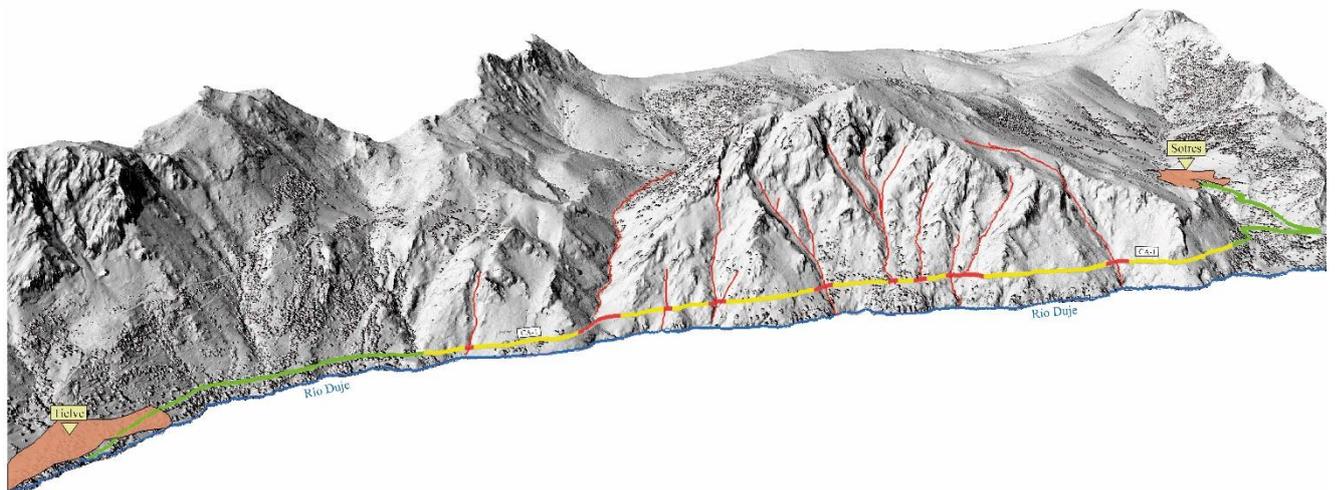


ANÁLISIS GEOTÉCNICO Y DE AFECCIÓN POR ALUDES DE NIEVE EN LA CARRETERA PONCEBOS-SOTRES

Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Trabajo Fin de Máster



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Raúl López García

Universidad de Oviedo

Mayo 2020

D. Raúl López García, autor del Trabajo de Fin de Máster titulado “Análisis geotécnico y de afección por aludes de nieve en la carretera Poncebos – Sotres”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de mayo de 2020

Fdo. Raúl López García

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Análisis geotécnico y de afección por aludes de nieve en la carretera Poncebos – Sotres”, realizado por D. Raúl López García, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de mayo de 2020

Fdo. Carlos López Fernández

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer la realización de mi Trabajo Fin de Máster a mi tutor Carlos López, el cual ha sido en todo momento un gran apoyo y ejemplo a seguir no solo durante la realización de este trabajo si no durante todo el Máster. Su entrega, constancia y pasión por la geología reflejan el gran profesional, pero sobretodo persona que es.

A María José Domínguez Cuesta, por sus grandes consejos en la elaboración de mapas geomorfológicos y de áreas fuentes.

A Mireia López Beltrán, por ser ese gran apoyo en mi vida que hace que todo lo que me proponga sea sencillo.

A mi familia, en especial a mis sobrinos Carlos y Hugo, ya que sin su cariño y apoyo no estaría donde estoy.

A mis Ovi Boiissss, por todo lo que hemos vivido juntos y nos queda por vivir.

RESUMEN

El tramo de carretera CA-1 que transcurre entre las localidades de Poncebos y Sotres (Cabrales, Asturias), dentro del Parque Nacional de Picos de Europa, resulta frecuentemente afectado por desprendimientos de rocas y desencadenamiento de aludes. En el marco del convenio entre la Universidad de Oviedo y la Consejería de Infraestructuras, Medioambiente y Cambio Climático del Gobierno del Principado de Asturias surge el presente Trabajo Fin de Máster en el que se aborda el estudio de los citados fenómenos sobre la carretera CA-1. Para ello, se realizó una cartografía de áreas fuente de desprendimientos de roca y aludes, una simulación de desprendimientos de bloques rocosos mediante software geotécnico específico, un estudio de las trayectorias de potenciales aludes y un inventario de los actuales sistemas de protección de la carretera antes tales fenómenos. Los resultados obtenidos muestran que existen cinco localizaciones en donde los bloques rocosos desprendidos podrían afectar a la carretera, siendo, por tanto, sectores donde resulta aconsejable establecer medidas de protección. Asimismo, se identifican ocho tramos del vial en donde la trayectoria de aludes interfiere con el vial objeto de estudio. Tras el análisis de los resultados se concluye que, para la correcta protección de la carretera CA-1, resulta recomendable la instalación de pantallas estáticas y dinámicas para la efectiva detención de rocas desprendidas y la construcción de sistemas de protección antialudes para aumentar las condiciones de seguridad de la misma.

ABSTRACT

The road section connecting the municipalities of Poncebos and Sostres (Cabrales, Asturias), located in Picos de Europa National Park, is often affected by rockfalls and landslide triggering. The present Master's Degree Final Project arises as part of the agreement between the Oviedo University and the Department of Infrastructure, Environment, and Climate Change of the Government of the Principality of Asturias, intending to study the aforementioned phenomena at the CA-1 national highway. To that end, a mapping of rockfall and landslide source areas, a rockfall simulation using specific geotechnical software, a study of potential landslide trajectories, and an inventory of current road protection systems against such phenomena were performed. The obtained results show the existence of five sites where the rocky block detachment could affect the road, and therefore, the establishment of protection measures for these sectors is advisable. In addition, eight sections of the road where the landslide path intersects with the road have been identified. After examining the results, it is concluded that for the correct protection of the CA-1 road, an installation of static and dynamic screens is recommended in order to prevent the detached rocks from hitting the road, as well as the construction of anti-landslide protection systems to increase its security conditions of the road section.

ÍNDICE

1. Introducción	1
Antecedentes	1
Situación geográfica de la zona de estudio	1
Características del vial	3
Contexto geológico	3
Materiales	4
Hidrogeología.....	7
Geomorfología	7
Objetivos	7
2. Metodología	7
Fotointerpretación	8
Cartografía de áreas fuentes de desprendimientos y aludes	8
Análisis de estabilidad frente a desprendimientos	11
Detección de sectores de riesgo frente a aludes	13
3. Resultados y discusión	14
Cartografía geomorfológica	14
Mapa de áreas fuentes de desprendimientos	15
Mapa de áreas fuentes de aludes	16
Afecciones por aludes	17
Análisis de caída de bloques con rocfall	19
Perfil 1	20
Perfil 2.....	22
Perfil 3.....	24
Perfil 4.....	26
Perfil 5.....	27
Perfil 6.....	29
Perfil 7.....	31
Perfil 8.....	32

Perfil 9	34
Perfil 10	35
Perfil 11	37
Perfil 12	38
Perfil 13	40
Perfil 14	41
Medidas de protección previas	43
Propuesta de medidas de protección	46
4. Conclusiones	48
5. Referencias	49
6. Anexos.....	52
Anexo 1: Cartografía geológica de la zona de estudio	52
Anexo 2: Cartografía geomorfológica.....	53
Anexo 3: Mapa de áreas fuentes de desprendimientos	54
Anexo 4: Mapa de áreas fuentes de aludes	55
Anexo 5: Mapa de afecciones por aludes a la carretera ca-1	56
Anexo 6: Representación 3d de afecciones por aludes al tramo Poncebos-Tielve	57
Anexo 7: Representación 3d de afecciones por aludes al tramo Tielve-Sotres	58
Anexo 8: Localización perfiles simulados con rocfall	59
Anexo 9: Localización geográfica de medidas de protección previas	60
Anexo 10: Localización geográfica de medidas de protección recomendadas	61

1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria representa el Trabajo Fin de Máster elaborado por Raúl López García dentro del Máster oficial en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo en el curso académico 2019/20. Este trabajo aborda el estudio de la afección de los desprendimientos de rocas y desencadenamiento de aludes sobre la carretera CA-1, situada en Cabrales (Asturias), en el Parque Nacional de los Picos de Europa. Esta temática ha sido fijada como de interés prioritario por la Consejería de Infraestructuras, Medio Ambiente y Cambio Climático del Gobierno del Principado de Asturias y se enmarca en el convenio firmado en 2019 entre esta Administración y la Universidad de Oviedo.

Cabe señalar que el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster se ha visto afectado de forma importante por la crisis sanitaria relativa al Covid-19 y por la declaración del estado de alarma por parte del Gobierno de España desde el pasado mes de marzo y que se mantiene vigente en la fecha de finalización de la presente memoria. No se ha podido desarrollar el trabajo de campo previsto en la zona objeto de estudio, aspecto que se ha intentado compensar con un trabajo de gabinete y de modelización de mayor alcance y detalle que el previsto al inicio del trabajo.

ANTECEDENTES

Picos de Europa es una zona con un gran valor paisajístico y medioambiental, que ha sido objeto de estudio en numerosas ocasiones en diversos estudios geológicos multidisciplinares. Los primeros trabajos publicados sobre esta región corresponden a Schulz (1838), Barrois (1882), Calderon (1900) y Carballo (1911). Sin embargo, las primeras bases cartográficas que han definido la forma en que se concibe hoy su estructura y estratigrafía las establecieron Martínez Álvarez (1965), Marcos (1967), Martínez García y Wagner (1971), Maas (1974) y Martínez García *et al.*, (1978). Éstos han definido con mayor claridad los diversos dominios de Picos de Europa y han aportado una mayor información sobre su configuración geológica.

No existen publicaciones científicas de carácter geotécnico ni de afección a infraestructuras que discurren por este Parque Nacional, a excepción de trabajos sobre peligrosidad por caída de rocas en la senda del Cares, como los de Diego Pérez (2019) y Álvarez García (2016). En este sentido, este trabajo se ha planteado como objetivo iniciar una nueva línea de investigación geotécnica ligada a infraestructuras viarias, en colaboración con la Consejería de Infraestructuras, Medio Ambiente y Cambio Climático del Gobierno del Principado de Asturias. Para ello, se ha seleccionado como primer vial a analizar, la carretera CA-1 en el tramo que transcurre entre las localidades asturianas de Poncebos y Sotres, gravemente afectada tanto por el desprendimiento de rocas desde las laderas adyacentes como por aludes.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La carretera CA-1 se sitúa íntegramente dentro del concejo de Cabrales (Asturias), al noroeste del Parque Nacional de Picos de Europa. El tramo analizado en el presente trabajo, con una longitud de 10,67 km, discurre por la ladera septentrional del valle situado entre las localidades de Poncebos y Sotres, en cuyo seno fluye el río Duje (Figura 1-1).

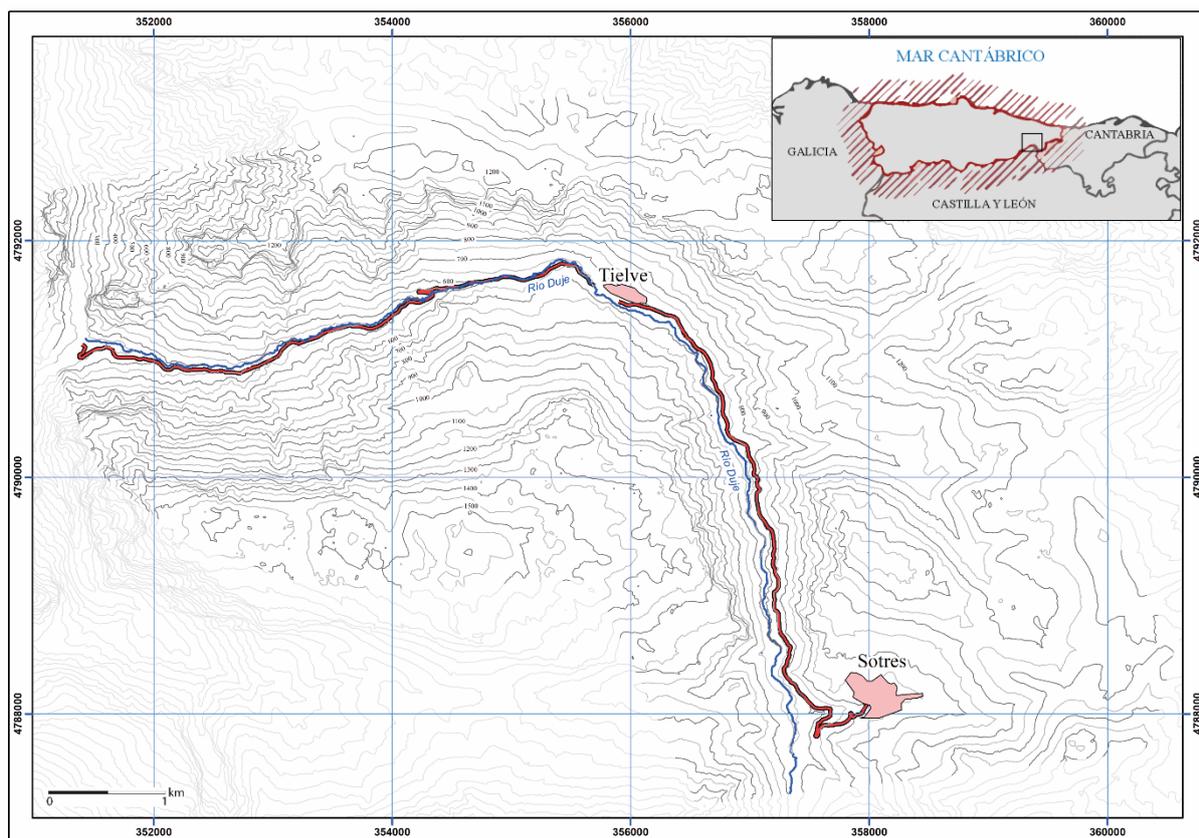


Figura 1-1. Situación geográfica de la carretera CA-1 en su trayecto Poncebos-Sotres (Asturias).

El Parque Nacional Picos de Europa, declarado como tal en 1995 (BOE, 30 de mayo de 1995), comprende una superficie de 64.660 hectáreas repartidas por las comunidades autónomas del Principado de Asturias, Cantabria y Castilla y León. El Parque comprende tres macizos montañosos: occidental o del Cornión, central o de Urrieles y oriental o de Ándara.

La vía objeto de estudio del presente trabajo está localizada en el macizo central, que separan los valles de pronunciadas pendientes excavados por los ríos Cares y Duje. Las elevaciones más destacadas de este macizo son el Torre Cerredo con 2.650 m y el Naranjo de Bulnes o Pico Urriellu con 2.519 m; aunque el pico de mayor envergadura en la zona de estudio es el Cabeza Llanedo con 1.346 m de cota.

La climatología de la zona está altamente marcada por las precipitaciones, dentro de un clima templado-húmedo siendo frecuentes registros de 2.000 mm de precipitaciones al año (un 20% en forma de nieve). El año meteorológico está marcado por la presencia de borrascas constantes durante seis meses que dan paso a anticiclones el resto del año. La temperatura media anual es de 3°C de mínima y 12°C de máxima. Estas condiciones climáticas junto con el tipo de suelo, en este caso carbonatado, hacen que la vegetación esté formada principalmente por robledales; aunque también se encuentran en abundancia hayas, tejos, acebos, serbales, abedules y espinos (Adrados-González et al., 2010).

CARACTERÍSTICAS DEL VIAL

La carretera CA-1 es una vía perteneciente a la Red de Carreteras del Principado de Asturias y que según el Artículo 5 de la Ley del Principado de Asturias 8/2006 del 13 de noviembre se clasifica como de tipo local (BOE, de 13 de noviembre de 2006). En la actualidad existe una propuesta de la Dirección General de Infraestructuras y Transportes que contempla que la carretera de tipo convencional AS-264 absorba la vía CA-1 para dar continuidad hasta el límite de la provincia de Asturias con Cantabria (BOPA, de 26 de octubre de 2017).

En la Figura 1-2 se muestra la sección tipo de la carretera CA-1 además de las zonas de protección de la misma según lo estipulado en Ley del Principado de Asturias 8/2006 (BOE, de 13 de noviembre de 2006).

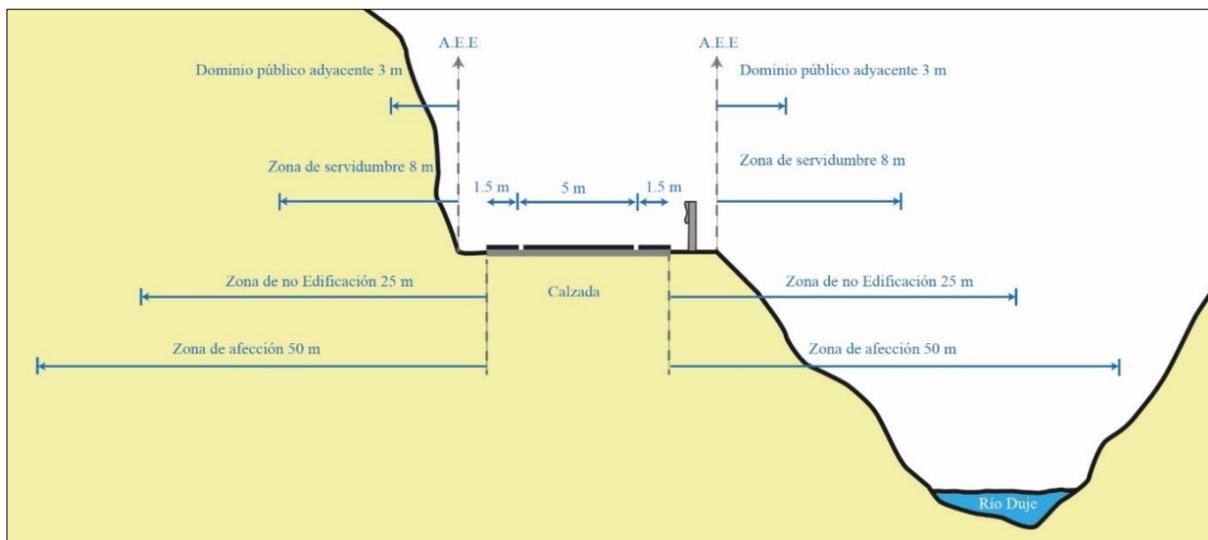


Figura 1-2. Sección tipo de la CA-1, incluyendo las zonas de protección de acuerdo a la legislación vigente y tomando como punto de referencia la calzada y la arista exterior de la explanación (A.E.E).

CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio del presente trabajo se sitúa geológicamente en la Zona Cantábrica, más concretamente dentro de la Unidad de Picos de Europa (Figura 1-3). Esta unidad está constituida casi en su totalidad por materiales del Carbonífero, en los cuales existe un amplio predominio de materiales carbonatados. Éstos dan origen al gran volumen de elevaciones que existe en la zona gracias a dicha secuencia carbonatada, que abarca desde Viseense hasta el Westfaliense terminal (Martínez García *et al.*, 1978). Dentro de esta unidad nos situamos según la división propuesta por Marquínez (1989), en la lámina de Gamonedo-Cuera y por otra parte en el Imbricado Principal de Picos de Europa.

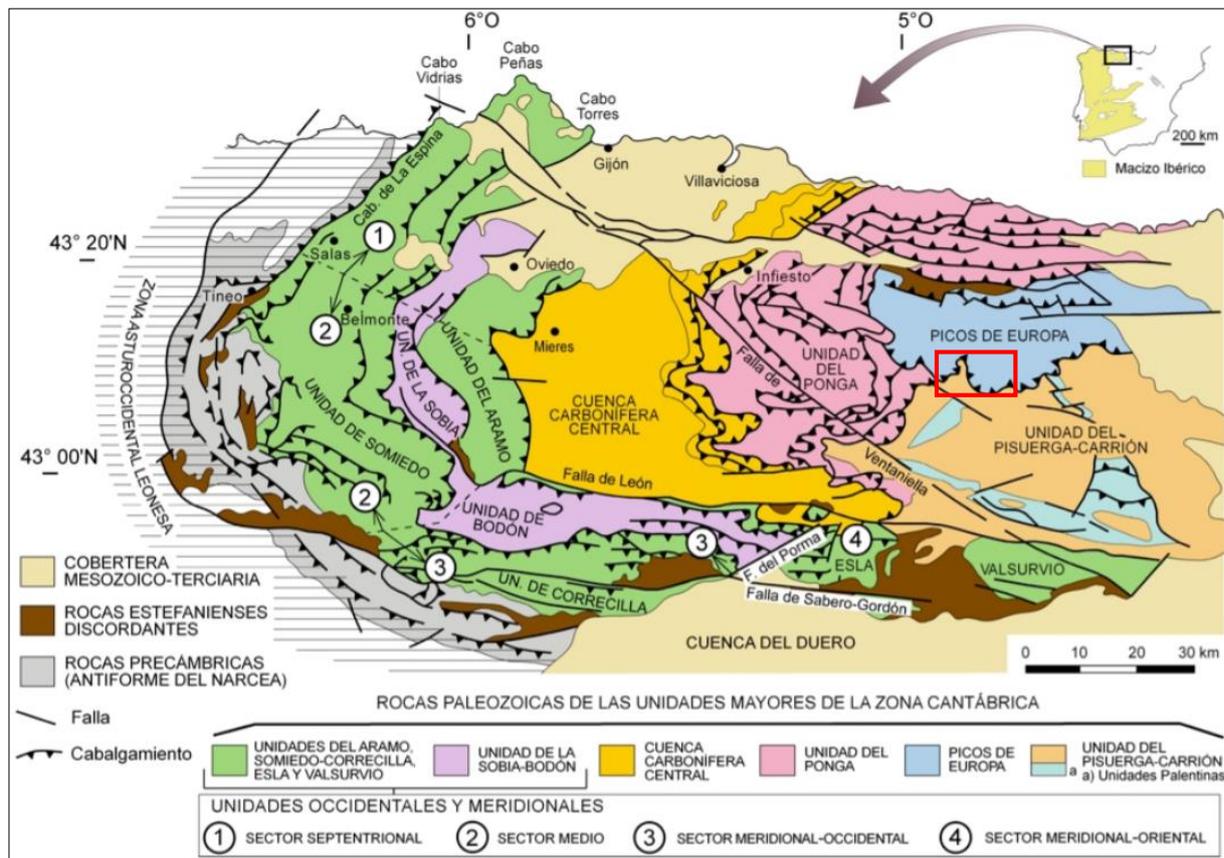


Figura 1-3. Esquema geológico de las Zonas Cantábrica y Asturoccidental-Leonesa (Pérez-Estaún y Bea, 2004). El recuadro rojo muestra la zona objeto de estudio en el presente trabajo.

La estructura principal que afecta a materiales Paleozoicos de la zona se adquiere en la Orogenia Varisca, la cual genera una región de mantos superpuestos, donde se han desarrollado pliegues asociados a la formación de los cabalgamientos (ver Figura 1-4). A esta estructura varisca se superpone, posteriormente, la adquirida durante la deformación Alpina, la cual se caracteriza por la presencia de pliegues suaves y el rejuego de cabalgamientos que llegan a verticalizarse (Marquínez, 1989)

Materiales

La serie estratigráfica que aflora en la zona de muro a techo es la que se presenta a continuación (Martínez García *et al.*, 1978):

- **Fm. Láncara:** compuesta por dolomías tableadas, calizas grises con glauconita y calizas rojas nodulosas (Cámbrico Inferior-Medio). Las dolomías constituyen la parte inferior de la formación, alcanzando su espesor aquí unos 100 m. Se trata de dolomías color crema y grano fino, en capas de 15-30 cm con intercalaciones de calcoesquistos verdosos y pardos. Sobre ellos se encuentran las calizas grises características de la formación, bastante recrystalizadas y con abundancia de glauconita, sobre todo en la parte superior; su espesor es de unos 30 m. Por último, la parte superior está constituida por las calizas rojas de facies “griotte”, también con glauconita y sólo de unos 4 m de espesor.

- **Fm. Oville:** integrada por pizarras verdes con intercalaciones de areniscas con glauconitas (Cámbrico Med. – Ordovícico Inf). Las pizarras, con restos de trilobites no determinables, constituyen la base de la formación. A ellos se superponen 230 m de areniscas ocráceas con glauconita en bancos de 10-20 cm, con intercalaciones arcillosas de variable importancia y que disminuyen hacia techo.
- **Fm. Alba o Genicera:** compuesta por calizas nodulosas rojas con intercalaciones de radiolaritas (Carbonífero Inferior). Esta formación alcanza un espesor de unos 30-50 m. Está constituida por un tramo basal de calizas rojas nodulosas en bancos de unos 20 cm separados por niveles arcillosos, con radiolaritas rojas en la base o intercaladas, y un tramo superior de calizas tableadas de grano fino y color rosado y grisáceo, pasando después a calizas tableadas con sílex y por último apareciendo la unidad superior de Caliza de Montaña.
- **Caliza de Montaña:** unidad compuesta por la Fm. Barcaliente en su base y la Fm. Valdeteja hacia techo, de edad Carbonífero (Namuriense).

Fm: Barcaliente: conformada por 300-500 m de calizas de color negro y brillo céreo, grano muy fino, olor fétido y característico bandeado milimétrico y continuo que se marca por diferencias de coloración. En la parte superior suele presentar brechas constituidas en su mayor parte por fragmentos de la propia caliza.

Fm: Valdeteja: integrada por calizas más masivas de color gris, grano más grueso que la anterior y con mayor contenido fosilífero. Su espesor es variable, pero puede llegar a 200-300 m.

- **Fm. Picos de Europa:** integrada por calizas blancas de grano fino y en la parte superior brechoides de color rosado con intercalaciones rojas nodulosas (Carbonífero, Westfaliense). Esta formación puede alcanzar los 800 m de espesor. Se diferencian principalmente por la facies de las calizas que la constituyen y, en algunas ocasiones, por la presencia de gruesos niveles separados por calizas margosas o lutitas en la base, que en conjunto superan los 100m. La base de la Caliza de Picos de Europa es diacrónica, ya que en ella se han encontrado fusulínidos cuya edad varía desde el Westfaliense B al C. En la parte superior de la formación se han encontrado fusulínidos del Kasimoviense, lo que indica que la sedimentación continuó sin interrupción hasta el Cantabriense.

La parte inferior de la Formación Picos de Europa se caracteriza por la presencia de calizas de grano fino y color blanco intenso en fractura. Excepcionalmente, en la parte basal bandeadada, se encuentran capas decimétricas de grano fino, color negro y bandeado milimétrico iguales a las calizas de la Fm. Barcaliente. Esta facies blanca puede ocupar casi la mitad inferior de la formación, pasando hacia la parte superior a calizas grises y rosadas de aspecto brechoide, con abundante fauna y con la particularidad de presentar

varios niveles que se acuñan lateralmente, y que pueden llegar a los 30m de espesor de calizas rojas brechoides que se parecen a la caliza “griotte”.

- **Lutitas y areniscas alternates (Estefaniense):** conjunto heterogéneo de rocas carbonatadas, detríticas y lutíticas que pueden alcanzar grandes espesores y que en parte presenta caracteres de turbiditas.
- **Fm. Sotres:** sucesión de areniscas y lutitas grises, rojas y verdes (Pérmico). Aparecen discordantes sobre los materiales carboníferos, arcillas margosas, limolitas y areniscas de grano fino con algunas intercalaciones brechoides poco potentes. Estos materiales son de color gris verdoso-pardo, y contienen carbonatos en cantidades variables y clorita ocasional, así como frecuentes cristales de pirita lo que indicaría condiciones reductoras de formación. Sobre este tramo basal se encuentran con frecuencia conglomerados y brechas calcáreas, que también pueden estar discordantes sobre los materiales carboníferos. Están constituidos por cantos de calizas carboníferas poco o muy rodados, embebidos en una matriz limolítica ferruginosa de color rojo intenso y en general no muy abundante.

Constituida en su base por unas decenas de metros de pizarras bituminosas oscuras a los que se superponen calizas tableadas con restos de caráceas y ostrácodos de 70 m de espesor en bancos de 1 a 3 con intercalaciones margosas de 0,5 a 1 m de espesor. En la parte superior muestra 4 metros de dolomías y a continuación siguen 40 m de margas rojas con intercalaciones areniscosas. Después aparecen 63 m de alternancias de margas rojas, areniscas y lentejones de conglomerados de hasta 1,5 m de espesor. Por último, el tramo superior está constituido por unos 50 m de intercalaciones de areniscas, margas y limolitas rojas y verdes con algún nivel delgado de conglomerados silíceos

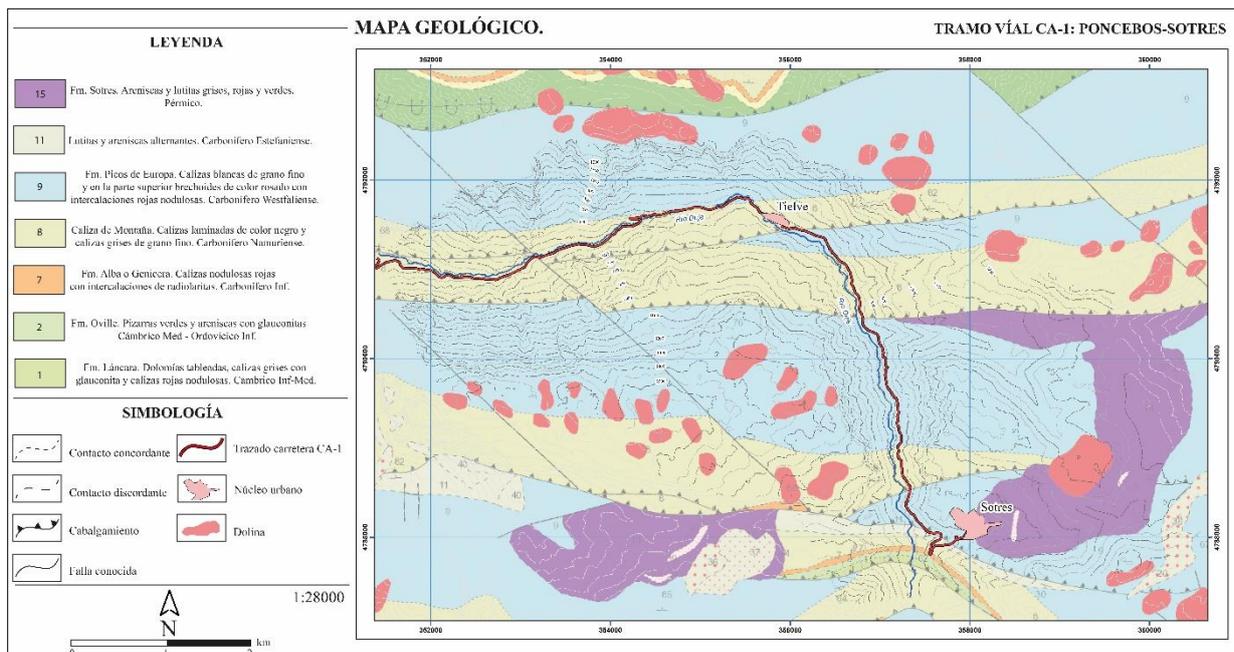


Figura 1-4. Mapa geológico del tramo Poncebos – Sotres de la carretera CA-1 (modificado de Martínez García *et al.*, 1978). Versión ampliada en Anexo 1.

Hidrogeología

En el trazado que recorre la carretera CA-1 existe un predominio de materiales carbonatados; éstos dan lugar a que el contexto hidrogeológico de la zona sea principalmente de tipo kárstico, con un amplio desarrollo teniendo en cuenta que existe un 65% de infiltración eficaz en la zona (Adrados-González et al., 2010). El resto de la lluvia útil discurre en forma de escorrentía superficial o bien por escorrentía hipodérmica (a través de las capas más superficiales del suelo) Esta hidrogeología con altas fluctuaciones en los niveles piezométricos da lugar a manantiales estacionarios que aparecen en periodos de altas precipitaciones, presencia discontinua de ríos y numerosas surgencias de aguas procedentes de cuevas.

Geomorfología

El vial analizado se caracteriza por estar localizado en la ladera orientada al Norte del valle excavado por el río Duje, de modo que existe una incidencia de los diferentes condicionantes geomorfológicos sobre la misma. La geomorfología de la zona viene totalmente condicionada por la naturaleza carbonatada del sustrato. Este hecho, sumado a factores climáticos como las elevadas precipitaciones y bajas temperaturas, genera unas condiciones idóneas para que se produzca la disolución de carbonatos. Esto conlleva por un lado el desarrollo de un sistema kárstico (tanto endokárstico como exokárstico) en donde se distinguen estructuras clásicas como las dolinas, lapiazes, etc; y, por otro, un amplio desarrollo de suelos arcillosos (terra rossa), los cuales presentan una alta susceptibilidad para generar deslizamientos rotacionales. Las laderas del valle se caracterizan por tener generalmente pendientes abruptas, aunque en ciertos sectores también existen zonas de pendientes suaves donde el desarrollo de terra rossa ha sido mayor; en ellas destaca la presencia de canchales, desprendimientos de bloques, fenómenos de reptación, etc.

OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo ha sido realizar un estudio de afección de procesos de desprendimientos de rocas y aludes al tramo Poncebos-Sotres del vial CA-1. Para ello, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de una cartografía geomorfológica de formas nivales y de gravedad.
- Realización de cartografías de áreas fuentes para desprendimientos y para aludes.
- Revisión de patologías de estructuras previas y obras efectuadas.
- Análisis de estabilidad frente a desprendimientos y aludes.
- Propuesta de medidas correctoras para el arranque de aludes y desprendimientos de rocas.

2. METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente trabajo ha comprendido de diversas etapas; desde la identificación de posibles fenómenos que afecten al vial, su localización y afección al mismo, hasta el planteamiento de medidas correctoras y/o protectoras de la carretera. En el presente apartado se presentan todas las metodologías realizadas.

Fotointerpretación

Inicialmente, con el objetivo de abordar una primera cartografía de las formas nivales y de gravedad de la zona por la que transcurre la carretera CA-1, se ha realizado un estudio de fotointerpretación previo a las tareas de investigación en campo. Para dicho análisis, se utilizaron ortoimágenes tomadas en 2017, con una resolución de 0,25 m de tamaño de píxel, y ficheros digitales de nubes de puntos LiDAR, con una resolución aproximada de 1 m por cada píxel, documentación obtenida en el portal web del Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN, 2019). Estos últimos ficheros, suministrados en formato LAZ, han sido procesados con la aplicación LAStools (v.9.3, Rapidlasso) para generar un modelo digital de elevaciones (MDE), a partir del cual se han obtenido diferentes modelos derivados del terreno (pendientes, sombreado, orientaciones, etc.); para estas operaciones se empleó el programa ArcGIS (v 10.3, ESRI).

Cartografía de áreas fuentes de desprendimientos y aludes

El estudio de desprendimientos de rocas y desencadenamiento de aludes de nieve en todo el trazado del vial CA-1, los fenómenos que más comprometen la seguridad del mismo, ha requerido discretizar los sectores de mayor afección en esta carretera frente a ambos fenómenos, sectores en donde, posteriormente, se podrán aplicar otras metodologías de análisis de estabilidad de taludes basadas en programas geotécnicos específicos. Así, se han elaborado cartografías de áreas fuentes, tanto para aludes como para desprendimientos de rocas.

Para la elaboración de estos mapas se han tenido en cuenta cinco condicionantes que pueden favorecer en mayor o menor medida la ocurrencia de desprendimientos rocosos y aludes de nieve. Con cada uno de los condicionantes se ha generado un modelo ráster, el cual ha sido reclasificado de tal forma que cada píxel contiene información en una escala arbitraria, que va del 1 al 3, en la que el 1 corresponde a la situación de mayor estabilidad posible y el 3 a la situación más desfavorable. A continuación, se exponen los diferentes condicionantes considerados en cada caso:

➤ Orientaciones de las laderas

A partir del MDE de alta resolución se generó un modelo digital de orientaciones (MDO) con una resolución de 5 metros. Este ráster se reclasificó teniendo en cuenta la incidencia de la radiación solar, tal y como se muestra en la Tabla 2-1. La exposición al sol calienta la superficie, tanto de la nieve como de la roca, desencadenando la movilización de la nieve en el caso de los aludes y favoreciendo la gelifracción en el caso de los desprendimientos de rocas.

Clasificación		
Tipo	Desprendimientos	Aludes
0-45°	1	1
45-90°	2	2
90-270°	3	3
270-315°	2	2
315-360	1	1

Tabla 2-1. Clasificación de las orientaciones de las laderas en función de la radiación solar.

➤ Vegetación

Para poder representar y clasificar la vegetación presente en la zona, se ha recurrido a la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (Valderrábano Luque, 2000), la cual incluye una cartografía de vegetación a escala 1/25.000 de la zona. A partir de ésta, se ha generado un nuevo modelo ráster siguiendo la clasificación que se adjunta en la Tabla 2-2, basada en los diferentes tipos de vegetación existente y en cómo influyen a la hora de favorecer a la estabilidad frente a desprendimientos y aludes.

VEGETACIÓN			
Tipo		Clasificación	
		Desprendimientos	Aludes
Dominio arboreo	Bosques maduros	1	1
	Formaciones arbustivas	1	1
	Prebosques	1	1
Dominio arbustivo	Aulagares	2	2
	Brezales, tojales y matorrales de brecha	1	2
	Enebrales rastreros de alta montaña	2	2
	Helechales y zarzales	2	2
	Formaciones herbáceas no pratícolas	2	3
Dominio herbáceo	Prados y pastos	2	3
	Vegetación rupícola	3	3
	Vegetación dulceacuícola	1	3

Tabla 2-2. Clasificación de la vegetación en función de sus características.

➤ Pendiente

La pendiente es un factor clave tanto en el desencadenamiento de aludes como de desprendimientos. La zona objeto de estudio se caracteriza, especialmente, por una orografía marcada por grandes desniveles, que también condicionan el trazado de la carretera CA-1. Para el estudio de esta variable se ha generado un modelo de pendientes (MDP) a partir del MDE, que ha sido reclasificado de acuerdo a los valores que se presentan en la Tabla 2-3. Para establecer estos parámetros se ha consultado la La Guía de Aludes realizada por las Delegaciones Territoriales de Aragón y Cataluña de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET, 2015), en el caso de los aludes, y siguiendo la propuesta de González de Vallejo *et al.* (2002), en el caso de los desprendimientos.

PENDIENTE		
Clasificación		
Tipo	Desprendimientos	Aludes
0-25°	1	1
25-35°	2	2
35-45°	3	3
45-90°	3	1

Tabla 2-3. Valores considerados en la reclasificación de la pendiente.

➤ Sustrato

El sustrato rocoso de la zona está constituido principalmente por materiales carbonatados. Dadas las características climáticas de la zona, estos materiales están especialmente expuestos a fenómenos de gelifracción y, por tanto, es frecuente la formación de cuñas y bloques de roca que luego pueden desprenderse. Sin embargo, este condicionante es irrelevante frente a la ocurrencia de aludes, ya que éstos, en la mayoría de los casos, tienen su zona de despegue en el propio manto nival, careciendo de importancia la superficie sobre la que se haya depositado. Considerando la cartografía litológica contenida en la citada cartografía ambiental del Principado de Asturias (Marquínez García y Fernández Iglesias, 2000), se generó un nuevo modelo ráster en el que se fusionaron todas aquellas formaciones cuyos materiales ofrezcan un comportamiento geomecánico similar. Cabe reseñar, que este condicionante únicamente ha sido considerado para la cartografía de desprendimientos. La clasificación utilizada en este caso se presenta en la Tabla 2-4.

Litologías		
Clasificación		
Tipo	Desprendimientos	Aludes
Calizas	3	-
Pizarras y Areniscas	2	-
Pizarras, calizas. Dolomías y margas rojas	2	-
Arcillas margosas, limolitas y areniscas	1	-

Tabla 2-4. Valores considerados en la reclasificación de las diferentes Formaciones presentes en la zona objeto de estudio.

➤ Formaciones superficiales

La presencia o no de formaciones superficiales no afecta al desencadenamiento de aludes, pero sí influye de forma importante en la generación de desprendimientos. Todos aquellos sectores en donde se hayan generado y/o acumulado materiales cuaternarios son zonas en donde no podrán producirse desprendimientos de grandes bloques por estar recubierto el sustrato rocoso. Sí podrán movilizarse, en ocasiones, bloques de pequeño tamaño, como por ejemplo en los canchales. El modelo ráster generado ha discretizado únicamente dos sectores; uno, donde aparecen materiales cuaternarios (al que se ha asignado un valor de 1)

y, otro, correspondiente a las zonas de afloramiento del sustrato rocoso (al que corresponde un valor de 3).

Para la elaboración de los mapas finales de áreas fuente de desprendimientos y de aludes se ha realizado una ponderación (Tabla 2-5) y posterior combinación de los diferentes condicionantes mediante una aproximación cualitativa heurística.

Tipo	Ponderación	
	Desprendimientos	Aludes
Formaciones superficiales	30	-
Vegetación	30	35
Sustrato	5	-
Pendiente	30	45
Orientación ladera	5	20
TOTAL	100 %	100 %

Tabla 2-5. Ponderación utilizada para la elaboración de los mapas de áreas fuentes de desprendimientos y aludes.

Análisis de estabilidad frente a desprendimientos

La realización de simulaciones de caídas de bloques es una tarea compleja que presenta múltiples limitaciones, ya que “emular” un proceso natural tan complejo resulta casi imposible debido a la infinidad de factores que pueden llegar a afectar a la trayectoria que realiza un bloque durante su caída por una ladera o talud. Pese a ello, existen programas capaces de modelizar caídas de bloques con resultados relativamente precisos. En este caso se ha recurrido al programa Rocfall (v.4.042, Rocscience) con la finalidad de conocer las trayectorias más probables de bloques desprendidos, sus alturas de rebote y su distribución de energías de impacto. En el presente trabajo se ha utilizado el método de cálculo denominado *Lumped Mass*, que modeliza cada bloque desprendido como una partícula esférica muy pequeña, para la que únicamente se considera su masa de cara a estimar la energía cinética.

Para la simulación de desprendimientos, en primer lugar, ha de definirse la geometría de la ladera donde se producirán la caída de bloques. En este trabajo, para ello, se ha considerado la cartografía de áreas fuente de desprendimientos. Disponer de este mapa resulta imprescindible para realizar simulaciones ajustadas a la realidad, dado que evita el estudio de perfiles donde no se puedan dar caídas de bloques desprendidos debido a que no existe ninguna zona donde puedan generarse. Además, también se han utilizado criterios geomorfológicos (existencia de canchales, canales, etc.) y la localización de medidas protectoras previas al presente informe para la selección de zonas de riesgo donde realizar los perfiles.

Se han modelizado 14 perfiles, cuya geometría se ha obtenido a partir del MDE de la zona objeto de estudio empleando la extensión *3D Analyst* implementada en ArcGIS. Las

coordenadas X/Z obtenidas para cada uno de los perfiles fueron posteriormente importadas en programa Rocfall para poder llevar a cabo las oportunas simulaciones.

La simulación de la caída de bloques a lo largo de una ladera, además de la propia geometría de la misma, requiere considerar otros factores que influyen en la trayectoria seguida por los mismos (Srikanth Marchetty, 2015).

➤ **Coefficientes de restitución normal y tangencial**

Estos coeficientes, cuyos valores varían de 0 a 1, indican como es de eficaz un determinado talud a la hora de favorecer o entorpecer la detención de un bloque durante su caída; valores bajos indicarán que los materiales que componen el talud tienen una gran capacidad de detener los bloques durante su caída. Se trata pues, de una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas. Dada la complejidad existente en definir dichos coeficientes debido a que requieren un arduo trabajo; se han tomado los valores propuestos por la tabla “Rocsience Coefficient of Restitution Table” presentados en la Tabla 2-6. Esta tabla ofrece los valores de coeficientes de restitución normal y tangencial considerados para diversos tipos de materiales en las laderas.

Tipo de material que forma el talud	Coeficiente de restitución normal (Rn)		Coeficiente de restitución tangencial (Rt)	
	Media	Desv. Estándar	Media	Desv. Estándar
Canchal	0,2	0	0,24	0
Roca con vegetación	0,303	0,08	0,615	0,17
Calzada	0,4	0,04	0,9	0,04
Sustrato rocoso	0,415	0,064	0,712	0,116
Suelo con vegetación	0,3	0,04	0,8	0,04

Tabla 2-6. Coeficientes de restitución normal y tangencial utilizados en la simulación de desprendimientos mediante Rocfall.

➤ **Velocidad angular**

Este parámetro representa una medida de la velocidad de rotación que sufre el bloque durante su caída, si bien tiene un reducido grado influencia en la trayectoria seguida por el bloque durante su caída. Lógicamente, la velocidad angular en los puntos de inicio del movimiento del bloque será cero.

➤ **Rugosidad de la superficie del talud**

Las irregularidades presentes en la superficie del talud explican la gran variabilidad en las trayectorias seguidas por los bloques desprendidos, ya que esta altera el ángulo en el que la roca impacta y rebota sobre la superficie de la ladera. La rugosidad media constituye un importante parámetro, que en el programa de cálculo utilizado se asigna a cada segmento del perfil, pudiendo especificar su desviación estándar para indicar la mayor homogeneidad o heterogeneidad del talud o ladera a modelizar.

➤ **Ángulo de rozamiento**

Este factor representa el ángulo crítico de cada segmento del talud a partir del cual un bloque caído continuará moviéndose ladera abajo. Por tanto, un ángulo inferior a éste detendría el movimiento del bloque. Este parámetro varía en gran medida en función de la forma de los bloques; así, si el bloque estuviera conformado por cantos planos el ángulo de rozamiento vendría definido por deslizamiento entre bloques (ángulo que se puede determinar, por ejemplo, mediante el ensayo *tilt test*); mientras que, si el bloque es una esfera, el ángulo de rozamiento se reduce a prácticamente 0. En este caso, al considerar método *Lumped mass*, el ángulo de rozamiento se obtiene directamente a partir del coeficiente de Restitución tangencial.

➤ **Valores de velocidad inicial horizontal, vertical y angular**

Estos valores indican al programa como ha sido el inicio del movimiento que ha generado el desprendimiento de bloques. Si, por ejemplo, el desprendimiento modelizado tiene lugar mediante vuelco, la velocidad inicial es la angular, quedando las velocidades horizontales y verticales con un valor de cero. Para ello, se han dibujado con el programa Rocfall diferentes *Seeder lines* (líneas de tiro), las cuales delimitan sectores en donde se producen desprendimientos, proponiéndose en este trabajo una velocidad inicial de 1,5 m/s en sectores donde existe sustrato rocoso y una velocidad de 2 m/s en canchales.

Rocfall además de dibujar la trayectoria seguida por los bloques, calcula la energía cinética total presente en cada punto del talud, valor imprescindible a la hora de decidir las medidas a establecer para proteger el vial. Para ello, es de vital importancia estimar la masa que tienen los bloques desprendidos, para poder dimensionar correctamente unas medidas protectoras y/o correctoras. La observación directa de bloques en zonas de acumulación muestra que existen tres tamaños representativos de bloques, cuya masa se ha obtenido empleando la fórmula del volumen de un elipsoide $V = \frac{4}{3} * \pi * a * b * c$, siendo a, b y c los tres ejes principales, y multiplicando dicho volumen por la densidad de esta roca caliza que según Pérez-Millán (2019) es de 2,6 g/cm³ (Tabla 2-7).

	M1	M2	M3
Masa de los bloques (kg)	1144	794,75	12,71

Tabla 2-7. Masas de los bloques utilizadas en Rocfall para la correcta determinación de la energía cinética total presente en los desprendimientos.

Detección de sectores de riesgo frente a aludes

La modelización de aludes de nieve se basa, habitualmente, en programas informáticos (RAMMS, Open FOAM, FLOW-3D, etc.) que simulan la trayectoria que sigue un flujo por una ladera, a través del análisis de un DEM. Estas herramientas no evalúan si pueden llegar a desencadenarse o no aludes, sino que simplemente simulan el recorrido y alcance de un flujo de nieve o de derrubios con unas características determinadas (densidad y coeficiente de fricción).

El cálculo del factor de seguridad (indicador del desencadenamiento de aludes) mediante software geotécnico estándar se hace inviable debido a la complejidad que supone caracterizar numéricamente la geometría y parámetros representativos de la nieve (humedad, presencia de hielo, capa de nieve, etc.). Para analizar la ocurrencia de los aludes que afectan a la carretera CA-1 se ha realizado una representación tridimensional mediante la herramienta ArcScene (v.10.3, ESRI), además de una representación bidimensional (mapa de afección de aludes a la carretera CA-1) de los tramos susceptibles de ser alcanzados por aludes. Esta delimitación de tramos de riesgo se ha realizado considerando el mapa de áreas fuente de generación de aludes, y teniendo en cuenta gracias a la información histórica proporcionada por la prensa, que los aludes se movilizan a través de canales que cruzan la carretera y finalizan en el cauce del río Duje. Para ello, se ha generado un archivo de tipo TIN (Triangulated Irregular Network) a partir del DEM de alta resolución. Estos archivos representan un tipo de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Éstos están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos, formando una superficie tridimensional a la cual se puede superponer la ortoimagen de la zona de estudio y el mapa de áreas fuentes de aludes, facilitando la visualización de la interacción de las zonas de arranque de aludes y los canales que los conducen al vial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado se presentan y se discuten los resultados del mapa de formas nivales y de gravedad, el análisis de trayectorias de caídas de bloques, la caracterización y clasificación geomecánica del macizo y afección de aludes al vial.

CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

Las geomorfologías más relevantes para el estudio de desprendimientos de rocas y aludes se presentan en la Figura 3-1 y en el Anexo 2; de esta cartografía destaca la presencia de grandes relieves, con ausencia de formaciones superficiales recubriendo el sustrato, los escarpes situados en zonas suprayacentes al vial y la presencia de numerosos canales de aludes.

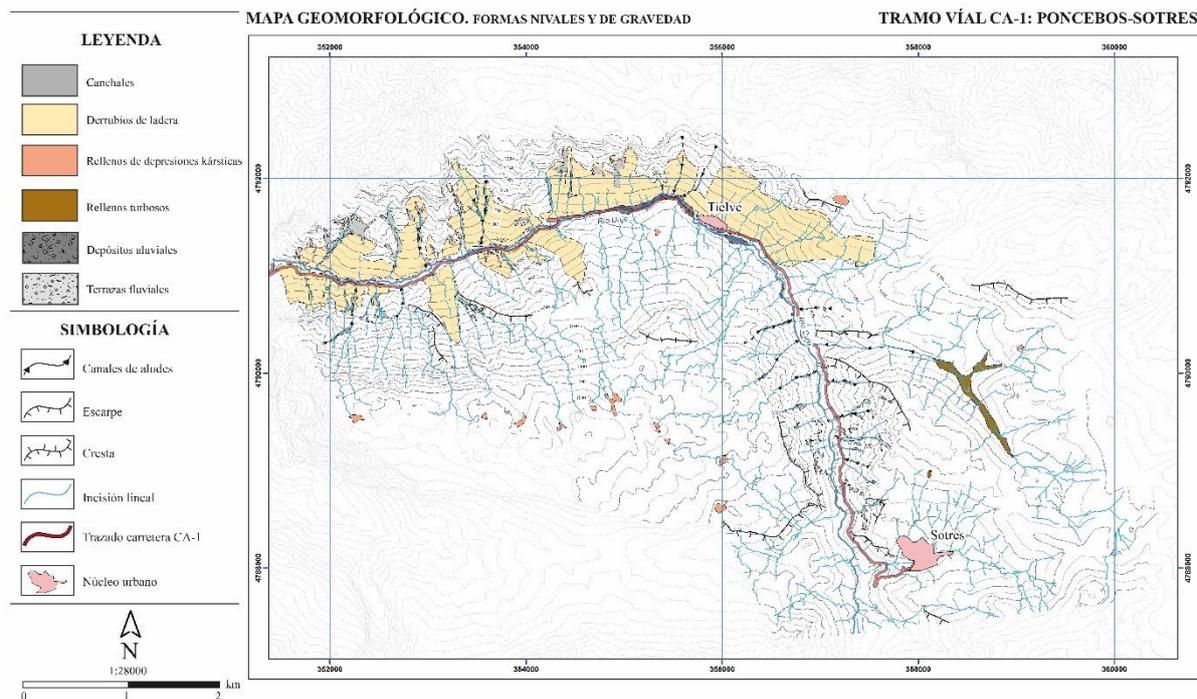


Figura 3-1. Mapa geomorfológico del tramo Poncebos – Sotres de la carretera CA-1. Versión ampliada en el Anexo 2.

MAPA DE ÁREAS FUENTES DE DESPRENDIMIENTOS

El mapa de áreas fuentes de desprendimientos (Figura 3-2; Anexo 3) presenta el resultado de los sectores con alta favorabilidad para que se produzca el arranque de caídas de bloques. Para un correcto estudio de afecciones de caídas de bloques al vial, hay que tener en cuenta si estas zonas de alta favorabilidad pueden llegar a afectar al mismo. Éstas, dependen de si el vial transcurre por la vertiente Norte o la Sur, ya que la carretera cambia de ladera en diversos puntos a lo largo de su recorrido. En las zonas de alto riesgo de desprendimientos que puedan interferir con la carretera se ha realizado a posteriori la simulación de caídas de bloques mediante Rocfall.

El mapa que se presenta a continuación muestra dos tramos principales con alta favorabilidad: (i) el tramo Poncebos – Tielve con una longitud de 5,2 km (desde el PK 0+000 hasta el PK 4+000) y (ii) el tramo Tielve – Sotres con una longitud de 5,4 km (desde el PK 5+000 hasta el PK 9+000). El tramo más occidental (Poncebos – Tielve), presenta numerosos sectores con alta favorabilidad para la generación de desprendimientos, presentándose con una mayor área en la vertiente Norte del valle y de forma más local en la Sur. Desde el PK 0+000 hasta el PK 2+000, la carretera CA-1 transcurre por la vertiente Sur, pudiendo ser afectada por pequeñas zonas de alta favorabilidad, mientras que entre el PK 2+000 y PK 3+000 la carretera cambia de ladera pudiendo ser afectada por las grandes zonas de alta favorabilidad de dicha vertiente. En el tramo más austral (Tielve – Sotres), se puede observar de Norte a Sur, una zona en donde no existe apenas riesgo alto de que se generen desprendimientos (tramo más cercano a la localidad de Tielve), dando paso a un sector con alta favorabilidad frente a desprendimientos situado entre el PK 6+000 y el PK 9+000. Éste último tramo se sitúa sobre el trazado del vial, coincidiendo

además con una pendiente elevada y la ausencia de vegetación arbustiva que pudiera detener bloques durante su caída.

MAPA DE AREAS FUENTE DE DESPRENDIMIENTOS.

TRAMO VÍAL CA-1: PONCEBOS-SOTRES

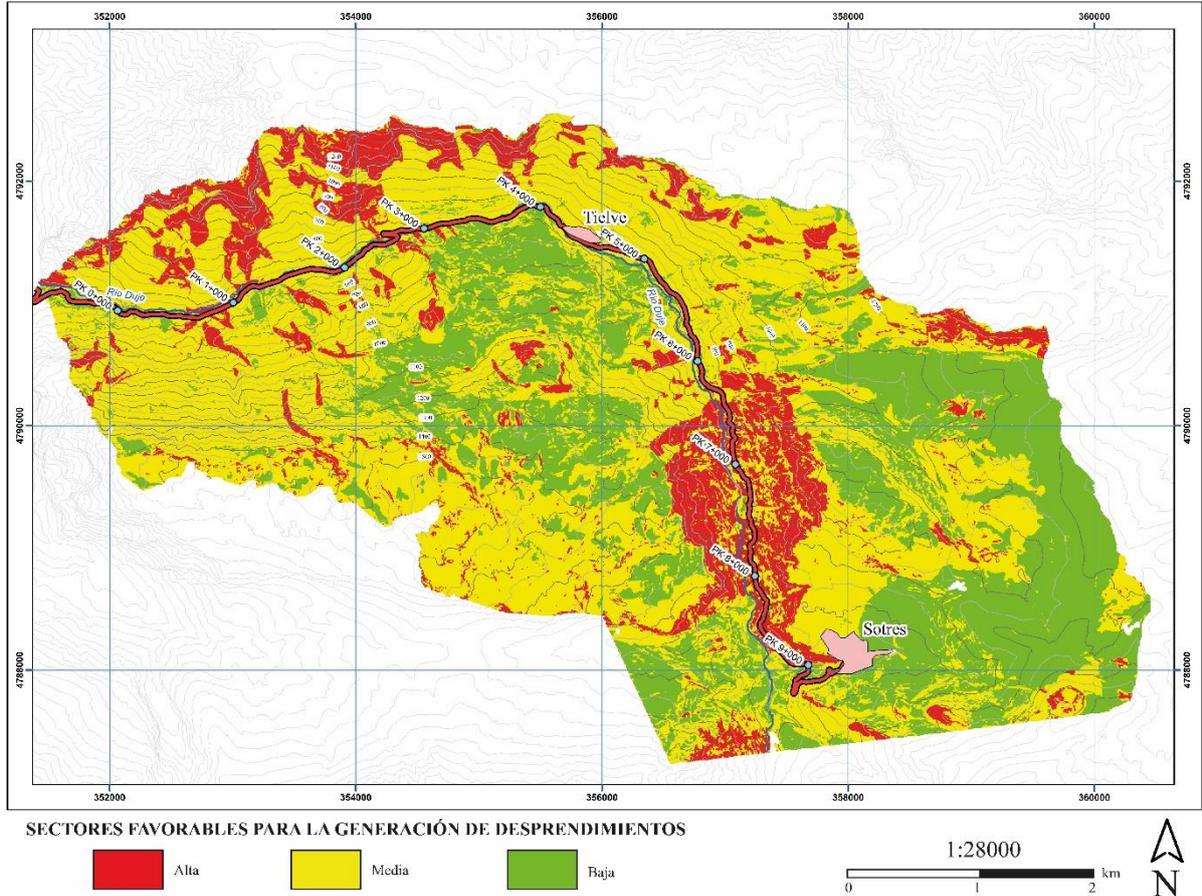


Figura 3-2. Mapa de áreas fuente de desprendimientos del tramo Poncebos – Sotres de la carretera CA-1. Versión ampliada en el Anejo 3.

MAPA DE ÁREAS FUENTES DE ALUDES

El resultado que ofrece el mapa de áreas fuente de aludes (Figura 3-3, Anexo 4) indica que no existen grandes sectores en donde pueda producirse el arranque de aludes. Así, en general, las zonas con alta favorabilidad para la generación de aludes son bastante dispersas salvo en la ladera Norte del tramo occidental del vial entre el PK 0+000 y el PK 1+000. Al igual que ocurre en el caso de desprendimientos de rocas, en dicho sector los posibles aludes que se puedan producir no afectarían al vial, por desarrollarse en la vertiente Norte situándose la carretera en la ladera opuesta.

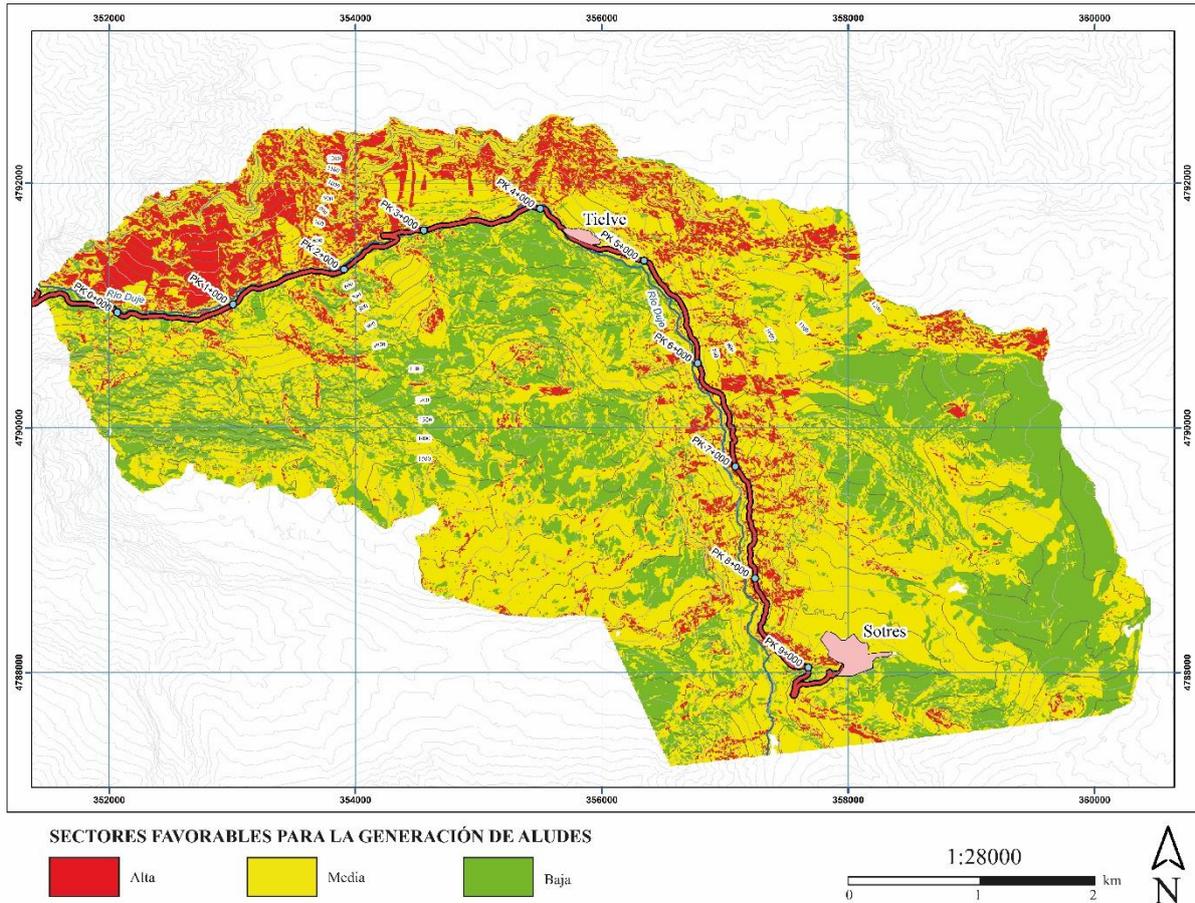


Figura 3-3. Mapa de áreas fuente de aludes del tramo Poncebos – Sotres de la carretera CA-1. Versión ampliada en el Anexo 4.

AFECCIONES POR ALUDES

El estudio de las posibles afecciones por aludes al vial, ha permitido deducir que la ocurrencia de aludes que afecten al vial se da cuando existen unas determinadas características. El análisis del mapa de áreas fuentes de aludes ha permitido identificar los sectores con las características adecuadas para el arranque de aludes, pero éste no es suficiente criterio para estudiar la afección de aludes al vial CA-1. Para un correcto análisis, se ha tenido en cuenta además, la cartografía geomorfológica y la información histórica obtenida a través de noticias recogidas en la prensa.

Los aludes que arrancan en los sectores que se muestran en el mapa de areas fuentes se canalizan a través de los canales de aludes. Cuando el flujo de nieve va descendiendo por dichos canales erosiona la nieve despositada en las paredes del canal eliminando el soporte con el que cuenta la nieve suprayacente. Esto genera pequeños aludes que alimentan el flujo de nieve canalizado. Esta situación causa un flujo de nieve que se mantiene relativamente constante. En la Figura 3-4 (ampliada en el Anexo 5) se muestran los sectores de la carretera CA-1 que se ven a afectados por estos aludes sobre los que parece recomendable tomar medidas de protección y/o correctoras.

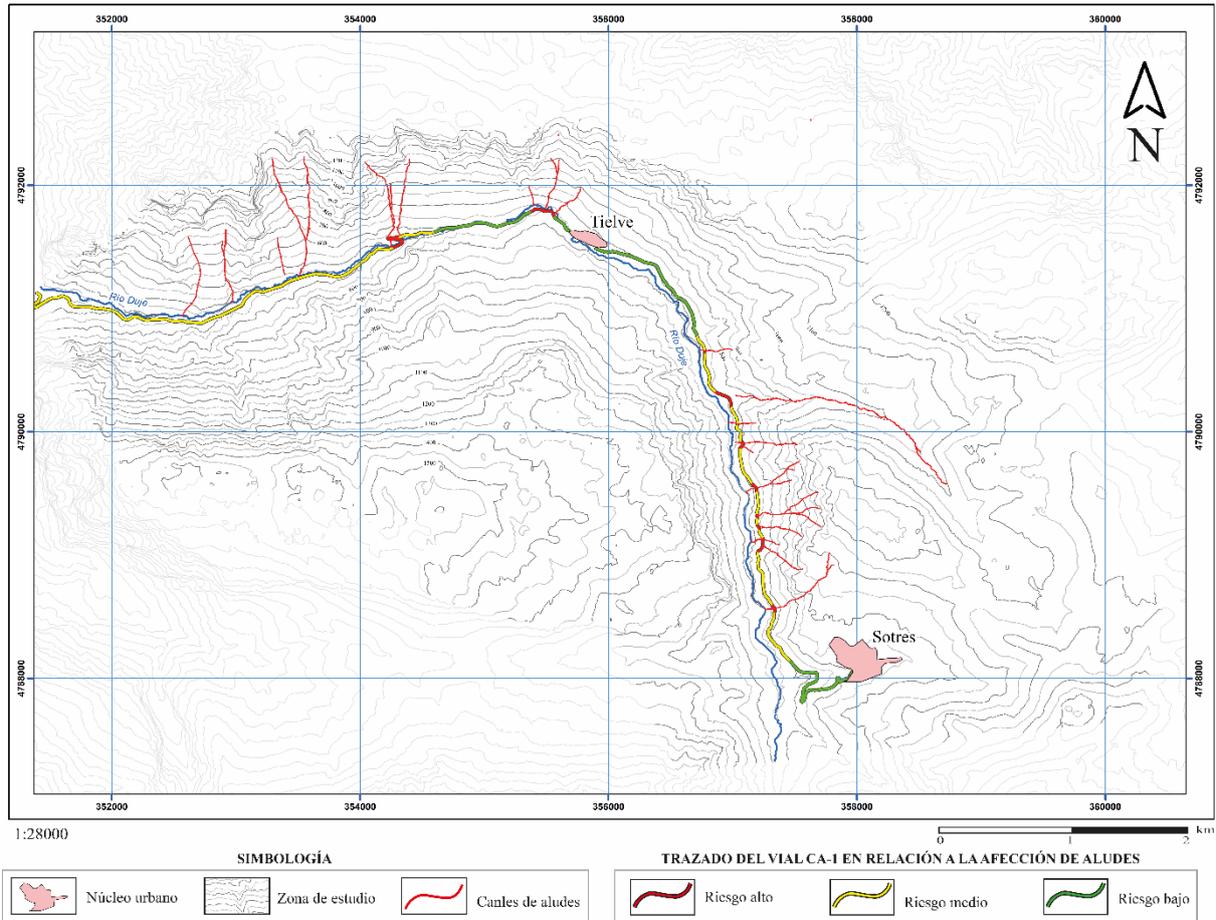


Figura 3-4. Mapa de afecciones por aludes del tramo Poncebos – Sotres de la carretera CA-1. Versión ampliada en el Anexo 5.

Con la finalidad de obtener una mejor visión de la interacción que se produce entre la carretera y los canales de aludes, se han realizado las representaciones 3D que se presentan en las Figuras 3-5 (Anexo 6) y 3-6 (Anexo 7) del tramo Poncebos – Tielve y Tielve – Sotres, respectivamente.

Representación 3D de afecciones por aludes al tramo Poncebos - Tielve del vial CA-1.

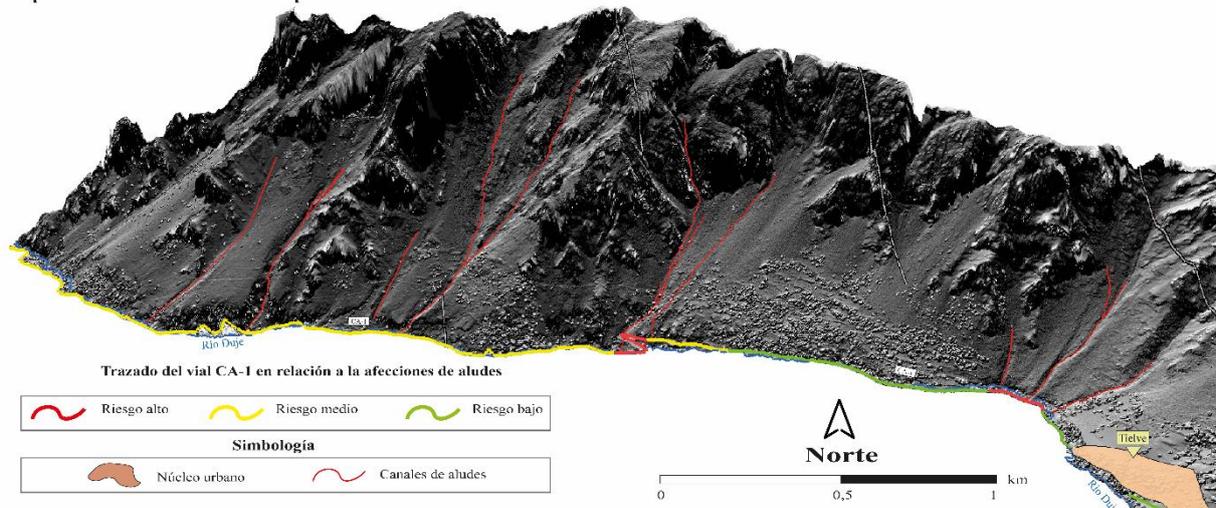


Figura 3-5. Representación tridimensional de la afección por aludes al vial CA-1 en el tramo Poncebos - Tielve. Versión ampliada en el Anexo 6.

Representación 3D de afecciones por aludes al tramo Tielve - Sotres del vial CA-1.

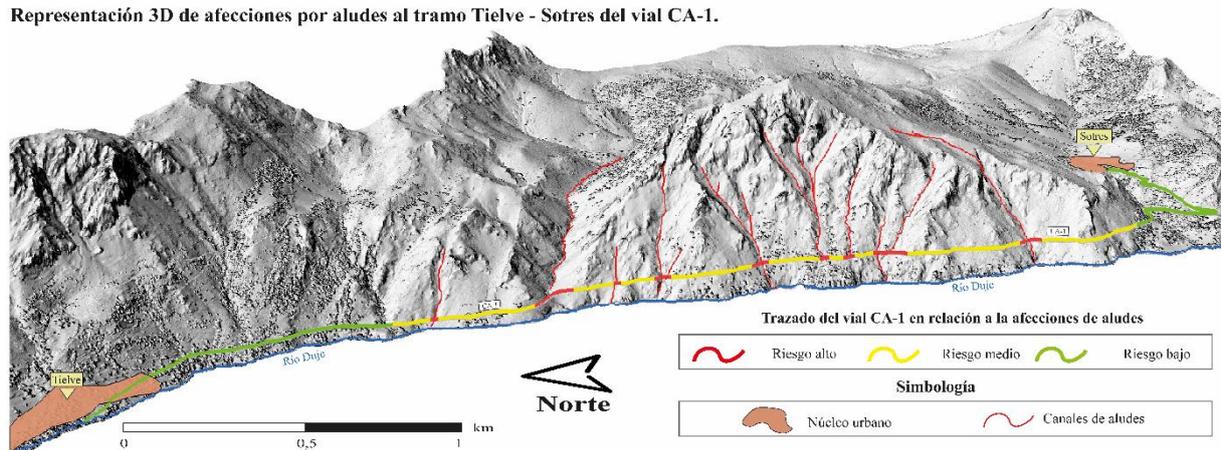


Figura 3-6. Representación tridimensional de la afección por aludes al vial CA-1 en el tramo Tielve - Sotres. Versión ampliada en el Anexo 7.

ANÁLISIS DE CAÍDA DE BLOQUES CON ROCFALL

En el presente apartado se presentan y discuten los resultados de 14 modelizaciones de desprendimientos rocosos realizados con el programa RocFall, correspondientes a los perfiles distribuidos a lo largo del trazado de la carretera (Figura 3-7). El objetivo de estos modelos es analizar las trayectorias que siguen los bloques desprendidos y estimar la energía con que podrían alcanzar el vial. Esta es una premisa necesaria para poder identificar las zonas donde resulta recomendable la adopción de medidas de protección frente a desprendimientos y poder abordar su dimensionado.

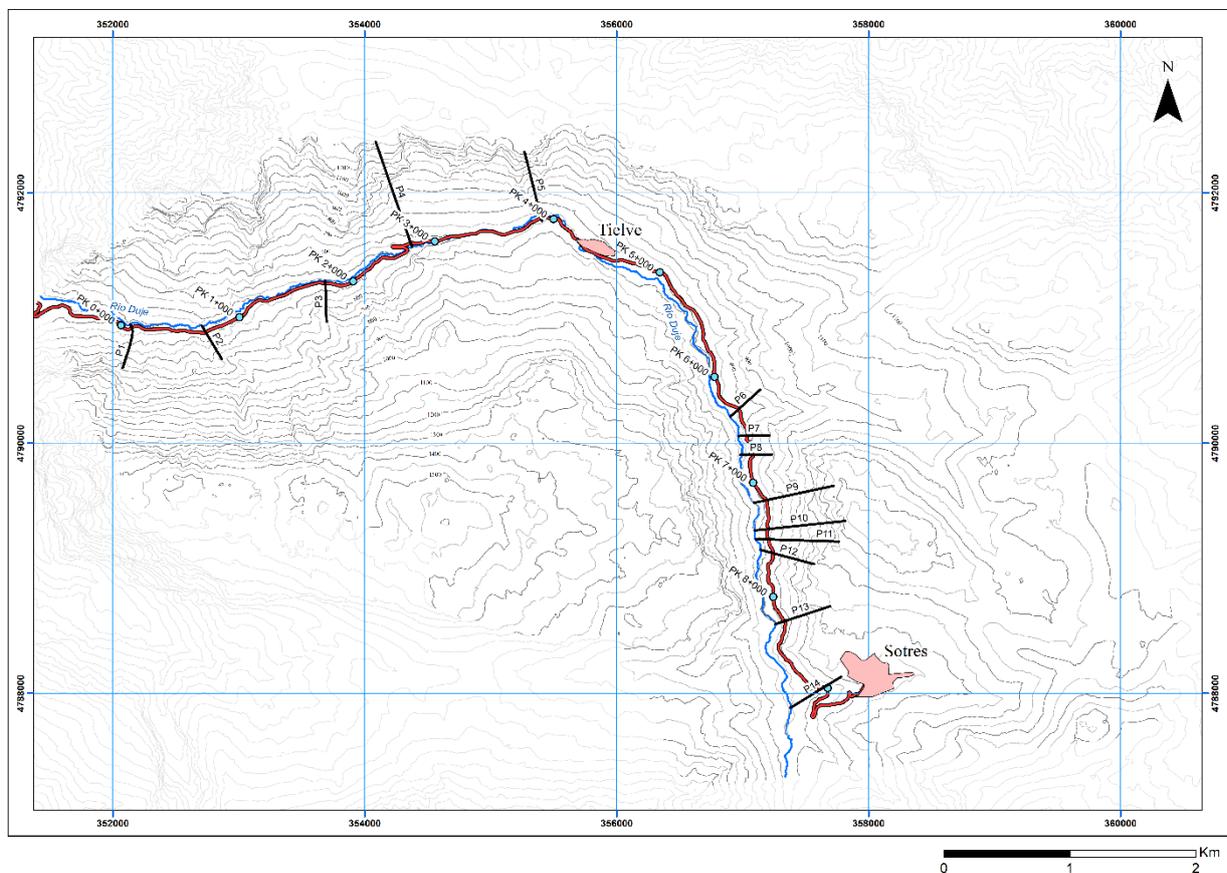


Figura 3-7. Localización geográfica de los perfiles simulados con Rocfall. Versión ampliada en el Anexo 8.

Para definir un escenario que se ajuste lo máximo posible a lo que sucede en la realidad y adoptar un criterio conservador, se han establecido una serie de condiciones en las simulaciones:

- Masa de los bloques: se ha tomado un valor de 1.144 kg como masa representativa de los bloques de mayor tamaño y, por tanto, de los que generarán mayor energía cinética. Esto repercute en que las barreras que se establezcan para proteger el vial deben ser capaces de soportar el mayor impacto esperable en la zona.
- *Seeder line* en zonas de alta favorabilidad: el lanzamiento de bloques en los perfiles se ha establecido en función de las zonas de alta favorabilidad presentadas en el mapa de áreas fuentes de desprendimientos.
- *Seeder line* en canchales: cuando se produce un desprendimiento, es habitual que al interactuar los bloques desprendidos con los acumulados en los canchales se generen nuevos desprendimientos. Por ello, se ha establecido en los canchales líneas de tiro de bloques con una velocidad inicial horizontal de 2 m/s. Esta velocidad horizontal ha sido establecida testando diferentes valores hasta alcanzar un valor en donde los bloques son capaces de moverse.
- Número de bloques lanzados: en todos los perfiles se lanzaron un total de 500 bloques distribuidos a lo largo de 500 puntos de los *seeder line*.

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la simulación de caída de rocas mediante Rocfall; gracias al cual se ha podido obtener los siguientes esquemas y gráficos: trayectoria seguida por los bloques, distancia final recorrida y la energía cinética total.

Perfil 1

El perfil 1 (Figura 3-8) se caracteriza por una abrupta pendiente en los sectores más elevados producida por el sustrato rocoso, que da paso a una pendiente bastante inclinada de roca y suelo con escasa vegetación que termina en un canchal. Éste se sitúa justo sobre el vial, y en él ya existe una medida protectora estática con bloques acumulados, lo cual evidencia la llegada de bloques a la carretera en este punto. Tal y como se puede ver en la Figura 3-9, los bloques que se movilizan de los sectores más elevados no llegan a alcanzar el vial, quedando acumulados en la zona con escasa vegetación y en el canchal. Los bloques que afectan de manera directa a la carretera son los movilizadas en el canchal tras la colisión previa de bloques que proceden de zonas más elevadas. Del lanzamiento de 500 bloques, tal y como se muestra en la Figura 3-8, llegan a alcanzar la carretera unos 40, que pueden llegar con una energía cinética de 930 kJ (Figura 3-10).

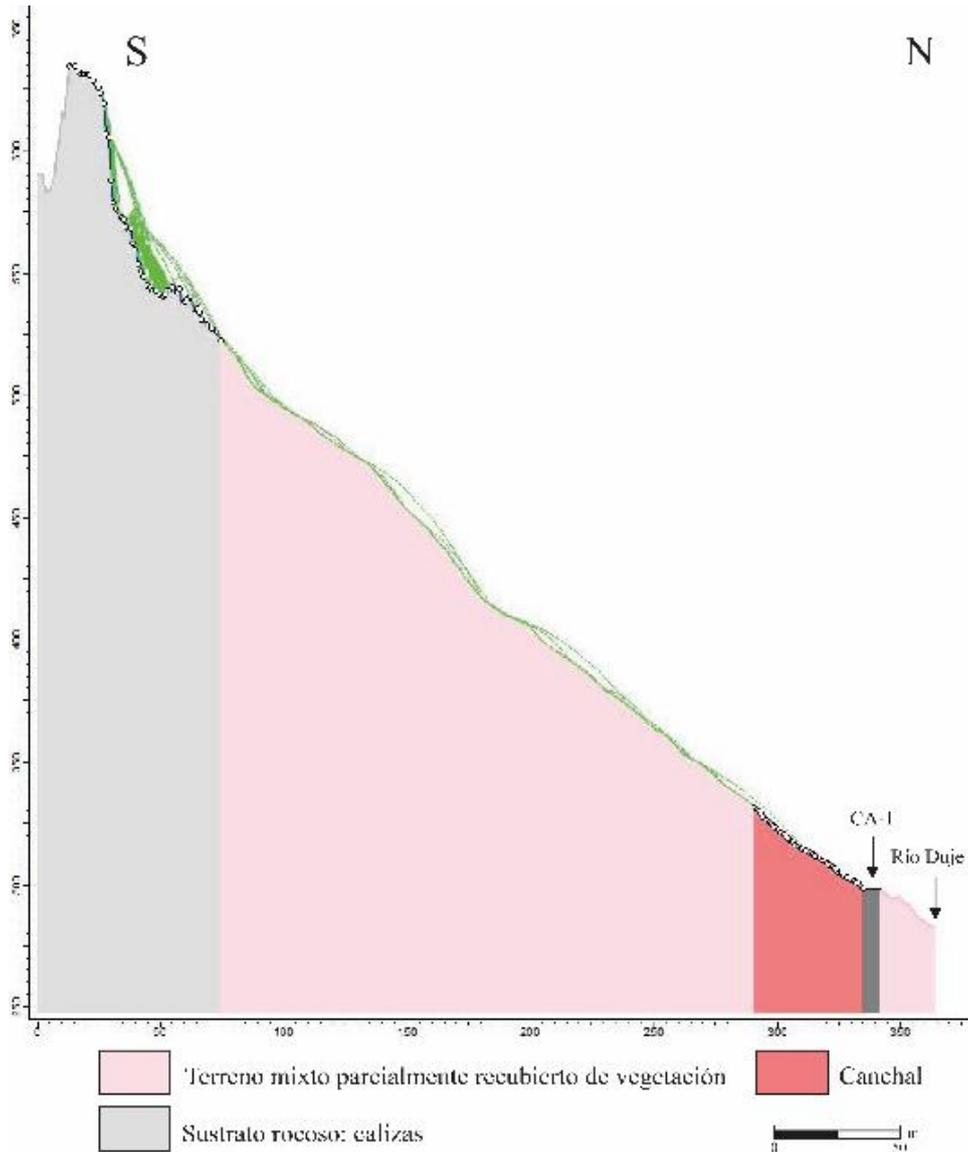


Figura 3-8. Simulación del perfil 1. Destaca el alcance de bloques del sustrato rocoso al canchal suprayacente al vial.

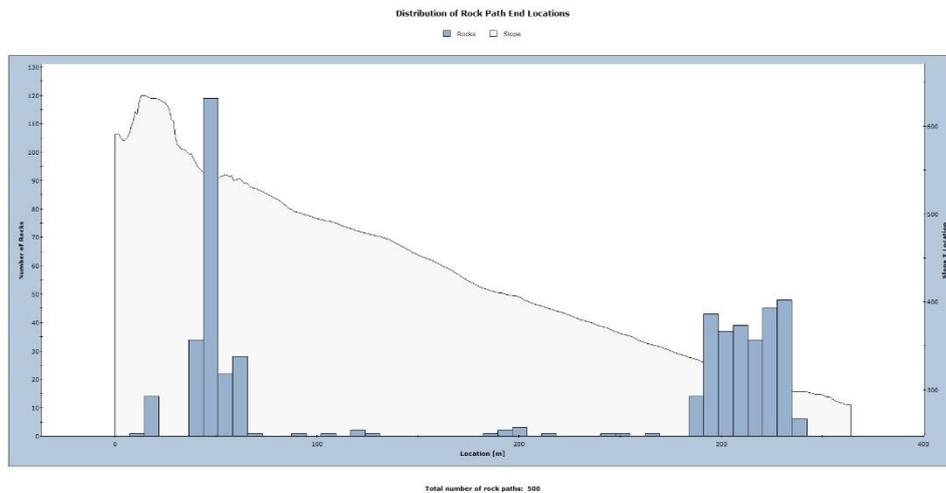


Figura 3-9. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 1. En el sector del vial se puede apreciar el número de bloques acumulados en él.

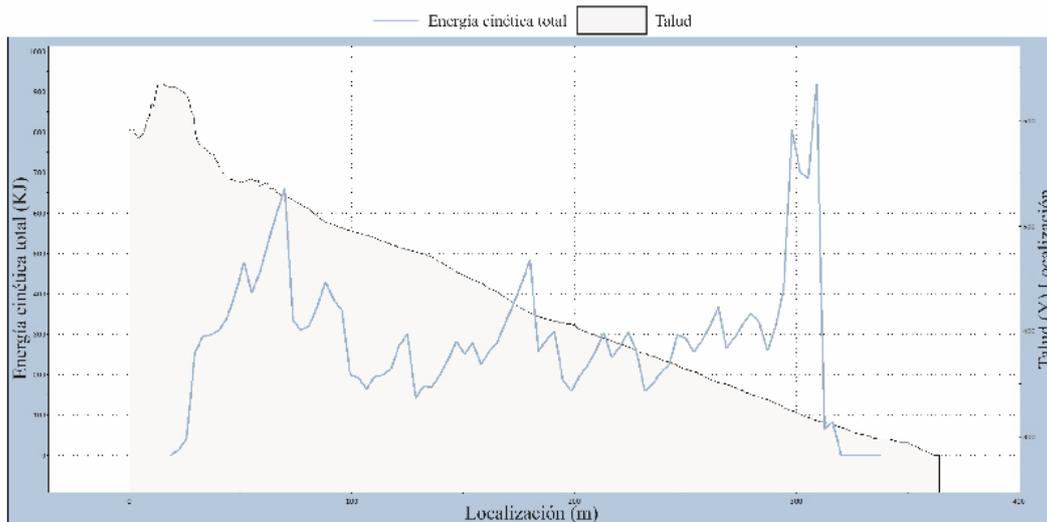


Figura 3-10. Gráfico de la energía cinética total del perfil 1. Destaca el aumento de la energía cinética en el punto de la carretera.

Perfil 2

Se trata de un perfil (Figura 3-11) que destaca por la gran presencia del sustrato rocoso que da una marcada inclinación. Esta fuerte pendiente, da paso a una zona con roca, suelo y escasa vegetación en donde existe una baja pendiente. La geometría y los materiales que conforman la ladera da lugar a la acumulación de los bloques desprendidos en sectores muy alejados del vial. El histograma de la Figura 3-12 muestra que no existe el alcance de bloques al vial y que por lo tanto no es necesario en este punto establecer ninguna medida de protección.

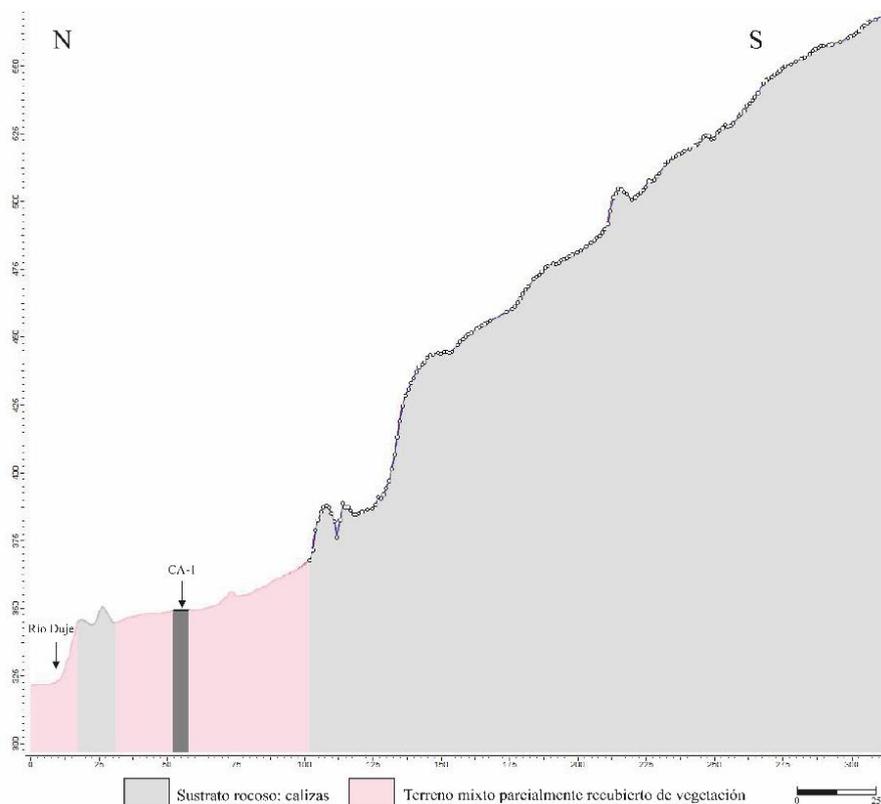


Figura 3-11. Trayectorias seguídas por los bloques desprendidos previstos para el perfil 2. Se puede observar la baja pendiente existente en los alrededores del vial.

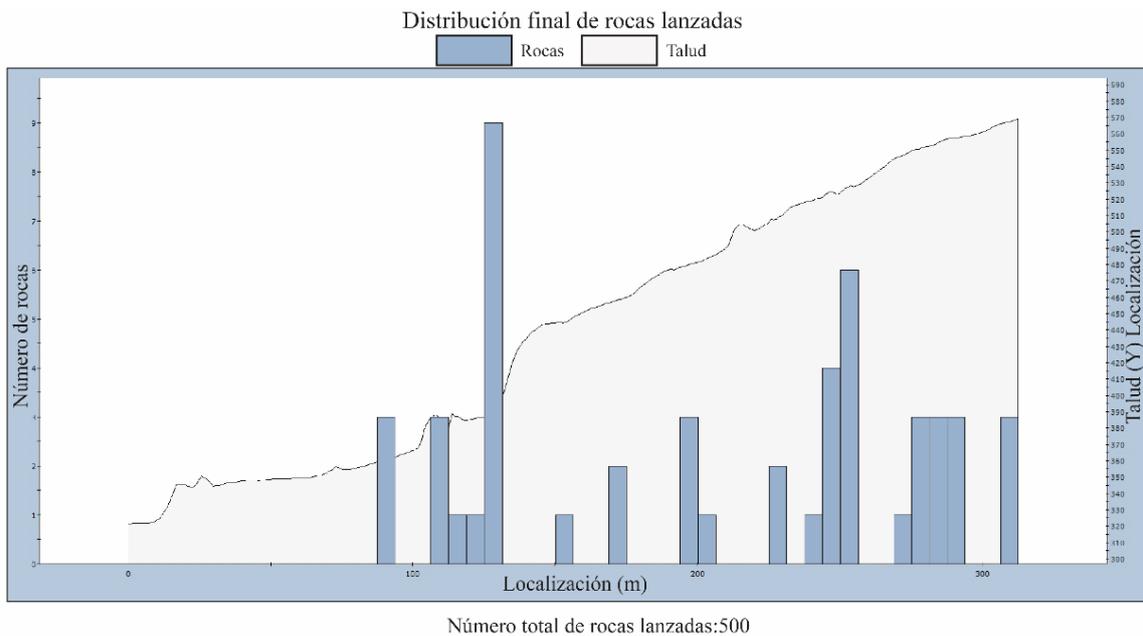


Figura 3-12. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 2. En el sector del vial se puede la ausencia total de bloques acumulados.

El gráfico de energía cinética que se presenta a continuación (Figura 3-13), se caracteriza por tener un trazo discontinuo en donde destacan hay zonas con alta energía y zonas con una energía nula. Esto se produce debido a que la energía cinética depende de la masa del bloque y la velocidad del mismo durante su caída, existiendo sectores en donde pese a simularse un lanzamiento de un bloque, éste no ha conseguido movilizarse y ha quedado depositado en el mismo lugar de origen (generado una energía cinética nula); y sectores donde al lanzarse el bloque este ha alcanzado una velocidad considerable (generando un pico en la energía cinética).

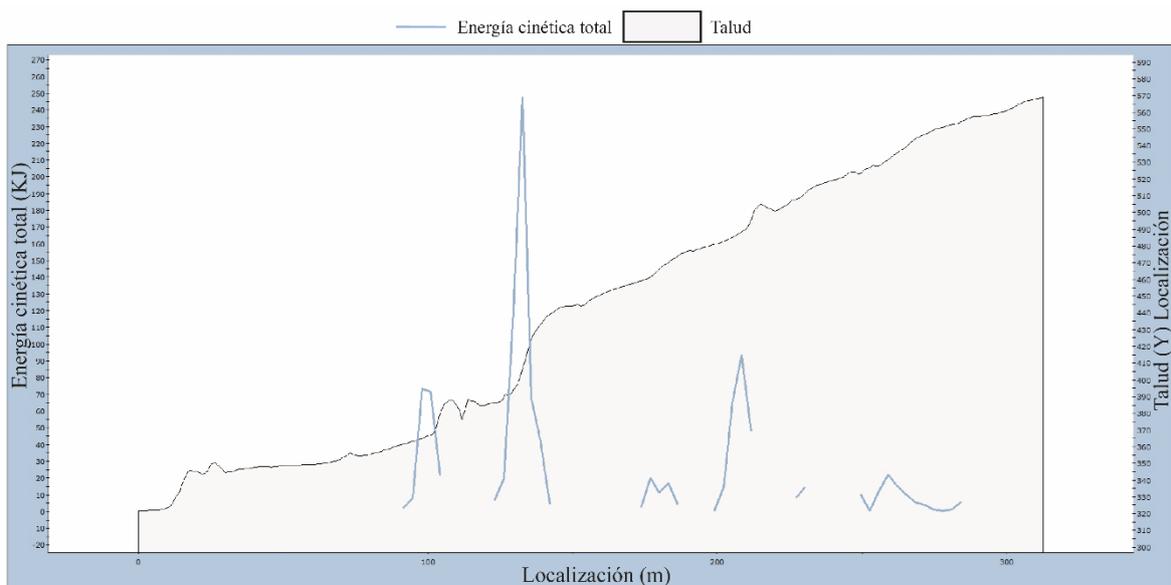


Figura 3-13. Distribución de la energía cinética a lo largo del perfil 2. Se puede observar como en las zonas más escarpadas existe un aumento de la energía cinética.

Perfil 3

La geometría del perfil 3 está claramente definida por los materiales que conforman el talud. En la cabecera, destaca una fuerte pendiente generada por el sustrato, mientras que la mayor parte del talud está formado por un canchal con una inclinación de unos 45°. La Figura 3-14, muestra que los desprendimientos generados en el sustrato rocoso terminan su trayectoria en el canchal, mostrándose el área fuente del mismo. La caída de bloques al vial se produce debido al canchal situado en la zona superior a la carretera, observándose en la Figura 3-15 que no existen bloques que lleguen a afectar al vial.

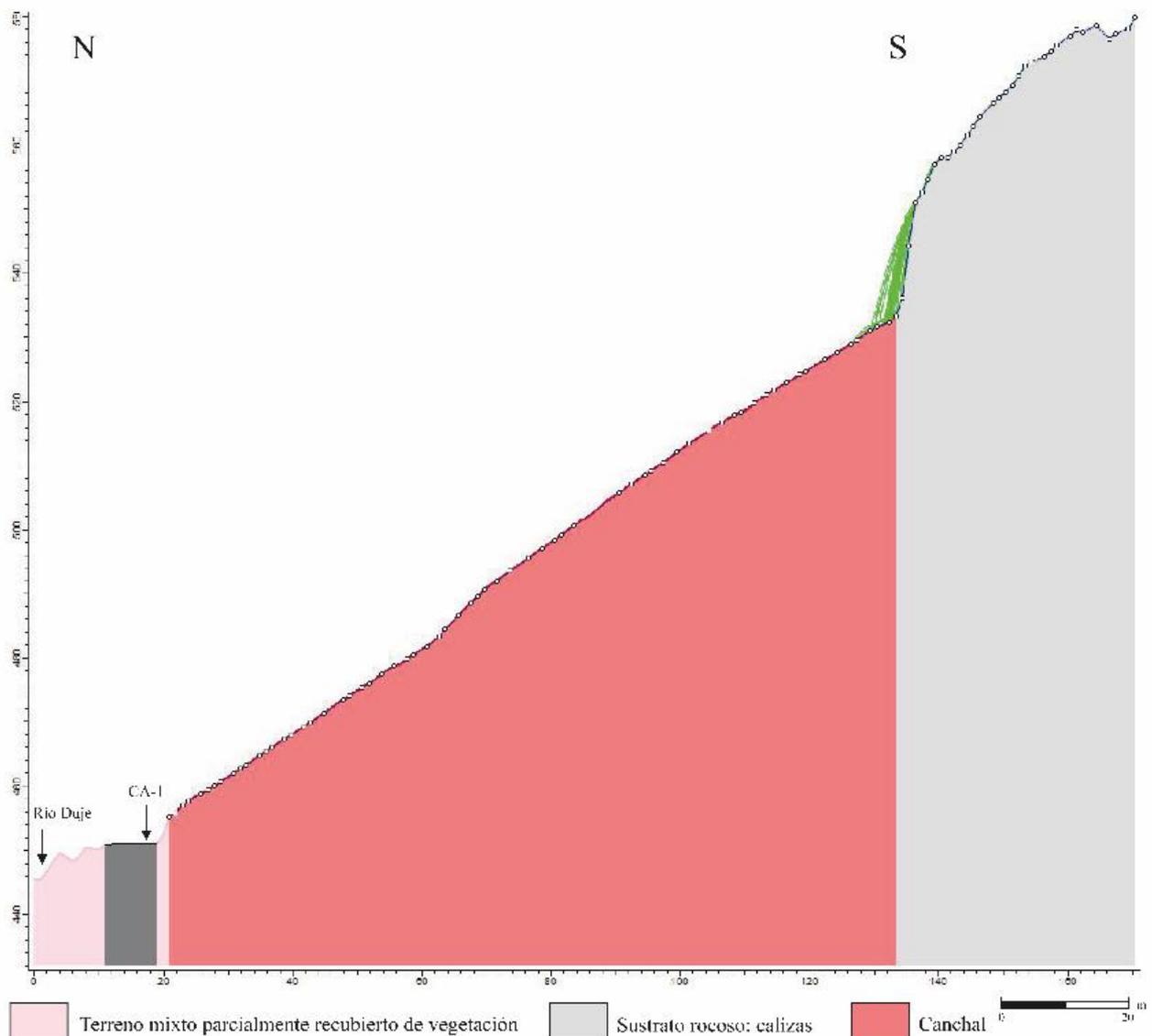
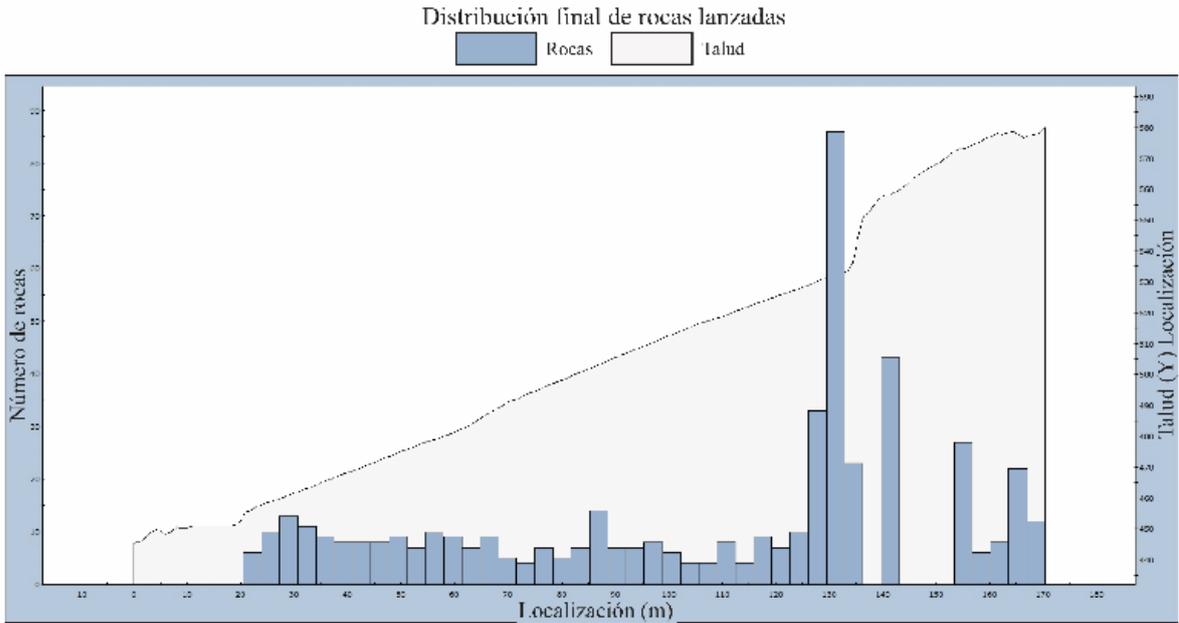


Figura 3-14. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 3. Destaca el gran desarrollo del canchal alimentado por el sustrato rocoso carbonatado de la zona más elevada.

El histograma de la Figura 3-15 muestra por un lado la gran acumulación que se produce al pie del sustrato rocoso (coordenada X=120); además de cómo los 500 lanzamientos del canchal quedan acumulados en el mismo con una trayectoria muy pequeña, generando una distribución de bloques bastante homogénea.



Número total de rocas lanzadas:500

Figura 3-15. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 3.

El gráfico de energía cinética total, muestra como solo se genera energía cinética al pie del sustrato rocoso, mientras que la zona de canchal permanece con valores nulos debido a que no se están movilizandobloques.

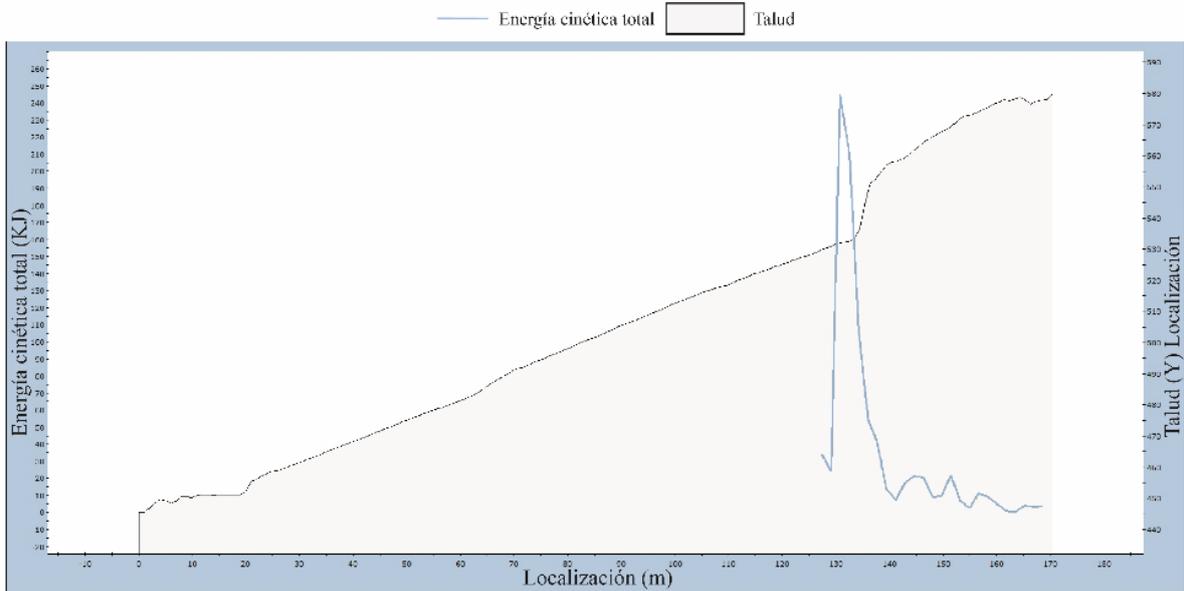


Figura 3-16. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 3.

Perfil 4

Se trata de un perfil con una geometría muy abrupta en la cabecera del talud formada por sustrato rocoso y en donde se presenta una zona de alta favorabilidad para los desprendimientos (Figura 3-17). Esta zona se ve contrarrestada por canchales que retienen los bloques caídos, aunque generan a su vez pequeños desprendimientos. Al pie del talud existen numerosas irregularidades (generadas por grandes bloques acumulados) que detienen la posible caída de bloques protegiendo el vial de manera natural. Las Figuras 3-18 y 3-19 muestran respectivamente la ausencia de bloques y, por ende, la ausencia de energía cinética en la carretera.

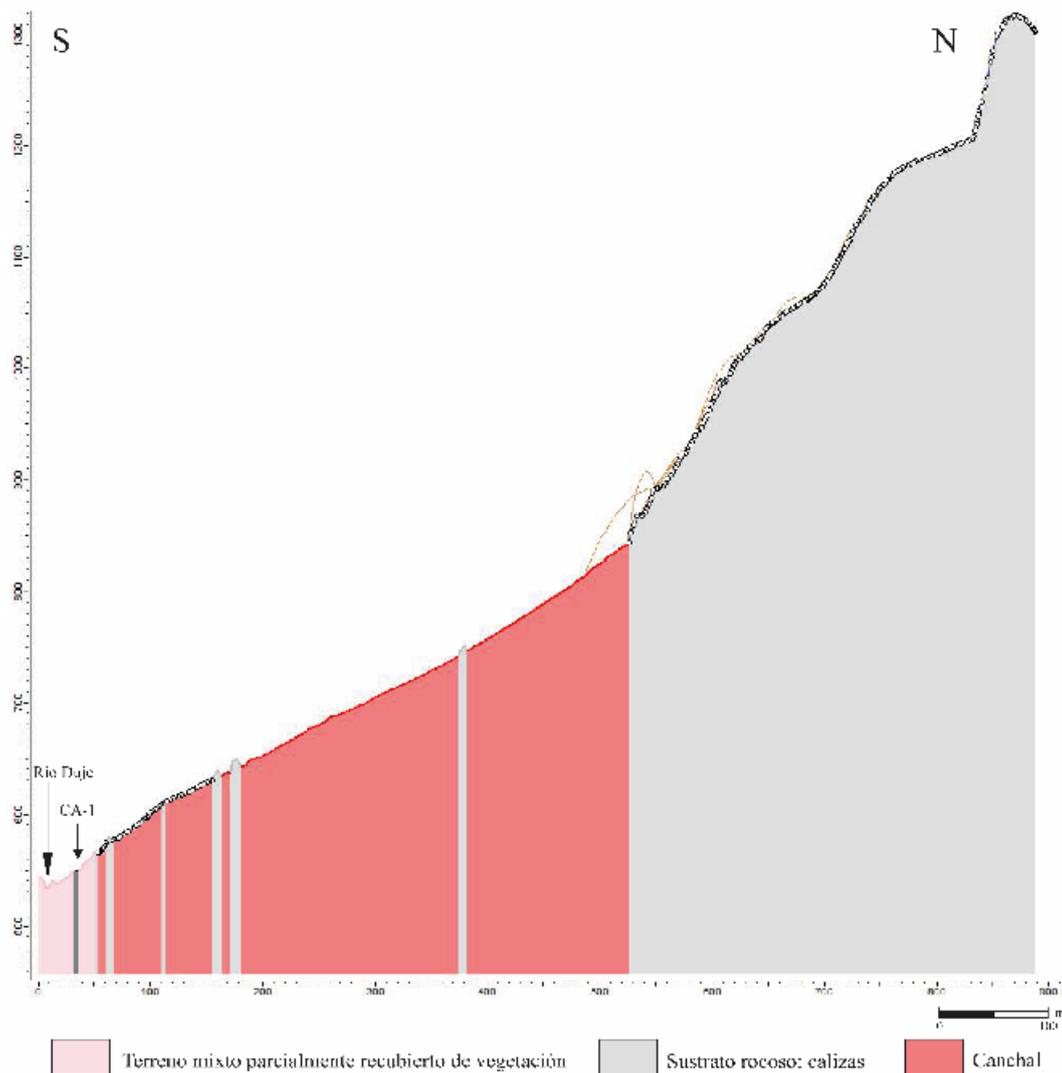


Figura 3-17. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos para el perfil 4. Se puede observar el área fuente del canchal además de las irregularidades localizadas en zonas cercanas a la carretera.

Las Figuras 3-18 y 3-19 muestran los mismos resultados que en el perfil anterior. Tanto la energía cinética con valor 0 como la alta acumulación de bloques en dichos sectores hacen denotar que en ese punto pese al lanzamiento de bloques no se producirá la movilización de los mismos.

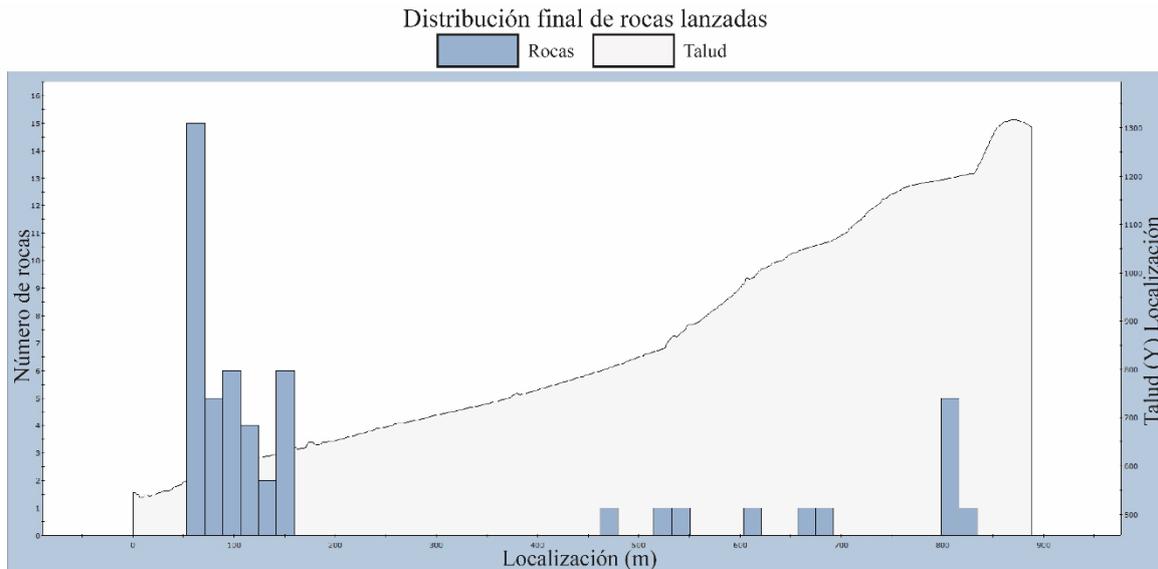


Figura 3-18. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 4. Destaca la gran acumulación en la parte del canchal más cercana al vial.

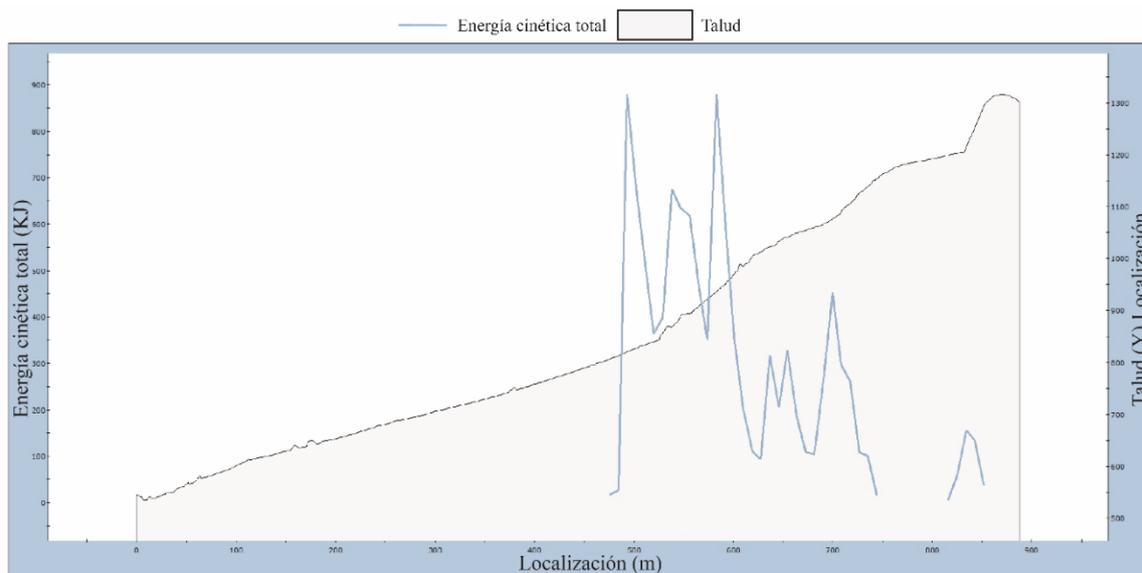


Figura 3-19. Distribución de la energía cinética total a lo largo del perfil 4. Se observa la ausencia de energía cinética entre las coordenadas $x=0$ y $x=460$.

Perfil 5

El perfil 5 se sitúa en la vertiente contraria en donde se sitúa el vial. La finalidad de esta simulación es ver si realmente los bloques pueden llegar a pasar el cauce del río Duje y alcanzar la carretera dado que, este es el punto en el que ésta se sitúa más cerca del río y con un menor desnivel. La geometría del talud la define en gran medida el sustrato rocoso que da paso a un gran canchal. Tal y como muestran la Figura 3-20 la trayectoria de los bloques no llega a afectar al vial, quedando acumulados en el cauce del río un reducido número de bloques.

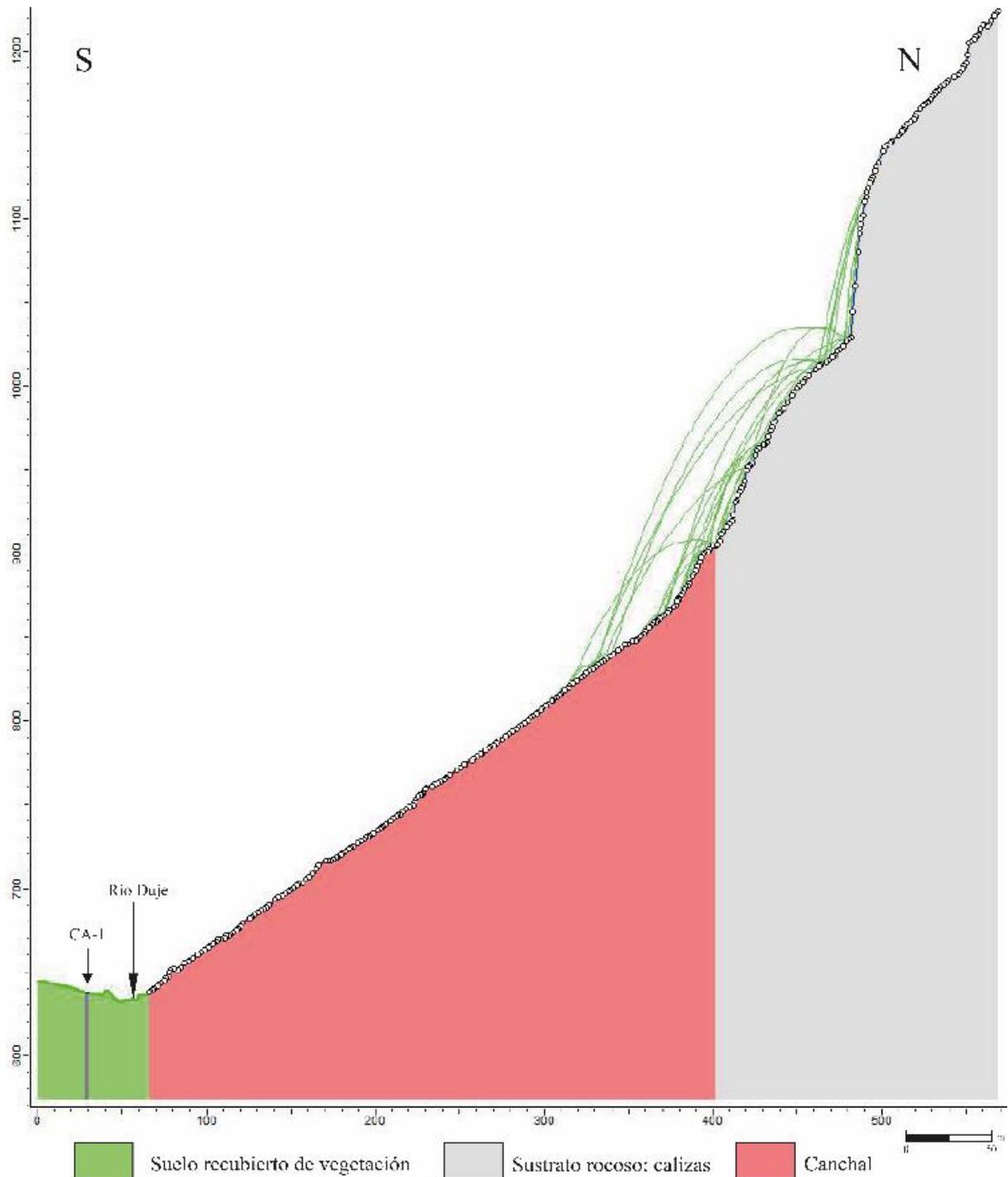


Figura 3-20. Simulación realizada del perfil 5. Destaca la altura de rebote que tienen algunos bloques durante su caída hacia el canchal.

Al igual que ocurre con los perfiles 2, 3 y 4 en la zona de canchal no produce una movilización de los bloques pese a realizar 500 lanzamientos. Éstos quedan acumulados en el propio canchal, alcanzando el río Duje un bajo número de bloques procedentes de los sectores más cercanos al cauce.

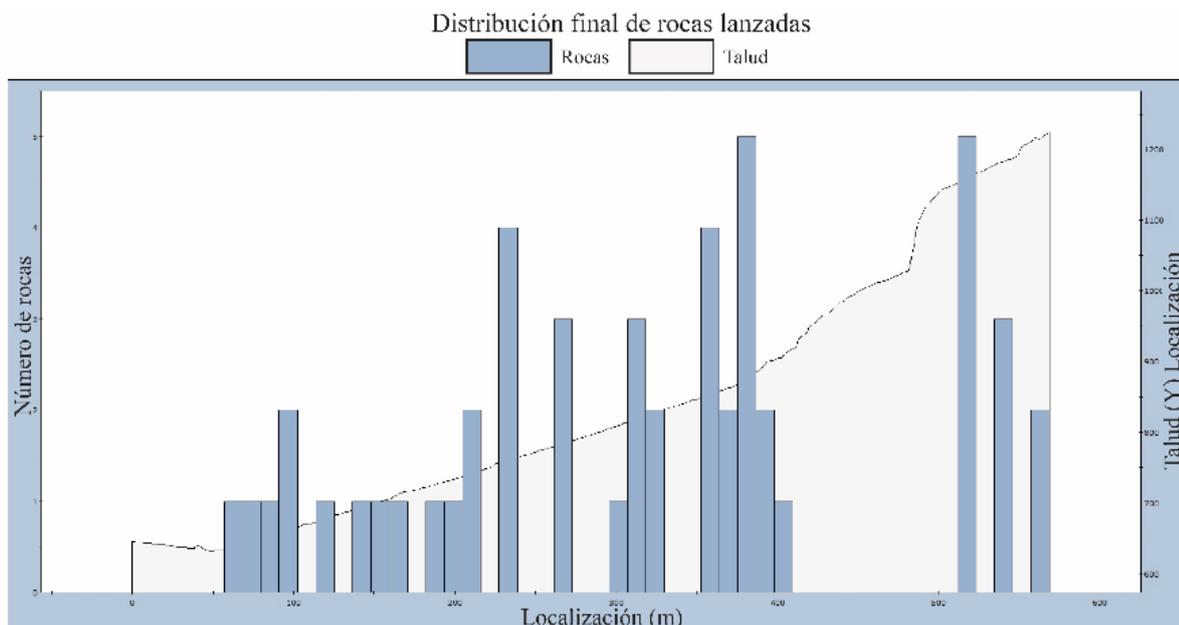


Figura 3-21. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 5. Destaca el bajo número de rocas acumuladas en el cauce del río.

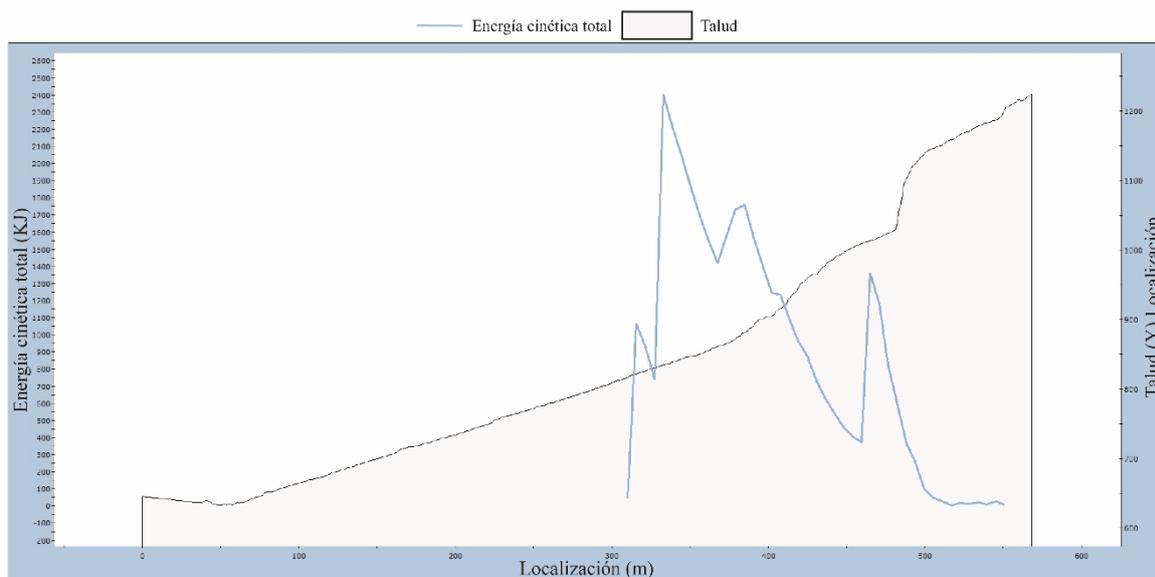


Figura 3-22. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 5. Véase la ausencia de energía en la mayor parte del canchal.

Perfil 6

Este perfil se sitúa en una zona con una alta favorabilidad de desprendimientos tal y como se muestra en la Figura 3-23. La modelización indica que pese a situarse en un sector con alta favorabilidad para el arranque de caída de bloques, la geometría del perfil antes de llegar al vial hace inviable que pueda ser afectado por desprendimientos. Las zonas más elevadas donde aflora el sustrato carbonatado, dan paso a una zona con suelo y escasa vegetación con un pronunciado cambio de inclinación, en donde se produce la acumulación de bloques (Figura 3-24). Esta geometría impide que el vial sea alcanzado por los bloques desprendidos, pese a ser una zona de alta favorabilidad.

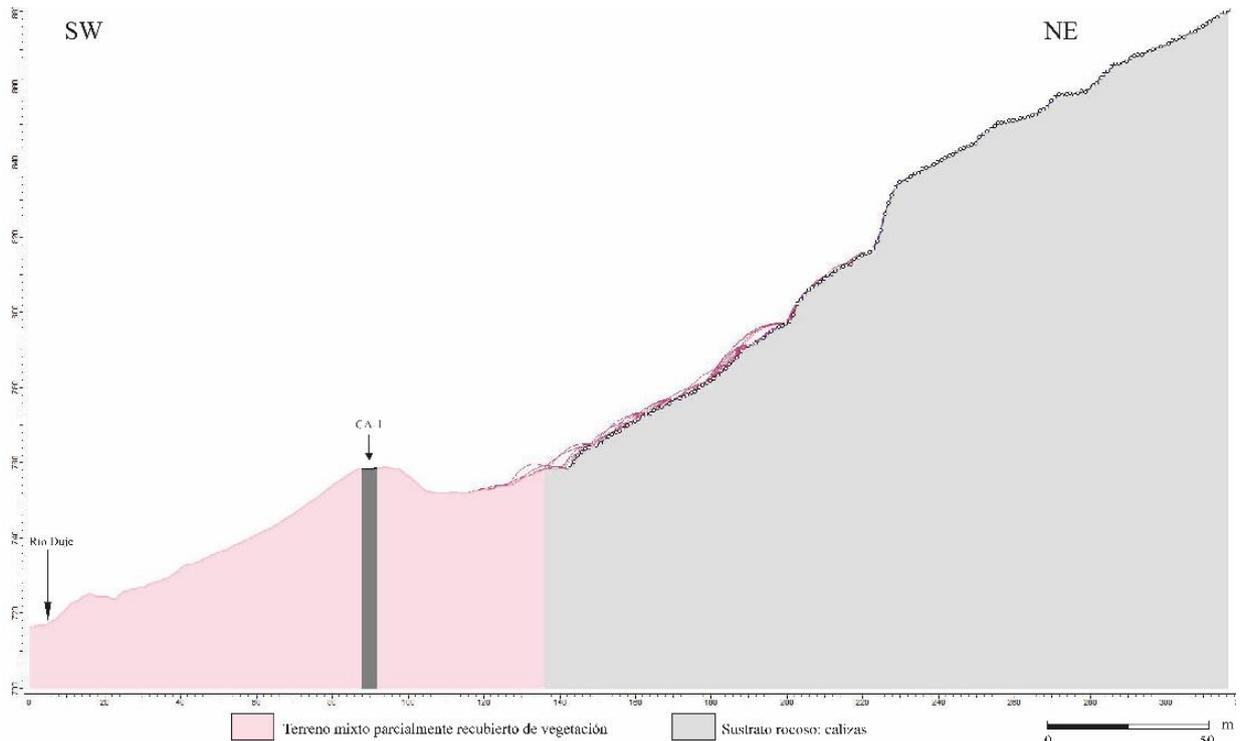


Figura 3-23. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos para el perfil 6. Destaca la baja pendiente entre las coordenadas x=100 y x=140.

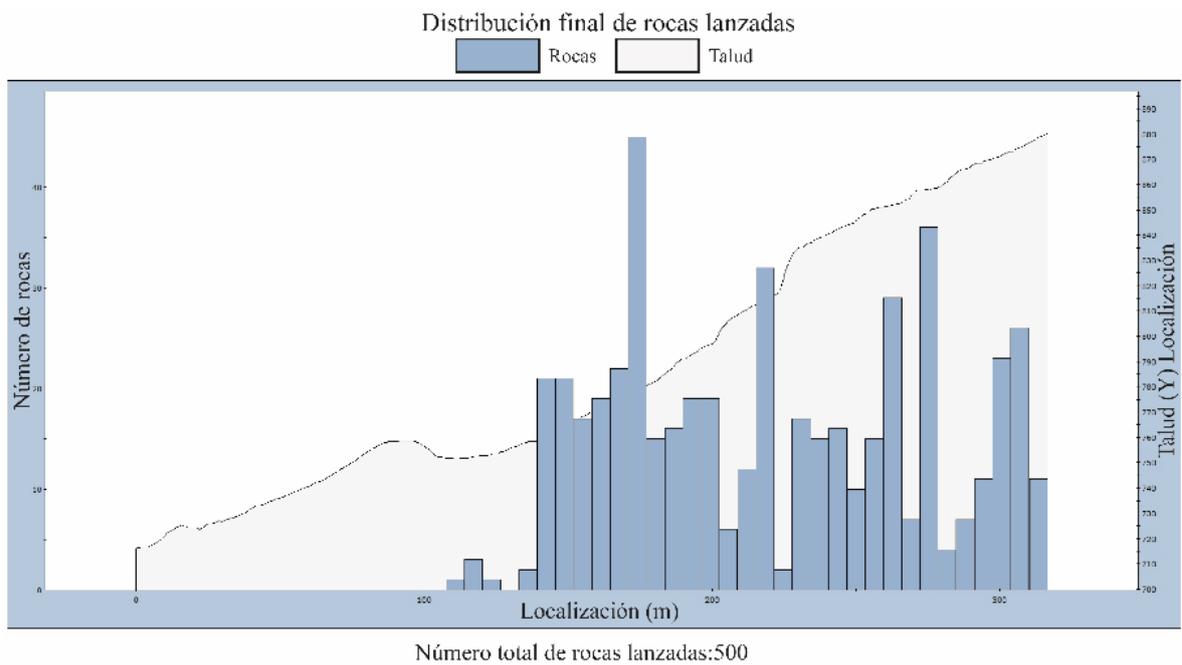


Figura3-24. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 6. Puede observarse perfectamente la mayor acumulación de rocas en los sectores de menor inclinación.

El gráfico de energía cinética (Figura 3-25) muestra claramente cómo aumenta la energía en el tramo donde la pendiente es más pronunciada, efecto del aumento de la velocidad.

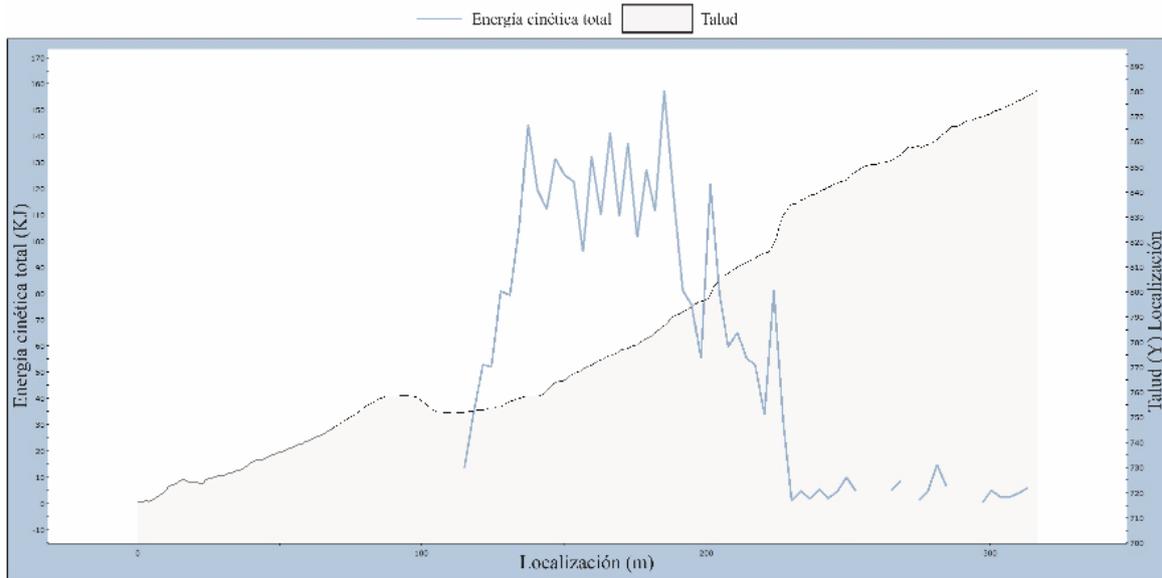


Figura 3-25. Distribución de la cinética total a lo largo de todo el perfil 6, en donde se observa un aumento de la energía cinética total en el sector más escarpado.

Perfil 7

El perfil 7 (Figura 3-26) está dominado por la presencia de sustrato rocoso y canchales a lo largo de toda la ladera, por lo que los desprendimientos no se producen desde un sector localizado, sino que pueden originarse desde cualquier punto de la pendiente. La Figura 3-27 muestra claramente que, en el vial, de 500 bloques lanzados llegan a acumularse 60, los cuales pueden tener una energía cinética de 10 kJ tal y como se puede ver en la Figura 3-28, haciendo que sean necesarias medidas de protección.

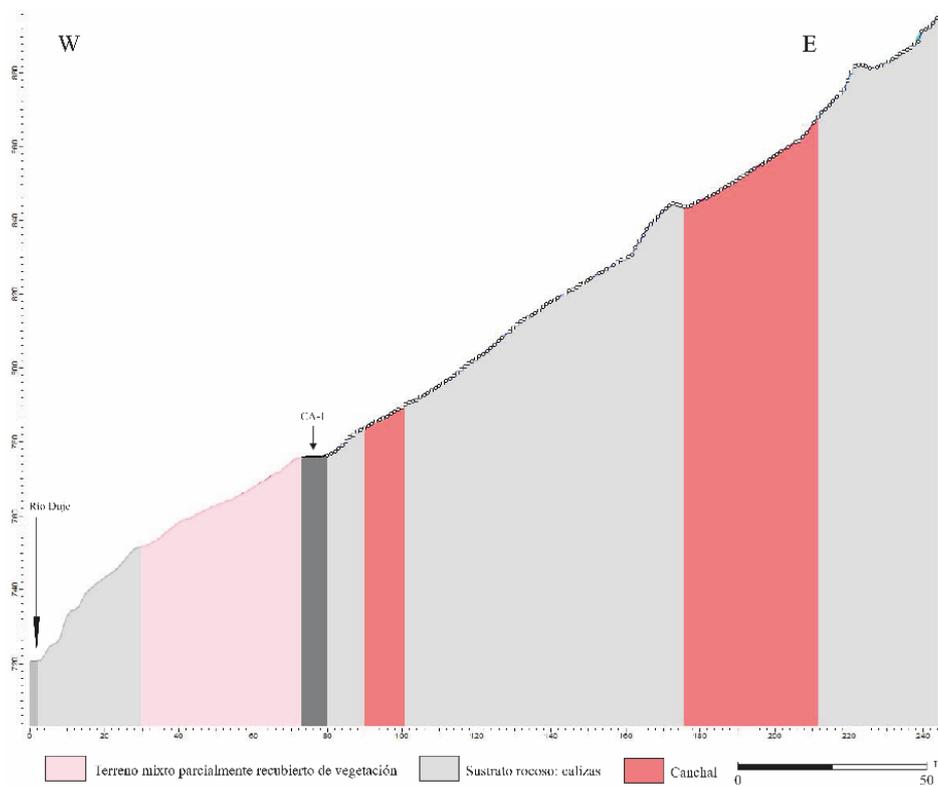


Figura 3-26. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 7. Se puede ver el predominio del sustrato rocoso que alterna con dos canchales de poca envergadura.

Tanto en la Figura 3-27 como en la 3-28, puede verse la influencia de los coeficientes de restitución de los canchales, siendo sectores en donde se genera una gran acumulación de bloques donde la energía se disipa fácilmente. La presencia de caliza el sector más cercano al vial genera que éste pueda ser alcanzado por bloques tal y como se puede ver en el histograma de la Figura 3-27.

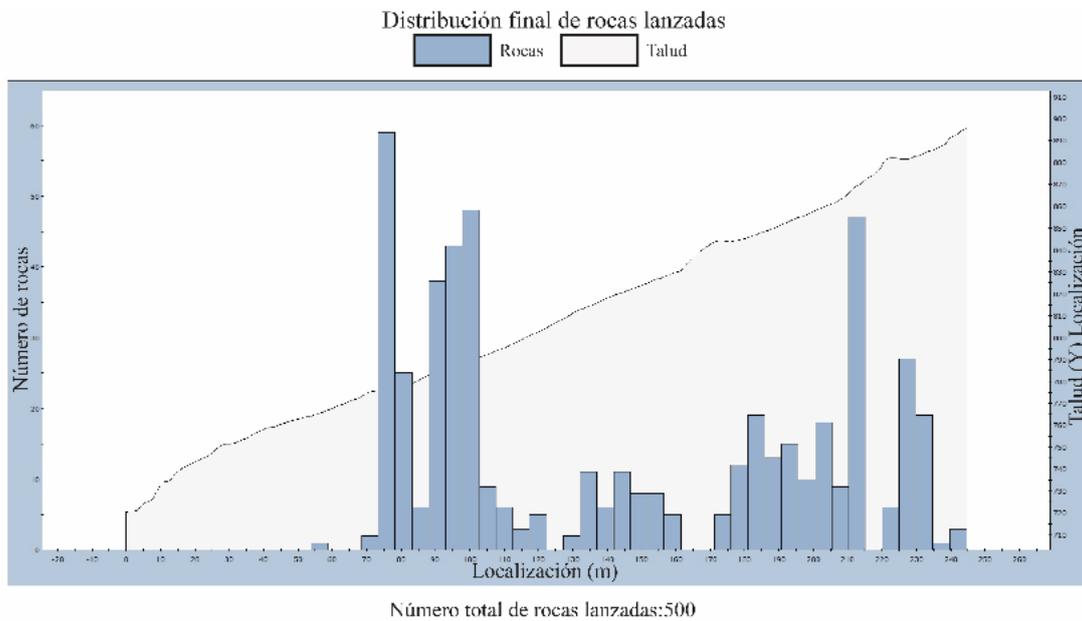


Figura 3-27. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 7, donde se puede observar la acumulación de bloques a la altura del vial.

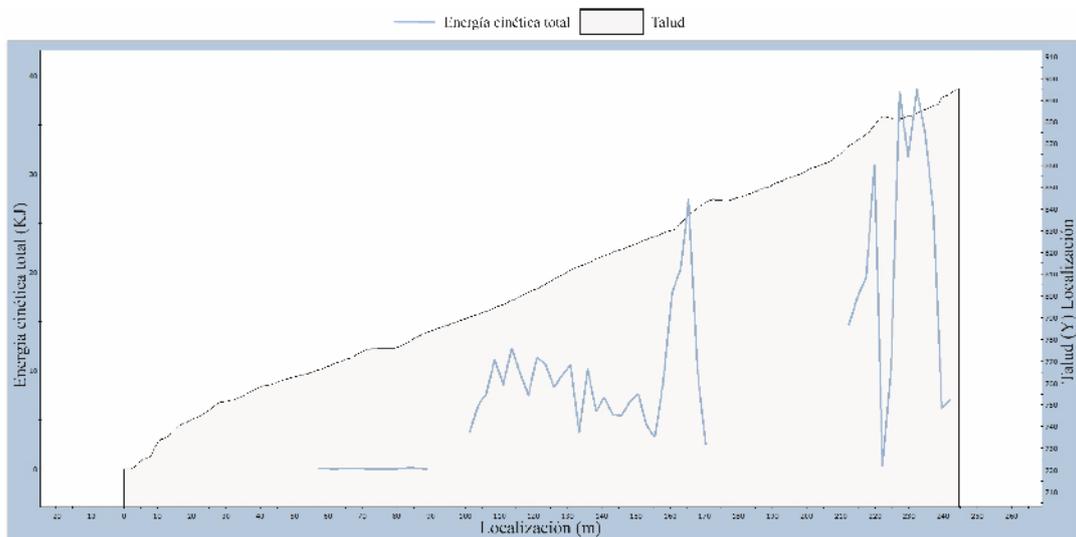


Figura 3-28. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 7. Destaca la gran disipación de la energía que se produce en los tramos de canchal.

Perfil 8

Este perfil (Figura 3-29) predomina por estar formado totalmente por sustrato rocoso, aunque existen pequeños canchales de poca entidad en las zonas superiores. La llegada de bloques al vial es inevitable en este caso, debido a que todo el talud está compuesto por roca con gran pendiente y por tanto es una zona susceptible de producirse el arranque de desprendimientos.

Las Figuras 3-30 y 3-31 muestran que el vial ha sido alcanzado por 47 bloques con una energía cinética de 20 kJ.

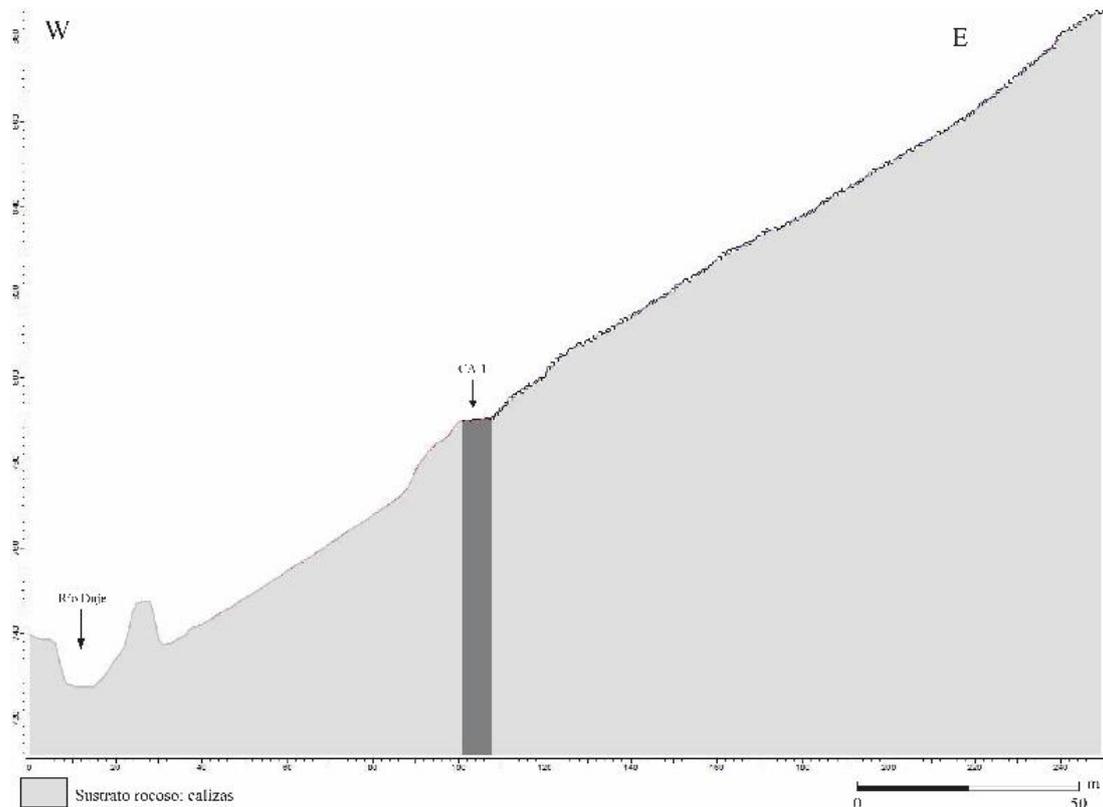


Figura 3-29. Simulación realizada del perfil 8, donde se puede observar el predominio de caliza.

Los resultados de las Figuras 3-30 y 3-31, indican que se están produciendo desprendimientos y acumulación de bloques coetáneamente a lo largo de todo el talud. Esto se debe a que el talud está formado exclusivamente por material competente (caliza), el cual puede producir el arranque de desprendimientos por todo el perfil, aunque con una energía cinética generalmente baja debido a la geometría del perfil, por lo que también propicia el detenimiento de bloques.

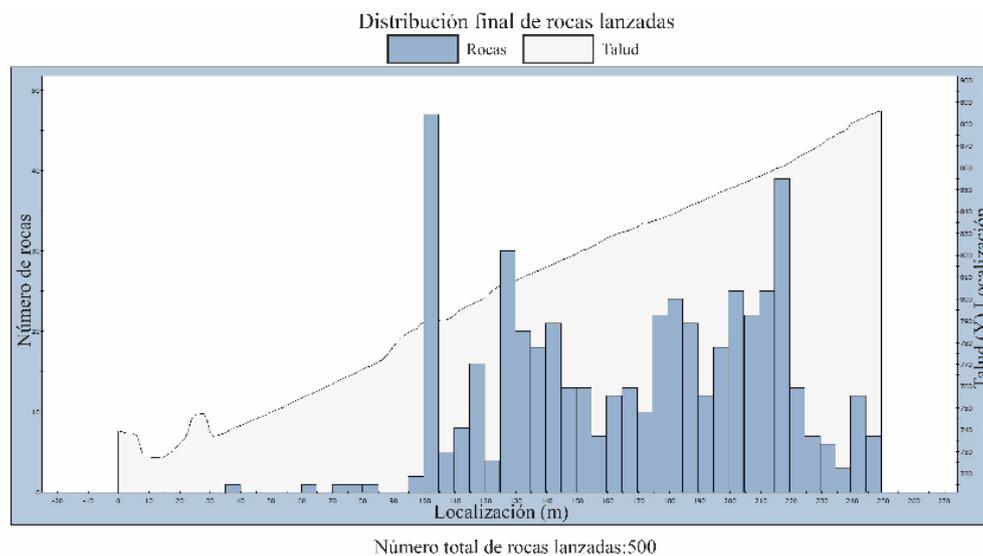


Figura 3-30. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 8, donde se observa la acumulación de bloques a lo largo de todo el sector superior a la carretera.

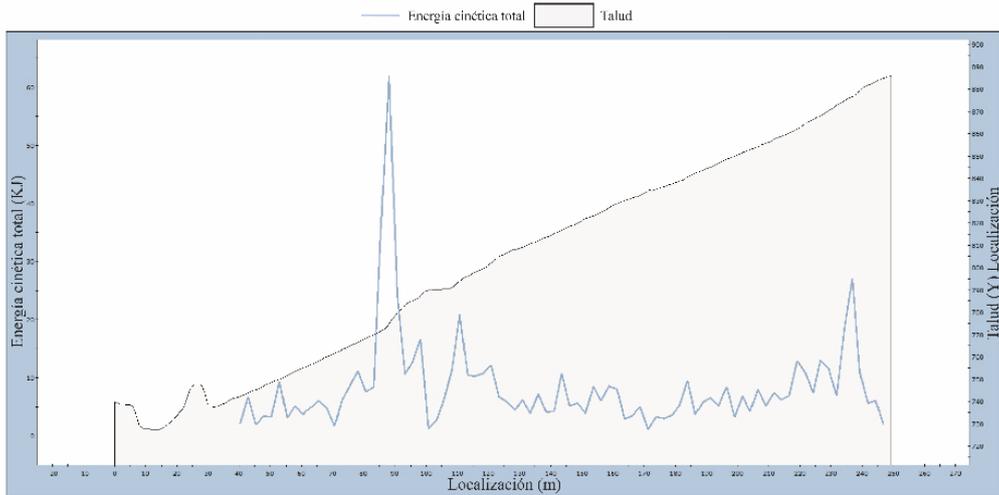


Figura 3-31. Gráfico de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 8. Véase el sector con baja energía cinética.

Perfil 9

Se trata de un talud formado por sustrato rocoso y grandes canchales con una ausencia total de vegetación (Figura 3-32). La mayor parte del sustrato rocoso no genera un riesgo real frente al vial, sino que es el canchal suprayacente a la carretera el que genera desprendimientos a causa de impactos provenientes de bloques que caen de zonas superiores. La Figura 3-33, muestra como un total de 20 bloques alcanzan la carretera con una energía cinética ínfima (Figura 3-34) debido a que estos desprendimientos se producen con trayectorias de corto alcance y con una baja velocidad de movimiento.

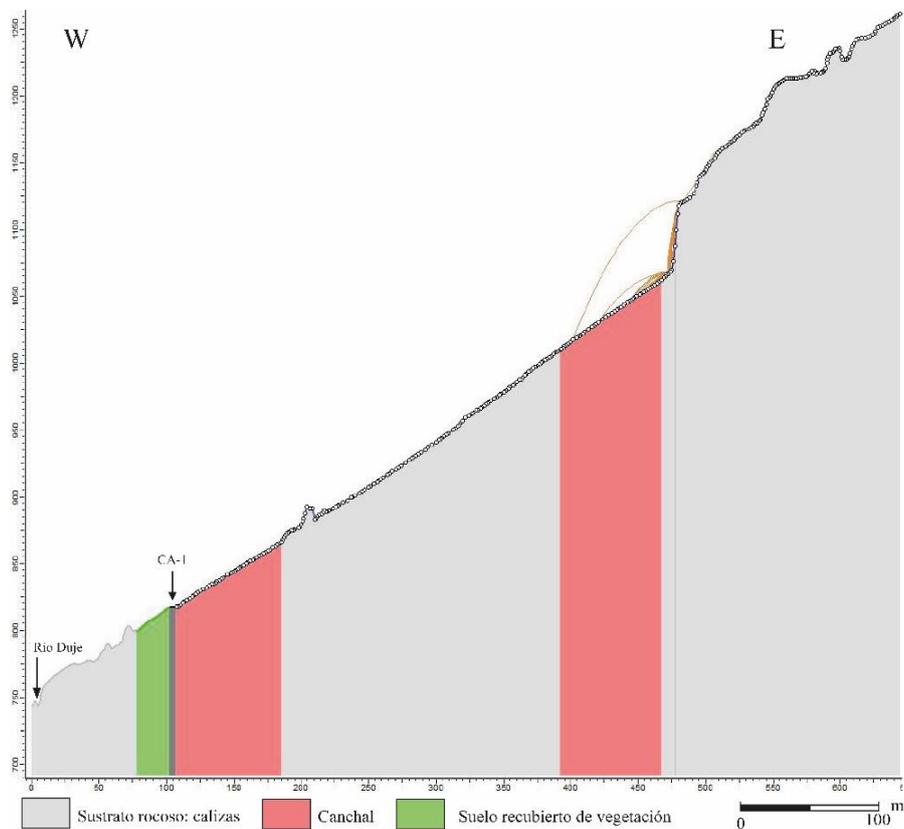
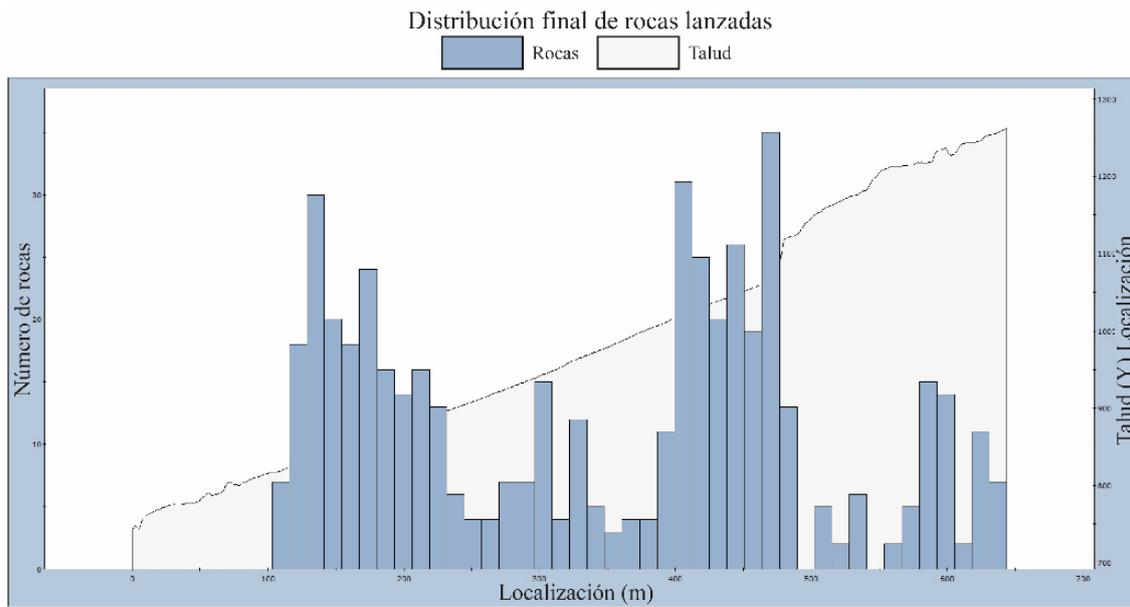
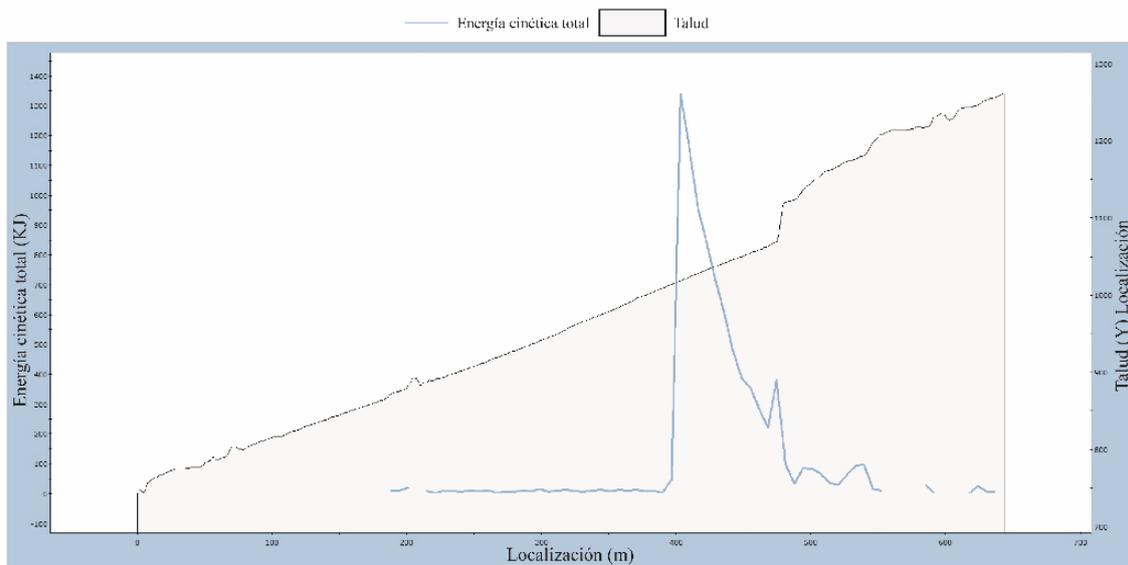


Figura 3-32. Trayectorias seguídas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 9..



Número total de rocas lanzadas:500

Figura 3-33. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 9. Destaca la gran



acumulación producida en los canchales.

Figura 3-34. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 9.

Perfil 10

En la zona de este perfil (Figura 3-35) existe un gran desarrollo de canchales alimentados por las zonas abruptas formadas por sustrato rocoso. La mayor parte de los bloques caídos de las zonas más elevadas quedan acumulados en el canchal, generando al mismo tiempo pequeños desprendimientos. El resultado es una acumulación de 15 bloques los cuales llegan con una energía cinética muy baja por el mismo motivo que en el perfil 9.

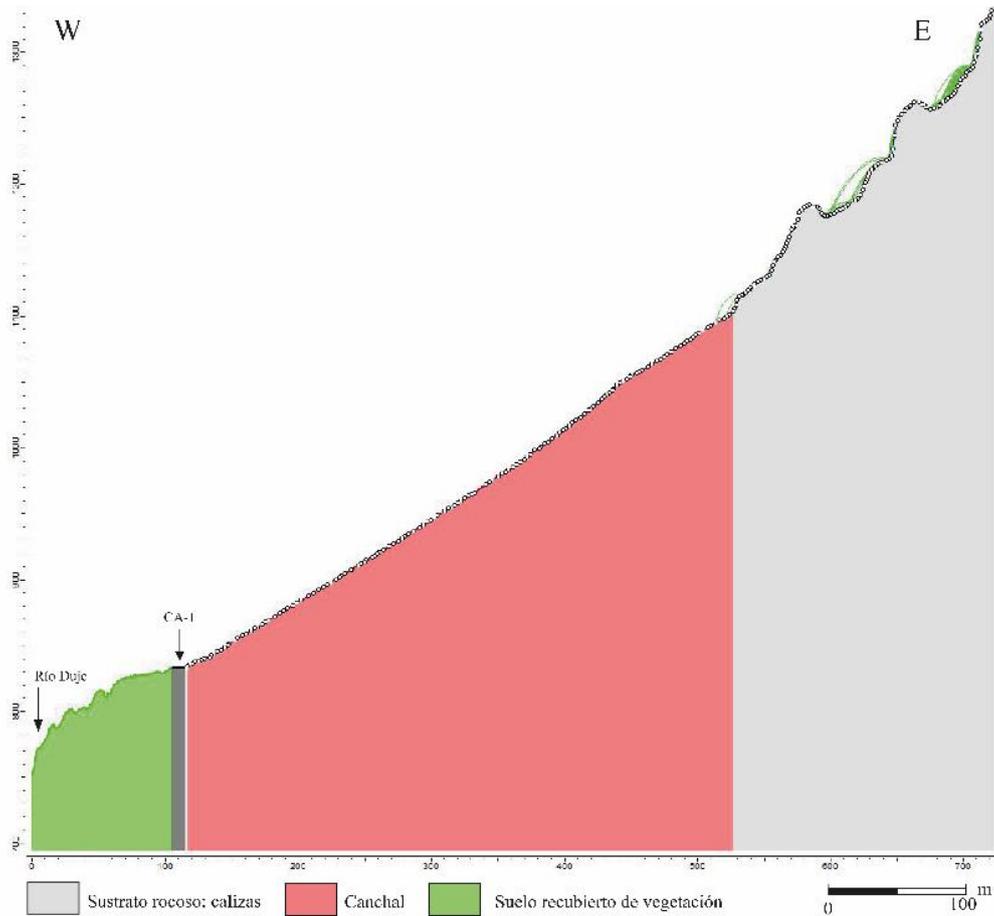
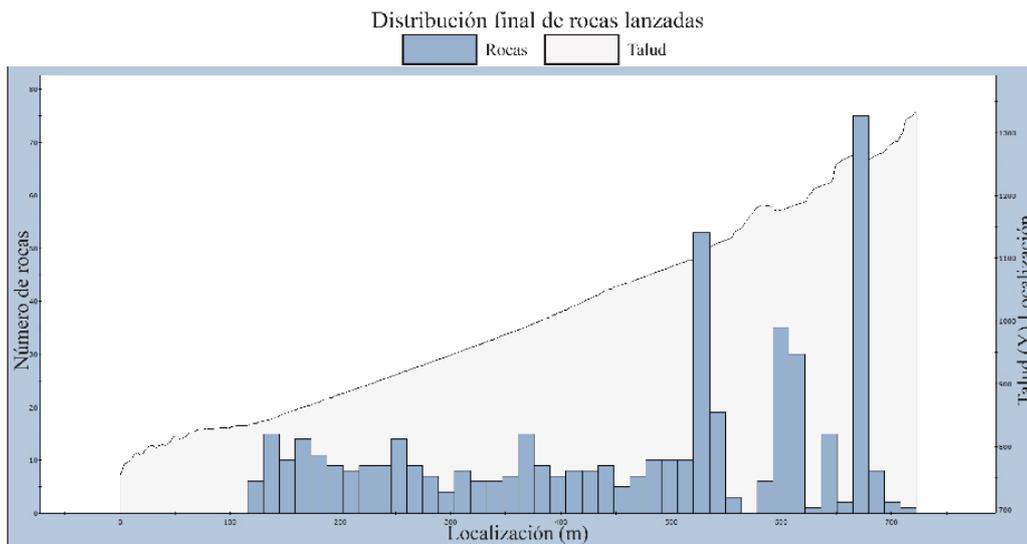


Figura 3-35. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 10.

Las Figuras 3-36 y 3-37 muestran la gran zona de acumulación y por tanto de disipación de la energía generada por el canchal, el cual genera locales desprendimientos sobre la carretera CA-1.



Número total de rocas lanzadas:500

Figura 3-36. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 10, donde se observa la acumulación homogénea en el canchal.

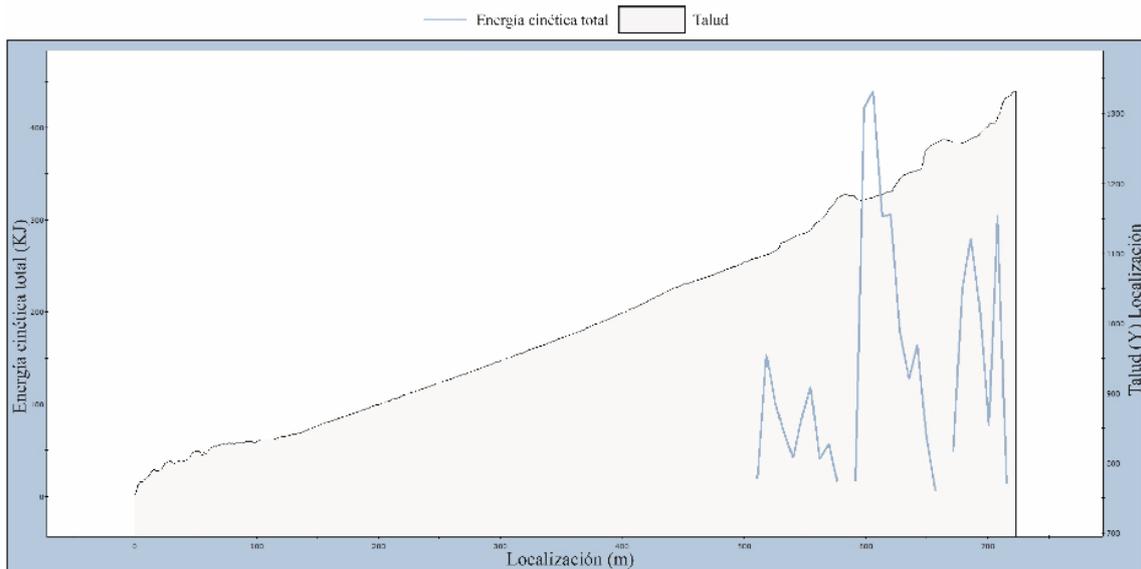


Figura 3-37. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 10. Véase el valor nulo de la energía en la zona del canchal.

Perfil 11

En el perfil 11 (Figura 3-38) se puede observar el gran predominio de sustrato rocoso existente en donde se desarrolla un canchal en la parte inferior del mismo. Las trayectorias de los bloques de zonas superiores finalizan en el canchal resultando el vial alcanzado por los desprendimientos generados en el sustrato rocoso que se sitúa sobre la carretera. La carretera es alcanzada por 15 bloques con una energía cinética de hasta 50 kJ de un total de 500 bloques lanzados.

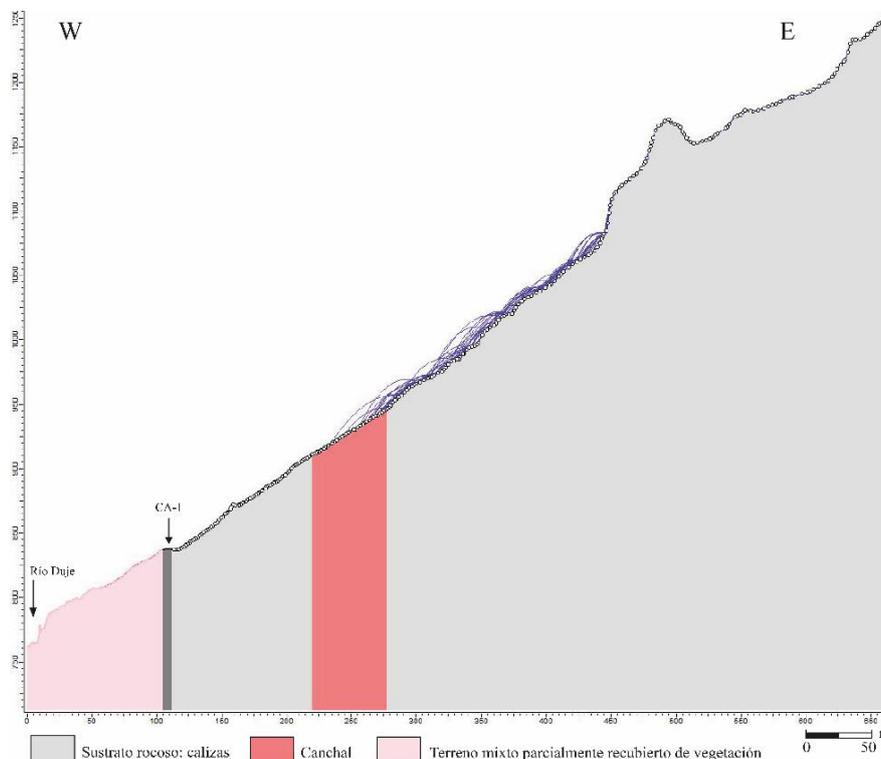


Figura 3-38. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 11, en donde se observa las trayectorias de los bloques desprendidos en las zonas superiores acumuladas en el canchal.

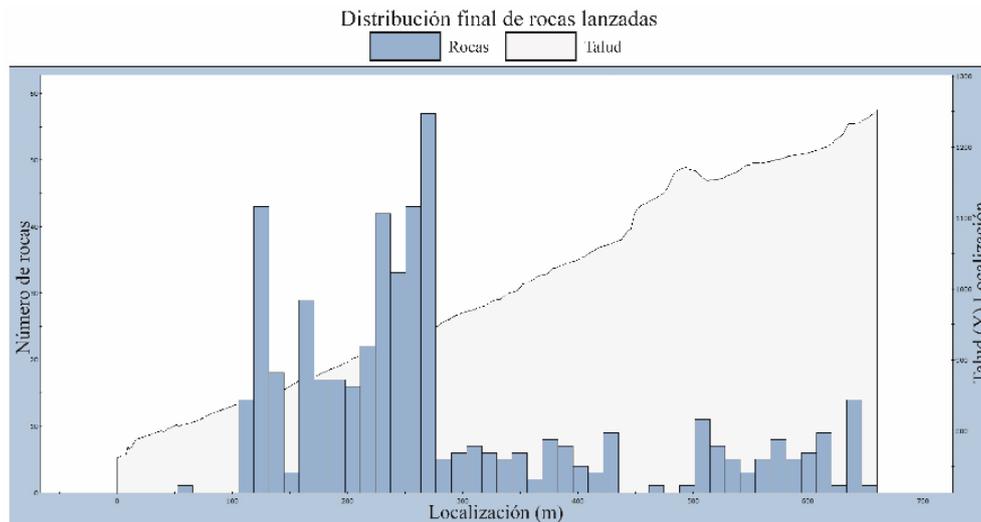


Figura 3-39. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 11, en donde se aprecia la gran acumulación de bloques en el canchal.

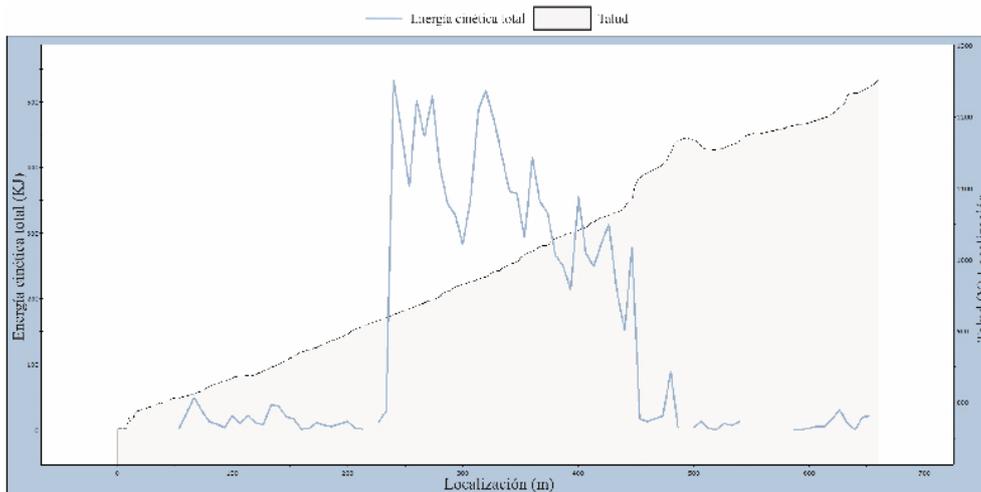


Figura 3-40. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 11. Se observa claramente el descenso de la energía producida por el canchal.

Perfil 12

El perfil 12 (Figura 3-41) destaca por tener una geometría muy abrupta en la zona de cabecera (formada por sustrato rocoso), que da paso a una zona de suelo con vegetación con una elevada pendiente en donde previamente está instalada a fecha de redacción de esta memoria una barrera estática en donde existen numerosos bloques retenidos con gran cantidad de vegetación. Tal y como puede verse en la Figura 3-41, pese a que el suelo con vegetación tiene un coeficiente de restitución normal y tangencial de 0,3 y 0,8 respectivamente, no es suficiente para detener el movimiento de los bloques debido a la gran inclinación que presenta. La Figura 3-42, muestra que únicamente se han acumulado 3 bloques en el vial, pero hay que tener en cuenta que la mayoría de bloques desprendidos llegan al cauce del río Duje, por lo que la trayectoria recorrida por los mismos intersecta con el vial, con una energía cinética de 300 kJ y una altura de rebote de unos 10 m.

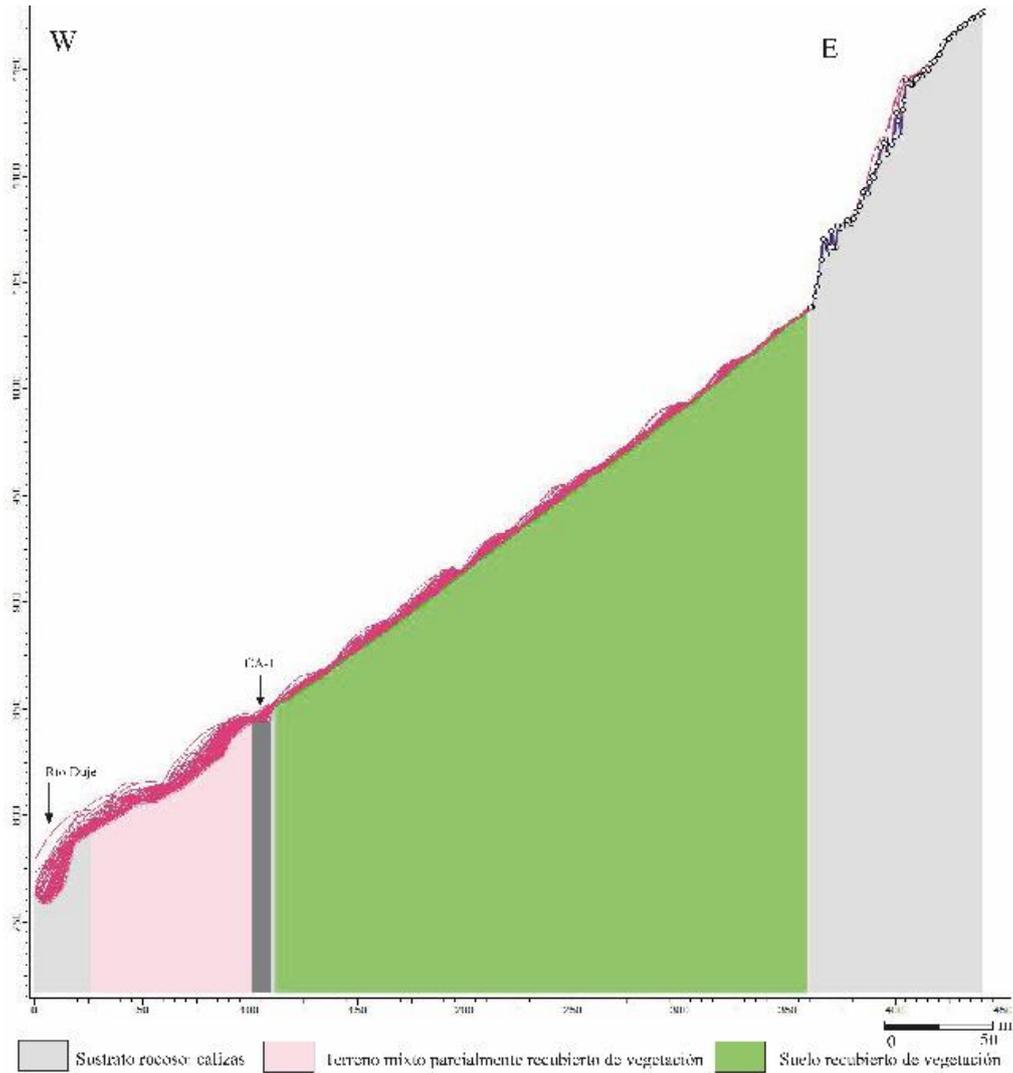
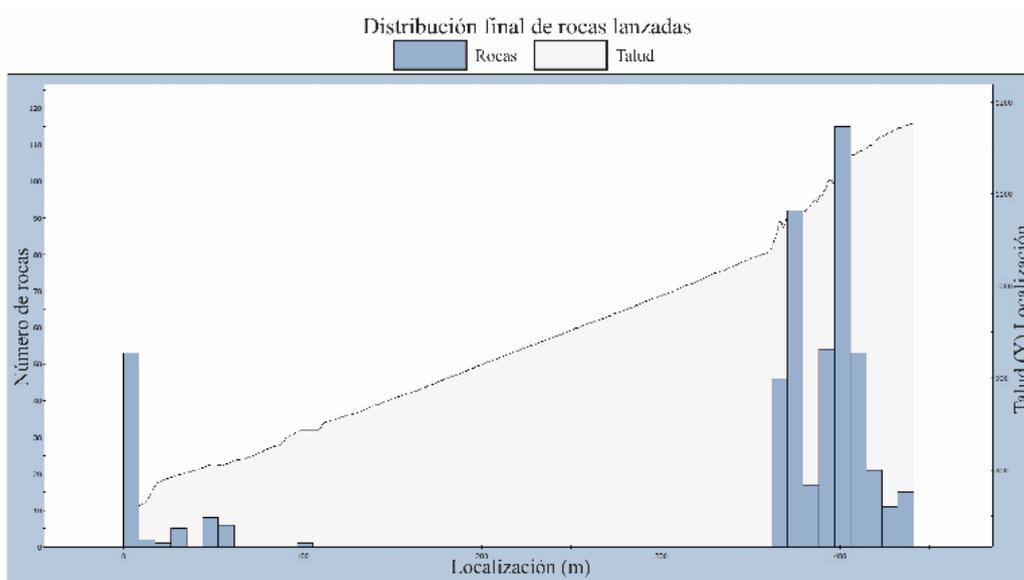


Figura 3-41. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 12. Las trayectorias de los bloques lanzados van desde la cabecera del talud hasta alcanzar el cauce el río.



Número total de rocas lanzadas:500

Figura 3-42. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 12, en donde se observa la acumulación de bloques al pie del talud y en la cabecera.

Las Figuras 3-42 y 3-43 muestran que la mayor parte de los bloques (salvo los que quedan retenidos en la cabecera del talud) realizan un largo recorrido aumentando progresivamente la energía cinética consecuencia del aumento de velocidad de los mismos; quedando finalmente depositados en el fondo del valle.

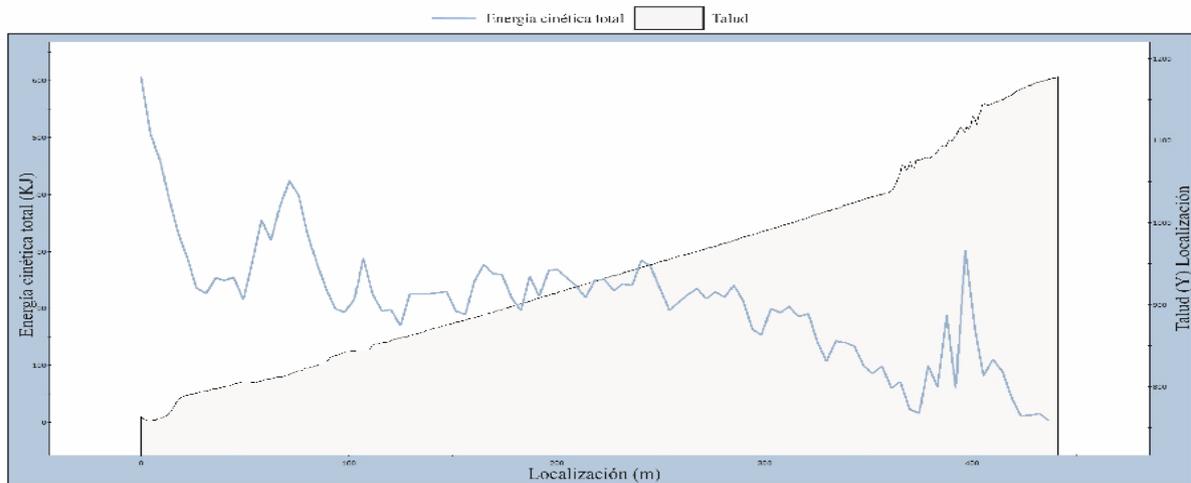


Figura 3-43. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 12. Destaca el aumento progresivo de la energía.

Perfil 13

Se trata de un perfil con una pendiente elevada, en la que predomina los canchales rodeados de sustrato rocoso. A lo largo de todo el perfil es evidente que la caída de rocas alcanzará el vial no por la trayectoria de los bloques de zonas superiores, sino por el sustrato rocoso presente en los aledaños del vial. Las Figuras 3-45 y 3-46 muestran la llegada a la carretera de 15 bloques con una energía de 5 kJ.

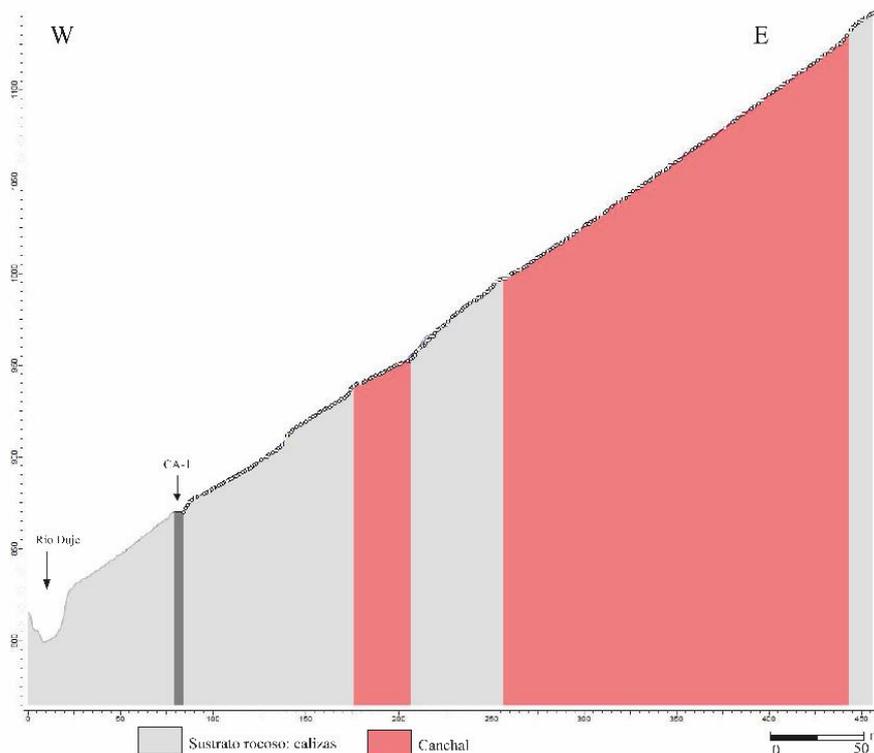


Figura 3-44. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 13.

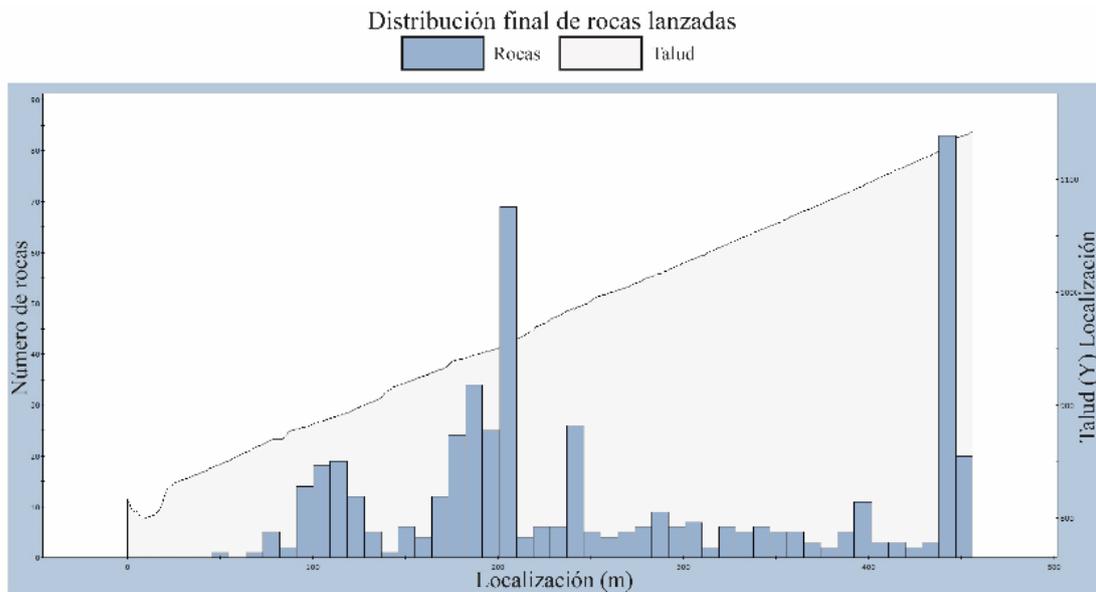


Figura 3-45. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 13.

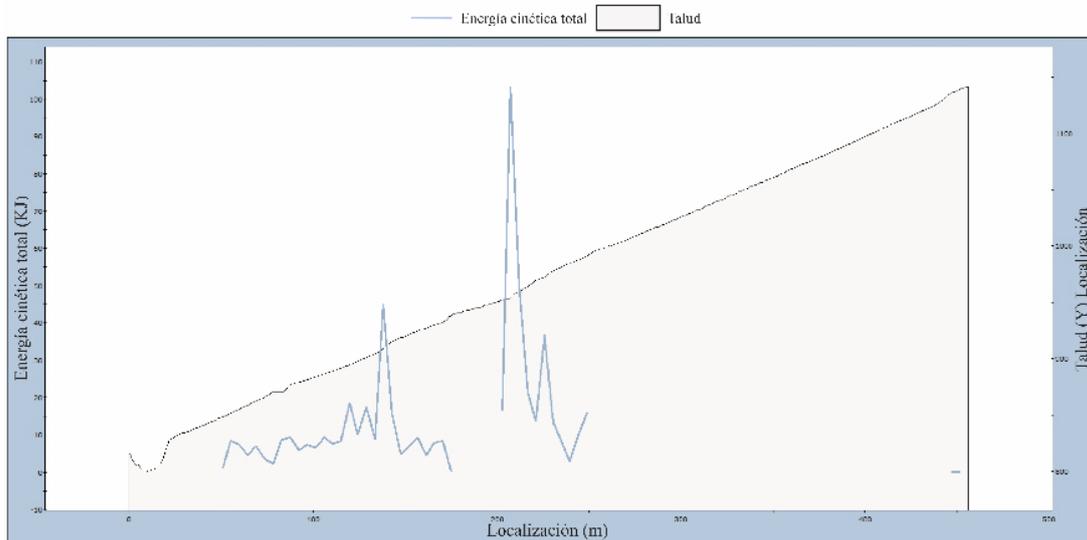


Figura 3-46. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 13.

Perfil 14

La geometría del perfil 14 (Figura 3-47) favorece los desprendimientos en los sectores más elevados formados por afloramientos de calizas sobre las que no se observan formaciones superficiales, mientras que el gran desarrollo de vegetación y suelo en las zonas cercanas al vial, evitan que la mayor parte de los desprendimientos generados en zonas suprayacentes puedan llegar a alcanzar la carretera.

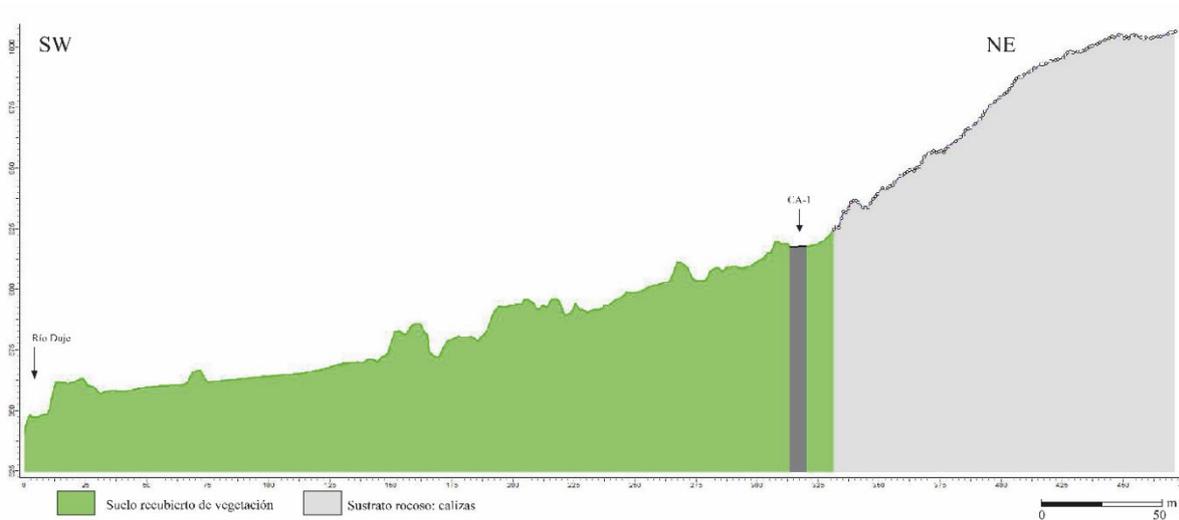
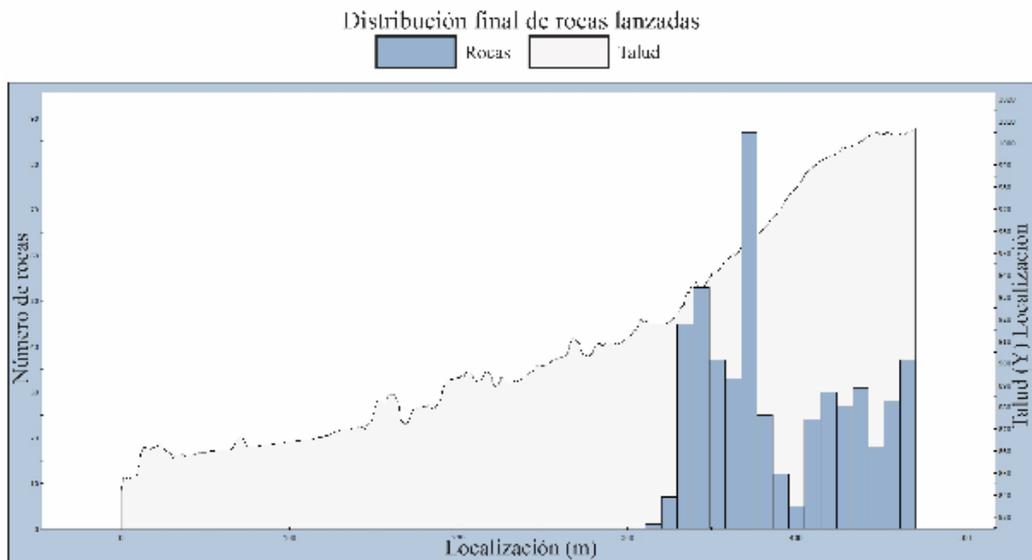


Figura 3-47. Trayectorias seguidas por los bloques desprendidos previstas para el perfil 14. Se observa la zona de “protección” de suelo recubierto de vegetación.



Número total de rocas lanzadas:500

Figura 3-48. Histograma de la distribución final de bloques lanzados del perfil 14.

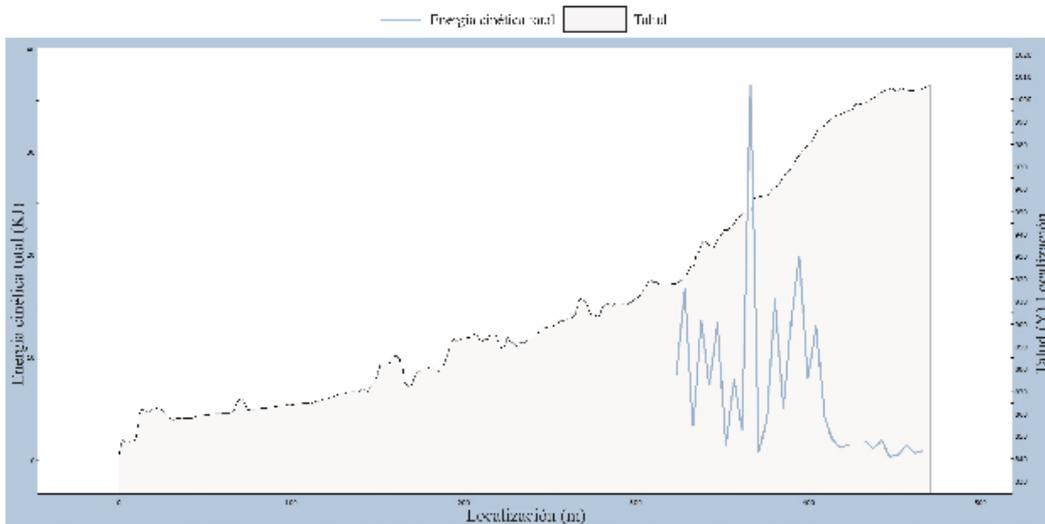


Figura 3-49. Distribución de la energía cinética total a lo largo de todo el perfil 14.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN PREVIAS

Las medidas de protección existentes a fecha de redacción del presente trabajo tratan de salvaguardar el vial frente a procesos de desprendimiento de bloques y, localmente, de movimientos de ladera de poca entidad, destacando la ausencia total de medidas frente a aludes. A continuación, se enumeran los sistemas de protección existentes actualmente en el tramo de vial objeto de estudio:

- Barrera de anillos estática recubierta con malla de triple torsión.

En la Figura 3-50 se puede apreciar una barrera estática que está anclada al sustrato rocoso. Esta barrera está formada por anillos metálicos y recubierta con malla de triple torsión con una luz de malla de 80 mm. Su instalación trata de contener pequeños bloques de tamaño centimétrico a decimétrico. En este caso destaca la baja altura que presenta la barrera y el gran recubrimiento vegetal que presenta. Su bajo nivel de mantenimiento actual reduce la función para la que fue establecida.



Figura 3-50. Barrera de anillos anclada a la roca recubierta de malla de triple torsión. Destaca su baja altura de 1,5 m aproximadamente cubierta de vegetación.

- Cortina de guiado mediante de malla de triple torsión.

Se trata de una malla de triple torsión anclada en la parte superior e inferior del talud (Figura 3-51). Tiene una luz de malla de 65 mm con la finalidad de guiar a pequeños bloques al pie del talud evitando que la trayectoria de estos interfiera con la carretera.

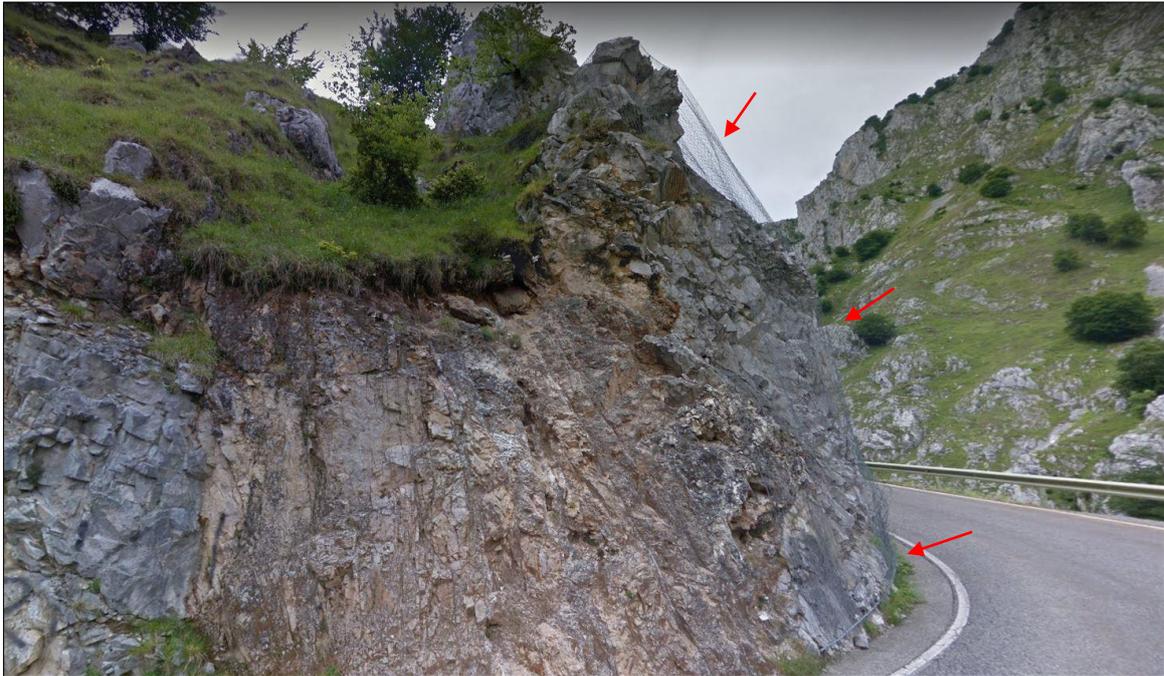


Figura 3-51. Cortina de guiado basada en una malla de triple torsión.

➤ Barrera rígida de acero.

Su función es la contención de bloques centimétricos a métricos (Figura 3-52). Su propiedad estática hace que sea una barrera frágil frente a bloques de mediano tamaño, debido a su baja disipación de la energía.

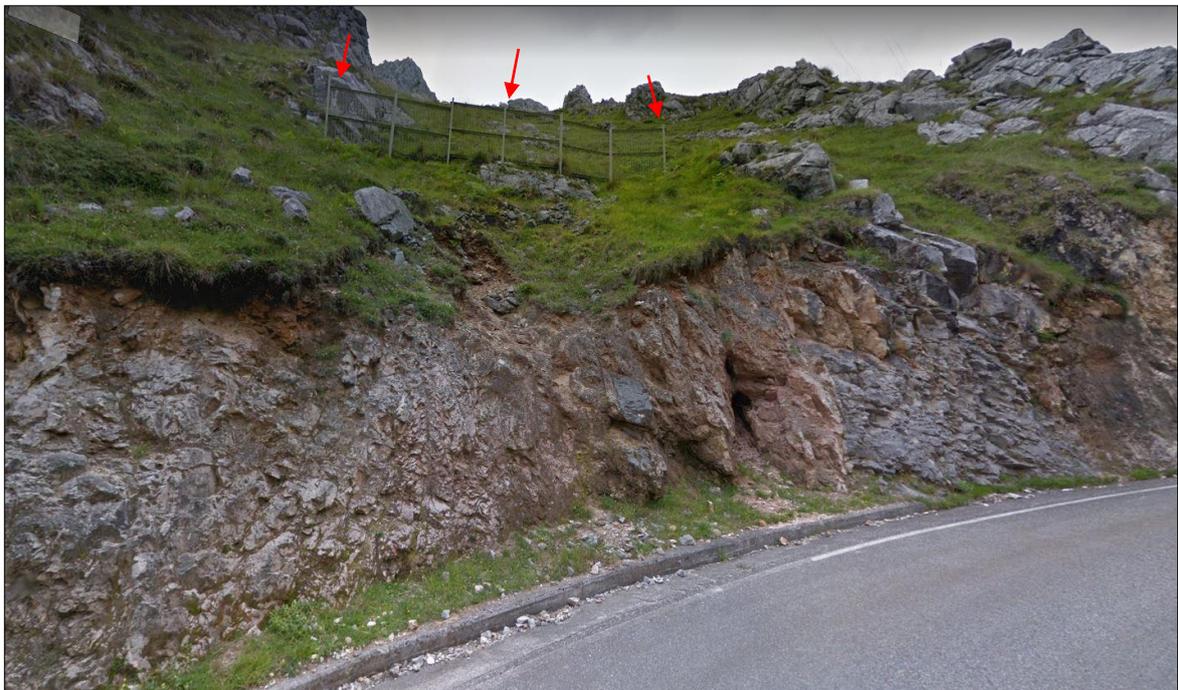


Figura 3-52. Barrera estática en el talud adyacente al vial.

➤ Pantalla dinámica de anillos metálicos.

La pantalla dinámica formada por postes de acero anclados al terreno mediante barras de acero, cables de arriostre anclados al terreno mediante anclajes flexibles de doble cable espiral con disipadores y recubierta por una estructura de interceptación formada por anillos y malla de triple torsión de acero. Esta medida permite alcanzar una alta disipación de la energía para bloques de tamaño métrico.



Figura 3-53. Pantalla dinámica de anillos metálicos.

A continuación, se presenta el mapa que incluye la localización de todas las medidas de protección establecidas previamente a la realización del presente informe:

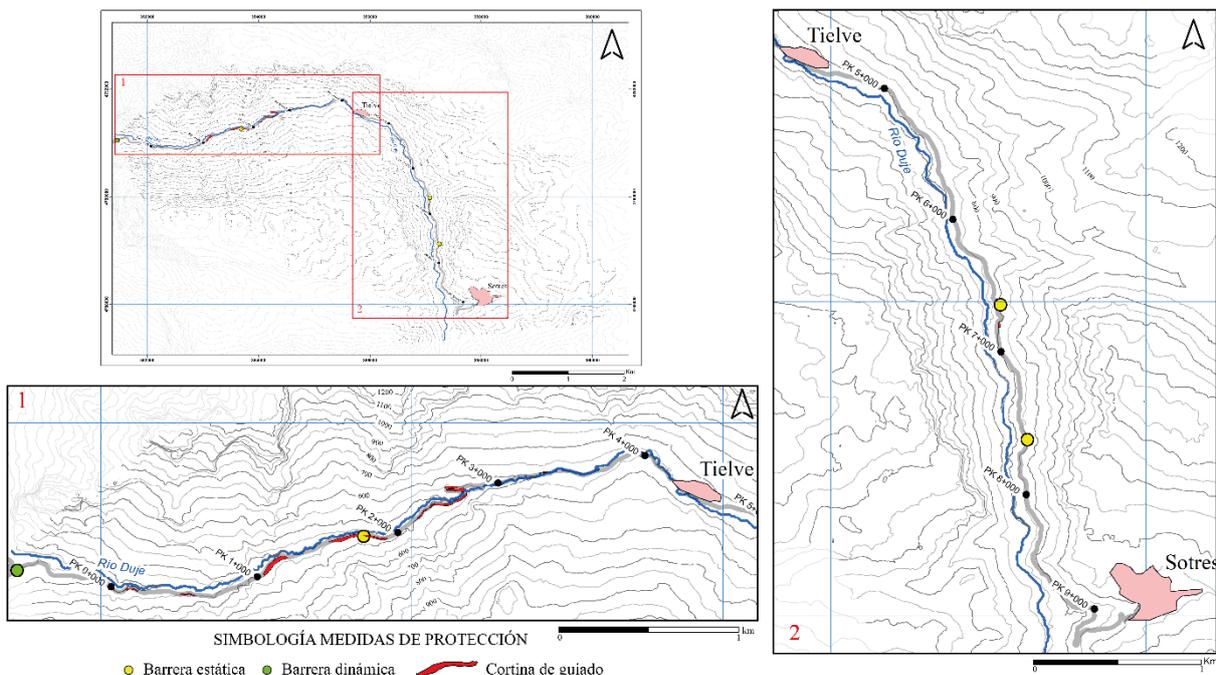


Figura 3-54. Localización geográfica de las medidas de protección preestablecidas. Versión ampliada en Anexo 9.

PROPUESTA DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Tanto los aludes como los desprendimientos de roca constituyen un peligro que afecta, en diferente medida, a numerosos tramos de la carretera CA-1. Las actuales medidas protectoras, enumeradas en el apartado anterior, no son suficientes para salvaguardar de manera efectiva al vial; dado que sólo existen barreras estáticas y dinámicas frente a desprendimientos en algunas zonas, no existiendo medidas contra aludes. En el presente apartado se proponen diversas medidas para la correcta protección del vial frente a ambos fenómenos.

Durante el estudio de desprendimientos de roca, se ha observado que, generalmente, existen dos tipos de zonas que requieren dos sistemas de protección diferentes:

- Zonas a proteger con sistemas de baja energía: el vial intersecta con numerosos canchales a lo largo de su trazado, constituyendo las zonas de mayor relieve las que alimentan con mayor frecuencia los canchales subyacentes. Así, la mayoría de los desprendimientos de roca que afectan a la carretera se producen como resultado de la evolución natural de los canchales, tratándose generalmente de desprendimientos de pequeña envergadura, con una trayectoria de reducida longitud, de baja altura de rebote y reducida energía cinética. Para estas zonas se propone la instalación de barreras metálicas fabricadas con alambre de acero (Figura 3-54), con una altura de 3 m, orientadas a contener la evolución del canchal. Éstas son capaces de retener bloques con una energía de hasta 100 kJ, siendo idóneas para desprendimientos de tamaño centimétrico y decimétrico. El alambre de acero le confiere un carácter dinámico a la hora de detener bloques, pese a ser una barrera estática.



Figura 3-54. Ejemplo de barrera estática compuesta por alambre de acero.

- Zonas a proteger con sistemas de alta energía: se trata de zonas con una elevada pendiente en donde los bloques desprendidos llegan a alcanzar velocidades de descenso elevadas, por lo que alcanzan grandes energías cinéticas. Puesto que en la zona se pueden generar desprendimientos con energías cinéticas de hasta 930 kJ, se propone la instalación de barreras dinámicas (Figura 3-55) formadas por anillos de acero recubierta

de alambre de acero con una capacidad de absorber energías de hasta 1.000 kJ con una altura de 5 m



Figura 3-55. Ejemplo de barrera dinámica compuesta de anillos de acero y recubierta de malla de acero.

La contención y/o mitigación de aludes a lo largo de una obra lineal superficial no es una tarea sencilla. Los métodos para la protección de carreteras frente aludes se dividen, generalmente, en dos tipos: (1) aquellos que tratan de proteger el vial estableciendo barreras y/o estructuras materiales que afectan a la trayectoria de los aludes (viseras, mallas de acero, etc). (2) aquellos que tratan de estabilizar los taludes cubiertos de nieve generando artificialmente aludes mediante pequeñas explosiones. Teniendo en cuenta que en la zona los aludes se movilizan siguiendo trayectorias lineales y generando un flujo continuo, se propone la instalación de viseras antialudes de hormigón empotradas en el sustrato rocoso presente en el talud de la carretera que permitan que se mantenga el flujo natural por las laderas (Figura 3-56). Estas viseras permiten el flujo de nieve sobre la carretera cambiando su trayectoria original.



Figura 3-56. Viseras antialudes de hormigón instaladas en una carretera de alta montaña.

A continuación, en la Figura 3-57 se presenta el mapa con la propuesta de localización de las medidas de protección descritas frente a la ocurrencia de desprendimientos de roca y aludes:

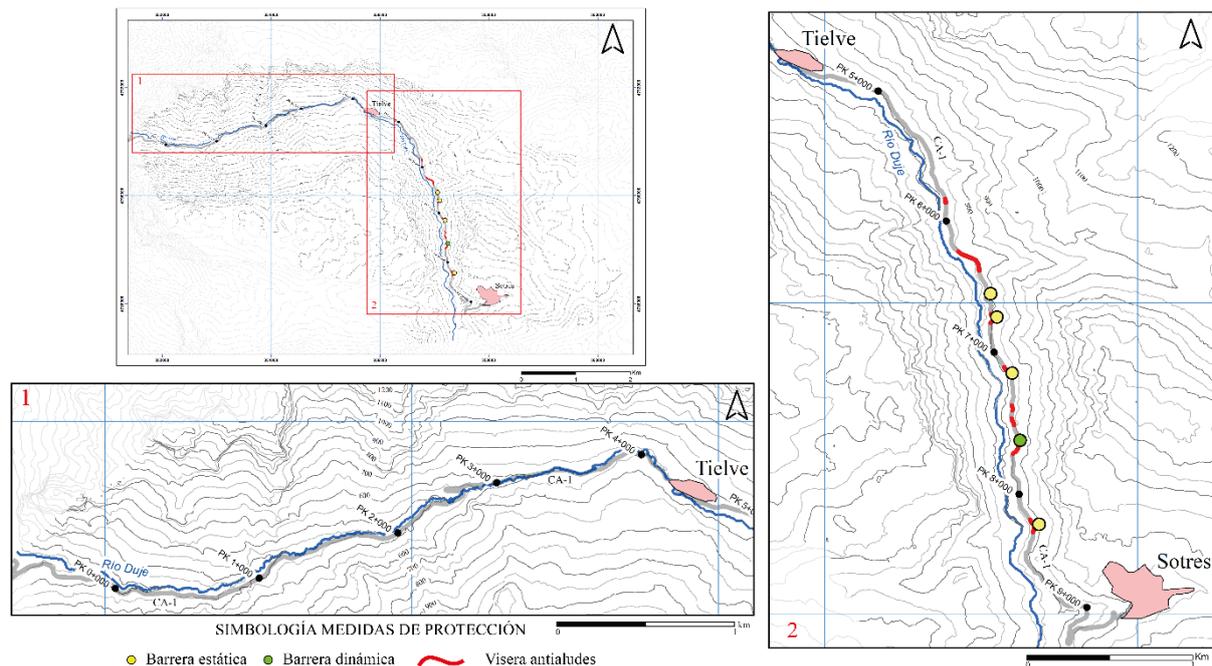


Figura 3-57. Localización geográfica de las medidas de protección propuestas tras el estudio de desprendimientos de roca y aludes. Versión ampliada en Anexo 10.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente Trabajo Fin de Máster, se pueden reseñar las siguientes conclusiones concernientes a la afección al vial CA-1 de procesos de desprendimientos de rocas y aludes.

- Se ha elaborado una cartografía de formas nivales y de gravedad del sector del valle del río Dujé por el que transcurre la carretera. En ella se observa la presencia de un fuerte relieve, carente de recubrimiento, en la zona superior de las laderas, identificándose un importante desarrollo de canchales en su parte media e inferior. Asimismo, destaca la existencia de numerosos canales de aludes que intersectan la carretera en varios puntos de su trazado.
- En la cartografía de áreas fuente de desprendimientos realizada en la misma zona se identifican dos sectores con una alta favorabilidad para el desprendimiento de bloques rocosos: i) entre el PK0+000 y el PK4+000 las zonas de mayor favorabilidad se localizan en la ladera opuesta a la que acoge al vial estudiado, siendo más reducidas en extensión las identificadas en la misma vertiente por la que transcurre la carretera. ii) entre el PK6+000 y el PK9+000 del trazado se identifica una gran zona con alta favorabilidad para generar desprendimientos de bloques rocosos situada en la misma ladera por la que transcurre la vía.

- Se han modelizado 14 perfiles para estudiar las trayectorias que siguen los bloques desprendidos, constatándose que en cinco de ellos las rocas desprendidas pueden alcanzar la carretera. En uno de estos sectores, las rocas llegan al vial con una elevada energía cinética (< 930 kJ), previéndose valores reducidos (de hasta 50 kJ) en los otros cuatro perfiles analizados).
- Por tanto, se estima que en, al menos, cinco sectores del trazado es necesaria la colocación de barreras de protección frente a desprendimientos de rocas. La mayoría de estas zonas se localizan en laderas donde se han desarrollado canchales cuya localización es cercana al vial o zonas donde existe una pendiente muy elevada con afloramiento del sustrato carbonatado. En las zonas de mayor desarrollo de canchales se pueden generar desprendimientos de baja energía cinética producidos por la evolución natural de los mismos.
- Como medidas de protección de la carretera frente a desprendimientos, se ha indicado la necesidad de colocar una barrera dinámica en el sector donde se espera mayor energía de impacto y cuatro barreras estáticas en las zonas donde se esperan menores energías (Figura 3-57). La zona del trazado con mayor peligrosidad es la situada entre los PK6+000 y PK9+000.
- La cartografía de áreas fuentes de aludes realizada en el valle por el que transcurre la carretera muestra una distribución dispersa de las mismas, concentrándose de forma especial en el tramo que va desde el PK6+000 hasta el PK9+000.
- El arranque de aludes suele dar lugar en este valle a flujos relativamente constantes del manto nival, pudiendo identificarse diversos canales de aludes.
- Se han identificado ocho puntos en los que se recomienda establecer sistemas antialudes, correspondientes a las zonas de intersección entre los canales de aludes y la carretera, principalmente situados entre el PK5+000 y el PK9+000.

5. REFERENCIAS

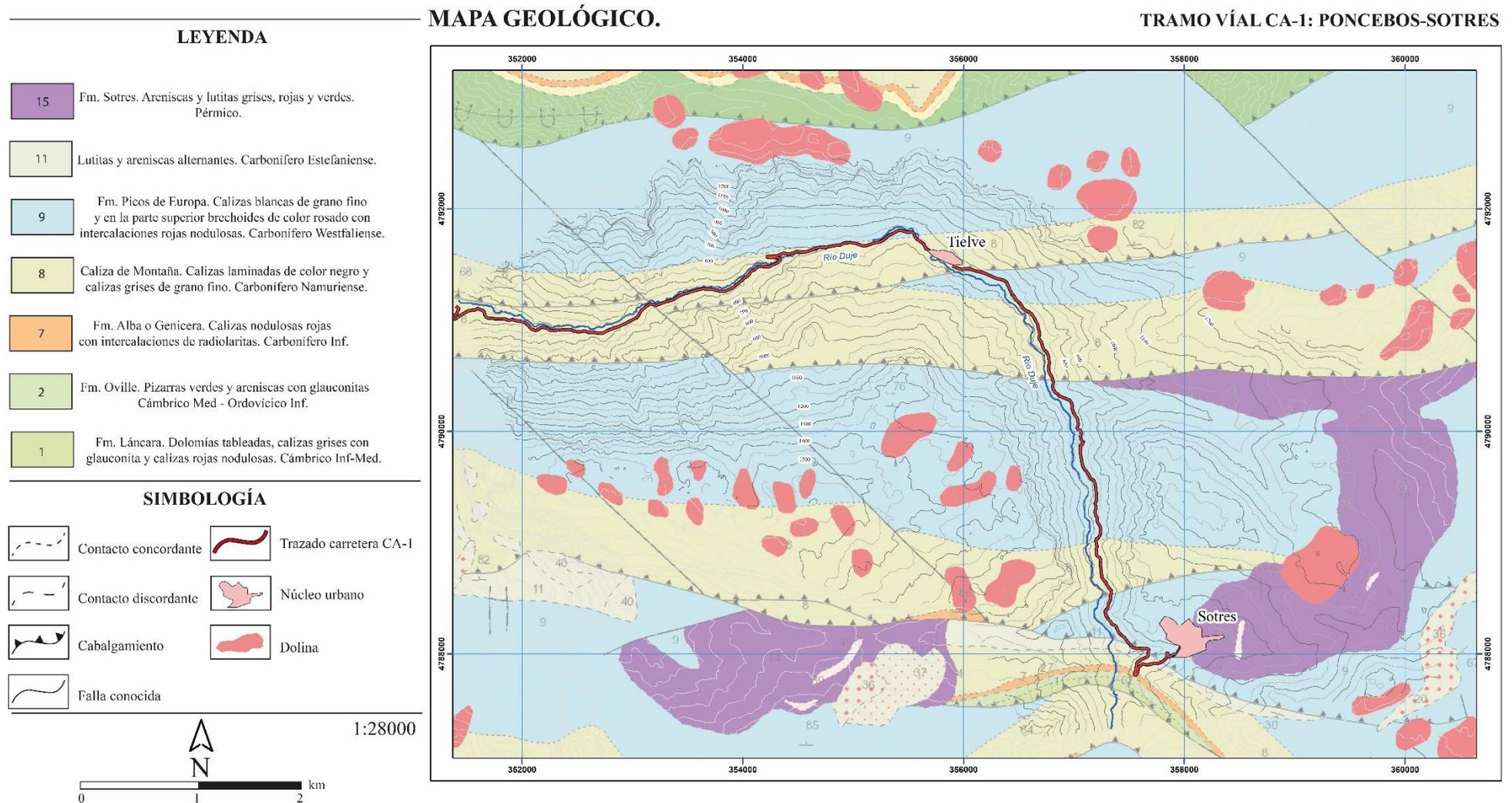
- Adrados González, L., Alonso Alonso, V., Bahamonde Rionda, J.R., Farias Arquer, P., Fernández González, L.P., Gutiérrez Claverol, M., Heredia Carballo, N., Jiménez Sánchez, M., Meléndez Asensio, M., Merino Tomé, O. y Villa Otero, E. (2010). Parque Nacional de los Picos de Europa, Guía Geológica. En: Guías Geológicas de Parques Nacionales (R. Rodríguez Fernández, Dir. y Coord.) IGME-OAPN, 1-337. 1 mapa. ISBN: 978-84-8014-786-6.
- AEMET (2015). La Guía de Aludes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 48 pp.
- Álvarez García, L. (2016). Zonificación y evaluación de la peligrosidad por procesos de ladera en la Ruta del Cares. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo, 87 pp.
- Barrois, C.H. (1882). Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. Mem. Soc. Geol. Nord., II, 1-630.

- BOE (1995). Ley 16/1995, de 30 de mayo, de declaración del Parque Nacional de los Picos de Europa. En: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1995/BOE-A-1995-12915-consolidado.pdf>. [Consultado 06-11-2019].
- BOE (2006). Ley 8/2006, de 13 de noviembre, carreteras. En: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-99-consolidado.pdf>. [Consultado 07-11-2019].
- BOPA (2017). Acuerdo 248 de 26 de octubre por el que se aprueba el nuevo Catálogo de Carreteras de la Red del Principado de Asturias. En: <https://sede.asturias.es/bopa/2017/10/26/2017-11636.pdf>. [Consultado 07-11-2019].
- Calderon, S. (1900). La blenda de los Picos de Europa. *Anc. Soc. Esp. Hist. Nat.*, XXIX, 153-161.
- Carballo, S. (1911). Excursión geológica a los Picos de Europa. *Bol. T. Soc. Esp. Hist. Nat.*, XI, 216, 226.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Edit. Prentice Hall. Madrid, España, 715 pp.
- IGN (2019). Instituto Geográfico Nacional. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> [Consultado 15-12-2019].
- Maas, K. (1974). The Geology of Liebana, Cantabrian Mountains Spain. *Deposition and deformation in a flysh area*. *Leidse Geol. Meded.*, 49, 379-465.
- Marcos, A. (1967). Estudio geológico del reborde NW de los Picos de Europa (región de Onís-Cabrales, Cordillera Cantábrica). *Trabajos de Geología Univ. Oviedo* 1, 39-46.
- Marquínez García, J. (1989). Mapa geológico del Cuera y los Picos de Europa. *Trabajos de Geología Univ. Oviedo*, 18: 137-144.
- Marquínez García, J., Fernández Iglesias, E. (2000). *Cartografía temática ambiental. Mapa Litológico, Carreña-Cabrales (E 1:25000)*. Oviedo: INDUROT.
- Martínez Álvarez, J.A. (1965). Rasgos geológicos de la zona oriental de Asturias. *Instituto Asturiano, Oviedo*, 1-132.
- Martínez García, E. y Wagner, R.H. (1971). Marine and continental deposits of Stephanian age in Eastern Asturias (NW Spain). In *the Carboniferous of NW Spain*. *Trabajos de Geología Univ. Oviedo*, 3, 285-305.
- Martínez García, E., Marquínez García, J., Rodríguez Fernández L.R. (1978): *Mapa Geológico y memoria explicativa de la Hoja nº 56 (Carreña-Cabrales), escala 1:50.000. Mapa Geológico de España. Segunda Serie MAGNA*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.
- Pérez Millán, D. (2019). Análisis de trayectorias de caída de rocas en la senda del río Cares. Trabajo Final de Máster, Universidad de Oviedo, 64 pp.
- Pérez-Estaún, A. y Bea, F. (2004). Macizo Ibérico. En: *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid, 19-230.
- Schulz, G. (1838). Reseña geognostática del Principado de Asturias. *Anales de Minas*, I, Madrid.

- Srikanth Marchetty. (2015). Analysis of Rockfall trajectories and evaluation of concrete barrier efficiency. Tesis doctoral University of Akron, United States, 286 pp.
- Valderrábano Luque, J. (2000). Cartografía temática ambiental. Mapa Vegetación, Carreña-Cabrales (E 1:25000). Oviedo: INDUROT.

6. ANEXOS

ANEXO 1: CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

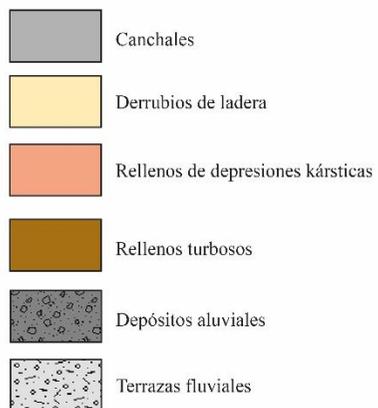


ANEXO 2: CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

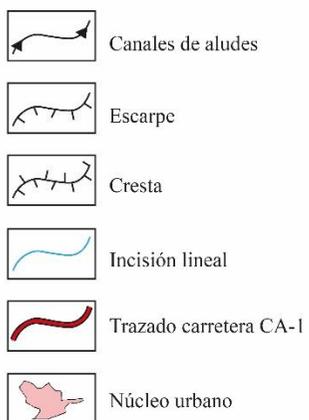
MAPA GEOMORFOLÓGICO. FORMAS NIVALES Y DE GRAVEDAD

TRAMO VÍAL CA-1: PONCEBOS-SOTRES

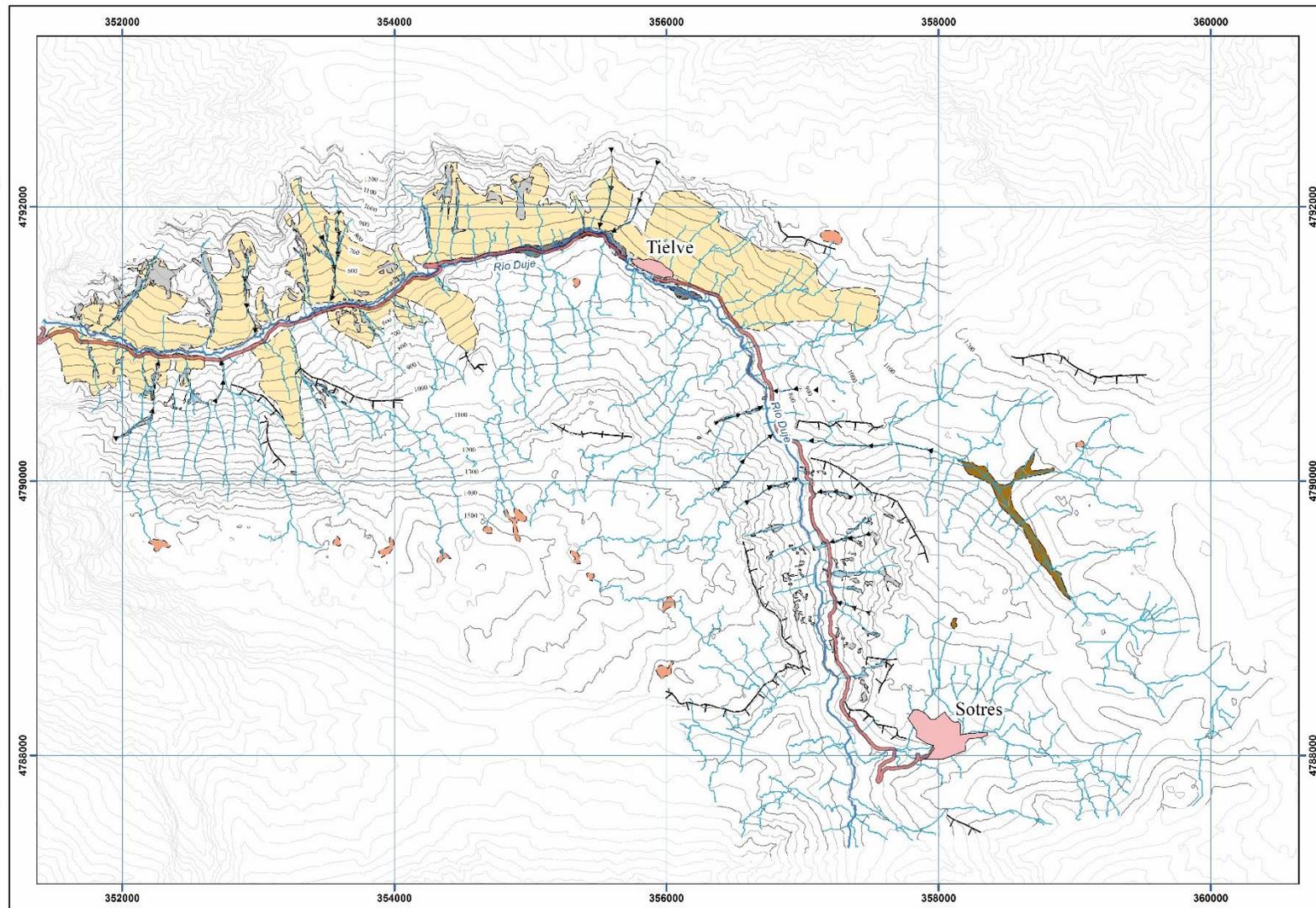
LEYENDA



SIMBOLOGÍA



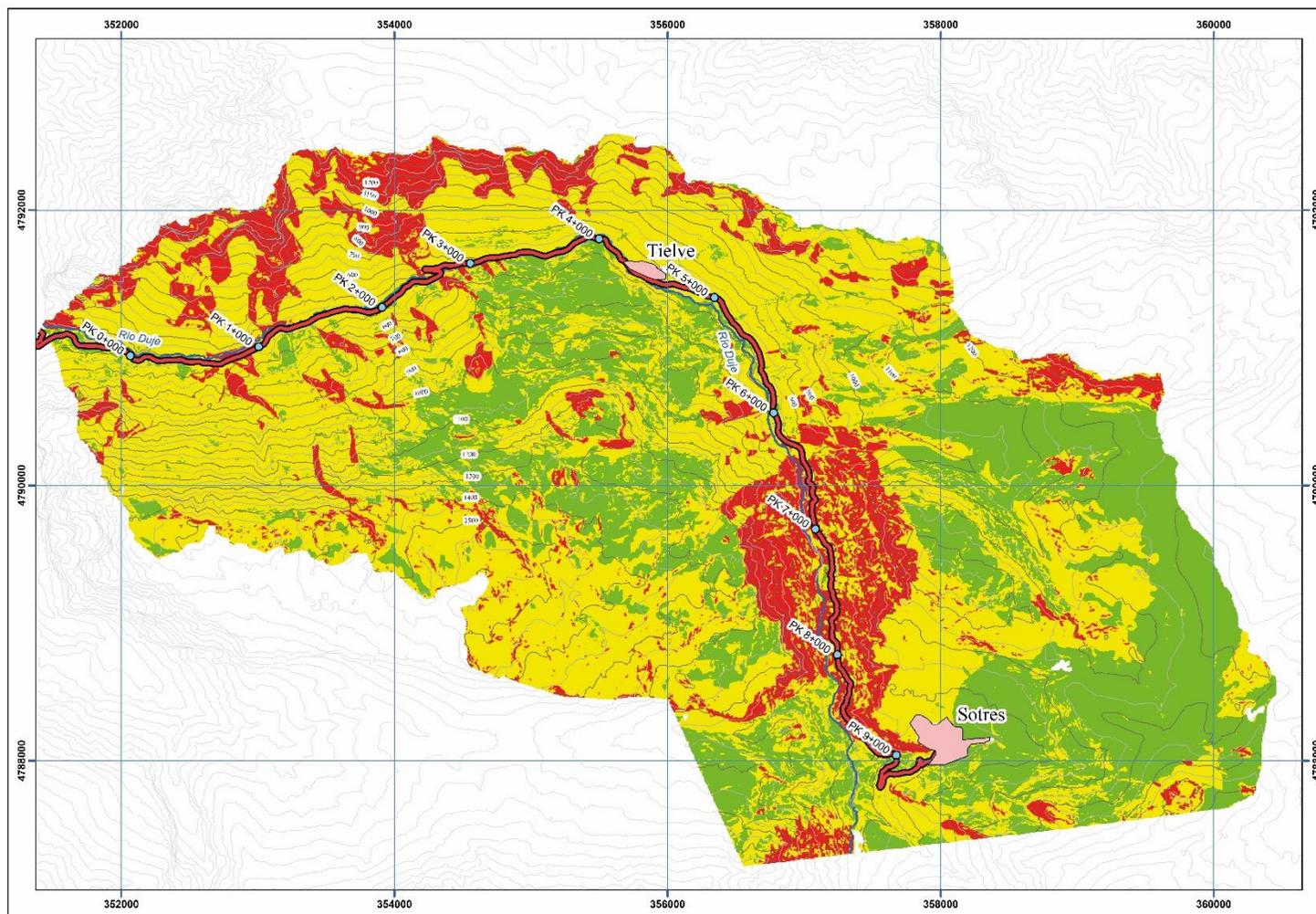
1:28000



ANEXO 3: MAPA DE ÁREAS FUENTES DE DESPRENDIMIENTOS

MAPA DE AREAS FUENTE DE DESPRENDIMIENTOS.

TRAMO VÍAL CA-1: PONCEBOS-SOTRES



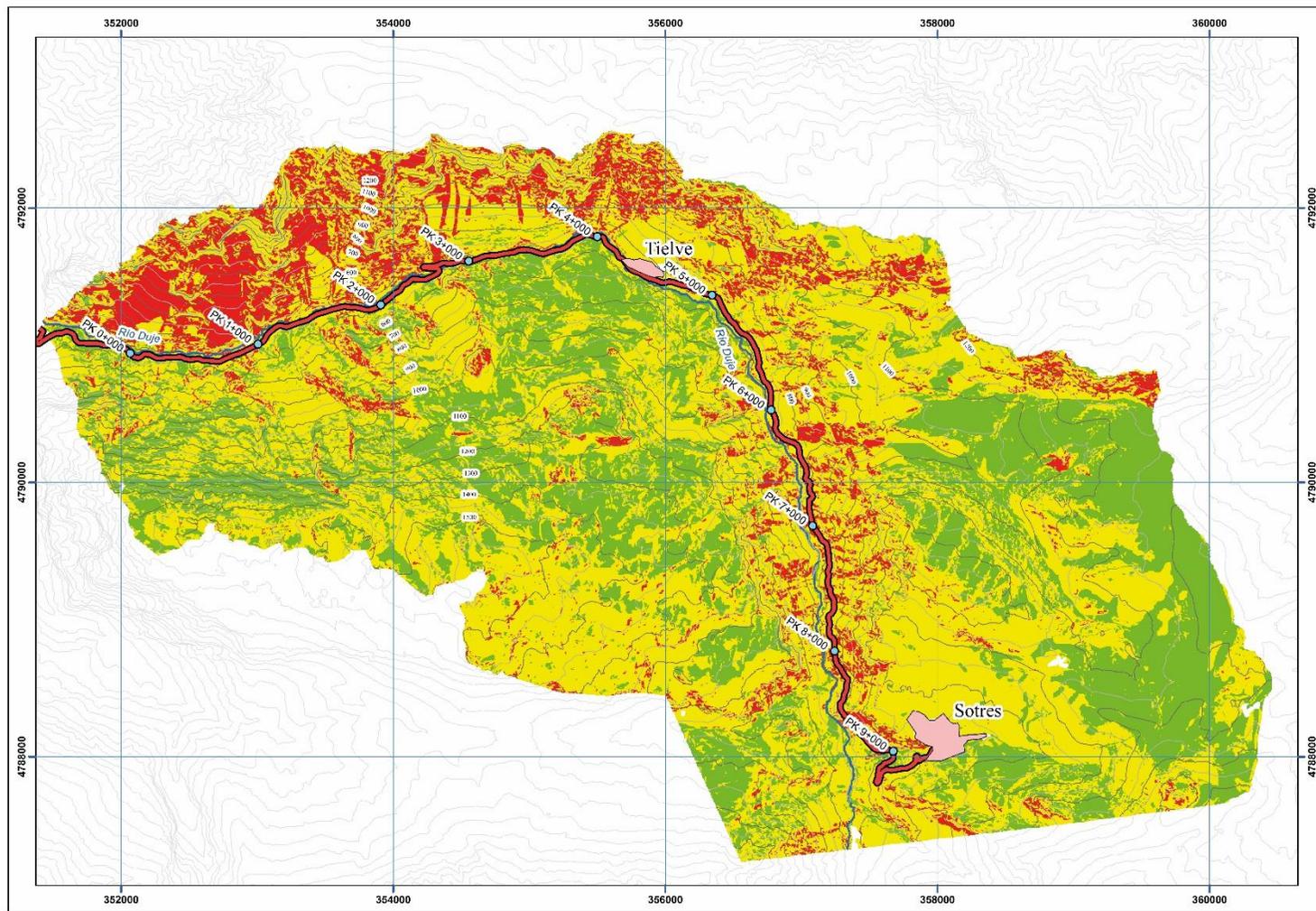
SECTORES FAVORABLES PARA LA GENERACIÓN DE DESPRENDIMIENTOS



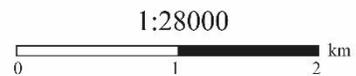
ANEXO 4: MAPA DE ÁREAS FUENTES DE ALUDES

MAPA DE AREAS FUENTE DE ALUDES.

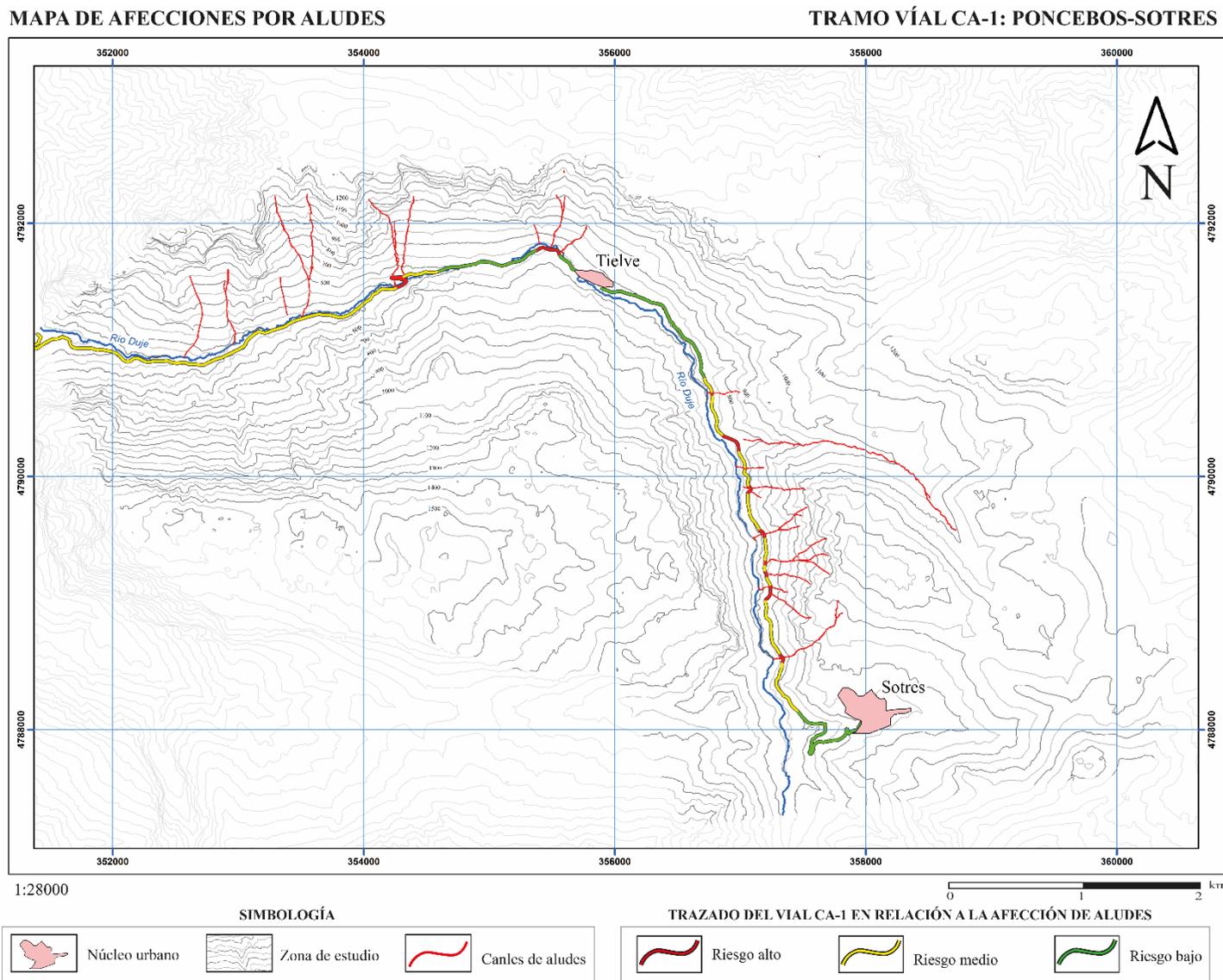
TRAMO VÍAL CA-1: PONCEBOS-SOTRES



SECTORES FAVORABLES PARA LA GENERACIÓN DE ALUDES

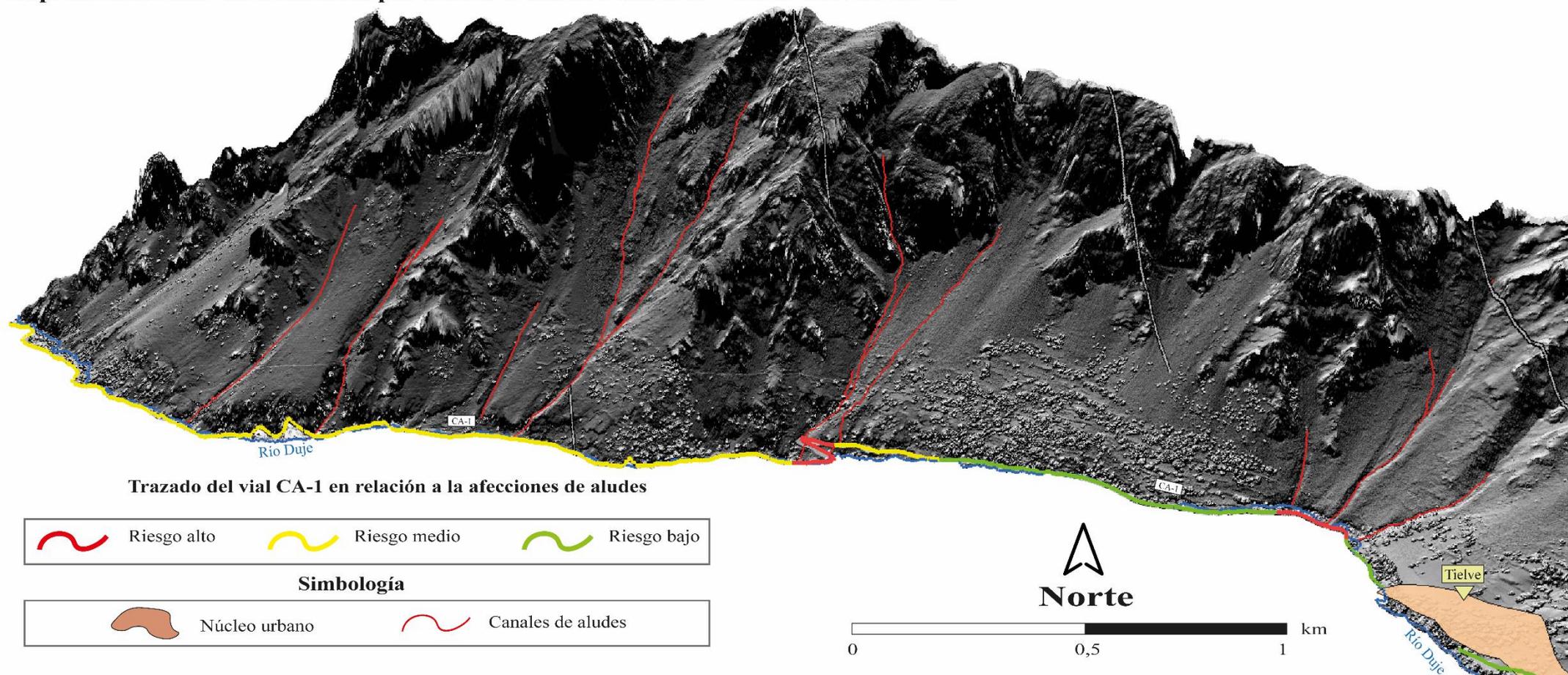


ANEXO 5: MAPA DE AFECCIONES POR ALUDES A LA CARRETERA CA-1



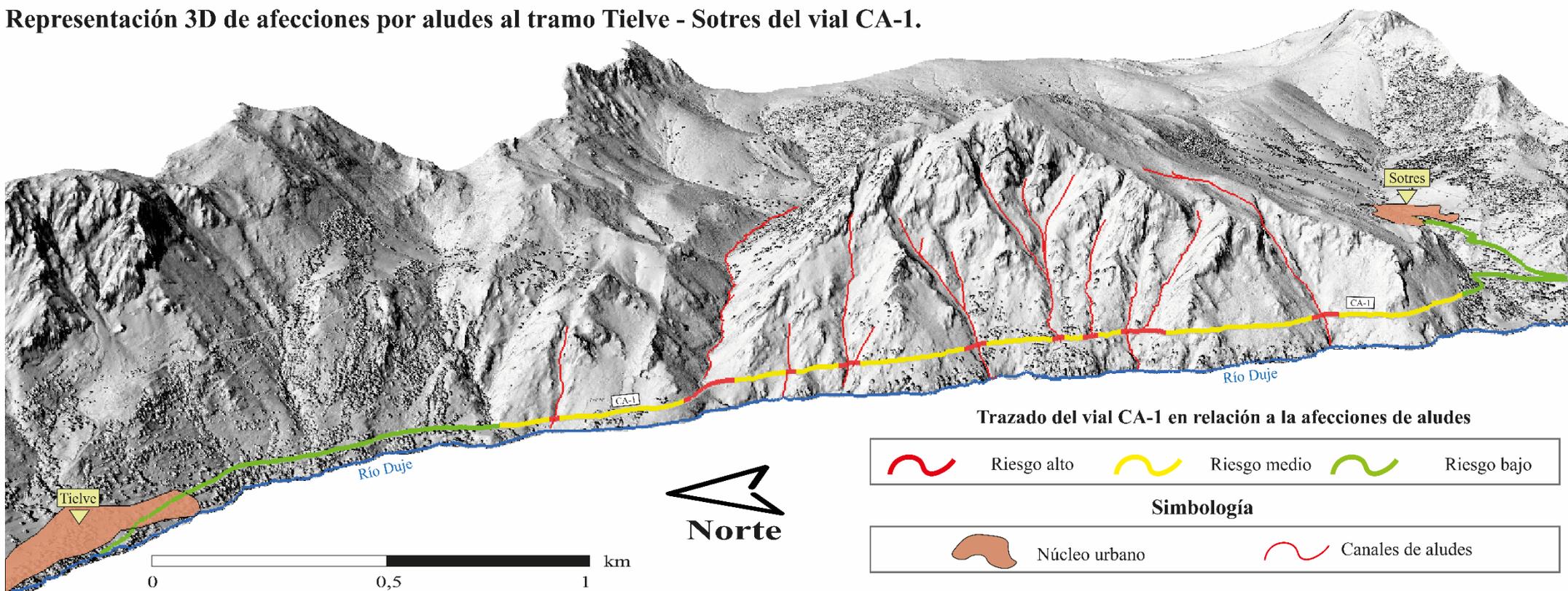
ANEXO 6: REPRESENTACIÓN 3D DE AFECCIONES POR ALUDES AL TRAMO PONCEBOS-TIELVE

Representación 3D de afecciones por aludes al tramo Poncebos - Tielve del vial CA-1.

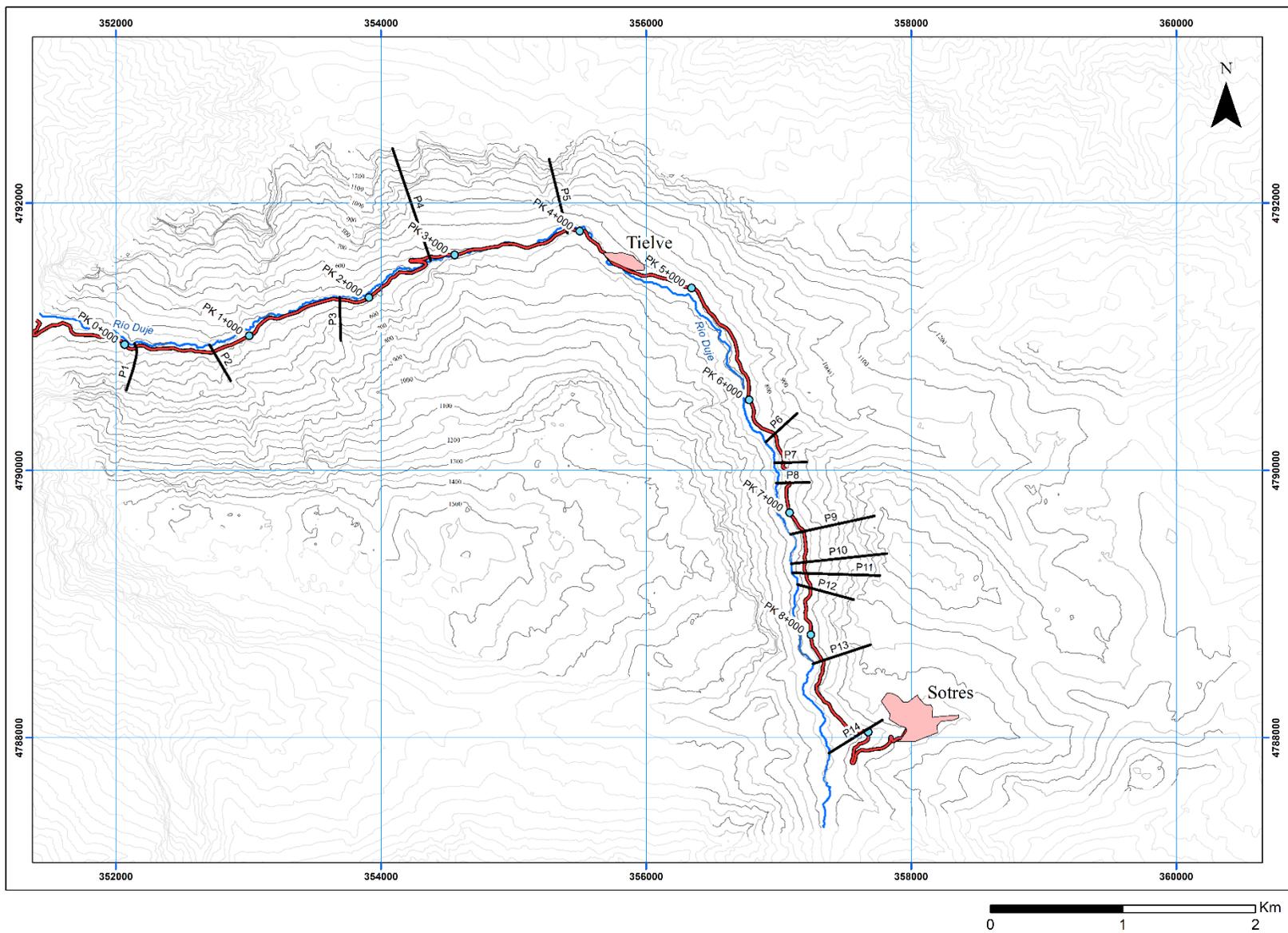


ANEXO 7: REPRESENTACIÓN 3D DE AFECCIONES POR ALUDES AL TRAMO TIELVE-SOTRES

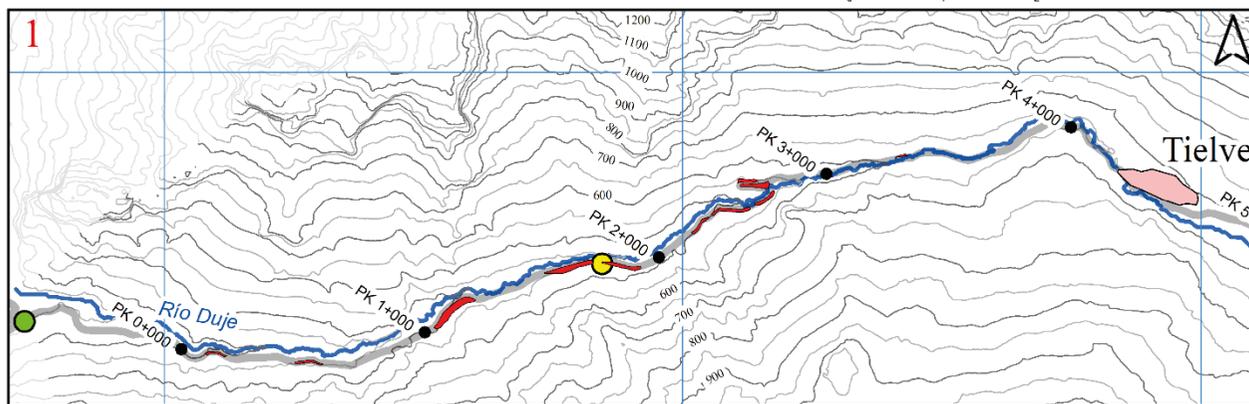
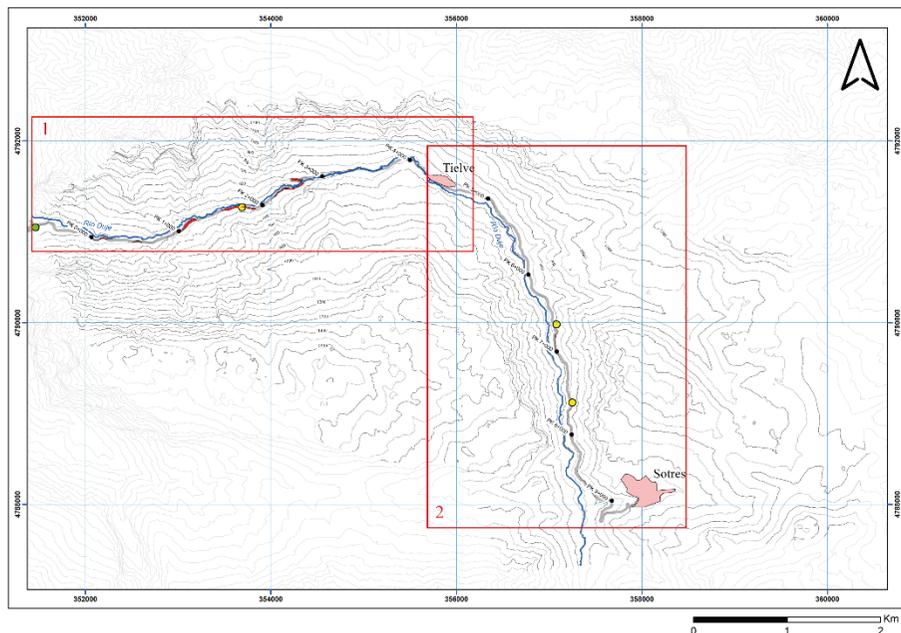
Representación 3D de afecciones por aludes al tramo Tielve - Sotres del vial CA-1.



ANEXO 8: LOCALIZACIÓN PERFILES SIMULADOS CON ROCFALL

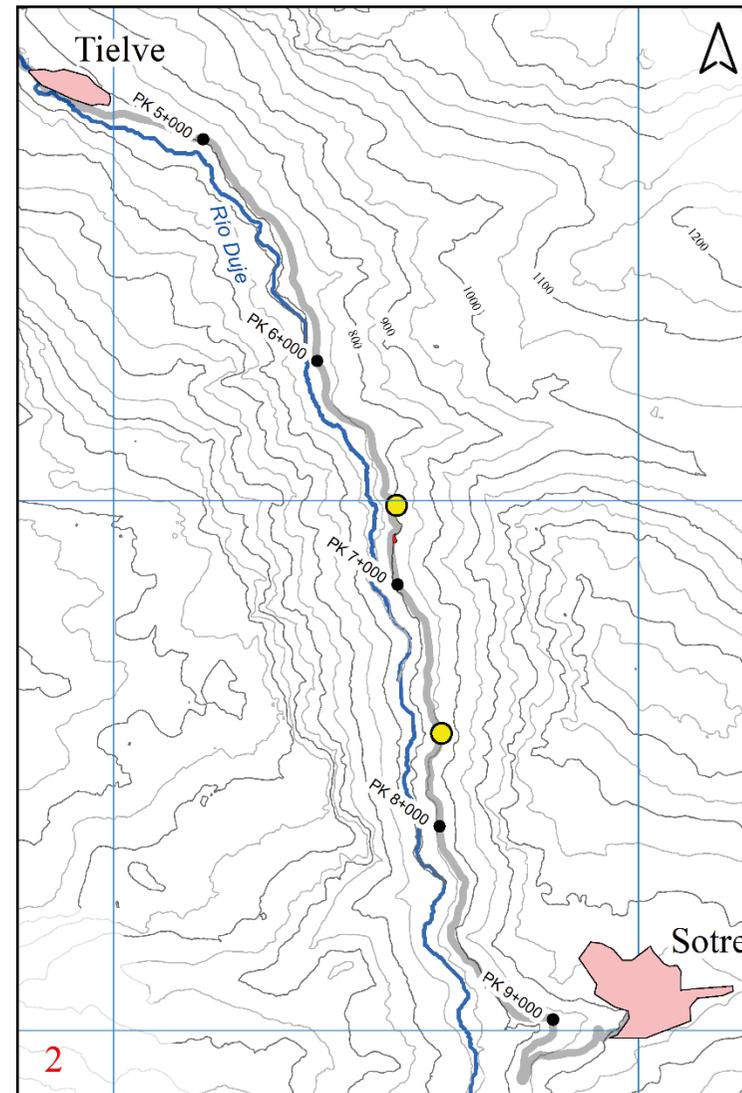


ANEXO 9: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN PREVIAS

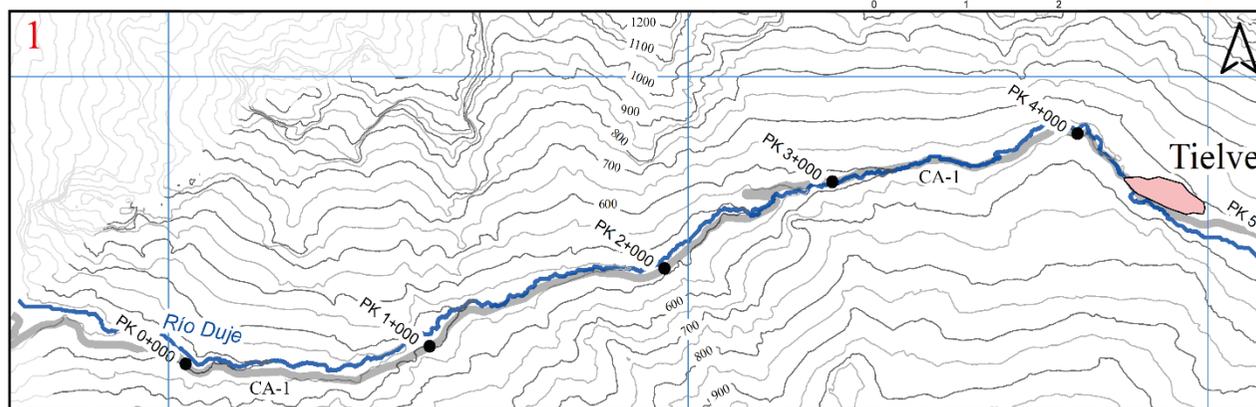
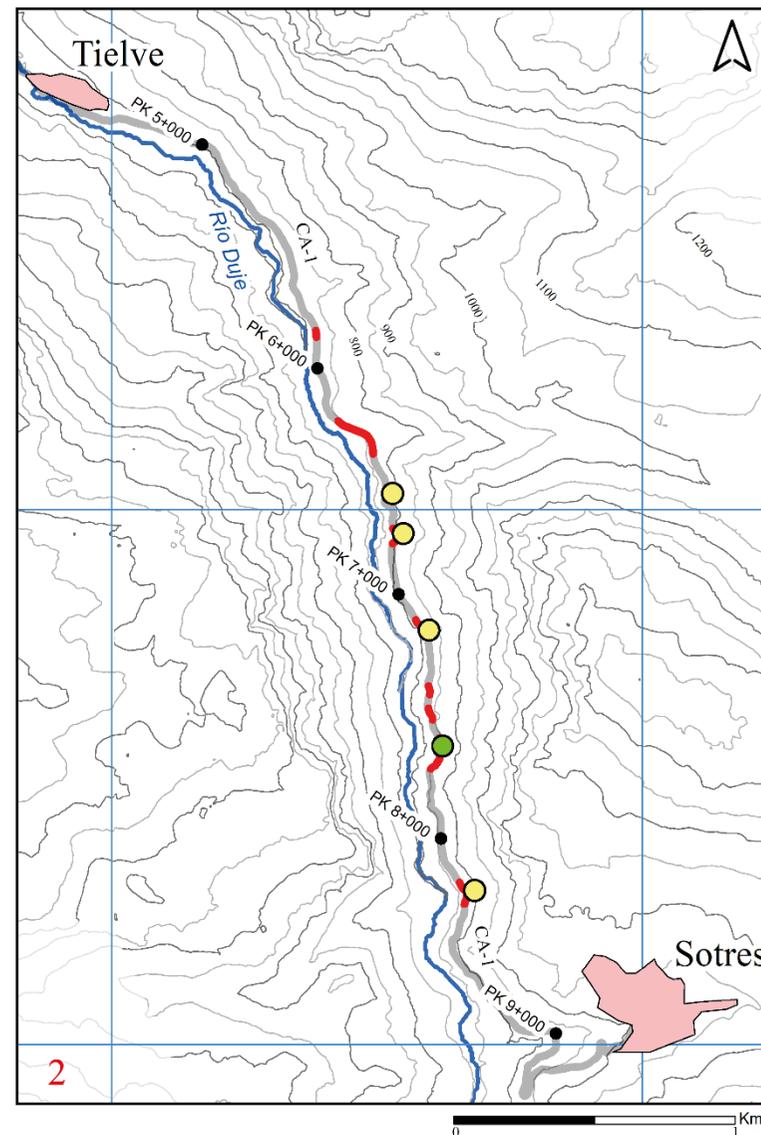
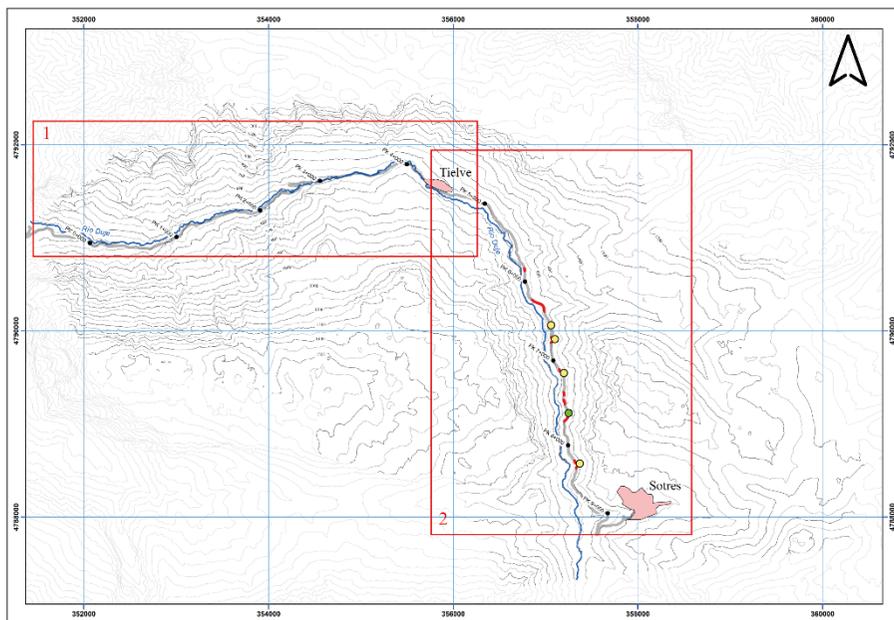


SIMBOLOGÍA MEDIDAS DE PROTECCIÓN

- Barrera estática
- Barrera dinámica
- Cortina de guiado



ANEXO 10: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN RECOMENDADAS



SIMBOLOGÍA MEDIDAS DE PROTECCIÓN

- Barrera estática
- Barrera dinámica
- ~ Visera antialudes