

APLICACIÓN DE CLASIFICACIONES PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA GESTIÓN DE LA EXPLOTACIÓN DE CORREDORES VIALES. EXPERIENCIAS, ADAPTACIONES Y PROPUESTAS

JESÚS DAVID FERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ (1), JOSE DIEGO LÓPEZ-VALERO (2) y
MARCEL HÜRLIMANN (3)

(1) Geoconsult España Ingenieros Consultores, S.A.U.
Responsable de proyecto I+D+i (1)
jd_fernandez@geoconsult.es

(2) Geoconsult España Ingenieros Consultores, S.A.U.
Responsable de Ingeniería de terreno
mailto:jd_lopez@geoconsult.es

(3) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universitat Politecnic Catalunya, UPC
marcel.hurlimann@upc.eu

RESUMEN

La gestión del riesgo en corredores viales por movimientos del terreno, tales como, inestabilidades de laderas, desmontes y terraplenes, tanto en macizo rocoso como en suelos, es un ámbito en el que el empleo de sistemas de clasificación del riesgo han de estar en continuo desarrollo y actualización, facilitando al gestor de la infraestructura una herramienta para priorizar las actuaciones e inversión. La clasificación RHRS “Rockfall Hazard Rating System” empleada por los autores, se descompone en características del terreno, de infraestructura, y frecuencias, habiendo sido aplicada en diferentes ubicaciones y entornos, con la finalidad de desarrollos de Planes de Inversión Estratégicos.

Las inestabilidades potenciales en suelos, tanto en taludes como terraplenes, presentes en los corredores analizados, han sido evaluadas en peligrosidad con una metodología análoga al RHRS adaptada a los suelos y denominada SHRS (Soil Hazard Rating System).

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de patologías e inestabilidades en las infraestructuras emplazadas en el terreno con desmontes y terraplenes es un proceso que se sucede de forma habitual, que implica de forma general un incremento de costes al gestor de la infraestructura y la consecuente pérdida de efectividad y funcionalidad de la misma, así como el perjuicio y riesgo de los usuarios.

La categorización y clasificación del fenómeno de peligrosidad, así como del riesgo inducido, no está muy extendido en relación con los movimientos del terreno en los que se emplazan las infraestructuras. De forma general, se realizan gestiones de los fenómenos inestables en las zonas de frecuencia de episodios de inestabilidad reiterativos o actuaciones de emergencia por episodios esporádicos.

El empleo de clasificaciones que engloben criterios de peligrosidad y riesgo con respecto a los

movimientos del terreno, proporcionan al gestor de la infraestructura una herramienta que priorice las inversiones mediante un plan estratégico de mantenimiento.

2. ROCK FALL HAZARD RATING SYSTEM (RHRS)

2.1 ESTADO DEL ARTE

Graves sucesos de desprendimientos en vías ferroviarias en British Columbia, Canadá, a principios de la década de 1970, impulsó el desarrollo del sistema de analizar y priorizar acciones en los taludes denominado RHRS por Brawner & Wyllie (Brawner & Wyllie, 1975). La necesidad de sectorizar las carreteras frente a los habituales desprendimientos que se producían del estado de Oregon (EEUU) y en colaboración con otras agencias estatales, despertó la necesidad de desarrollar e implementar sistemas de análisis, control y priorización de soluciones, que en base a la practicidad del desarrollo del sistema RHRS fue adaptado y calibrado a principio de la década de 1990 (Pierson, 1990, 1991, 1992).

Posteriormente, autores como Budetta (Budetta, 2004), introducen cambios en el sistema de evaluación, principalmente en el análisis geológico-geotécnico del macizo rocoso, sustituyendo la caracterización inicial (Pierson, 1990) en relación a la disposición estructural de las juntas y su componente friccionante (caso 1) o el grado de erosión diferencial y su desarrollo (caso 2), por un sistema de clasificación geomecánica como es el Slope Mass Rating, SMR (Romana, 1988) para evaluar la peligrosidad de inestabilidades en los taludes.

Recientemente se han publicado estudios (Bouali, 2017) sobre el beneficio en la relación coste/técnica en el empleo de nuevas tecnologías de toma de datos para la aplicación del RHRS.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología de evaluación de la peligrosidad por desprendimientos de rocas en los desmontes de los corredores de infraestructuras de transporte, consta de varias fases o evaluaciones.

El sistema de análisis y control Rockfall Hazard Rating System (RHRS) de forma completa, consta de 6 etapas o fases progresivas. Estas fases ordenadas de inicial a final son las siguientes: Inventario y localización de taludes (Fase 1), Clasificación preliminar (Fase 2), Clasificación de detalle (Fase 3), Plan Estratégico (Fase 4), Desarrollo del Proyecto (Fase 5) y Seguimiento y actualización anual (Fase 6).

Posteriormente a la localización e inventario de taludes del corredor (Fase 1), se debe realizar una Evaluación Preliminar Cualitativa (Criterial Expert) (fase 2) para poder realizar de forma efectiva la fase final de evaluación cuantitativa e indexada. Esta aproximación inicial, considerada como “criterio experto”, atribuye a cada talud de corte o ladera una categorización dual de clase-riesgo. Se definen tres clases A, B y C, y riesgo/peligrosidad Alto, Medio y Bajo respectivamente. Esta clasificación primaria o preliminar es meramente cualitativa a juicio del criterio experto, quien priorizará el análisis sobre los taludes con un riesgo A.

Una vez determinada la prioridad de análisis con la fase 2, se ha de realizar una clasificación de detalle (fase 3) de todos los taludes, estableciendo prioridades según la clasificación preliminar. Esta fase 3, conforma el desarrollo cuantitativo indexado de esta metodología, analizando categorías estructuradas por temática de evaluaciones. Se han de evaluar 9 (o 10 según metodología aplicada) categorías de diferentes temáticas estructuradas en 4 rangos puntuados cada una. Las categorías pueden ser agrupadas por ámbito o temática como: Infraestructura-Tráfico (RHRS_{infra}), Geológico-geotécnicas (RHRS_{geo}) y frecuencia (RHRS_{frec}). La descripción detallada de estas categorías se analiza en el siguiente apartado.

Con los taludes del corredor indexados según la clasificación de detalle (fase 3) se ha de elaborar un plan estratégico (fase 4) que estime las medidas de mitigación y la relación de costes/inversión. Esta estimación del plan estratégico, ayudará a la implementación más adecuada del proyecto de mitigación (fase 5). Finalmente, la herramienta desarrollada de análisis, control y mitigación del riesgo mediante la metodología RHRS, ha de ser actualizada con seguimientos periódicos (fase 6) (anuales / semestrales / ocasionales-situación accidental o umbrales de control) de los taludes del corredor de la infraestructura evaluada.

En el presente artículo se emplea como base de partida la metodología de RHRS_{mod} (Budetta, 2004), la cual es actualizada por Geoconsult (Tabla 1) para su empleo en corredores pirenaicos y andinos reflejando la importancia de las clasificaciones geomecánicas en las evaluaciones de riesgo de las infraestructuras (Geoconsult, 2019 y Fernandez-Gutiérrez et al, 2021).

Clasificación	Categoría		Criterio de evaluación y puntuación (Geoconsult 2019)			
			3 puntos	9 puntos	27 puntos	81 puntos
RHRS	Altura talud	H _t	7,5m	15m	22,5m	>30m
SHRS (STC-SBC)	Pendiente talud	ψ	<15°	15-30°	30-45°	>45°
RHRS-SHRS (STC)	Efectividad de cuneta	D _{eff}	Buena captación	Captación moderada	Captación limitada	No captación
SHRS (SBC)	Distancia calzada-talud	S _d	>3m	2m	1m	0,5m
RHRS-SHRS	Riesgo vehículo promedio	AVR	25% tiempo	50% tiempo	75% tiempo	100% tiempo
RHRS-SHRS	Visibilidad para toma de decisiones	DSD	Adecuada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muy limitada (40%)
RHRS-SHRS	Ancho de calzada	R _w	21,5m	15,5m	9,5m	3,5m
RHRS	Slope Mass Rating	SMR	80	40	27	20
SHRS (STC)	Proceso erosivo	W _p	Sin erosión	Cárcavas	Cobertera vegetal en voladizo	Inestabilidad en desarrollo
SHRS (SBC)	Afección a calzada	R _p	Nula	Hundimientos, deformaciones leves	Hundimientos con fisuras, deformaciones moderadas	Grietas de tracción, escarpes en calzada y/o cunetas
RHRS	Tamaño de bloque	D _b	0,3m	0,6m	0,9m	>1,2m
RHRS	Volumen de desprendimiento	V _{fall}	26dm ³	0,21m ³	0,73m ³	1,74m ³
SHRS			<0,1m ³	1m ³	10m ³	>100m ³
RHRS-SHRS	Condiciones climatologías y afección por agua	Cl	<1000 mm/año	1025 mm/año	1050 mm/año	>1100 mm/año
SHRS		W _s	Talud seco sin agua	Talud con agua según periodo estacional	Talud saturado	Talud saturado con surgencias continuas
RHRS-SHRS	Frecuencia de desprendimientos	R _f	1 c/5años	1 c/1-5años	1 c/2años	>2 c/1año

Tabla 1. Categorías y rangos de puntuaciones, RHRS-SHRS (Geoconsult, 2019)

2.3 CLASIFICACIÓN DETALLADA DE TALUDES (FASE 3)

Las categorías o parámetros del índice de peligrosidad se indexan en 4 rangos de puntuaciones para cada categoría (3-9-27-81) o se asignan puntuaciones lineales que siguen una ley exponencial incremental en base 3 (Figura 1). En la Eq. (1), x es el factor exponencial que define a cada categoría,

incluyendo en la Tabla 2 los empleados en los casos aplicados.

$$y = 3^x$$

(1)

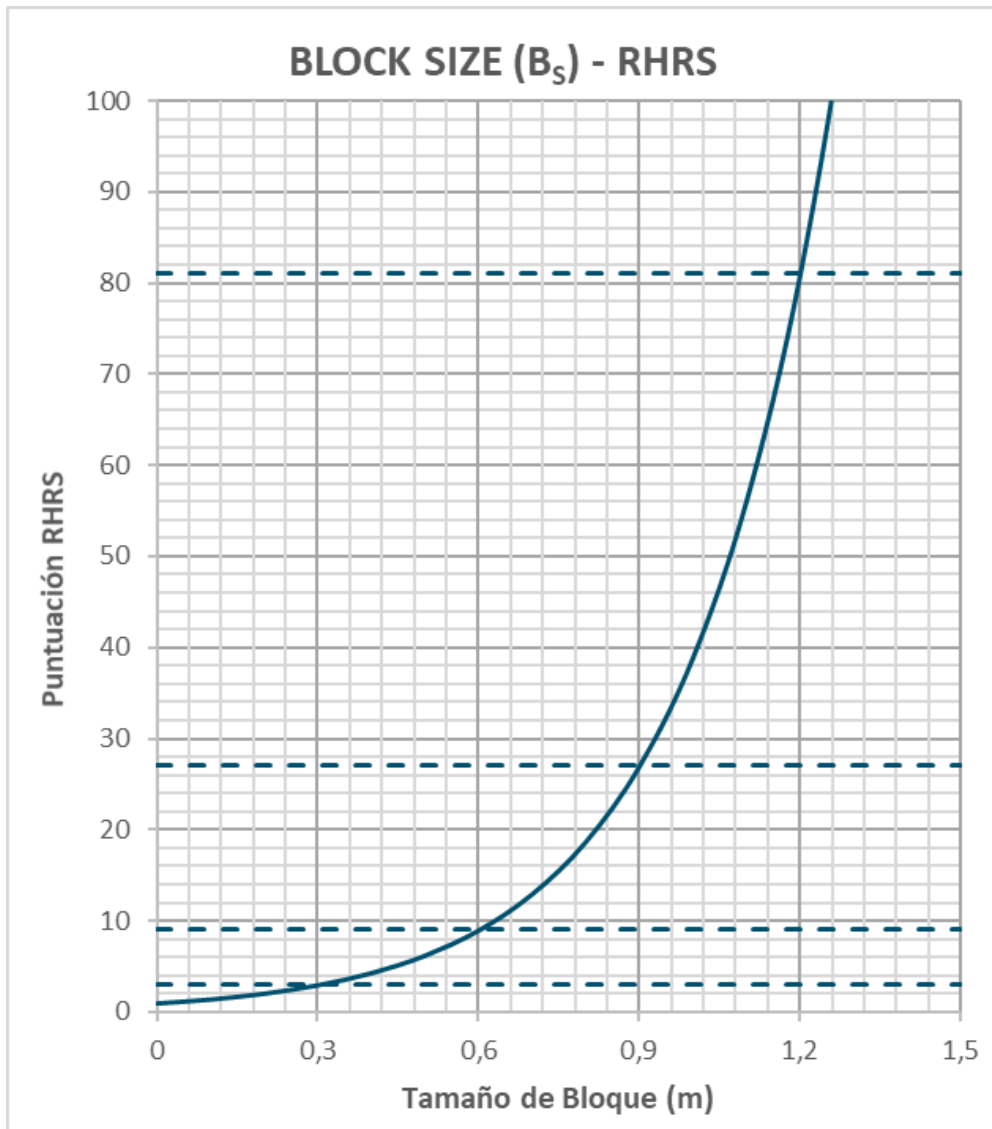


Figura 1. Ejemplo gráfico de la ley exponencial, categoría Tamaño de bloque (B_s)

Categoría	Exponente	Autor
H _s (Altura de talud)	$y = 3^{\left(\frac{Ht}{7,5}\right)}$	Pierson 1990
D _{eff} (Efectividad de cuneta)	$y = 3^{\left(\frac{125-Def}{30}\right)}$	Geoconsult 2019
AVR (Riesgo vehículo promedio)	$y = 3^{\left(\frac{\%AVR}{25}\right)}$	Budetta 2004
DSD (Distancia toma de decisiones)	$y = 3^{\left(\frac{120-\%DSD}{20}\right)}$	Budetta 2004
R _w (Ancho de calzada)	$y = 3^{\left(\frac{17,5-Rw}{3,5}\right)}$	Geoconsult 2019
SMR (Slope Mass Rating)	$y = 3^{\left(\frac{80}{SMR}\right)}$	Budetta 2004
B _s (Tamaño de bloque)	$y = 3^{\left(\frac{Db}{0,3}\right)}$	Budetta 2004
V _{fall} (Volumen de bloque-inestabilidad)	$y = 3^{\left(\frac{Vfall}{2,3}\right)}$	Budetta 2004
Cl (Climatología)	$y = 3^{\left(\frac{h}{300}\right)}$	Budetta 2004
R _f (Registro histórico – frecuencia de inestabilidades)	$y = 3^{(1+1,5*f)}$	Corominas 2009

Tabla 2. Relaciones exponenciales RHRS

2.3.1. RHRS-INFRA

Dentro del grupo de categorías (Tabla 1) definido como RHRS_{infra}, se engloban los parámetros a evaluar correspondientes a aspectos de geometría (altura de talud) y condiciones de las infraestructuras en base a diseño y normativa sobre las mismas.

La altura de los taludes de corte o ladera natural inmediata (Hs: High Slope) sobre la carretera, es evaluada en función de la altura del desmonte, con rangos de menor a mayor altura (7,5 a >30m) e indexados en cuatro rangos.

Aspectos relativos a la capacidad efectiva de la cuneta (D_{eff} : Ditch effectiveness) y su posible recepción de material desprendido, se evalúa en función de los criterios de diseño de cunetas de Ritchie. Geoconsult en su puesta en práctica del sistema de clasificación RHRS en 2018, implementa al RHRS_{mod} (Budetta, 2004) la modificación de esta categoría propuesta para el estado de Colorado, CRHRS (Russel et al, 2008). La relación de la cuneta existente y la que debería de existir, se traduce en un porcentaje del diseño adecuado (2) para la recepción de material desprendido con seguridad de no afección y por tanto condicionada a las categorías de altura (Hs) y pendiente y tamaño de bloque (Bs).

$$D_{eff} = \frac{D_a + W_a}{D_r + W_r} \times 100\% \quad (2)$$

En esta relación D_a y W_a son la profundidad y ancho de cuneta existentes y D_r y W_r son el diseño según la metodología de Ritchie (Ritchie, 1963). En la Figura 2 se ilustra la relación gráfica con las puntuaciones exponenciales entre los límites del 30, 65 y 95% del diseño adecuado de cuneta, por tanto, de la dimensión efectiva de la cuneta existente.

La exposición y frecuencia dinámica de vehículos ante un fenómeno de peligrosidad como inestabilidades del terreno en taludes se evalúa con la categoría Riesgo Promedio Vehículo (AVR: Average Vehicular Risk) según la relación siguiente (3), donde interviene el IMD (Intensidad Media Diaria) del corredor evaluado.

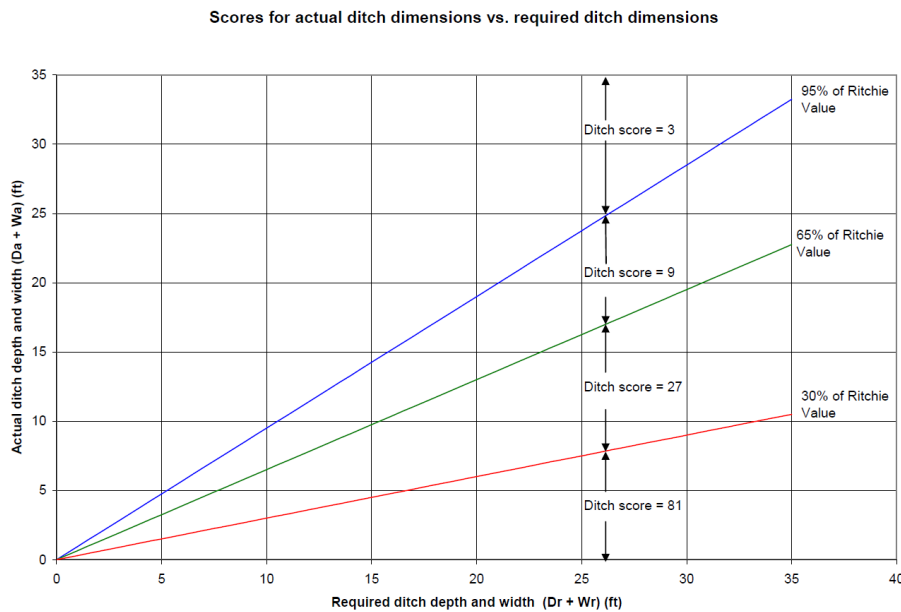


Figura 2. Gráfico de dimensión efectiva de cuneta (D_{eff}) (CRHRS, 2008).

$$AVR (\%) = \frac{IMD \times l_t}{PsL \times 24} \quad (3)$$

Donde IMD es la Intensidad Media Diaria de tráfico (vehículo/día), l_t es la longitud de tramo (km) y PsL (Posted Speed Limit) el límite de velocidad del tramo analizado (km/h).

La categoría visibilidad para la toma de decisiones (DSD, Decision Sight Distance) controla el porcentaje de distancia visible con la distancia necesaria para frenar el vehículo ante un elemento anómalo en la carretera. Geoconsult en el 2018, adecua el cálculo del parámetro para las carreteras

españolas según la Norma 3,1-IC de trazado (2016) siendo el cálculo de la distancia de parada calculada según la relación (4).

$$D_p = \frac{V \times t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \times (f_l + i)} \quad (4)$$

D_p es la distancia de parada (m), V es la velocidad de la maniobra de frenado, f_l es el coeficiente de rozamiento longitudinal movilizado (rueda-pavimento), i es la inclinación de la rasante (tanto por uno) y t_p es el tiempo de percepción y reacción (s). La Figura 3 representa el ábaco de la distancia de parada según la Norma 3,1-IC de trazado actualizada a 2016.

El porcentaje de la distancia de reacción se calcula según la siguiente relación (5).

$$\%DSD = \frac{SD}{DSD} \quad (5)$$

Donde DSD es D_p de la ecuación (4) y SD (Sight Distant, m) la distancia de reacción-visibilidad.

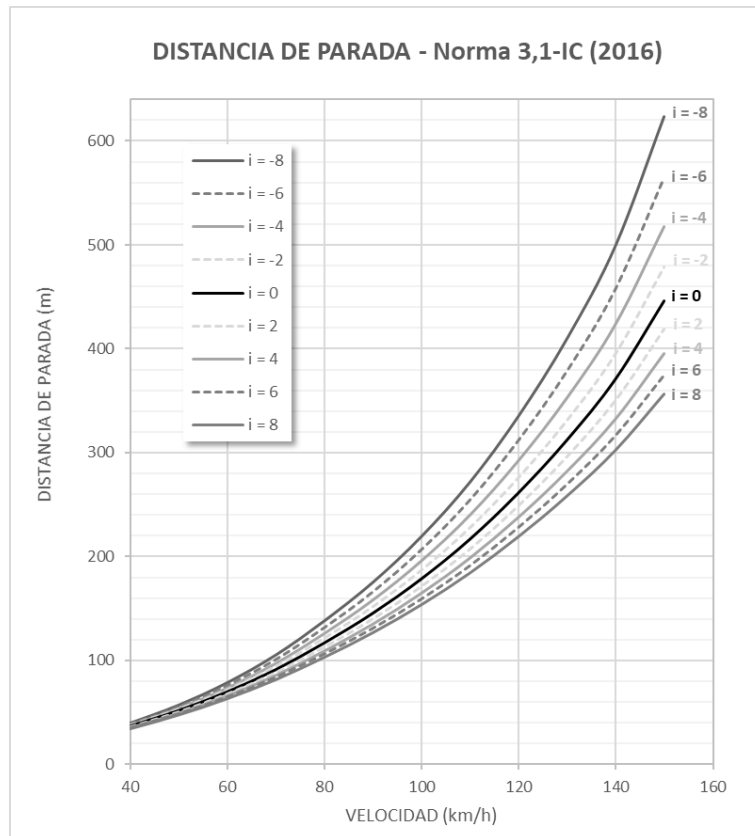


Figura 3. Ábaco de distancia de parada según Norma 3,1-IC de trazado, 2016 (Geoconsult, 2019).

2.3.2 RHRS-GEO

Las características del macizo rocoso presente en los taludes de los corredores de transporte de las infraestructuras son analizadas, según RHRSmod (Budetta, 2004) desde el punto de vista de la caracterización geomecánica mediante estaciones geomecánicas para determinar el índice geomecánico Rock Mass Rating System, RMR (Bieniawski, 1989) para obtener el índice SMR (6) (Slope Mass Rating) (Romana, 1988).

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (6)$$

Donde RMRb es el índice RMR (Bieniawski, 1989) sin corregir por orientación de litoclasas, F_n , son factores de ajuste según paralelismo entre litoclasas y talud (F_1), probabilidad al esfuerzo cortante de las juntas o intersecciones inestables (F_2), buzamiento de litoclasas y su relación con el talud (F_3), y método de excavación (F_4).

Las dimensiones de los bloques en relación a tamaño del bloque (B_s , Block Size) (7) y el volumen del desprendimiento por evento (V_{fall} , Volume block) (8) siguen la misma relación que el RHRSmod

(Budetta, 2004).

$$B_s = \sqrt[3]{V_{fall}} \quad (7)$$

$$V_{fall} = \frac{(S_1 + S_2 + \dots + S_n)}{(\sin\alpha \times \sin\beta \times \dots \times \sin\gamma_n)} \quad (8)$$

S_{1-2-n} es el espaciado principal entre las litoclasas de una misma familia y α, β y γ es el ángulo entre las direcciones en de los pares de juntas (Palmstrom 2005).

2.3.3. RHRS-FREC

Las categorías que definen rangos temporales o de frecuencias se han englobado en RHRS_{frec}, y son tales como los aspectos climatológicos, periodos de precipitación adaptados a la climatología de la zona (Cl, Climate) y el registro histórico o frecuencia de desprendimientos (R_f , Rockfall Frequency) empleando para estos últimos la ecuación propuesta por Corominas (2017).

3. SOIL HAZARD RATING SYSTEM (SHRS)

La necesidad de afrontar la evaluación de la peligrosidad en la totalidad de los taludes de corredores de infraestructuras, incluidos lo que no se emplazan en macizo rocoso, sino que se desarrollan en suelos, hace que Geoconsult en 2018 desarrolle una metodología análoga aplicando la misma en viales pirenaicos (España) y andinos (Colombia).

De una sistemática análoga a la metodología RHRS, el desarrollo de SHRS (Soil Hazard Rating System) modifica los aspectos relativos a la geometría de talud, condiciones geológicas y climáticas con respecto a los suelos. Únicamente se definen las categorías modificadas con respecto a RHRS, puesto que el resto son idénticas

3.1. SHRS-INFRA

Los taludes de corte o sobre calzada (STC), así como los taludes de borde o bajo calzada (SBC) son evaluados con esta clasificación (SHRS) en función de su inclinación (ψ). Así, el aspecto geométrico de la categoría (Tabla 2) varía con respecto a la altura valorada con RHRS.

La efectividad de la cuneta (D_{eff}) en STC es la mismas que para RHRS, mientras que en SBC se evalúa la distancia entre el borde de calzada y la cabeza de talud (S_d , Slope distance) (Tabla 2).

3.2. SHRS-GEO

Las condiciones geológicas (G_c , Geological conditions) según el estado físico de los taludes de corte (STC) frente a fenómenos erosivos (W_p , Weathering process) es evaluado en rangos desde sin afección a inestabilidades en desarrollo (Tabla 2-STC). Para los taludes SBC, el aspecto evaluado se enfoca en las patologías de la calzada (R_p , Road pathologies), valorando presencia y grado de fisuras, grietas o hundimientos (Tabla 2-SBC). Estos criterios tienen relación directa con la litología y propiedades geotécnicas de los suelos presentes.

El aspecto volumétrico, de magnitud de potenciales o reales roturas es evaluado en función de la magnitud en m^3 volumen afectado (V_{fall}).

3.3. SHRS-FREC

Las condiciones climáticas en suelos, se evalúan las precipitaciones/año y heladas (CI), como en la presencia de agua en los taludes (W_s , Water Slope) STC-SBC ya que su presencia condiciona la estabilidad (Tabla 2) y por tanto la peligrosidad.

4. EXPERIENCIAS RHRS-SHRS

4.1 CORREDORES VIALES PIRENAICOS

Geoconsult en 2018, desarrolla el estudio de riesgos naturales en la carretera A-136 entre Biescas y Espacio Portalet, dentro del Proyecto Poctefa-Securus, donde entre otros riesgos, se plantea la evaluación de los riesgos geológicos inmediatos (en sentido de distancia, no temporal) de los 27km de corredor vial entre Biescas y Portalet. Geoconsult propone la metodología adaptada RHRS para los taludes en roca y desarrolla la clasificación SHRS para los taludes y terraplenes en suelos presentes en gran parte del corredor. De esta forma, se consigue aportar una evaluación de la peligrosidad de forma lineal del corredor frente a riesgos por desprendimientos y deslizamientos del terreno (de baja escala, sin tener en cuenta los mega deslizamientos evaluados con otra metodología). Este enfoque y desarrollo de una nueva clasificación o sistema de evaluación (SHRS) permite desarrollar de forma más ajustada y completa el Plan Estratégico de actuación e inversión (Fase 6 Metodología RHRS-SHRS).

En la Tabla 3 se resumen el número de fichas de clasificación según los sistemas RHRS, SHRS (STC-SBC), así como los metros lineales evaluados por cada una. La evaluación del corredor fue en los dos sentidos de circulación, ya que de forma general es una carretera con excavación en una margen y relleno en la opuesta, generando la geometría talud/terraplén en una misma sección transversal y ocasionalmente en trinchera. Así, los taludes de corte sumarían el 79% de la longitud de corredor, mientras que los taludes bajo calzada sumarían el 95% teniendo en cuenta ambos sentidos de circulación.

Clasificación	Nº fichas	km lineales	% corredor
RHRS	91	8,164	30
SHRS (STC)	118	13,221	49
SHRS (SBC)	186	25,710	95

Tabla 3. Resumen estudio A-136 (Huesca, España)

El corredor analizado, presenta de forma general geometría de Talud monte (Desmonte)-Talud valle (Terraplén-ladera), por lo que el análisis, en ambos sentidos de calzada tiene una tipología de potenciales inestabilidades muy diferenciada, con zonas de trinchera ocasionales, por lo que el empleo de ambos índices, son necesarios, ya que por un lado se valoran los posibles caídas o deslizamientos de bloques del macizo rocoso hacia la calzada, que en este caso es el pie de talud, mientras que por el lado valle, la problemática es de afecciones a la calzada por roturas de principalmente los suelos hacia el lado valle, siendo la calzada la cabeza de talud.

Desde un punto de vista geológico, según progresiva de la A-136, los materiales presentes pasan de alternancias de calizas y margocalizas de ambiente deposicional flyschoides, a calizas y dolomías, que según se asciende en cota, son atravesadas por formaciones pizarrosas. Las laderas, tanto de lado monte como valle, presentan coluviales de baja compacidad y variabilidad de la fracción bloque según origen de los depósitos, incrementando la peligrosidad los taludes y laderas en coluviales pizarrosos por un menor ángulo de rozamiento y mayor fracción fina.

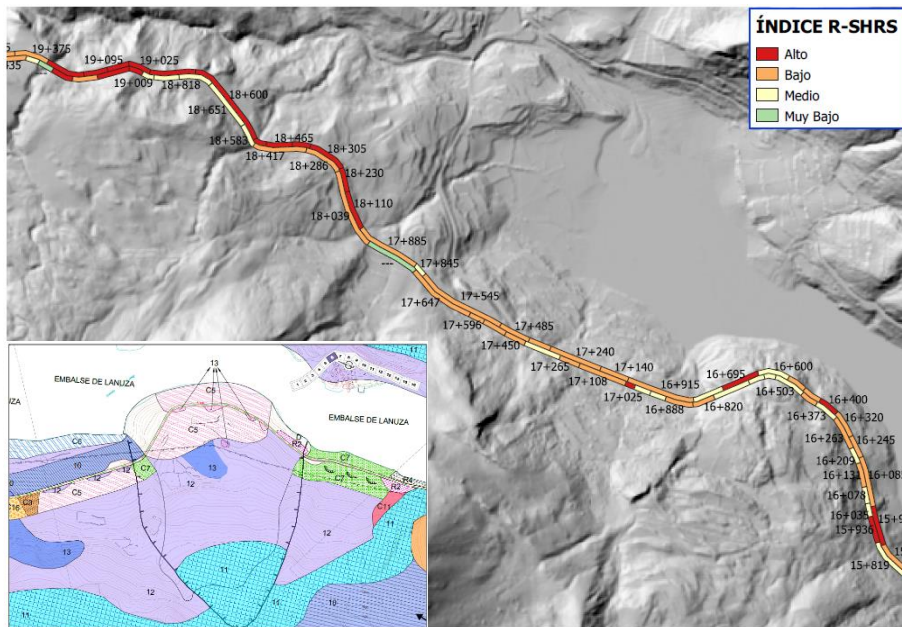


Figura 5. Cartografía geológica y RHRs-SHRs en A-136, (Huesca, España) (Geoconsult, 2019).

Frente al fenómeno de, inestabilidad de taludes, se han clasificado los riesgos (Alto-Medio-Bajo-Muy Bajo) en la carretera A-136 (Tabla 4, Figura 4 y Figura 5), estructurando los rangos de puntuaciones límite para cada grado de peligrosidad según clasificación empleada, tanto en función de tipología de terreno (roca/suelos) como en geometría en la infraestructura (talud de corte/terraplén), así como el porcentaje de cada grado o nivel de peligrosidad.

Peligrosidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
Puntuación	<75	175	275	>275
RHRs	-	23%	46%	31%
SHRs (STC)	-	38%	47%	15%
SHRs (SBC)	4%	67%	13%	16%

Tabla 4. Resultados de RHRs-SHRs A-136 (Huesca-España)

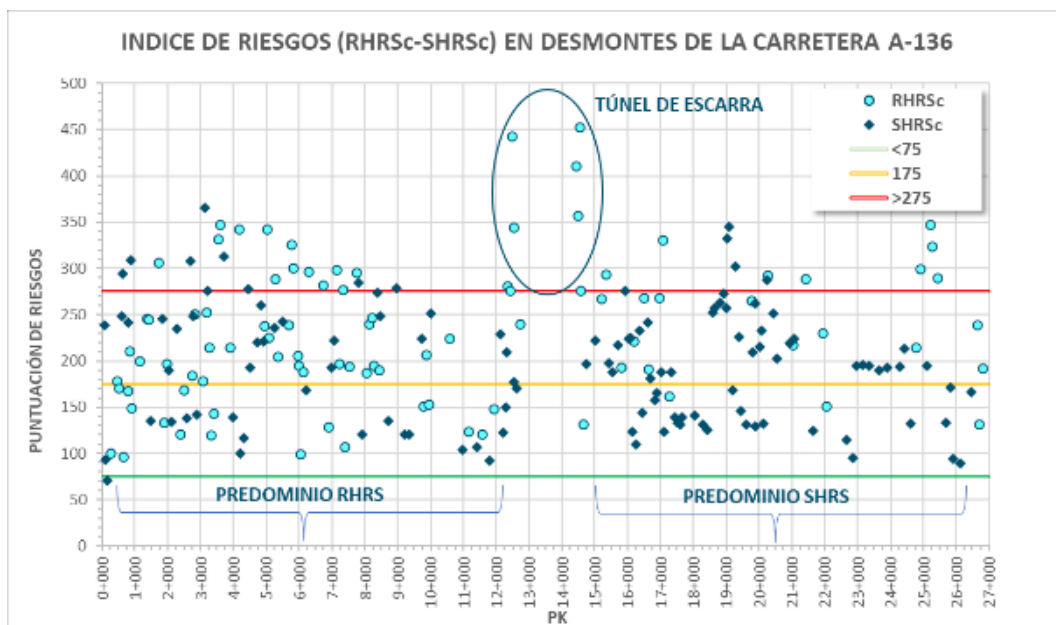


Figura 4. Grafica lineal de la carretera A-136 clasificada con RHRs-SHRs en taludes.

Las zonas de corredor con mayor presencia de taludes en roca, generan un incremento del riesgo en

desmontes, tanto en roca, como en suelos (coluviales y residuales, saprolíticos).

Finalmente, el Plan Estratégico (Fase 6) se estructura, en prioridad/prevención y fase de intervención, en base a medidas de mitigación preliminares, estructurando el presupuesto y la prioridad en los taludes de Alta peligrosidad con un 46% del presupuesto, un 35% para los Medios y un 7% para los Bajos.

En 2020, se le encarga a Geoconsult la evaluación del estado de los taludes de corte y relleno de una carretera en el sur de Colombia. La actuación a realizar sobre dicha carretera consistía en su desdoblamiento, de tal forma que la concesionaria además tenía que asumir la reparación inicial de los puntos críticos ya existentes, así como el mantenimiento a lo largo de todo el periodo de la concesión.

Dicho tramo, de 86 km de longitud, comprendía 5 unidades funcionales (UF-1 a UF5) que sumaban un total de 119 puntos críticos entre cortes en roca, cortes en suelos y rellenos viales. Se trata de una carretera de montaña con fuertes pendientes afectando a una amalgama de materiales volcánicos muy tectonizados (lavas, piroclastos, cenizas) sobre los que descansan potentes depósitos cuaternarios ligados a dinámica de laderas (eluviales y coluviales) así como depósitos de terrazas y de lahares. Además, la zona se ve afectada por procesos erosivos muy importantes tanto por efecto de las lluvias, como por las grandes socavaciones de los ríos, viéndose agravado por la ejecución de cortes, así como por la elevada sismicidad de la zona.

Se aplicó la metodología desarrollada por Geoconsult a partir de la experiencia adquirida en la carretera A-316, estableciendo el nivel de riesgo para taludes en roca (RHRS), taludes en suelos (SHRS) y rellenos.

Dicha metodología se modificó para adaptarla a la normativa nacional en cuanto al riesgo por vehículo promedio (AVR) de acuerdo al estudio de tráfico y su proyección hasta el final de la concesión. También se modificó el parámetro de visibilidad para toma de decisiones (DSD), al igual que el parámetro de clima para adecuarlo a las tasas de precipitación de la zona.

Igualmente, se utilizaron los datos aportados por la concesionaria en cuanto al inventario de desprendimientos por punto kilométrico, fecha, y volumen de desprendimientos, permitiendo adaptar el parámetro de frecuencia de desprendimientos.

Finalmente, la aplicación de dicha metodología permitió establecer un nivel de riesgo para cada uno de los puntos críticos (Tabla 5, Figura 5, Figura 6).

Peligrosidad	Muy bajo Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Puntuación	<150	300	375	>375
RHRS	11%	62%	12%	15%
SHRS (STC)	-	49%	40%	10%
SHRS (SBC)	9%	56%	26%	9%

Tabla 5. Resultados de RHRS-SHRS UF1-5 (Sur de Colombia)

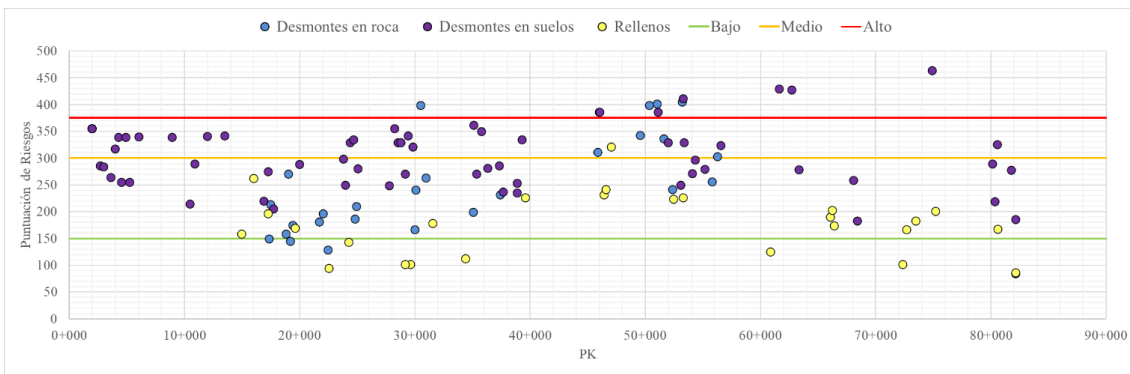


Figura 5. Gráfica lineal de la carretera Andina clasificada con RHRS-SHRS en taludes.

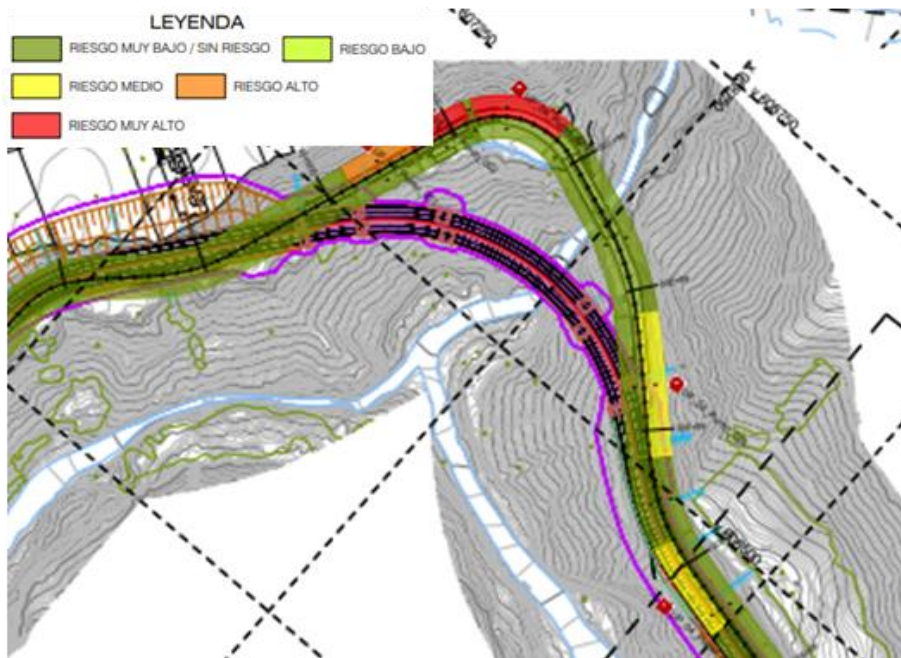


Figura 6. Cartografía RHRS-SHRS en corredores andinos.

Una vez establecido el nivel de riesgo de cada uno de los puntos críticos situados a lo largo de la carretera, el plan estratégico se enfocó en los riesgos Altos-Muy Altos. Para ello se estableció una estrategia de inversión en función del propio nivel de riesgo y teniendo en cuenta la relación entre el coste de mantenimiento a lo largo de la concesión según los costes reales de reparación, frente al coste de la intervención estimada para la reparación de dicho punto crítico. Esta clasificación también permite establecer un criterio de monitoreo para seguimiento de posibles inestabilidades.

La estimación del coste de mantenimiento se estableció a partir de los datos de frecuencia de desprendimientos, costes de remoción y limpieza de la calzada y el traslado de dicho material a depósito de sobrantes autorizados, y su proyección hasta el final de la concesión.

La estimación del coste de la reparación se realizó teniendo en cuenta la magnitud y tipo de inestabilidades de cada punto crítico, así como las preferencias de la concesionaria según criterios económicos y productivos en cuanto a tipo de refuerzos y soluciones.

El plan estratégico también permite la reducción del nivel de peligrosidad mediante la ejecución de actuaciones que, aunque no erradiquen totalmente la peligrosidad, si permitan un mayor equilibrio en la razón peligrosidad/coste. Dichas medidas deben ir encaminadas a reducir los factores que resultan más elevados de la metodología aplicada, como la ejecución de cunetas de pie, retaluzados concretos, planes de inspección periódica de posibles bloques inestables y su saneo en taludes en roca, o la implantación de sistemas de auscultación y su seguimiento tanto en rellenos como en taludes en suelos.

5. LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Geoconsult, en colaboración con la Universidad Complutense de Madrid (UPM-ETSICCP-ETSIT), está desarrollando un proyecto de I+d+i, con procesos de optimización y automatización de toma de datos con drones e inteligencia artificial en fases de procesado, para una mayor precisión de los índices, así como una menor afección a usuarios y técnicos durante el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Brawner, C. O. and Wyllie, D. C., 1975, Rock slope stability on railway projects: *Proceedings of the American Railway Engineering Association Regional Meeting*: Vancouver, British Columbia, Canada, 8 p.
- Bouali, E. H., Oommen, T., Vitton, S., Escobar-Wolf, R., & Brooks, C. (2017). Rockfall hazard rating system: Benefits of utilizing remote sensing. *Environmental & Engineering Geoscience*, 23(3), 165-177.
- Budetta, P. (2004). Assesment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. European Geosciences Union. Vol 4: 71-81.
- Corominas, J., Mayrouli, O., Ibarbia, I., Jugo, I., Alonso, N., Ruiz, J., Luzuriaga, S., Navarro, J.A., (2017). Metodología integrada para la evaluación de riesgos en la red de carreteras de Gipuzkoa. *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Santander, Junio 2017
- Fernandez-Gutierrez, Jesús David, Sergio Sanchez Rodriguez, Hernán Gonzalo-Orden, and Heriberto Perez-Acebo (2021). Analysis of rock mass classifications for safer infrastructures. *Transportation Research Procedia* 58: 606-613.
- Geoconsult Ingenieros Consultores (2019). Experiencia en el empleo de índices de riesgo en la gestión de la explotación en corredores viales pirenaicos y andinos. *54ª Sesión sobre obras de interés geotécnico, Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, SEMSIG*
- Palmstrom, Arild. "Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)." *Tunnelling and Underground Space Technology* 20.4 (2005): 362-377.
- 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 Transp.
- Pierson, L. A., (1991), Rockfall Hazard Rating System: Oregon State Highway Division, *Federal Highway Administration, Report, FHWA-OR-GT-92-05*, 15 p.
- Pierson, L. A., (1992), Rockfall Hazard Rating System: Rockfall Prediction and Control and Landslide Case Histories: Research Record 1343, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., PP. 6–13.
- 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. (1988): Practice of SMR classification for slope appraisal, *Proc. 5th Int. Symp. on Landslides*, Balkema, Rotterdam, 1227– 1229.
- Russell, C. P., Santi, P. M., and Higgins, J. D. (2008): Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System, Report CDOT-2008-7, *Colorado Department of Transportation DTD Applied Research and Innovation Branch*, 137 pp.