

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO GEOLÓGICO POR CAÍDA DE BLOQUES ROCOSOS EN LA RED DE CARRETERAS DE ANDORRA (PRINCIPADO DE ANDORRA).

Jordi Amigó¹, Joan Altimir², Joan Torrebadella³

¹Eurogeotecnia S.A. Sant Cugat del Vallès
Director Técnico. Geotecnia y riesgos naturales

²Euroconsult. Principat d'Andorra
Director-Gerente

³Euroconsult. Principat d'Andorra
Director proyectos y estudios de riesgos naturales

RESUMEN

La red general de carreteras del Principado de Andorra presenta un riesgo geológico por caídas de bloques rocosos provenientes de laderas contiguas a los desmontes. Para determinar el riesgo de cada tramo de carretera y establecer un orden temporal en la prioridad de las actuaciones, se ha utilizado una metodología de trabajo basada en dos variables: la peligrosidad natural por caída de bloques rocosos y la probabilidad de impacto en los tramos de carretera en función de la intensidad media diaria (IMD) de paso de vehículos. El objetivo de la metodología es establecer un criterio objetivo que permita priorizar los tramos sobre los que actuar, para ello se realiza una parametrización de las variables asignando valores numéricos que permitan reflejar el riesgo estimado de cada tramo. Los resultados obtenidos permiten establecer un orden de prioridad a la hora de programar medidas de protección. En aquellos casos en que para diferentes tramos se obtienen idénticos resultados, se establece un “criterio de experto” que permite priorizar un tramo sobre otro.

INTRODUCCIÓN

Durante el año 2005 el Gobierno Andorrano solicitó a la empresa Euroconsult la realización de un análisis del riesgo geológico por caídas de bloques rocosos, provenientes de laderas contiguas a los desmontes, que pudieran afectar a la red general de carreteras andorranas.

Desde el año 1997, se han instalado diferentes protecciones para la caída de bloques rocosos, preferentemente en los tramos de carretera que históricamente ya se consideran de alta

prioridad. Protegidos estos, el objetivo del análisis se centra en determinar los tramos de la red general de carreteras CG1, CG2, CG3, CG4 y CG5 (ver figura 1) que aún quedan por proteger, para determinar el riesgo de cada tramo de carretera y establecer un orden temporal en la prioridad de acuerdo con una metodología objetiva y que sea exportable a otras zonas con problemáticas similares.

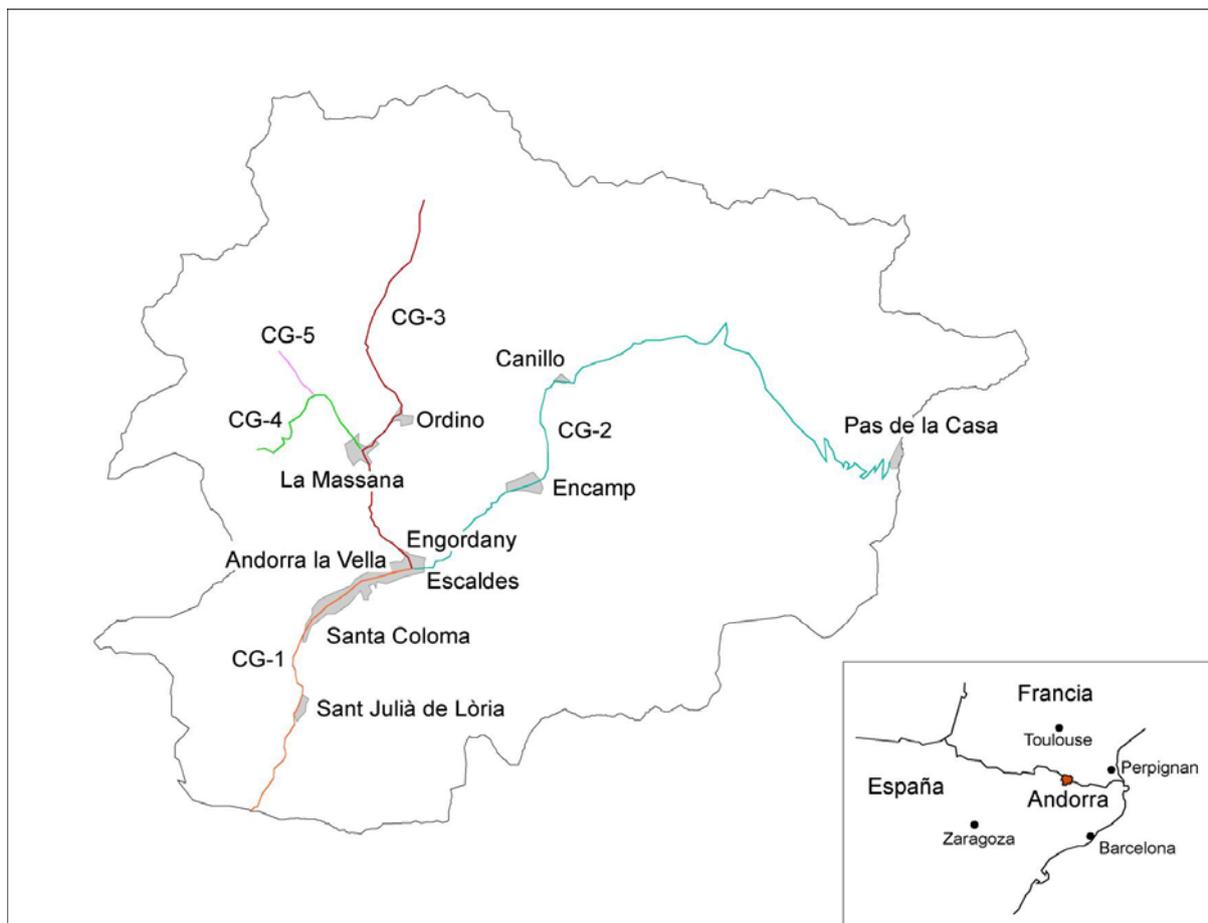


Figura 1: Mapa de la red general de carreteras de Andorra

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la evaluación del riesgo existente en cada uno de los tramos de carretera seleccionados, parte de dos variables: la peligrosidad natural por caída de bloques rocosos y la probabilidad de impacto de un tramo de carretera, definida por la intensidad media diaria (IMD) de vehículos que circula en cada tramo de carretera.

En el caso estudiado, los datos de la primera variable se obtuvieron del estudio “Zonificació del terreny segons la seva problemàtica geològica-geotècnica” llevado a cabo por el Gobierno de Andorra en el año (2001). Para la segunda variable se utilizaron los datos de la intensidad

media diaria de paso de vehículos (IMD), datos que se encuentran en el: “Pla Sectorial de Noves Infraestructures Viàries“(2004).

Para que el método sea objetivo, se ha procedido a cuantificar numéricamente las dos variables, de esta manera se puede obtener un valor de riesgo “objetivo” en función de la peligrosidad y la vulnerabilidad del tramo de carretera estudiado, según la ecuación:

$$(1) \text{ RIESGO} = \text{PELIGROSIDAD} \times \text{VULNERABILIDAD}$$

La **peligrosidad** natural por caída de bloques rocosos se ha dividido en cuatro niveles, según el estudio de zonificación del año 2001, y que son peligrosidad alta, media, baja y muy baja. En función del nivel de peligrosidad de cada tramo de carretera, se ha asignado un valor del 1 al 4.

Peligrosidad	Puntuación
ALTA	4 puntos
MEDIA	3 puntos
BAJA	2 puntos
MUY BAJA	1 punto

Tabla 1: Puntuación asignada según la peligrosidad del tramo.

La **vulnerabilidad** es el daño esperable en el elemento amenazado (vehículo). Según la IMD de cada tramo, la probabilidad de impacto sobre un vehículo será mayor cuantos más vehículos circulen y menor cuantos menos sean. Para facilitar los cálculos, se han establecido cinco niveles de IMD en función del número de vehículos que circulan por cada tramo.

Vulnerabilidad IMD	Flujo de vehículos	Puntuación
MUY ALTA	>15.000 vehículos/día	5 puntos
ALTA	10.000-15.000 vehículos/día	4 puntos
MEDIA	5.000 – 10.000 vehículos/día	3 puntos
BAJA	1.000 – 5.000 vehículos/día	2 puntos
MUY BAJA	<1.000 vehículos/día	1 punto

Tabla 2: Puntuación asignada según el número de vehículos.

Es de remarcar que la división de los niveles se ha establecido específicamente para este estudio en concreto. En caso de exportar este método a otras zonas, se recomienda establecer una división de niveles adecuada a la carretera estudiada.

El **riesgo** de cada tramo se evalúa cruzando los valores de la peligrosidad y de la vulnerabilidad, obteniéndose valores de riesgo que van desde 1 a 20. En función de estos resultados, el riesgo se ha dividido en cinco niveles, muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

Riesgo	Puntuación
MUY ALTO	17-20 puntos
ALTO	12-16 puntos
MEDIO	8-11 puntos
BAJO	4-7 puntos
MUY BAJO	1-3 puntos

Tabla 3: Clasificación del riesgo en función de la puntuación obtenida.

A continuación se muestra una tabla con todos los resultados posibles.

Peligrosidad	Vulnerabilidad (IMD)	Riesgo estimado
Alta (4)	Muy alta (5)	Muy alto (17-20)
	Alta (4)	Alto (12-16)
	Media (3)	
	Baja (2)	Medio (8-11)
	Muy baja (1)	Bajo (4-7)
Media (3)	Muy alta (5)	Alto (12-16)
	Alta (4)	
	Media (3)	Medio (8-11)
	Baja (2)	Bajo (4-7)
	Muy baja (1)	Muy bajo (1-3)
Baja (2)	Muy alta (5)	Medio (8-11)
	Alta (4)	
	Media (3)	Bajo (4-7)
	Baja (2)	
	Muy baja (1)	Muy bajo (1-3)
Muy baja (1)	Muy alta (5)	Bajo (4-7)
	Alta (4)	
	Media (3)	Muy bajo (1-3)
	Baja (2)	
	Muy baja (1)	

Tabla 4: Resultado del cruce de la peligrosidad con la vulnerabilidad.

Una vez obtenidos los resultados se establece una prioridad de actuación de los tramos de mayor a menor riesgo estimado. Puede darse el caso que dos o más tramos tengan los mismos resultados de riesgo, circunstancia que conlleva a establecer al técnico asignado al estudio, la prioridad de actuación de dichos tramos en base a las observaciones de campo aplicando su criterio de experto.

RECOPIACIÓN DE DATOS

Inicialmente se ha recopilado, utilizando un sistema de información geográfica, todos los tramos de carretera general que presentan diferentes niveles de peligrosidad por caída de bloques, según el estudio de zonificación del terreno del año 2001, y que todavía no disponen de sistemas protección.

Una vez identificados los tramos a estudiar, se realiza una campaña de campo consistente en una inspección visual de los tramos de carretera afectados, recogiendo información más detallada y que no figura en el estudio general de zonificación. Esta información se centra básicamente en la problemática y características morfológicas de la vertiente, accesibilidad y facilidades para la instalación de protecciones y un reportaje fotográfico. Se ha elaborado una ficha para cada uno de los tramos que refleja toda la información recogida (ver figura 2).

FICHA DESCRIPTIVA DE LA ZONA		8	
Nombre SANT JOAN DE CASELLES			
Carretera CG2	P.K. 13+000	I.M.D. 11000	
Parroqui :CANILLO	Població :----		
Longitud de la zon 300 m	Altura	1545 m	
Peligrosidad zonificación ar ALTA			
Problemática detectada y características de la ladera			
Ladera rocosa de escasa altura pero donde el volumen de los bloques que se pueden desprender es considerable. Los bloques más pequeños corresponden a rocas carbonatadas, siendo los de mayores dimensiones de pizarra, ya que estas pueden deslizarse en masa. Existen algunos tramos en los que el sustrato rocoso se halla extraplomado. En el límite oeste es necesario realizar una estabilización directa de la ladera, ya que existen planos de fractura muy marcados y favorables a la inestabilización de una zona de pizarras.			
Accesibilidad y facilidades para el montaje			
Muy buena accesibilidad desde la CG2. El montaje de las barreras se tendría que hacer con grua desde la plataforma de la carretera, en un lugar donde existen dos carriles en cada sentido de circulación.			
		Detalle de bloques de grandes dimensiones separados del sustrato rocoso	
			
Vista general de la ladera situada al este de Sant Joan de Caselles			
I.M.D.	Muy alta	>15.000 vehículos/día	
	Alta	10.000-15.000 vehículos/día	
	Media	5.000-10.000 vehículos/día	
	Baja	1.000-5.000 vehículos/día	
	Muy baja	<1.000 vehículos/día	
RIESGO	Muy alta	17-20 puntos	
	Alta	12-16 puntos	
	Media	8-11 puntos	
	Baja	4-7 puntos	
	Muy baja	1-3 puntos	
PELIGROSIDAD		I.M.D.	RIESGO ESTIMADO
Alta (4)	Muy alta (5)	Muy alto (17-20)	
	Alta (4)	Alto (12-16)	
	Media (3)	Medio (8-11)	
	Baja (2)	Bajo (4-7)	
	Muy baja (1)	Bajo (4-7)	
Media (3)	Muy alta (5)	Alto (12-16)	
	Alta (4)	Medio (8-11)	
	Media (3)	Medio (8-11)	
	Baja (2)	Bajo (4-7)	
	Muy baja (1)	Muy bajo (1-3)	
Baja (2)	Muy alta (5)	Medio (8-11)	
	Alta (4)	Medio (8-11)	
	Media (3)	Bajo (4-7)	
	Baja (2)	Bajo (4-7)	
	Muy baja (1)	Muy bajo (1-3)	
Muy baja (1)	Muy alta (5)	Bajo (4-7)	
	Alta (4)	Bajo (4-7)	
	Media (3)	Muy bajo (1-3)	
	Baja (2)	Muy bajo (1-3)	
	Muy baja (1)	Muy bajo (1-3)	
RIESGO DE LA ZONA ALTO			PUNTUACIÓN 16

Figura 2: Ejemplo de ficha de campo

Además de los tramos recogidos en el estudio de zonificación del 2001, se ha observado con mayor precisión las carreteras estudiadas para identificar posibles tramos susceptibles de ser protegidas por su alta peligrosidad que no fuesen contemplados en el estudio original. Así mismo se ha estudiado el tramo de carretera comprendido entre el Coll de la Botella y el Port de Cabús, no estudiado originalmente. Solamente ha sido necesario añadir 3 tramos, todos ellos en el tramo entre Coll de la Botella y el Port de Cabús. De esta manera, se han estudiado

un total de 28 tramos. Para la evaluación del riesgo existente, además de la peligrosidad se debe determinar la vulnerabilidad. La vulnerabilidad de la infraestructura viaria se considera constante, por lo tanto, la vulnerabilidad se halla determinada por la intensidad media diaria (IMD) de vehículos que circula en cada tramo de carretera. Los valores IMD utilizados del *Pla Sectorial de Noves Infraestructures Viàries* son la media aritmética del periodo de invierno y verano.

RESULTADOS

Una vez identificados y parametrizados los tramos a estudiar, se cruzan las variables según la fórmula (1) para obtener de esta manera el riesgo estimado para cada tramo de carretera. En la siguiente tabla se reflejan los resultados obtenidos:

Núm.	Denominación	Peligrosidad	Vulnerabilidad (IMD)	Riesgo estimado
1	Prat de les quadres	MEDIA	MEDIA	MEDIO (9)
2	Roc de St. Miquel	MEDIA	MEDIA	MEDIO (9)
3	Borda de l'Hortó	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
4	Cruïlla Aldosa de Canillo	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
5	La Cauba	ALTA	ALTA	ALTO (16)
6	La Trava	ALTA	ALTA	ALTO (16)
7	Vall del Riu est	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
8	St. Joan de Caselles	ALTA	ALTA	ALTO (16)
9	Entrada oest de Canillo	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
10	Meritxell	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
11	Torrent Pregó	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
12	El lloser d'Encamp	MEDIA	ALTA	ALTO (12)
13	El Tamany	ALTA	BAJA	MEDIO (8)
14	Basers del Corb	ALTA	BAJA	MEDIO (8)
15	Mines de Llorç	MEDIA	BAJA	BAJO (6)
16	El Vilaró	MEDIA	BAJA	BAJO (6)
17	Arans-el Cresp	ALTA	BAJA	MEDIO (8)
18	Serrat de la Llonga	MEDIA	BAJA	BAJO (6)
19	Forat del Grau	MEDIA	BAJA	BAJO (6)
20	Plana Perdiguera	MEDIA (*)	MUY BAJA	MUY BAJO (3)
21	Rocs alts	MEDIA (*)	MUY BAJA	MUY BAJO (3)
22	La Devesa	MEDIA (*)	MUY BAJA	MUY BAJO (3)
23	Les Esquirols	ALTA	MUY ALTA	MUY ALTO (20)
24	Cruïlla d'Aixovall	MEDIA	MUY ALTA	ALTO (15)
25	Creu de les Portes	ALTA	MUY ALTA	MUY ALTO (20)
26	El Solanet	BAJA	BAJA	BAJO (4)
27	El Baixant	BAJA	BAJA	BAJO (4)
28	Túnel de St. Antoni	ALTA	MUY ALTA	MUY ALTO (20)

(*) la peligrosidad ha sido evaluada en el campo debido a que el estudio de zonificación del año 2001 no contemplaba esta zona

Tabla 5: Resultados obtenidos.

Finalmente se ordenan los tramos de mayor a menor nivel de riesgo obtenido y con el criterio de experto se determina la prioridad de actuación, en caso de igualdad en el nivel de riesgo.

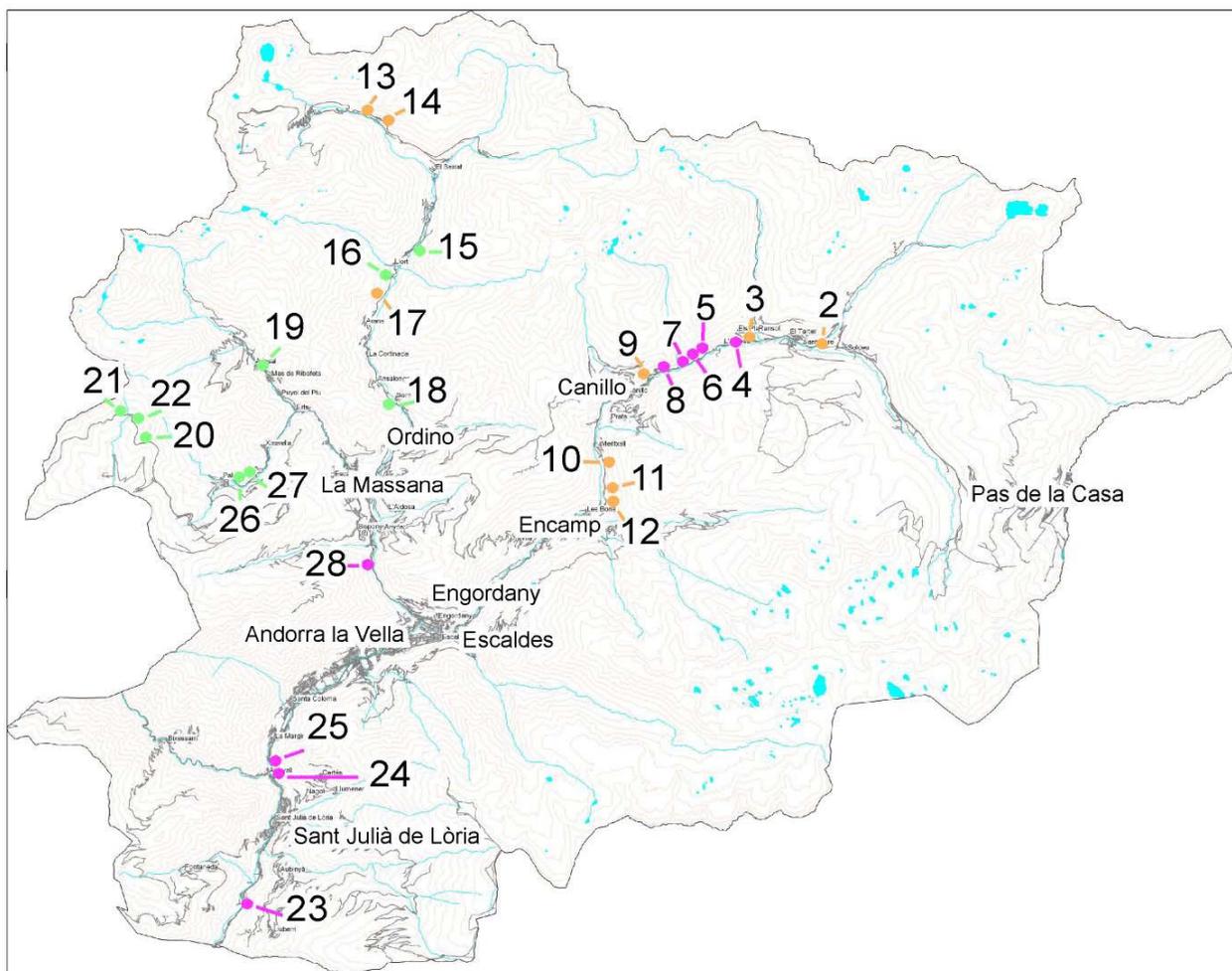


Figura 3: Situación tramos, los colores indican la fase de actuación (ver tabla 6)

Fase a Corto plazo			Fase a Medio plazo			Fase a Largo plazo		
Núm.	Denominación	Prioridad	Núm.	Denominación	Prioridad	Núm.	Denominación	Prioridad
25	Creu de les Portes	1	9	Entrada oest de Canillo	10	16	El Vilaró	19
23	Les Esquiroles	2	3	Borda de l'Hortó	11	19	Forat del Grau	20
28	Túnels de St. Antoni	3	12	El lloser d'Encamp	12	15	Mines de Llorts	21
8	St. Joan de Caselles	4	10	Meritxell	13	18	Serrat de la Llonga	22
5	La Cauba	5	11	Torrent Pregó	14	27	El Baixant	23
6	La Trava	6	2	Roc de St. Miquel	15	26	El Solanet	24
24	Cruïlla d'Aixovall	7	17	Arans-el Cresp	16	20	Plana Perdiguera	25
7	Vall del Riu est	8	13	El tamany	17	21	Rocs alts	26
4	Cruïlla Aldosa de Canillo	9	14	Basers del Corb	18	22	La Devesa	27

Tabla 6: Ordenación de tramos en fases según su prioridad.

Para establecer un orden de ejecución de los estudios y proyectos constructivos pertinentes, se ha creído conveniente agrupar los 28 tramos estudiados (exceptuando el tramo nº1, donde existe una zona de aludes que es incompatible con la instalación de protecciones) en tres fases; una primera en la cual la prioridad de estudio y protección, en nuestra opinión es bastante elevada, y que por tanto las medidas a tomar han de ser llevadas a cabo en los próximos años (fase a corto plazo); una segunda fase en la cual la prioridad de estudio detallado y protección han de realizarse, pero a medio plazo (fase a medio plazo); la tercera fase engloba los tramos en los cuales existe cierto riesgo, pero en los que consideramos puede ser asumido actualmente, aunque será necesario efectuar estudios y proyectos en un futuro (fase a largo plazo).

CONCLUSIONES

Los riesgos geológicos por caída de bloques se dan de forma extensiva a lo largo de una región con predominio de macizos rocosos. La mayor parte de ellos se dan en zonas que no afectan a las actividades y/o construcciones humanas y por ello el riesgo que producen es mínimo, cuando el fenómeno se produce en lugares donde si afectan a las actividades y/o construcciones humanas el riesgo puede ser muy elevado. Una de las construcciones mas afectadas suelen ser las infraestructuras viarias, debido a la realización de desmontes que tienden a desestabilizar las laderas naturales. Las medidas de protección a realizar suelen tener un coste elevado y no siempre se dispone de los recursos necesarios para proteger todas las zonas afectadas. Por ello es necesario que se establezcan métodos que permitan optimizar los recursos existentes, actuando primero en los puntos más necesarios.

El método expuesto pone el foco de atención sobre este asunto, estableciendo un orden de riesgo de mayor a menor que permite priorizar las actuaciones y así optimizar los recursos. La utilidad del método se basa en la elección de variables sencillas e independientes que una vez parametrizadas permiten valorar de manera representativa el nivel de riesgo al que se halla expuesto cada tramo considerado. Así mismo, la aplicación del “criterio de experto” permite tener en cuenta variables que no permiten o son de difícil parametrización. Las ventajas del método son su objetividad, sencillez, rapidez de aplicación, flexibilidad (pueden introducirse nuevas variables que permitan definir un caso concreto) y su capacidad de ser aplicado a diferentes regiones y/o tipos de actuaciones humanas (actividades, construcciones,...).

Para que el método sea representativo hemos de ser cautos a la hora de escoger las variables y definir los límites de los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad adecuados a la zona de estudio. Una elección de muchos niveles de rango pequeño, hará más complejo el cálculo y no aportara unos resultados “claros” y manejables. Por el contrario, pocos niveles de rangos grandes pasará por alto diferencias importantes a la hora de establecer las prioridades de actuación.

Mediante este método se obtiene un resultado numérico que permite objetivar el grado de riesgo de cada tramo, pudiendo de una manera rápida y sencilla, ordenar temporalmente las actuaciones a realizar a la hora de abordar problemas de riesgos geológicos por caída de bloques. Permite establecer una prioridad en las actuaciones a corto, medio y largo plazo para de esta manera diseñar los planes de actuación de una forma objetiva y optimizando los recursos.

BIBLIOGRAFÍA

- Copons, R.; Altimir, J.; Amigó, J.; Corominas, J. i Vilaplana, J.M. (2005): Gestión del riesgo asociado a desprendimientos rocosos en zonas urbanas: el Solà d'Andorra la Vella (Principado de Andorra). *VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. València. Vol 1: 555-566.
- Corominas, J.; Copons, R.; Moya, J.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. & Amigó, J. (2005) "Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area". *Landslides*, 2: 343-357
- Copons, R.; Mases, M.; González, M. i Vilaplana, J.M. (2004): El mapa geomorfológico de Andorra en formato digital.: Posible fuente de datos para el análisis de la peligrosidad de deslizamientos. En: G.Benito y A. Díez Herrero (eds.): *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología*. Actas de la VII Reunión Nacional de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología, CSIC-Centro de ciencias Medioambientales, 313-321pp.
- Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Corominas, J.; Altimir, J. & Amigó, J. (2004). "Rockfall risk management in high-density urban areas. The Andorran experience". In: T.Glade, M. Anderson and M.J. Crozier (eds). *Landslide hazard and risk*. John Wiley and Sons, Chichester. pp. 675-698
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. i Amigó, J. (2003): "Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra". *Natural Hazards*, Vol. 30, Issue 3, 421-435.
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. & Amigó, J. (2003). "From landslide hazard assessment to management. The andorran experience". In L. Picarelli (ed.). *Fast slope movements: prediction and prevention for risk mitigation*. Napoli. Patron Editore. Bologna. Vol.1: 111-118
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. & Amigó, J. (2002): "Hazard assessment and management experience in the Principality of Andorra". International Conference on Instability Planning and Management. Ventnor, Isle of Wight. UK. RG. McInnes & J. Jakeways (eds.) *Instability Planning and Management*. Thomas Telford. London: 687-694.

- López, C. (2001): “Zonificación del territorio según la peligrosidad de deslizamientos”. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Madrid. Vol 1: 229-254.
- Altimir, J; Copons, R.; Amigó, J.; Corominas, J.; Torrebadella, J i Vilaplana, J.M. (2001): “Zonificació del territori segons el grau de perillositat d’esllavissades al Principat d’Andorra”. Primeres Jornades del CRECIT (Institut d’Estudis Andorrans), *La gestió dels riscos naturals*: 119-132.
- Amigó, J.; Altimir, J. i Copons, R. (2001): “Verificación de los resultados del modelo de simulación Eurobloc a partir de casos reales de caídas de bloques rocosos”. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Madrid. Vol 2: 653-663.
- Copons, R.; Altimir, J.; Amigó, J. i Vilaplana, J.M. (2001): “Estudi i protecció enfront les caigudes de blocs rocosos a Andorra la Vella: Metodologia Eurobloc”. Primeres Jornades del CRECIT (Institut d’Estudis Andorrans), *La gestió dels riscos naturals*: 134-149.
- Copons, R.; Altimir, J.; Amigó, J. i Vilaplana, J.M. (2001): “Metodologia Eurobloc para el estudio y protección de caídas de bloques rocosos. Principado de Andorra”. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Madrid. Vol. 2: 665-676.
- Copons, R.; Vilaplana, J.M.; Altimir, J. i Amigó, J. (2000): “Estimación de la eficacia de las protecciones contra la caída de bloques”. *Revista de Obras Públicas*, 3394: 37-48
- Copons, R.; Altimir, J; Amigó J; Díaz, A i Vilaplana, J.M. (2000): “Eurobloc: Un modelo de simulación de caída de bloques y su máxima adaptación a la realidad”. *Geotemas*, Vol 1: 219-222
- Lopez Carreras, C, Ruiz Gandullo, J; Amigó Mitjana J; y Altimir Planes, J (1997): Aspectos metodológicos del diseño de sistemas de protección frente a la caída de bloques rocosos mediante modelos de simulación cinemática *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada. Vol 2: 811-824.