



Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en fase operativa en el Camino de Altas Cumbres, Sierra Chica, Córdoba, Argentina

Use of rock fall hazard measurement systems in the operational phase of the Altas Cumbres Road, Sierra Chica, Cordoba, Argentina

Quintana Crespo, Enrique F. ¹ ✉ - Navarro, María Alejandra ²

Recibido: 12 de diciembre de 2021 • Aceptado: 09 de junio de 2022

Resumen

El presente trabajo muestra las conclusiones de la segunda etapa de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, cuyo objetivo consiste en la aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo de caída de rocas en obras viales de montaña.

La primera parte del proyecto se dedicó al establecimiento de una “línea base” en la RP34 – Camino de Altas Cumbres – sector de cruce del cordón de Sierra Chica, en la Provincia de Córdoba, mediante el Sistema de Calificación de Riesgo de Caída de Rocas modificado (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) realizada al tiempo cero, es decir a escasos meses de la liberación al tránsito, y permitió contar con la información básica de la situación de los taludes.

A poco más de un año de operación del camino, se han registrado caídas de rocas en diversos taludes que determinaron un nuevo esquema de riesgo y permitieron observar el funcionamiento del sistema implementado.

Los resultados obtenidos permitieron detectar aquellas variables que sufrieron modificaciones y afectaron los índices de riesgo y separarlas de otras cuyos cambios o incrementos se mantuvieron bajo un umbral que no causó modificaciones en la categoría del riesgo.

De ese modo se definieron las variables que considera el sistema que deben ser monitoreadas en detalle en cada talud para determinar acciones a implementar que eviten el aumento en la categoría y en consecuencia el valor de riesgo.

Palabras clave: Caída de rocas, Estabilidad, Macizos Rocosos, Riesgo.

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

✉ equintr@yahoo.com

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

Abstract

This paper shows the conclusions of the second stage of a research project developed in the Faculty of Engineering of the Catholic University of Córdoba, whose objective is the application of geotechnical models for the analysis of risk of falling rocks in mountains routes.

The first part of the project was dedicated to the establishment of a "baseline" in the RP34 – Camino de Altas Cumbres – at Sierra Chica, Córdoba, through the modified Rockfall Risk Rating System. (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) carried out at time zero, that is, a few months after release to traffic, and allowed for basic information on the situation of the slopes.

After more than a year the road has been in operation, rock falls have been recorded on various slopes that determined a new risk scheme and allowed the functioning of the implemented system to be observed.

The results obtained made it possible to detect those variables that underwent changes and affected the risk indices, and to separate them from others whose changes or increases remained below a threshold that did not cause changes in the risk category.

In this way, the variables considered by the system that must be monitored in detail on each slope were defined to determine actions to be implemented to avoid an increase in the category and, consequently, the risk value.

Keywords: Risk, Rockfall, Rock Mass, Stability.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo reúne las conclusiones de la segunda etapa de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba titulado: “Aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo en taludes rocosos para obra viales”.

La primera etapa del proyecto consistió en la obtención de una “línea base” de riesgo de caída de rocas en la Ruta Provincial 34 (Camino de las Altas Cumbres), (Figura 1) en un tramo de 16,6 km de longitud, que comunica al camino de cintura C45, a la altura de la localidad de Falda del Cañete, con las rutas 14 y E96, en el Valle de Punilla, (Quintana Crespo y Navarro, 2020).

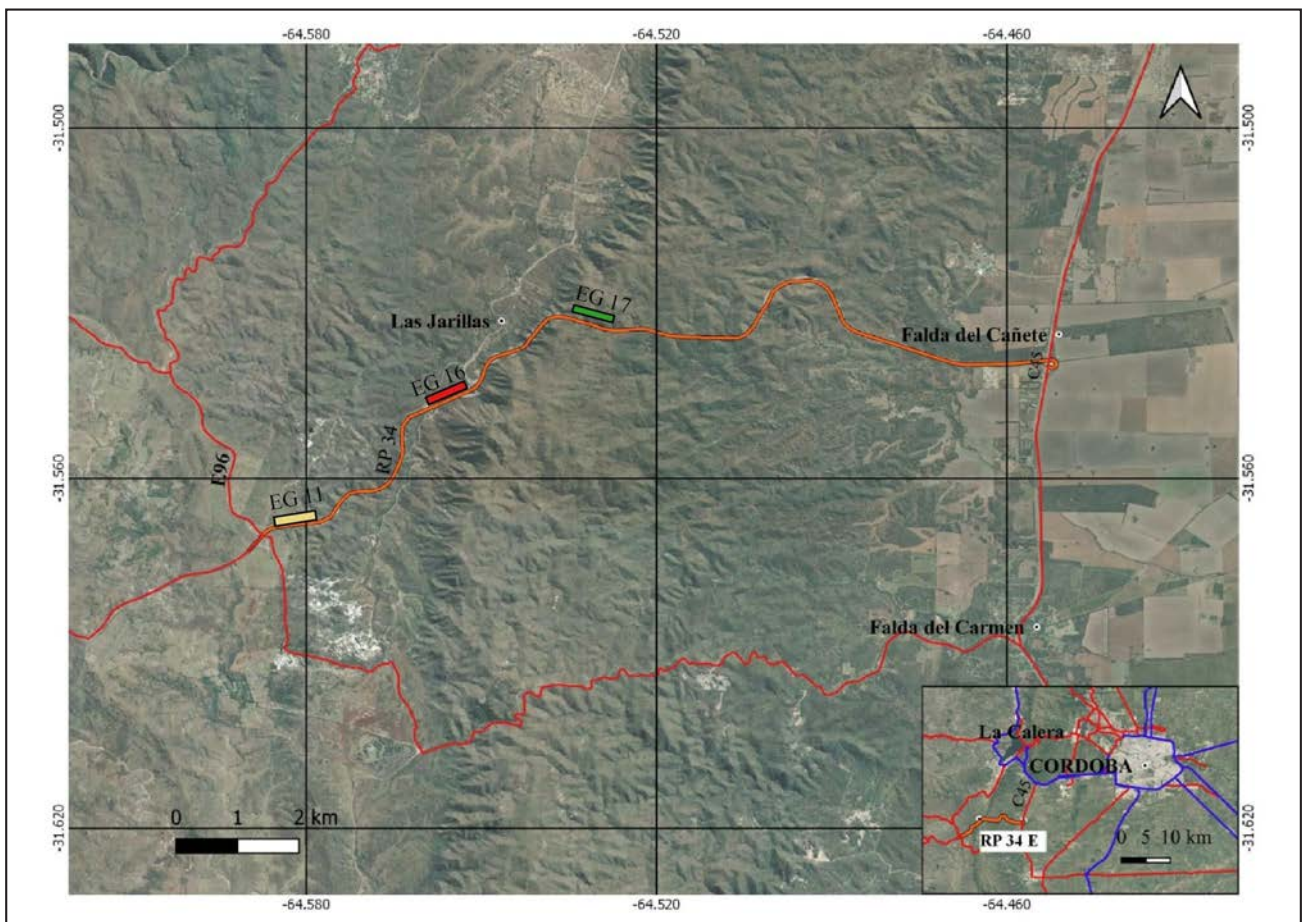


Figura 1. Ubicación del tramo en estudio (RP34 Este: Intersección C45 - Intersección E96) y taludes referidos en el trabajo (EG 11, EG 16 y EG 17). Sobre imagen de Google Earth.

Para ello, se realizó un relevamiento geológico-geotécnico en el momento de la puesta en servicio de la obra, con el fin de determinar la estabilidad resultante de los taludes generados, y se calificaron los macizos rocosos mediante la aplicación del criterio de *Hoek y Brown (1980)*. Previamente se había efectuado la clasificación de los macizos rocosos y la determinación de unidades de mapeo de ingeniería geológica (*Quintana Crespo y Soffietti, 2020*).

El método utilizado tomó como base el “Rockfall Hazard Rating System (RHRS)”, desarrollado por *Pierson et al. (1990)* en el Departamento de Transporte de Oregón (ODOT) y patrocinado por la FHWA (Federal Highway Administration), con una de las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: la introducción del “Slope Mass Rating” de *Romana (1991)* como método de caracterización de la estabilidad de los taludes rocosos.

En la actualidad los relevamientos de caídas de rocas, así como los deterioros en calzada, pueden ser realizados mediante imágenes de dron, con gran rapidez, facilidad y excelente calidad de imágenes, con lo cual es posible brindarle a la administración de las redes viales, tanto provinciales como nacionales, una actualización de la base de datos original en momentos críticos, tales como la época de lluvia, actividad sísmica, etc. Estas bases de datos deben encontrarse georreferenciadas y formando parte de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para poder recibir los datos y actualizarse automáticamente. Los casos de estudio de *Singh et al. (2018)* son importantes referencias sobre aplicaciones

geotécnicas de SIG, en integración de datos; visualización y análisis; planeamiento y resumen de actividades en sitios específicos; y presentación de datos. *Ansari et al. (2016)* desarrollaron a partir del RHRS, un sistema propio para las redes de caminos de India, con bases de datos raster y vectoriales incorporados en un ambiente SIG. Por su parte *Bouali et al. (2017)* explicitan las múltiples ventajas de la utilización de sensores remotos para la aplicación del RHRS.

A fin de conocer las variaciones ocurridas en la estabilidad de los taludes rocosos de la RP 34, que fueran relevados con motivo del establecimiento de la “línea base”, se llevó a cabo una nueva inspección a 18 meses de la primera, en la que se obtuvieron nuevamente los datos necesarios para la utilización del método RHRS original de *Pierson*: altura de taludes, eficiencia de la cuneta, distancia visual de decisión, ancho de calzada y cuneta; caracterización geológica, tamaño de bloques y/o volumen de desprendimientos, antecedentes de caídas de rocas, condiciones climáticas y aguas subterráneas. También se consideraron las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: la clasificación geológica basada en el Slope Mass Rating (SMR) de *Romana (1991)*; la estimación cuantitativa de la eficiencia de las cunetas mediante la carta de *Ritchie (1963)*, con actualizaciones de *Fookes y Sweeny (1976)*, y *Whiteside (1986)*.

La Tabla 1 resume las nueve categorías y los puntajes correspondientes, de acuerdo al criterio de clasificación establecido por *Budetta (2004)*.

Tabla 1. Planilla Resumen del Método RHRS modificado.

Categoría	Criterio de Calificación por Puntaje			
	Puntos 3	Puntos 9	Puntos 27	Puntos 81
Altura del Talud	7,5m	15m	22,5m	> 30m
Eficiencia de la Cuneta	Buena: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño y barreras)	Moderada: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño)	Limitada: diseño equivocado	Nula
Riesgo medio por vehículo (% del tiempo)	25%	50%	75%	100%
Distancia Visual de Decisión (% del valor de diseño)	Adecuada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muy Limitada (40%)
Ancho de Camino	21,5 m	15,5 m	9,50 m	3,5 m
Slope Mass Rating SMR	80	40	27	20
Tamaño de Bloque	0.3 m	0.6 m	0.9 m	1.20 m
Volumen de Bloques	0,026 m ³	0,21 m ³	0,73 m ³	1,74 m ³
Volumen de derrumbe x evento	2,3 m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,2 m ³
Lluvias anuales y períodos de heladas	H =300 mm Sin heladas	H =600 mm ó Cortos períodos de heladas	H = 900 mm ó Largos períodos de heladas	H = 1200 mm ó Largos períodos de heladas
Antecedentes de caídas de rocas	1 cada 10 años	3 por año	6 por año	9 por año

LINEA BASE DE RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS

Los resultados correspondientes a las investigaciones para la obtención de una “línea base” de riesgo de caída de rocas, se expusieron detalladamente en *Quintana Crespo y Navarro (2020)*, y se resumen a continuación:

El tramo analizado de la RP34 E fue inaugurado a fines del año 2019. Cuenta con 16,6 km de longitud total y 26 taludes

rocosos que fueron divididos en 52 secciones homogéneas, cuyas longitudes totalizan 5.169 metros.

La “línea base” para el análisis de riesgo de caída de bloques se determinó en 18 taludes. Los valores RHRS alcanzados son bajos, variando entre un mínimo de 69 y un máximo de 225. (Tabla 2). Por tratarse de un estudio a tiempo cero, no se suma puntaje por la categoría de Frecuencia de Caída de rocas.

Tabla 2: Valores de puntajes obtenidos mediante el método RHRS modificado

Talud	Sección	Tipo Geotécnico	RHRS
12	S1	5.2.2 Gneis masivo	93
	S2-S3-S5	5.2.2 Gneis masivo	147
	S4	5.2.3 Pegmatitas	141
13	S1-S2	5.2.2 Gneis masivo	147
14	S1	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S2	5.2.2 Gneis masivo	93
15	S1-S2	4.2.1 Cataclasitas	153
16	S1	4.2.1 Cataclasitas	225
17	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	111
18	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	87
19	S1-S2-S3-S4-S5-S6	4.1.1 Metatexitas	87
	S7	4.1.1 Metatexitas	93
20	S1-S2-S5-S6	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S3-S4	5.2.2 Gneis masivo	87
21	S1	5.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5	5.2.2 Gneis masivo	141
22	S1-S3-S4-S5-S6	3.2.2 Gneis masivo	84
	S2	3.2.2. Falla	171
23	S1	3.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5-S6-S7-S8	3.2.1 Gneis esquistoso	87
24	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	141
	S1	3.2.2 Gneis masivo	94
25	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	147
	S2	3.2.2 Gneis masivo	93
26	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	100
	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	93
30	S1-S2	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S3	3.2.2 Gneis masivo	69
31	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S2	3.2.2 Gneis masivo	69
32	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	111

Con las puntuaciones obtenidas “a tiempo cero”, se generó una capa de información, dentro del sistema Qgis.

Se delimitaron las zonas que deben ser regularmente monitoreadas (representadas en color rojo): el TG 4.2.1 (cataclasitas) en los taludes 15 y 16, que presentan los valores de puntuación más elevados (153 - 225 puntos); la zona de falla del talud 22 (171 puntos); los TG 5.2.2 (gneises masivos) en los taludes 12, 13 (147 p.) y TG 3.2.2 en los taludes 21 y 24 (141 p.); y el TG 3.2.1 (gneis esquistoso) en el talud 25 (147p.).

En las zonas representadas en color amarillo pálido, (entre 121 y 173 puntos) con condiciones de estabilidad buena, la conservación de rutina debe incluir la limpieza de bermas, mantenimiento de cunetas de guardia, y eventualmente tareas de despedrado en algunos puntos críticos.

En cuanto a las zonas representadas en verde presentan una situación inicial de las características geométricas y geológicas de los taludes, que permite prever un comportamiento estable en el mediano y largo plazo. (Figura 2).

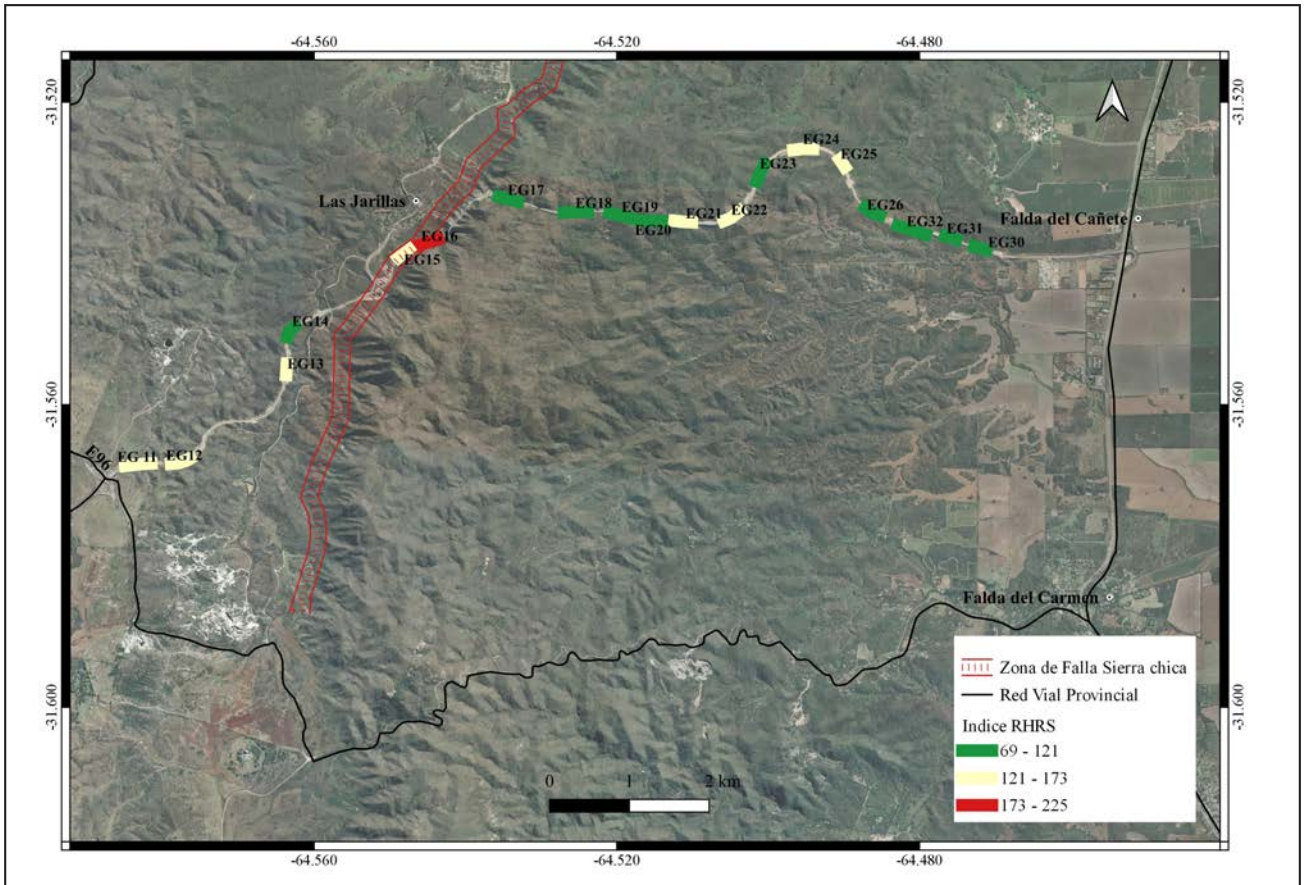


Figura 2. Taludes analizados para línea base de riesgo de caída de rocas. Método RHRS modificado.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ÍNDICE RHRS EN TIEMPO CERO Y EN ETAPA OPERATIVA

Después de un año y seis meses de la definición de la “línea base de riesgo de caída de rocas” en la Ruta Provincial 34 Este (Octubre/2019) se detectaron desprendimientos en 3 taludes: EG11, EG16 y el EG17. A fin de actualizar las bases de datos correspondientes al sistema de medición de riesgo de caída de rocas implementado en la RP 34 Este, se tuvieron en cuenta aquellas variables que sufrieron modificaciones como consecuencia directa de los desprendimientos; y aquellas otras en las que el estudio específico efectuado en los taludes fallados produjo resultados diferentes a los del análisis general del tramo para la obtención de la “línea base”.

El talud EG11 se encuentra conformado por marmoles calcínicos y dolomíticos, que forman parte del basamento cristalino. No fue analizado originalmente debido a su baja altura y a su ubicación alejada del camino, no obstante, con la producción del derrumbe y la consecuente obstaculización del

drenaje al pie del talud, puede generarse el humedecimiento del mismo y el descalce de las partes superiores. (Figura 3).

El talud EG17 fue estudiado en tres sectores: S1 de 100 mts. de longitud, S2 de 27 mts. y S3 de 118 mts., y se obtuvieron valores del índice RHRS modificado, igual a 93, 111 y 93 puntos respectivamente. Los factores que cambian en el caso de la sección S2 es el Riesgo promedio por vehículo (AVR) y el SMR, que toman los siguientes valores: AVR- S1 y S3 = 9 y S2 = 3; esto es debido a que las longitudes de las secciones cambian, siendo muy inferior la correspondiente a la S2; y en cuanto al SMR, presenta un puntaje de 3 para las secciones S1 y S3; y 27 para S2.

En los sectores S1 y S2 se produjeron dos desprendimientos importantes, relacionados con familias de discontinuidades que generan cuñas inestables. En la Figura 4 se puede observar los desprendimientos sobre la ortofotografía obtenida con un dron DJI - Spark 4, desde una altura de vuelo de 50 metros.

A partir de la ortofotografía se obtuvieron las curvas de nivel y el modelo de elevación digital, (Figura 5) a fin de poder establecer la geometría de las zonas deslizadas.



Figura 3. Zona de derrumbe en talud EG11.

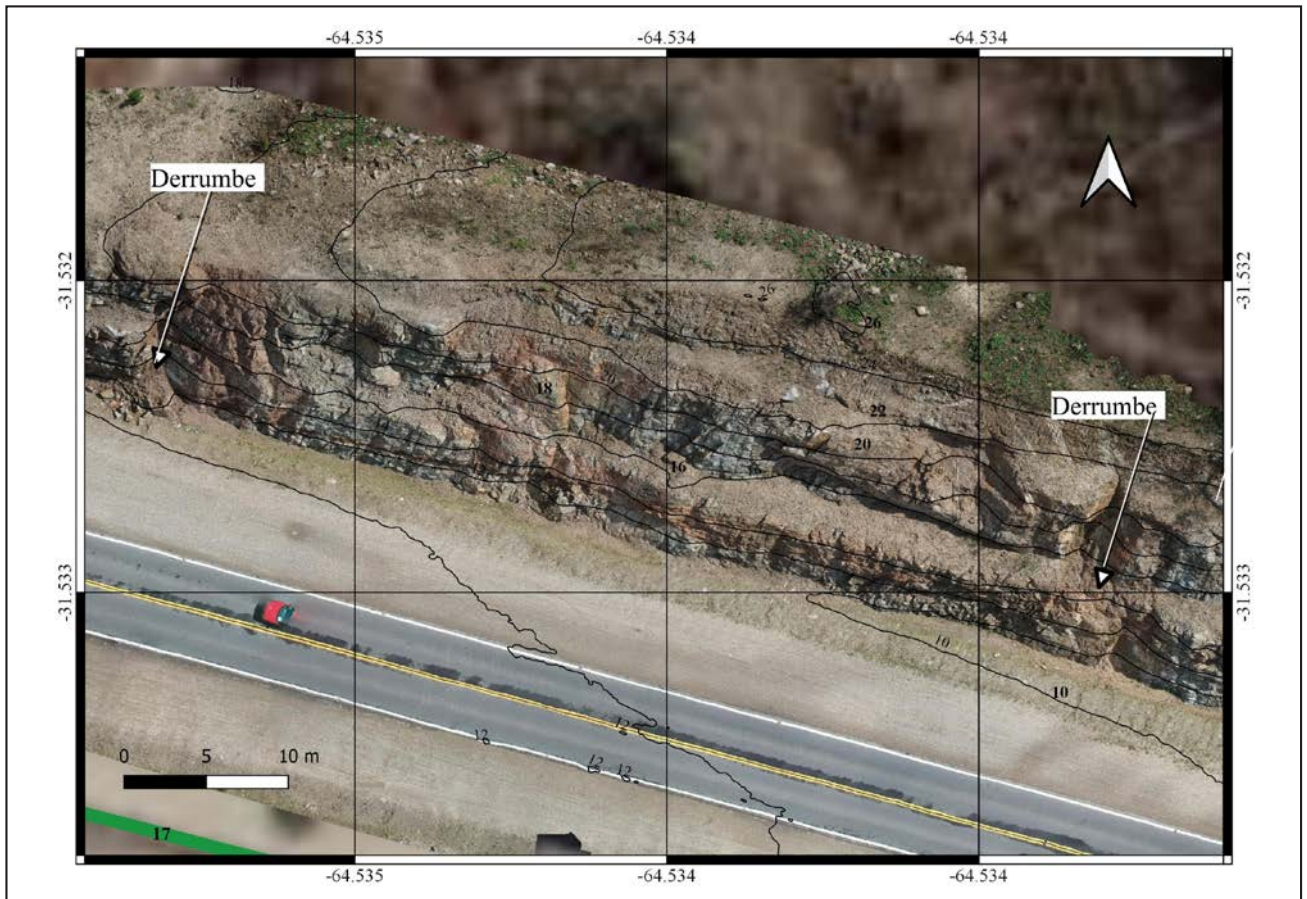


Figura 4. Derrumbes en EG17. Sector S1 y S2.

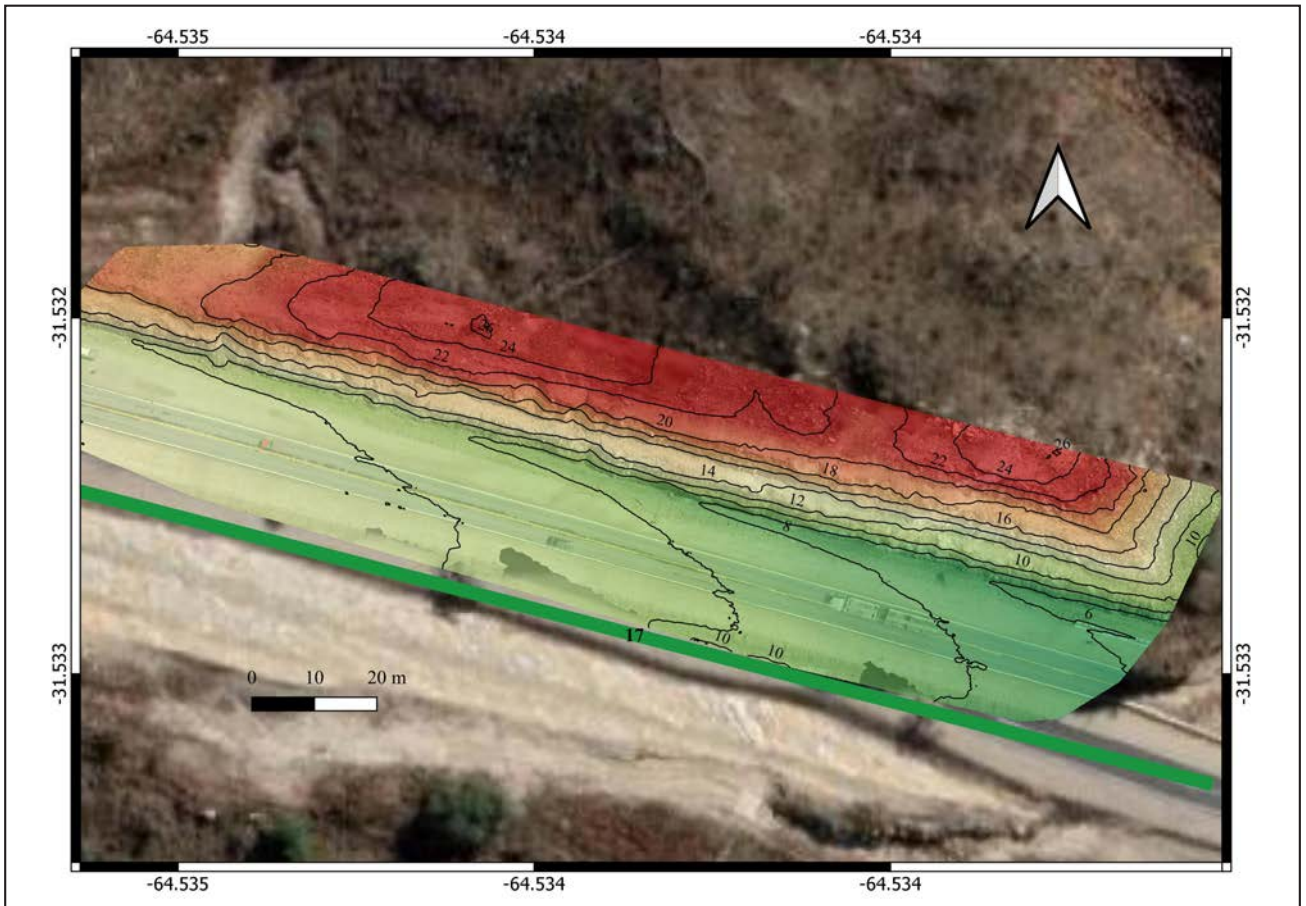


Figura 5. Modelo Digital de Elevación de EG17. Sector S1 y S2.

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

Las Tablas 3 y 4 corresponden al análisis del talud EG17, en las secciones S1 y S2, en el momento de obtención de la línea base y en el relevamiento realizado después de 18 meses de operación de la vía.

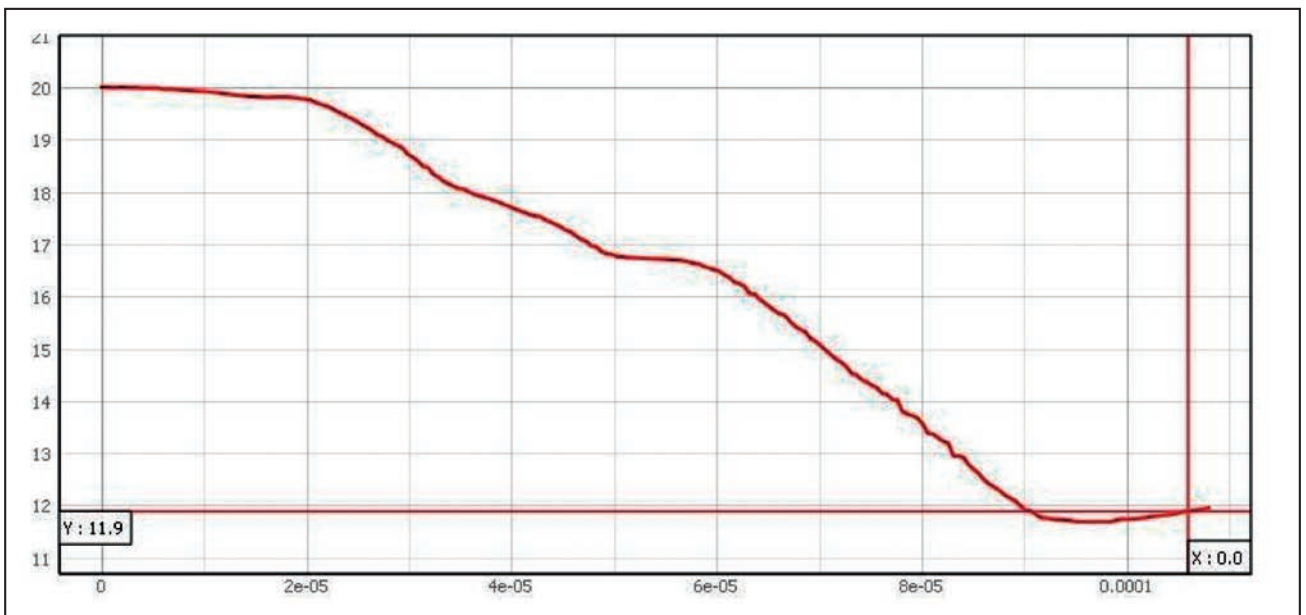


Figura 6. Perfil transversal del talud EG 17, previo al derrumbe.

El primer aspecto a tener en cuenta -por la gran modificación que sufre- es la condición de la cuneta: el estado actual del derrumbe abarca todo el ancho de la cuneta limitando el libre escurrimiento de agua y provocando acumulación de ésta dentro del talud. Esto podría provocar nuevos derrumbes y permitir

nuevamente la posibilidad de caídas de rocas sobre la calzada. Como consecuencia se produce un aumento del valor de la categoría con respecto al estado inicial que pasa de Buena a Ineficiente, elevando su puntaje de 3 a 81 para ambas secciones. (Figura 7).



Figura 7. Talud EG17. (31°31'56" - 64°32'02") Desmoronamiento de bloques y obstrucción de cuneta. Vista hacia el Oeste.

Tabla 3. Análisis del talud EG17 - Sección 1 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating	
				Tiempo Cero	A 18 meses
Altura del Talud	H(m)	24	$3^{(H/7,5)}$	33,63	
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	3
	Ineficiente			81	81
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	6,24	9
	TMDA (vpd)		6000		
	Vehículos por hora (vph)		250		
	Longitud de zona (m)		27		
	Velocidad Diseño (km/hr)		60		
Distancia de Visibilidad	%Da	87,7	$3^{((120-\%Da)/20)}$	5,89	3
	Distancia requerida (m)		171,0		
	Distancia disponible (m)		150,0		
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{((27,5-Lc)/6)}$	16,17	9
	Calzada (m)		7,3		
	Banquina (m)		5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9
		1,50			81
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
		6,7			27
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27
	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$	3,00	
Frecuencia caída de bloques	1. Algunos	1/ (365*10)			3
	2. Ocasionales	3/365			9
Slope Mass Rating	SMR	73	$3^{(80/SMR)}$	3,33	3
		32			9
				93	282

Tabla 4. Análisis del talud EG17 - Sección 2 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating		
				Tiempo Cero	A 18 meses	
Altura del Talud	H(m)	24	$3^{(H/7,5)}$	33,63	27	27
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	3	
	Ineficiente			81		81
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	6,24	3	3
	TMDA (vpd)		6000			
	Vehículos por hora (vph)		250			
	Longitud de zona (m)		27			
	Velocidad Diseño (km/hr)		60			
Distancia de Visibilidad	%Da	87,7	$3^{((120-\%Da)/20)}$	5,89	3	3
	Distancia requerida (m)		171,0			
	Distancia disponible (m)		150,0			
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{(27,5-Lc)/6}$	16,17	9	9
	Calzada (m)		7,3			
	Banquina (m)		5,0			
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76		9
		1,50				81
Volumen del Bloque	m ³	0,2				
		6,7				27
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27	27
	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$	3,00		
Frecuencia caída de bloques	Algunos	1/ (365*10)			3	
	Ocasionales	3/365				9
Slope Mass Rating	SMR	25	$3^{(80/SMR)}$	3,33	27	
	20				27	
					111	294

En cuanto al tamaño medio de los bloques derrumbados, originalmente considerado para toda la sección igual a 0,56 m, pasa puntualmente para la zona de derrumbe ilustrada en la Figura 3, a 1,50 m; y se estima un volumen del derrumbe igual a 6,7 m³. Debido al tamaño de bloque el puntaje pasa de 9 a 81, a lo que se debe agregar el puntaje debido al volumen del derrumbe que es igual a 27 puntos, para ambas secciones.

Para la frecuencia de caída de bloques en el momento de la confección de la "línea base" de riesgo de derrumbes, se consideró una puntuación mínima de 3 puntos, correspondiente a un derrumbe cada 10 años, por carecerse de antecedentes. Con la ocurrencia de los dos desprendimientos en el EG 17, la puntuación corresponde a la categoría de "Ocasionales", con frecuencia de 3 por año: 9 puntos, para ambas secciones.

La variable SMR, fue calculada para la ejecución de la línea base mediante el método de Hoek y Brown con el valor de GSI promedio resultando igual a 73 (3 puntos RHRS) para la Sección 1 y 25 para la Sección 2 (27 puntos). Para la situación actual que contempla los derrumbes, el cálculo fue realizado en base al GSI mínimo y se actualizaron los valores de F1, F2, F3 y F4, obteniéndose los valores de SMR=32 (que implican 9 puntos para el RHRS) para la S1 y SMR = 20 (27 puntos) para la S2.

De esta forma los puntajes iniciales del talud 17, secciones 1 y 2, que eran de 93 y 111 puntos respectivamente, se incrementan en función del derrumbe ocurrido a 282 y 294 puntos respectivamente.

La limpieza y desobstrucción de la cuneta en el talud 17, permitiría revertir la condición de drenaje de la misma, llevándola

a la situación inicial, lo que produciría una disminución de 78 puntos en el RHRS. No obstante, debe tenerse en cuenta que la eliminación del material del derrumbe produce también el descalce de pie del talud. Ello implica que conjuntamente se tienen que plantear alternativas de estabilización, tales como el enmallado de la zona derrumbada para restablecer la estabilidad de la pared rocosa.

En cuanto al talud EG16, han ocurrido una serie de derrumbes ocasionados principalmente por la caída de agua por la cara del talud, debido a la obstrucción de las cunetas de guarda. Este talud fue construido sobre cataclasitas correspondientes a la falla de Sierra Chica y tiene una antigüedad de aproximadamente seis años, ya que fue construido en una etapa previa a la paralización que sufrió la construcción de la obra durante tres años. Ese período de tiempo fue utilizado para la observación del talud, que se mantuvo estable en forma global, con caída de pequeños bloques sobre las cunetas de guarda. La obstrucción de las cunetas generó concentración del flujo en determinados lugares del talud que hoy registran derrumbes.

Para el análisis correspondiente a la "línea base" se obtuvo una puntuación mediante el RHRS igual a 225 puntos. (Tabla 5).

El talud correspondiente al EG16 tiene una altura de 50 mts., con 6 bancos de 8 mts. y bermas de 2,50 mts., de ancho. Los primeros 5 bancos fueron excavados con pendiente 2V:1H y el superior en transición hacia la ladera con pendiente 1V:1H.

En la Figuras 8 y 9 se puede observar el desprendimiento principal que abarca dos bancos y se sitúa sobre la segunda berma.

Tabla 5. Análisis del talud EG16 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating	
				Tiempo Cero	A 18 meses
Altura del Talud	H(m)	50	$3^{(H/7,5)}$	1516	81
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	
	Moderada		0	9	9
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	38,9	81
	TMDA (vpd)		6000		
	Vehículos por hora (vph)		250		
	Longitud de zona (m)		27		
	Velocidad Diseño (km/hr)		60		
Distancia de Visibilidad	% Da	87,7	$3^{((120-\%Da)/20)}$	3	3
	Distancia requerida		171,0		
	Distancia disponible		150,0		
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{((27,5-Lc)/6)}$	16,17	9
	Calzada (m)		7,3		
	Banquina (m)		5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27
Frecuencia caída de bloques	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$		
	1. Algunos	1/ (365*10)		3	3
	2. Ocasionales	3/365			9
Slope Mass Rating	SMR	40	$3^{(80/SMR)}$	9	9
				225	231



Figura 8. Ubicación del desprendimiento principal en talud EG16.

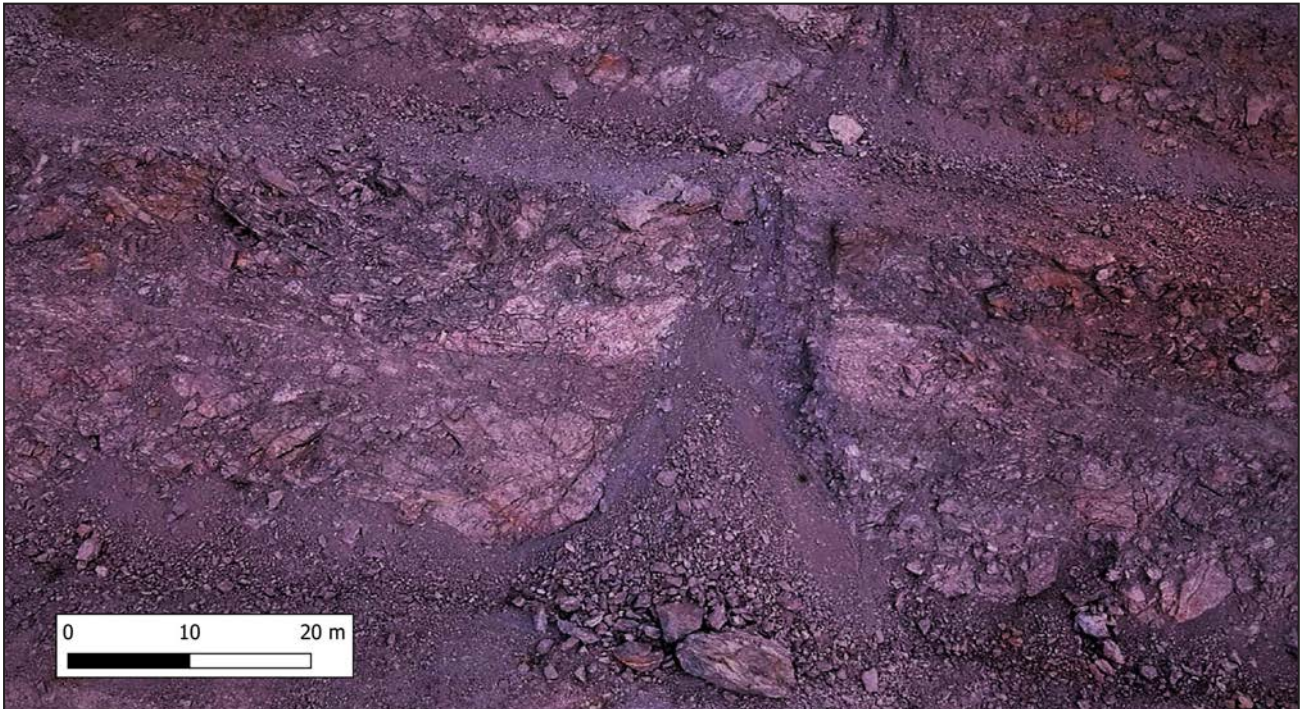


Figura 9. Detalle del desprendimiento en talud EG16. ($31^{\circ}32'19'' - 64^{\circ}32'40''$)

Para el análisis de los desprendimientos se realizó un vuelo con un dron Spark 4 - DJI, desde una altura de vuelo de 50 metros, obteniéndose el modelo digital de elevación con las

curvas de nivel y el perfil transversal en la zona del derrumbe principal. (Figura 10).

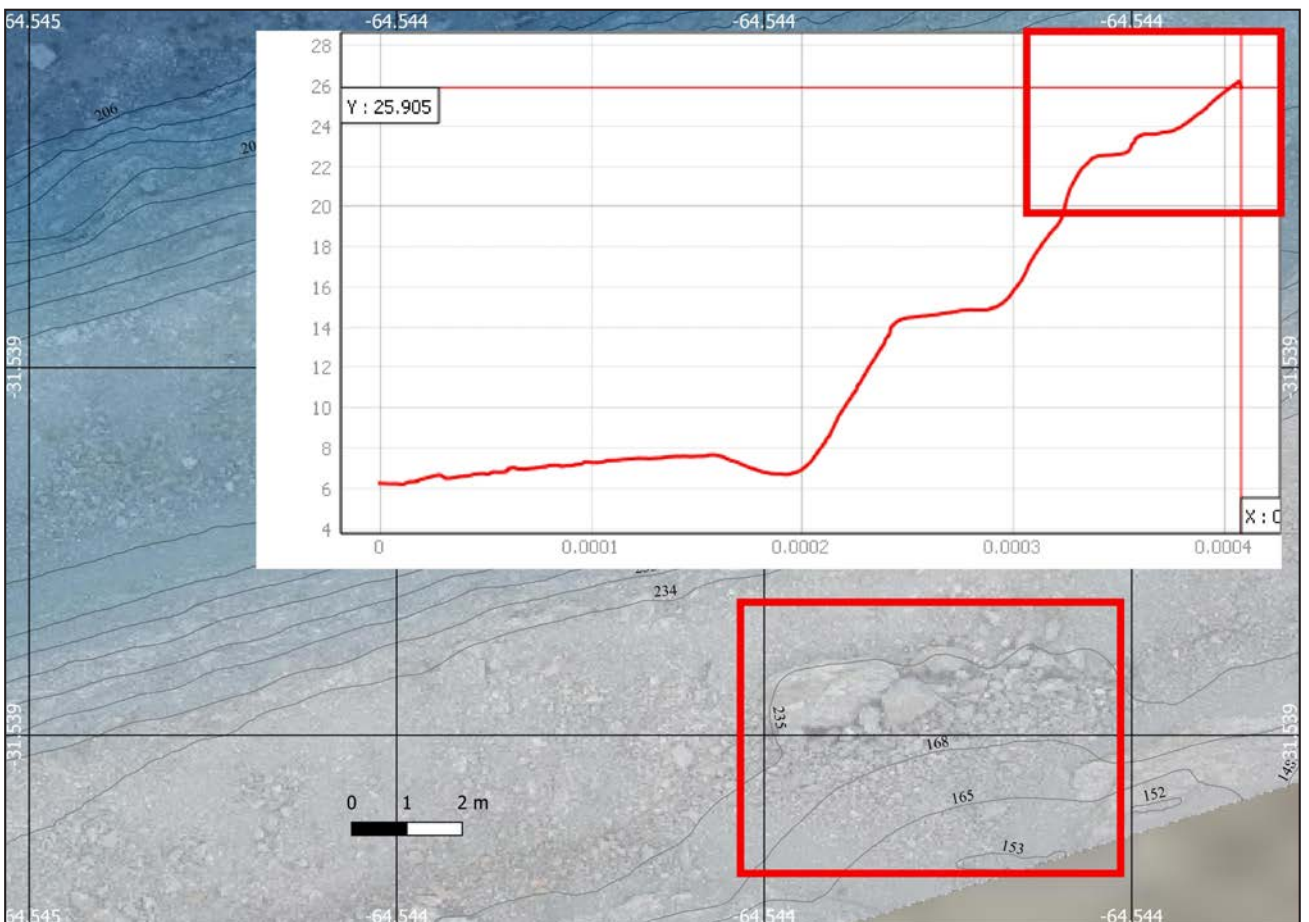


Figura 10. Perfil transversal del EG16 en zona de derrumbe.

Los rectángulos en rojo marcan la zona del derrumbe y la acumulación del material en zona de berma, con la correspondiente obstaculización de la cuneta de guarda.

Las modificaciones en el análisis de caída de rocas para el escenario actual: con derrumbes; implica cambios solamente en la variable: Frecuencia de caída de rocas, que en forma similar al EG 17, pasaría de 3 a 9 puntos, por la existencia de dos zonas de derrumbes, llevando la puntuación RHRS a 231; pero la forma de reflejar las condiciones de estabilidad y el riesgo de caída de bloques requiere de un estudio sectorizado, tanto en progresiva como en altura.

Las variables que fueron analizadas con mayor detalle en ambos taludes, pero que no registraron cambios que pudieran alterar la puntuación de RHRS, fueron:

RMV (Riesgo Medio por Vehículo): con posterioridad a los eventos de caídas de rocas, la Dirección Provincial de Vialidad realizó un censo de tránsito (en agosto de 2021) para estimar el TMDA que resultó ser igual a 4.970 vpd, muy cercano a los 6.000 vpd estimados para la ejecución de la “línea base”, por lo que el valor de la categoría se mantuvo en 9. En cuanto a la velocidad de los vehículos, que también es tenida en cuenta para la determinación del RMV, el método adopta la velocidad máxima señalizada en el tramo igual a 80 y 60 km/h según las zonas. Al momento del censo de tránsito se registraron las velocidades de flujo libre de los vehículos que transitan por la ruta obteniéndose como percentil 85, un valor de 103 km/h teniendo en cuenta ambos sentidos de circulación. Esto implicaría una disminución del RMV, ya que a mayor velocidad disminuye el tiempo en que los vehículos permanecen en la zona de riesgo. Estos ligeros cambios de TMDA y RMV no afectan a la categorización del tramo se mantiene igual a la determinada para el análisis de la línea base. (Figura 11).

DVD (Distancia de Visibilidad): El cambio registrado en la velocidad de circulación al momento del censo de tránsito (103 km/h), no influye en los taludes 17 y 16, ya que se encuentran en zonas de viaductos, con velocidades máximas permitidas de 60 km/h. En cuanto a la disminución de visibilidad por el crecimiento de la vegetación en banquinas, no se presentaron cambios en los sectores correspondientes a los taludes que presentaron derrumbes.

Condición Climática: la base de datos pública del Sistema de Gestión Clima - del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, brinda valores horarios de precipitación de los que se puede obtener un promedio de los registros acumulados entre las estaciones de Alta Gracia y Los Chorrillos para el año 2021, registrándose valores inferiores a los utilizados en la determinación de la “línea base” pero que tampoco generan cambios de categoría.

CONCLUSIONES

Los relevamientos realizados para la aplicación del sistema RHRS, con posterioridad a la ejecución de la “línea base”, mediante tecnologías tales como las fotografías de dron, y modelos digitales de elevación son de rápida y fácil ejecución.

En las dos secciones del talud EG17, donde ocurrieron derrumbes se incrementó el índice RHRS en alrededor de un 200%.

En el talud EG16 el incremento del índice RHRS fue solo del 3% debido a que los derrumbes ocurrieron sobre bermas en altura y el análisis se encuentra efectuado a nivel de piso.

La obstrucción de cuneta y los cambios en las condiciones de drenaje -y consecuentemente de humedad del macizo rocoso- en la zona del derrumbe constituyen el factor de mayor sensibilidad para la determinación del índice RHRS.

Se registraron cambios importantes en el tamaño de bloque obtenido mediante el análisis de la zona de derrumbe, en relación al análisis regionalizado utilizado para la obtención de la “línea base”.

La historia y antecedentes de derrumbes en taludes rocosos, son datos muy valiosos para el establecimiento de una serie temporal de eventos; y el conocimiento de su magnitud y frecuencia, permiten la calibración de sistemas de monitoreo y alarma en lugares y épocas del año determinados.

La incorporación de esa información en un SIG permite la actualización y generación de informes sobre riesgo de derrumbes y caídas de rocas en caminos de montaña.

Todos estos elementos terminan aportando para la toma rápida de decisiones sobre medidas de mitigación y/o remediación que garanticen la transitabilidad en condiciones seguras de la vía.



Figura 11. Medición del TMDA y Velocidad de los vehículos con equipo de la Dirección Provincial de Vialidad. Ubicación: (31°31'44.03" - 64°30'2.17") Orientación fotográfica hacia el Oeste.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería de 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 que facilitó la licencia para el software utilizado, y a la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba que permitió la publicación de datos técnicos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AASHTO. 2011.
A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
Tomo 1. Anexo 3. Distancia Visual de Detención.
- ANSARI M., AHMAD M., SINGH R., Y SINGH T. (2016).
Rockfall Hazard Rating System along SH-72: a case study of Poladpur–Mahabaleshwar road (Western India), Maharashtra, India,
Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7:2, 649-666, DOI: 10.1080/19475705.2014.1003416
- BOUALI E.H., VITTON S., BROOKS C.,
Rockfall Hazard Rating System: Benefits of Utilizing Remote Sensing.
Environmental and Engineering Geoscience. 2017. DOI: 10.2113/gseegeosci.23.3.165
- BUDETTA P. 2004.
The modified Rockfall Hazard Rating System. Assessment of rockfall risk along roads.
Natural Hazards and Earth System Sciences 4: 71-81
- FOOKES, P., AND SWEENEY, M. 1976.
Stabilisation and control of local rockfalls and degrading of slopes.
Quarterly Journal of Engineering Geology, 9(1): 37-55. doi:10.1144/GSL.QJEG.
- HOEK, E. AND BROWN, E.T. 1980.
Empirical strength criterion for rock masses.
J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- PIERSON, L. A., DAVIS, S. A., AND VAN VICKLE, R. 1990.
Rockfall Hazard Rating System - Implementation Manual,
Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. of Transport.
- QUINTANA CRESPO, E., & 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. Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/view/29363>
- 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 la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente - ASAGAI. N° 45 - ISSN 2422 - 5703 (En línea).
- RITCHIE, A. M. 1963.
Evaluation of rockfall and its control,
U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission.
- ROMANA, M. 1991.
SMR Classification,
Proc. 7th Int. Congr. on Rock Mech., Balkema, Rotterdam, 955-960.
- SINGH A., NOOR S. CHITRA R., GUPTA M., (2018)
Applications of GIS in Geotechnical Engineering: Some Case Studies.
International Journal of Scientific Engineering and Science Volume 2, Issue 3, pp. 34-38, 2018. ISSN (Online): 2456-7361
- WHITESIDE, P., (1986)
Discussion on rockfall protection measures,
Conf. on Rock Eng. and excavation in an Urban Env., Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, 490-498.