimentos cuaternarios; NpgPciz: Metamorfitas zona cizalla; Qf: Cuaternario fluvial;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

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS GEOTÉCNICOS EN BASE A SU COHESIÓN Y FRICCIÓN (ACTUALIZADO DE QUINTANA CRESPO Y SOFFIETTI, 2020)

CL	TL	TG	ϕ (°)		c' (MPa)	
			Medio	Desv. Est.	Medio	Desv. Est.
3	3.2	3.2.1	47	13,18	0,16	0,56
		3.2.1 F	31	-	0,13	-
		3.2.2	65	2,12	0,74	0,53
		3.2.2 F	37	-	0,08	-
		3.2.3	64	-	1,84	-
4	4.1	4.1.1	62	2,47	0,63	0,20
	4.2	4.2.1	43	-	0,27	-
5	5.2	5.2.1E	47	-	0,19	-
		5.2.2E	62	3,70	0,58	0,52
		5.2.1O	56	-	0,52	-
		5.2.2O	66	2,2	0,96	0,20
		5.2.3	63	-	1,32	-

RETROANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA ESCARPA DE FALLA DE SIERRA CHICA

El análisis de la estabilidad de laderas enfocado desde la ingeniería geológica permite obtener, a partir de la

zonificación realizada mediante metodologías como la vista en el apartado anterior, valores de coeficientes de seguridad en diversos escenarios.

En la falla de Sierra Chica se reconocen rocas cataclásticas con un ancho afectado que alcanza la decena a centena de metros, representadas por brechas y microbrechas con arcilla de falla de color rojo y verde y rocas esquistosas.

De acuerdo al estudio de Quintana Crespo y Soffietti (2020) corresponden al TG 4.2.1 identificado como brechas tectónicas y cataclasitas de grano grueso, con bloques angulares de resistencia friccional elevada, en los EG 15 y EG 16 (Fig. 2) realizados en taludes de 48 m de altura, con cota en la base de 883 m s.n.m. En la Fig. 2 puede observarse la ubicación de las distintas unidades de mapeo geotécnico sobre la traza de la RP 34.

La descripción más completa de los materiales de falla de la zona es la realizada por Lencinas (1971) quien describió el Perfil N° 18 del Yacimiento Rodolfo (Cosquín – Córdoba - CNEA) realizando un corte transversal O-E de la ladera occidental de Sierras Chicas (Fig. 3).

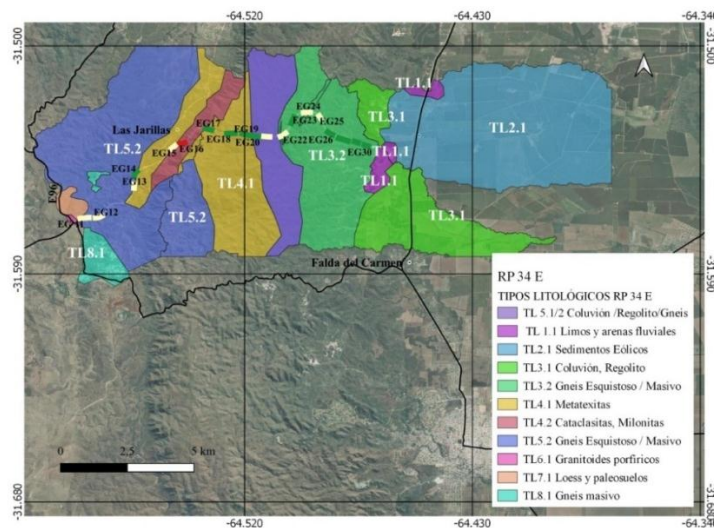


Fig. 2: Ubicación de los Estudios Geotécnicos en taludes (EG) y Unidades de mapeo geotécnico.

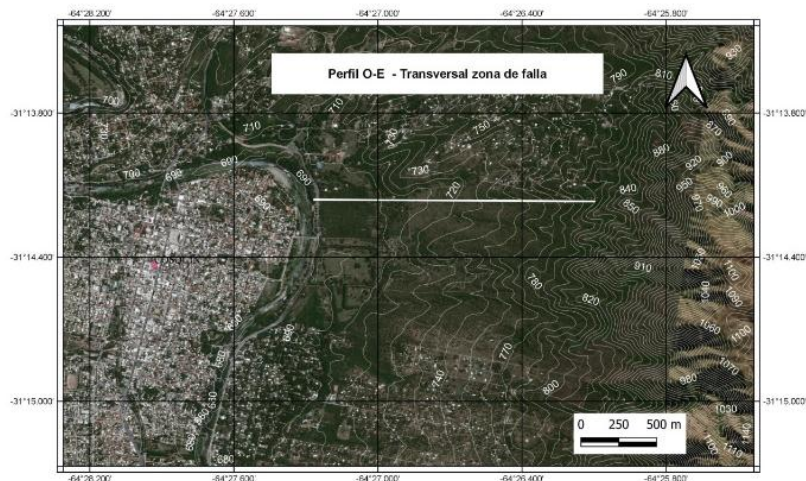


Fig. 3: Ubicación del Perfil N° 18 del Yacimiento Rodolfo (Cosquín – Córdoba - CNEA) realizando un corte transversal O-E de la ladera occidental de Sierras Chicas. Modificada de Lencinas, (1971).

Según los estudios de Lencinas, existe una microbrecha de 2 a 4 m. de espesor, constituida por microbrecha de roca verdosa a rojiza y una macrobrecha de 10 a 30 m. de espesor. Hacia el este, los efectos cataclásticos se traducen en una faja de 200 a 400 m. de ancho de gneis cataclástico con pronunciada cloritización, clivaje de fractura y fallas menores.

De acuerdo a Martino et al (2012), la falla de la Sierra Chica presenta una escarpa de falla que puede reconocerse por más de 200 km de largo, hacia el norte, a la latitud de Capilla del Monte, y hacia el sur, llega hasta el lineamiento de Los Cóndores. Los autores coinciden con el análisis de Lencinas, en cuanto a que: “asociadas a la zona de falla, se reconocen rocas cataclásticas con un ancho afectado que

alcanza la decena 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” y agregan que “en cuanto a su recorrido, la falla de la Sierra Chica cabalga a conglomerados rojos cretácicos en la zona de La Cumbre, a los estratos terciarios del valle de Punilla en la zona de Cosquín y parcialmente a los fanglomerados pleistocénicos en Bialeto Massé y Villa Carlos Paz”.

Según Lencinas, en la zona de Cosquín los estratos terciarios constituyen en el pie fracturado una faja o escalón marginal (Fig. 4).

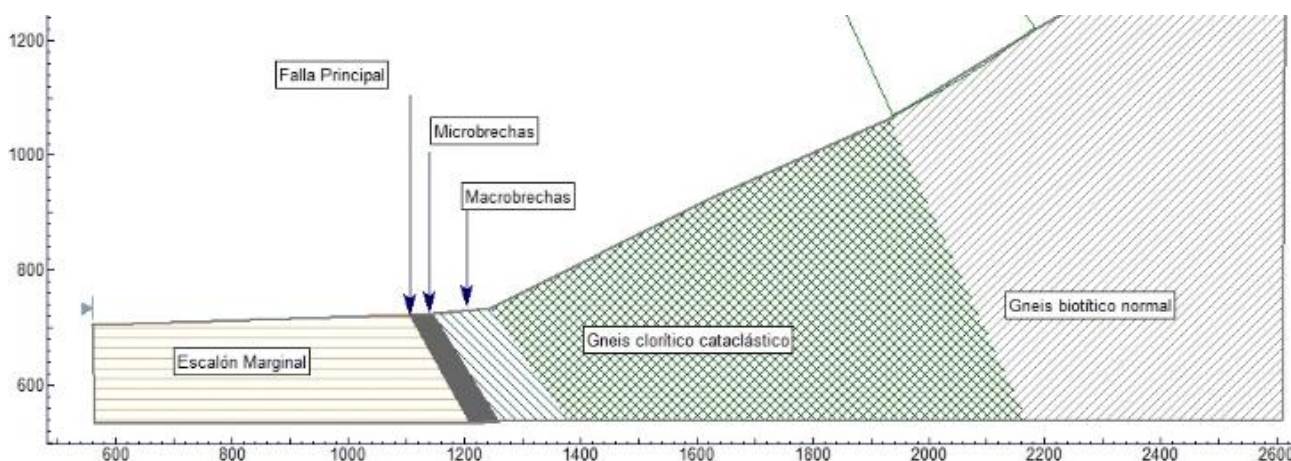


Fig. 4: Modelo geológico de la zona de falla de Sierra Chica según Lencinas, (1971).

En la traza de la RP34, tramo: Falda del Cañete – Las Jarillas, la microbrecha se localizó en un corte, en cota 863 m s.n.m., como se observa en la Fig. 5., realizándose el Perfil 1 que se observa en la Fig. 6. y que ratifica los análisis de Lencinas (1970) y Martino (2012), en cuanto a la presencia de micro y macrobrechas, gneises cataclásticos y gneises normales, en la escarpa de falla oriental.



Fig. 5: Microbrecha de la falla de Sierra Chica, en proximidades del talud EG15 - RP34. Altura del talud 8,00 m.

Análisis determinístico de Estabilidad Global de la ladera

Los análisis determinísticos permiten obtener un FS promedio, sin analizar su variabilidad. Los métodos más conocidos son el de Fellenius, Bishop, Morgesten-Price, etc. El análisis normalmente se efectúa en 2D, con geometría constante y parámetros medios de c' , ϕ' , γ_{nat} y γ_{sat} .

Para el presente artículo se utilizó el método de las dovelas (Bishop, Janbu, etc.) que divide la masa desplazada en distintas fajas o dovelas (Fig. 7) que pasan a considerarse un sólido rígido y se resuelve bajo dos hipótesis simplificadoras:

1. Se considera que las dovelas son suficientemente estrechas como para que su base sea rectilínea.
2. Se considera que la base de cada dovela está afectada únicamente por un tipo de material.

Los distintos métodos de dovelas se pueden clasificar dependiendo de las condiciones de equilibrio estático que se consideren y de las hipótesis sobre las fuerzas entre rebanadas. Las condiciones de equilibrio que se satisfacen dependen de los métodos utilizados con más frecuencia y que se pueden denominar como casos específicos del método general de equilibrio límite (GLE).

El método de Janbu Generalizado (1973) establece como hipótesis que la posición de la fuerza normal entre dovelas está definida como la fuerza de empuje y se puede cambiar

la posición de las fuerzas resultantes. Es aplicable para cualquier tipo de superficie de deslizamiento.

En cuanto al método de Bishop Modificado (1955), la hipótesis establece que la fuerza entre rebanadas es horizontal (no hay fuerza tangencial) y solo es aplicable para deslizamiento circular. Las hipótesis que considera son:

1. Superficie de ruptura circular.
2. La masa deslizante se divide en n dovelas o bloques verticales.
3. Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada dovela respecto el centro del círculo.

4. A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada dovela se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de ruptura) y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.

5. El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. Por otro lado, considera las normales. W = cargas verticales externas. E_L y E_R fuerzas normales izquierda y derecha entre dovelas. P y S son las fuerzas normal y tangencial en la base de la dovela.

Para el análisis del perfil 1, sobre la RP 34, se asignaron las propiedades físico-mecánicas que se muestran en la

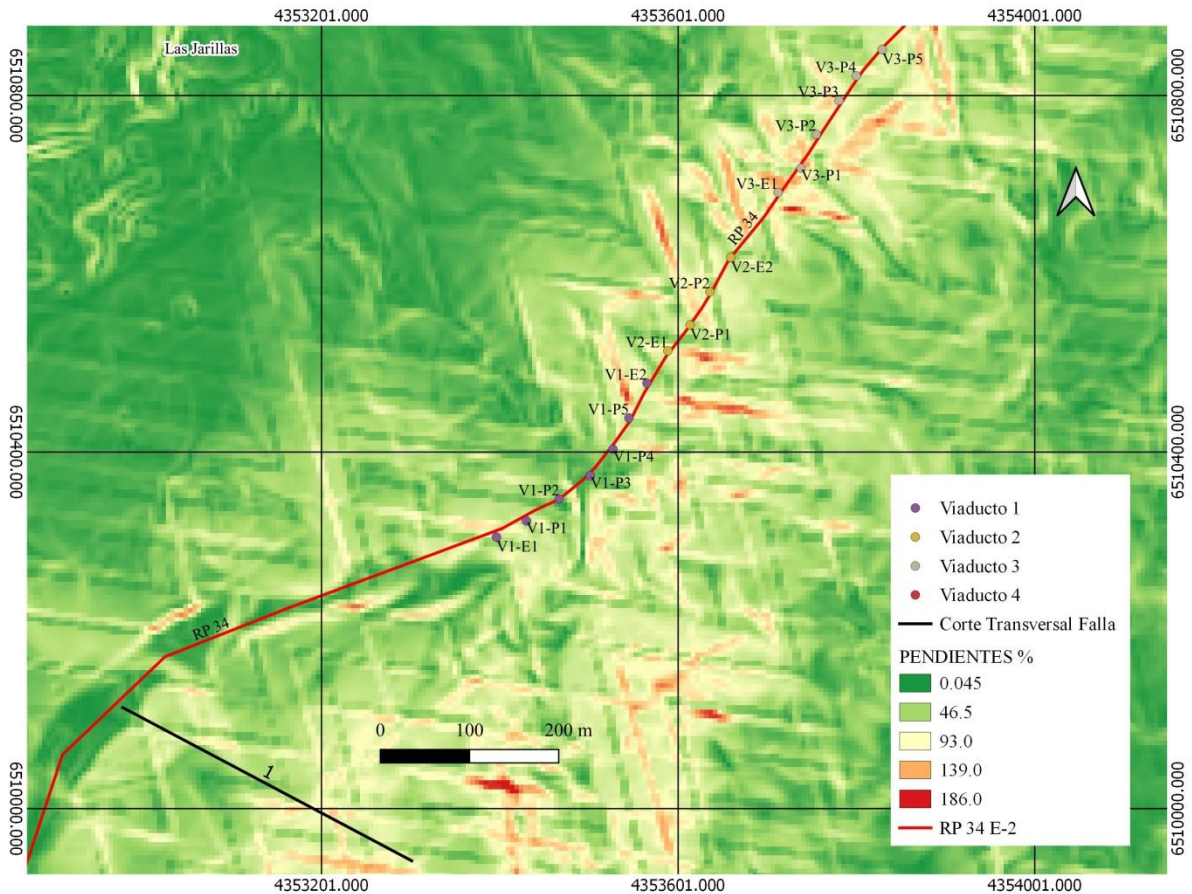


Fig. 6: Mapa de pendientes. Ladera occidental de la Sierra Chica. Escarpa de falla. Sistema de Referencia de Coordenadas Posgar 2007- Argentina 4.

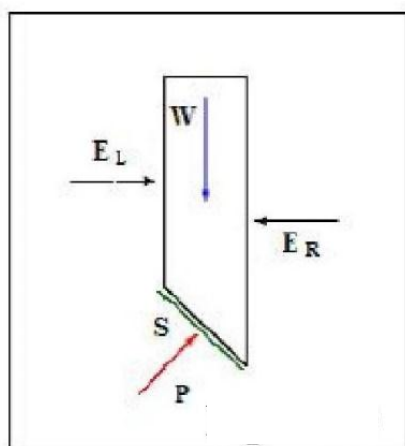


Fig. 7: Esquema de fuerzas de Bishop.

Tabla 2, con el propósito de realizar un primer análisis determinístico de la estabilidad global de la ladera. Se utilizó el programa Slide de RocScience, bajo licencia educativa (Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – UNC. 2021). Como acciones externas se han considerado: la actividad sísmica ($a_h = 0,10g$ y $a_v = 0,04g$) y la presencia de agua subterránea.

TABLA 2: PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DE FALLA SIERRA CHICA.

Descripción	Peso Unitario (kN/m ³)	ϕ (°)	c (MPa)
Microbrecha	16	10	0,020
Macrobrecha	18	20	0,060
Macrobrecha meteorizada	16	17	0,050
Gneis cataclástico	20	35	0,160
Gneis (TG 4.2.1)	22	43	0,270

TABLA 3: FS OBTENIDOS EN FORMA DETERMINÍSTICA POR LOS MÉTODOS DE DOVELA DE BISHOP Y JANBU.

Escenario	Bishop simplificado	Janbu simplificado
1. Ladera natural sin agua subterránea	2,076	1,941
2. Ladera natural con capa freática	1,417	1,222
3. Ladera natural saturada	1,088	0,946
4. Ladera natural con carga sísmica ($a_h = 0,10 g$ y $a_v = 0,04g$)	1,709	1,583
5. Ladera natural saturada, con carga sísmica	0,899	0,774

El Escenario 1 corresponde a la estabilidad de la ladera en su condición natural y sin considerar la presencia del agua subterránea, ni carga sísmica (Fig. 8), resultando un FS = 1.941 según Janbu.

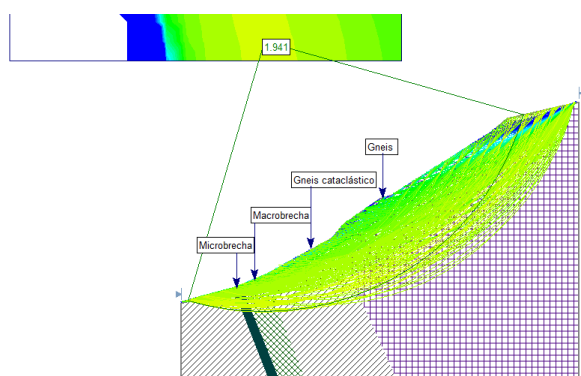


Fig. 8: Modelación de la ladera en zona del perfil 1 en RP 34. Escenario 1: sin actividad sísmica, ni agua subterránea.

Para el Escenario 2 se recolectó información en relación a la presencia de agua subterránea, encontrándose que existen vertientes en cota 810 m s.n.m. La posición de la capa freática se ilustra en la Fig. 9, donde la línea azul está representando una superficie de saturación del macizo que podría producirse al fin de la época estival, como consecuencia de una lluvia intensa, como la que ocurriera el 15 de febrero de 2015 en la vertiente oriental de Sierra Chica. La posición de la capa freática se ilustra en la Fig. 9. Según Janbu, el FS ante la presencia de agua descende un 37%, pero es mayor a 1, indicando que la ladera es estable en estas condiciones.

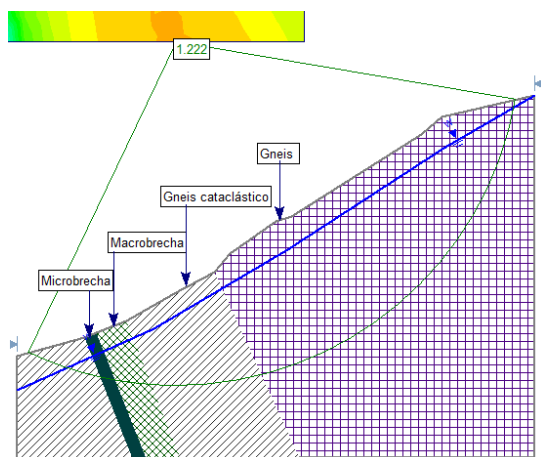


Fig. 9: Modelación de la ladera en zona del perfil 1 en RP 34. Escenario 2: presencia de agua subterránea.

El Escenario 3 corresponde a una condición de gatillo por la existencia de una tormenta como la ocurrida en febrero de 2015, que podría haber llevado a la saturación del macizo rocoso. En esta circunstancia se obtienen valores de FS menores a la unidad, indicando la inestabilidad de la ladera. El Escenario 4 contempla la existencia de una carga sísmica acorde a la actividad de la zona y el Escenario 5 (Fig. 10) muestra la combinación de los dos gatillos: saturación del subsuelo y actividad sísmica, arrojando un grado de inestabilidad más pronunciado. Este último caso, el FS es de 0.774 según el método de Janbu.

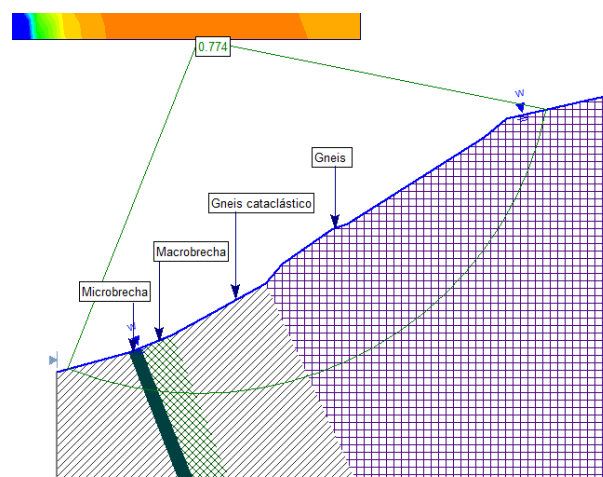


Fig. 10: Modelación de la ladera en zona del perfil 1 en RP 34. Escenario 5: macizo saturado por intensas lluvias y actividad sísmica.

Análisis Probabilístico de la zona de falla y retrocálculo

Los métodos probabilísticos más utilizados son: Montecarlo y el Método de Segundo Momento de Primer Orden (FOSM), también denominado Método de Segundo Momento de Primer Orden de Valor Medio (MVFOSM). Este último es un método probabilístico para determinar los momentos estocásticos de una función con variables de entrada aleatorias. El nombre se basa en la derivación, que utiliza una serie de Taylor de primer orden y el primer y segundo momento de las variables de entrada. A través del método FOSM se determina la probabilidad de falla (PF) o probabilidad de rotura (PR).

Para utilizar el método FOSM se precisa definir una Función de Densidad de Probabilidad, la media, la varianza y la desviación estándar de los parámetros geotécnicos, que serán variables aleatorias independientes, de las que surgirá el FS como variable dependiente.

El perfil de la ladera analizado se encuentra a 140 m del talud EG15, en cuya base ha ocurrido un deslizamiento. Este talud forma parte de la ladera, por lo cual se efectuará un retroanálisis para definir las propiedades de los materiales en el sector fallado (Fig. 11 y 12).

Para determinar la resistencia in situ del contratalud se realizó un análisis de diferentes escenarios de falla, con la cual se pueda arribar a un FS = 1.

Para el análisis retrospectivo se consideran los pesos unitarios, la cohesión y el ángulo de fricción correspondientes a los distintos materiales que se asumen conformando el talud.



Fig. 11: Contratalud rocoso EG 15. Sector SO con plano de falla.

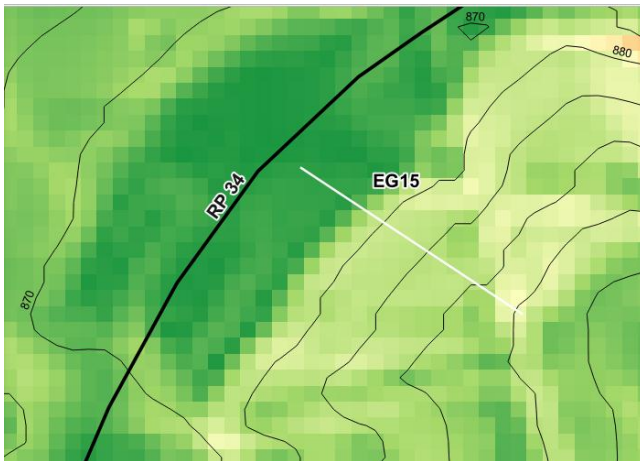


Fig. 12: Pendientes en el contratalud y ladera rocosa. Verde Oscuro <0,045 – Verde Claro < 46.5% - Rosado < 93% .

Para realizar el análisis probabilístico se consideró la geometría original del talud antes de la falla. La falla en cuestión ocurrió coincidentemente con una obstrucción de la cuneta del pie del talud durante la construcción, con la formación de una laguna que se asimila al nivel freático.

La actividad sísmica adoptada fue de un factor horizontal: $a_h = 0,10g$ y vertical $a_v = 0,04g$, valores que fueran los utilizados para los cálculos de estabilidad de taludes y fundaciones en la construcción de la RP 34, por parte de las empresas consultoras y la inspección estatal. Se tuvo en cuenta, además, una sobrecarga para equiparar el peso del macizo rocoso superior.

Debido a que la altura de la base del contratalud generado se encuentra en cota 850 m s.n.m., se consideró que las microbrechas se encuentran por debajo de la cara del mismo, constituyendo el cuerpo del talud. El contratalud en el sector de la falla está conformado por una capa superficial de macrobrechas meteorizadas, sobre las macrobrechas.

Se llevaron a cabo diversos análisis (Tabla 4) hasta conseguir el FS = 1, para las propiedades siguientes:

TABLA 4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MATERIALES DE ZONA DE FALLA SIERRA CHICA.

Descripción	Análisis	Peso Unitario (kN/m ³)	c (MPa)	φ (°)	FS
Microbrecha	1	16	0,020	10	-
	2	18	0,100	25	-
Macrobrecha	3	18	0,040	15	0,706
	3	18	0,060	20	1,120
Macrobrecha meteorizada	1	16	0,080	20	-
	2	16	0,030	12	0,706
	3	16	0,050	17	1,120

El análisis de sensibilidad permite observar que la propiedad más influyente en la estabilidad del talud es la fricción de la macrobrecha meteorizada, y en segundo lugar su cohesión (Fig. 13).

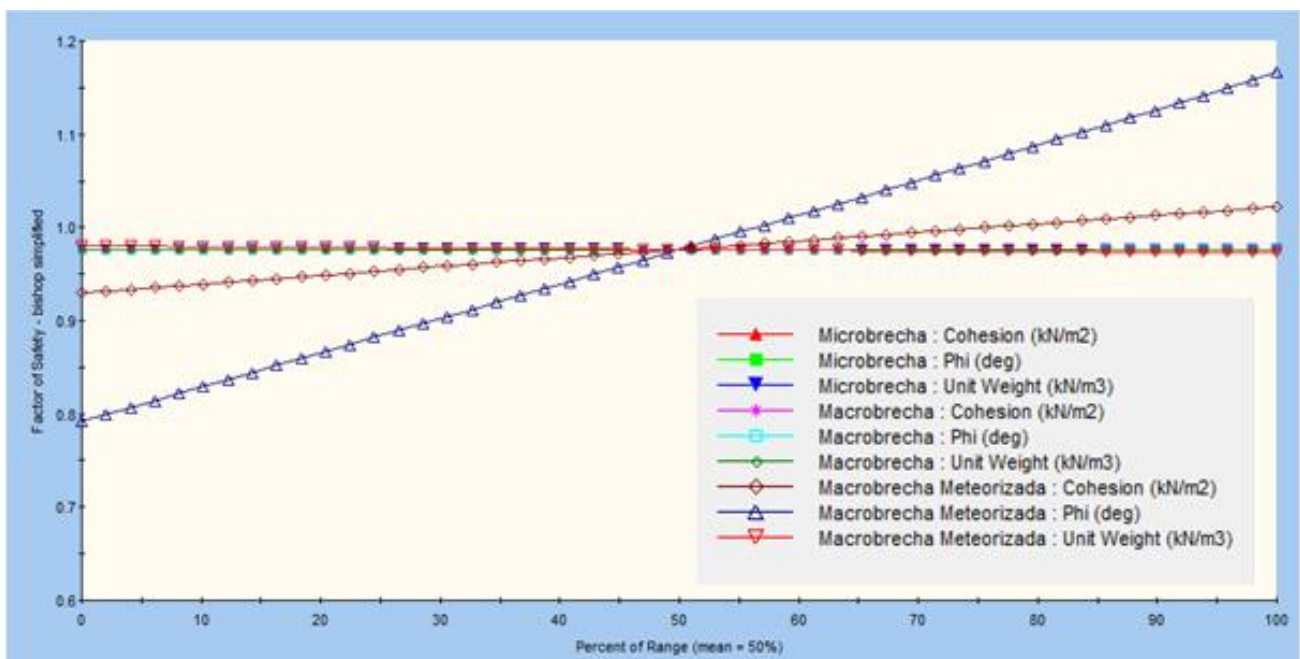


Fig. 13: Análisis de sensibilidad de las propiedades geotécnicas de materiales de falla.

Para un valor de fricción igual a 10° y cohesión igual a 0,052 MPa se llega a $FS = 1,007$ (Fig. 14).

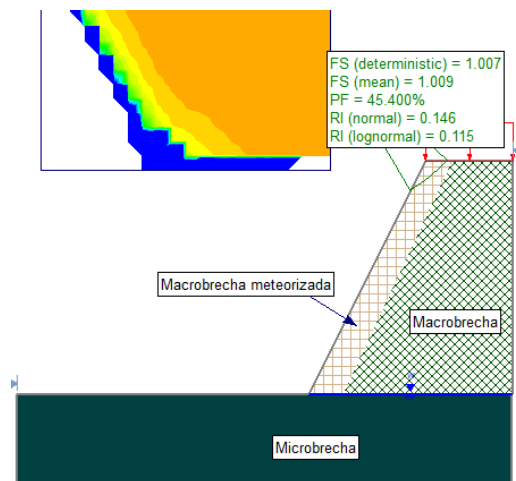


Fig. 14: Análisis de estabilidad de la ladera con fricción igual a 10° y cohesión igual a 52 kPa para $FS = 1$.

RETROANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS EN RP34

Análisis de estabilidad global mediante falla circular

El talud rocoso identificado como EG17 en Quintana Crespo y Soffiatti (2020) se encuentra construido dentro de un macizo rocoso metamórfico de metatexitas masivas (TG 4.1.1) con valores medios de $c = 0,63$ MPa y $\phi = 62^\circ$. El talud EG17 fue estudiado en tres sectores: S1 de 100 m. de longitud, S2 de 27 m. y S3 de 118 m, obteniéndose los parámetros intrínsecos del macizo rocoso (Tabla 5) donde se parte de valores medios de resistencia a la compresión simple (RCS), Geological Strength Index (GSI), y el parámetro m_i de Hoek y Brown (2002), para arribar a valores medios de $c = 0,47$ MPa y $\phi = 61^\circ$. La disminución de los valores con respecto a la media regional se corresponde con la cercanía del talud a la Falla de Sierra Chica, siendo notoria la presencia de fallas transversales, horizontales y fallamientos localizados que afectan la integridad del macizo.

TABLA 5: PARÁMETROS INTRÍNSECOS DEL MACIZO ROCOSO EN EG17 (ACTUALIZADO DE QUINTANA CRESPO Y SOFFIATTI, 2020)

EG	Sectores	RCS (MPa)	GSI	m_i	ϕ ($^\circ$)	c (MPa)
17	S1	36	65	30	61	0,41
	S2	31	55	28	57	0,25
	S3	42	75	33	64	0,77

En los sectores S1 y S2 se produjeron dos desprendimientos importantes relacionados con familias de discontinuidades que generan cuñas inestables y con fallamientos localizados que producen cataclasitas y arcilla de falla. Los volúmenes desprendidos señalan la presencia de bloques rocosos de diversos tamaños en una matriz brechosa. El comportamiento del material puede ser considerado homogéneo, siendo aplicable la metodología de Hoek y Brown y el modelo de rotura circular.

En la Fig. 15 se pueden observar los desprendimientos sobre la ortofotografía obtenida con un dron Spark 4 – DJI, desde una altura de vuelo de 50 metros.



Fig. 15: Derrumbes en EG17. Sector S1 y S2.

A partir de la ortofotografía se obtuvieron las curvas de nivel y el modelo de elevación digital (Fig. 16), a fin de poder establecer la geometría de las zonas deslizadas.

El perfil transversal del talud original se muestra en la Fig. 17, donde puede observarse un banco inferior de 6 m de altura excavado con pendiente 2V:1H y el banco superior excavado con pendiente 1V: 1H, por ser el más afectado por la meteorización superficial.

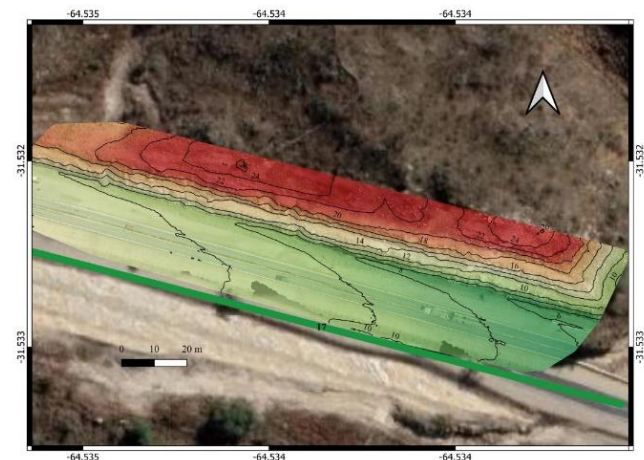


Fig. 16: Modelo Digital de Elevación de EG17. Sector S1 y S2.



Fig. 17: Perfil transversal del talud EG 17, previo al derrumbe.

Para el análisis determinístico de la estabilidad global del talud se consideraron las propiedades correspondientes a:

1. Gneis cataclástico

2. Macrobrecha meteorizada en la zona de derrumbe: los bloques se deslizan sobre un plano de falla y el material presenta una disgregación en bloques con tamaños desde pocos centímetros hasta más de un metro (Tabla 6).

TABLA 6: PARÁMETROS DEL MACIZO ADOPTADOS PARA EL ANÁLISIS DETERMINÍSTICO, EXTRAPOLADOS DE LA ZONA DE FALLA DE SIERRA CHICA.

Material	γ	ϕ (°)	c (kPa)
Gneis cataclástico	22	35	160
Macrobrecha meteorizada en zona de derrumbe	20	10	52

En la Fig. 18 se ilustra el primer escenario para las zonas de derrumbe en el EG17. En la presente situación no se considera la existencia de agua subterránea, ni actividad sísmica, lográndose un elevado FS de 12,93 según el método de Janbu.

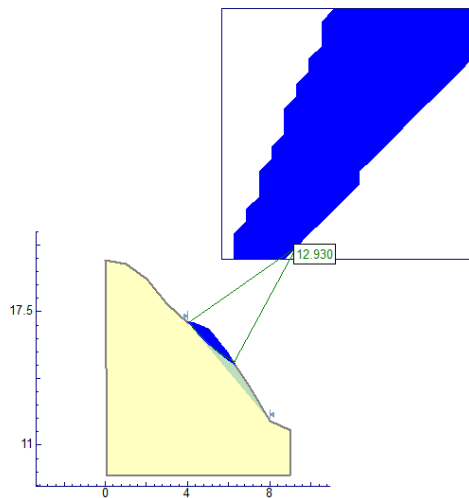


Fig. 18: Análisis de estabilidad en el EG 17 considerando solo acción de la gravedad.

En la época de lluvia en la que se produjeron los derrumbes se detectó la presencia de agua subterránea, con filtraciones a través de los planos de fallas. En la Fig. 19 se muestra el resultado del análisis. Es posible que el elevado contenido de humedad haya superado el límite líquido de la arcilla de falla con una notoria disminución de la cohesión. Una reducción de un 90% en el valor de c, permite obtener un FS cercano a la unidad con una probabilidad de falla del 63%. Esto muestra que, en el momento del derrumbe, los parámetros del macizo habrían sido $c = 16$ MPa y 5.2 MPa y $\phi = 35^\circ$ y 10° para el gneis y la macrobrecha meteorizada, respectivamente.

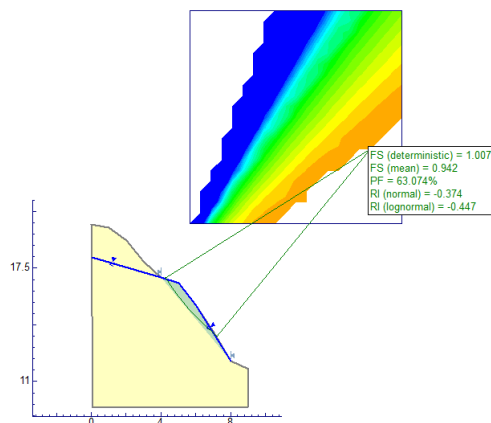


Fig. 19: Análisis del EG 17 considerando presencia de agua subterránea.

Análisis de estabilidad local mediante falla en cuña

A partir de las observaciones realizadas in situ para verificar las condiciones de alteración y las características de las discontinuidades y considerando los parámetros geotécnicos del macizo reducidos por saturación ($c=16$ MPa y $\phi = 35^\circ$), se evaluaron los sectores de derrumbes del EG17 (detallados en las Fig. 20 y 21), como fallas locales en cuña. Un análisis similar puede verse en García y de la Rosa (2021).



Fig. 20: Desprendimientos en el S1 del EG17.



Fig. 21: Desprendimientos en el S2 del EG17.

Los juegos de discontinuidades forman claras cuñas que pueden ser analizadas mediante el software Swedge 4.078 de Rocscience (Rocscience, 2021) y así obtener los parámetros geotécnicos correspondientes. En las Fig. 22 y 23 se pueden observar los modelos de cuña evaluados, mientras que las direcciones de cada familia de discontinuidades (J1 y J2), hombro y cara de los taludes, pueden observarse en las Tablas 7 y 8 para el S1 y S2 respectivamente.

TABLA 7: DIRECCIONES DEL TALUD EG17, S1.

S1	Rumbo (°)	Dirección Buzamiento (°)
Hombro talud	65	118
Cara talud	0	118
J1	75	10
J2	60	130

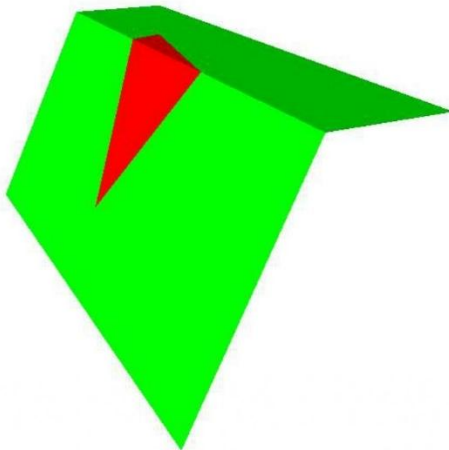


Fig. 22: Modelo de la cuña del S1 en Swedge.

TABLA 8: DIRECCIONES DEL TALUD EG17, S2.

S2	Rumbo (°)	Dirección Buzamiento (°)
Hombro talud	65	118
Cara talud	0	118
J1	55	85
J2	55	135

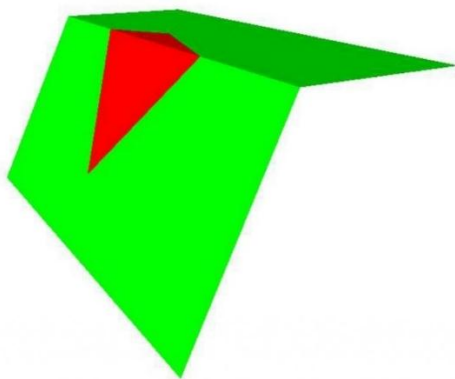


Fig. 23: Modelo de la cuña del S2 en Swedge.

Se evaluaron cuatro casos posibles. El primero y más conservador solo incorpora la acción de la gravedad. Por otra parte, y debido a las intensas lluvias que se produjeron durante la primavera y el verano del 2020-2021, se tomó como posible condición una saturación del 100% del macizo. Como tercer escenario se evaluó la acción sísmica mediante un factor horizontal de 0,10. Finalmente, se evaluó la combinación de los tres factores. En la Tabla 9 se pueden observar los FS obtenidos para los cuatro casos analizados.

TABLA 9: FACTORES DE SEGURIDAD DE EN LOS DERRUMBES DEL EG17.

Derrumbe	Escenarios analizados			
	Gravedad	Sismo	Saturado	Saturado+Sismo
FS - S1	3,39	3,02	0,58	0,51
FS - S2	2,14	1,92	0,35	0,32

Es posible observar que, analizando localmente las zonas de derrumbe con los parámetros geotécnicos reducidos, ambos bloques, tanto del S1 como del S2, muestran FS elevados para los escenarios en que actúa solo la gravedad o la acción sísmica. Cuando el macizo se satura, los FS se reducen significativamente, obteniéndose valores por debajo de la unidad en ambos sectores. Por lo tanto, la verificación del talud, analizado por falla en cuña muestra posibles condiciones en que los bloques son inestables.

CONCLUSIONES

La zona de falla de Sierra Chica representa uno de los principales rasgos tectónicos de la provincia de Córdoba, con una problemática geotécnica muy compleja para los trazados viales que han debido atravesarla. En la falla de Sierra Chica se reconocieron rocas cataclásticas representadas por brechas y microbrechas con arcilla de falla y rocas esquistosas.

En el caso de la RP 34, que cruza la escarpa de falla de Sierra Chica mediante viaductos y grandes taludes, de acuerdo a lo anterior, se identificó la presencia de micro y macrobrechas, gneises cataclásticos y gneises normales. Las propiedades intrínsecas del macizo rocoso (cohesión y fricción) fueron determinadas en base a estudios previos, considerándose apropiados para el análisis determinístico del sector evaluado.

Se desarrolló un modelo geológico en base a observaciones en taludes generados para la obra vial y afloramientos en laderas. La existencia de un importante desprendimiento de tipo circular permitió un retroanálisis determinístico y de sensibilidad para así obtener parámetros de fricción y cohesión correspondientes a estados límites de estabilidad en laderas y taludes.

Se determinó que los derrumbes en la ladera investigada pudieron darse principalmente, por la saturación del macizo debido a fuertes tormentas, como la ocurrida en febrero de 2015, como así también por la acción sísmica conjunta. En estas circunstancias se obtuvieron factores de seguridad determinísticos iguales o menores a la unidad. El análisis de sensibilidad, además, permitió observar que la propiedad más influyente en la estabilidad del talud fue la fricción de la macrobrecha meteorizada y en segundo lugar su cohesión.

Luego se analizó el talud EG17 construido dentro de un macizo rocoso metamórfico de metatexitas masivas. El talud EG17 fue estudiado en tres sectores, obteniéndose los parámetros intrínsecos promedios. Estos parámetros, por su cercanía a la falla de Sierra Chica, fueron inferiores a la media regional. Además, se identificó la presencia de fallas transversales, horizontales y fallamientos localizados que afectaron la integridad del macizo.

En dos sectores del talud se evaluaron zonas donde se produjeron desprendimientos importantes relacionados con familias de discontinuidades que generan cuñas inestables y con fallamientos localizados que producen cataclásitas y arcilla de falla.

Una vez determinada la geometría original del talud, se evaluó su estabilidad global mediante falla circular. Se encontró que, una importante disminución de la cohesión, debido al elevado contenido de humedad (por la época de

lluvia en la que se produjeron los derrumbes), podría explicar la causa de los derrumbes.

El análisis de estabilidad local mediante falla en cuña, en los dos derrumbes del EG17 mostró que, al saturarse el macizo, los FS en las zonas de cuña disminuyen significativamente. La presencia de agua en el interior del macizo, en compañía de acciones sísmicas o individualmente, podría explicar, en este caso también, la causa de los desprendimientos.

Es importante destacar que estos resultados pueden ser considerados para futuros estudios de estabilidad sobre los taludes ya existentes en la RP 34 y para nuevas obras que se vayan a construir en el macizo rocoso y en el abrupto de falla de Sierra Chica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Católica de Córdoba por la aprobación del proyecto de investigación, en el marco del cual se realizó este trabajo; a la Universidad Nacional de Córdoba por el uso de las licencias educativas del software de RocScience, y a la Dirección Provincial de Vialidad que permitió la publicación de datos técnicos.

REFERENCIAS

- [1] 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>.
- [2] 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. pp. 3628 – 3635. Foz do Iguazú. Brazil.
- [3] 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.
- [4] Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- [5] García, F. y de la Rosa, A. (2021). Análisis de estabilidad de un talud rocoso mediante el criterio de Hoek & Brown considerando un mecanismo de falla no circular. XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Noviembre 2021, Misiones, Argentina.
- [6] Hoek, E. y Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div.*, ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- [7] Janbu, N. (1973). "Slope Stability Computations," Embankment-Dam Engineering: Casagrande Volume, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973, pp. 47-86.
- [8] Lencinas A., (1971). Geología del Valle de Punilla entre Bialeto Massé y La Cumbre, Provincia de Córdoba. *Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba*. Tomo I. N° 2.
- [9] Martino, R. D., Guerreschi, A. B., & Carignano, C. C. (2012). Influencia de la tectónica preandina sobre la tectónica andina: el caso de la falla de Sierra Chica, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(2), 163-178.
- [10] Quintana Crespo E. (2010, a). 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.
- [11] Quintana Crespo E. (2010, b). 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.
- [12] Quintana Crespo, E. y Navarro, M. A. (2020). Línea Base para Riesgo de Caída de Rocas en un camino de montaña en Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (45), 33-47.
- [13] Quintana Crespo, E. y Soffietti, F. P. (2020). Una Zonificación Geotécnica Aplicada a Taludes Rocosos en el Cordón de Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 7(2), 27-43.
- [14] Rocscience Ltd. Swedge-Probabilistic analysis of the geometry and stability of surface wedges. Toronto, Canada; 2021.