



Universidad de Oviedo

ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PELIGROSIDAD POR ALUDES EN LA CARRETERA AS-253 (CUEVAS-SAN ISIDRO)

Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Trabajo Fin de Máster



JUNIO 2020

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Ángel Abad Sánchez



FIRMAS

D. Ángel Abad Sánchez, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PELIGROSIDAD POR ALUDES EN LA CARRETERA AS-253 CUEVAS-SAN ISIDRO”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 22 de mayo de 2020

Fdo: Ángel Abad Sánchez

El Dr. Carlos López Fernández, profesor titular de la Universidad de Oviedo, confirma que ha dirigido el trabajo “ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PELIGROSIDAD POR ALUDES EN LA CARRETERA AS-253 CUEVAS-SAN ISIDRO”, realizado por D. Ángel Abad Sánchez y autoriza la presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 22 de mayo de 2020

Fdo: Carlos López Fernández



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a Carlos López, por tener la paciencia de corregir y revisar este Trabajo Fin de Máster 200 millones de veces y por su entrega y dedicación durante los dos últimos años, mostrando su preocupación por nuestro futuro y dándonos herramientas útiles para afrontarlo.

A Mario y a Jaime, por venir conmigo a una nueva ciudad, ayudarme a seguir creciendo cada día y hacer de estos años una experiencia inolvidable.

A mis nuevos amigos, por haberme dado un año lleno de anécdotas y buenos momentos.

A mis geologuitos, pues a pesar de la distancia durante todo el máster han demostrado estar siempre a mi lado demostrando su cariño y su apoyo.

Y a mi padre, por su esfuerzo para que pueda cumplir mis metas y por demostrarme su apoyo cada día en cada decisión que tomo a pesar de las dificultades.



Índice

Resumen.....	1
Abstract	1
1. Introducción.....	2
Antecedentes	2
Zona de estudio y características del vial.....	2
Contexto geológico	5
Sustrato rocoso	6
Estructura.....	9
Hidrogeología	11
Formaciones superficiales	12
Riesgos geológicos	13
Objetivos	15
2. Metodología.....	16
Cartografía de formaciones superficiales.....	16
Caracterización geomecánica del macizo	17
Modelización de caída de rocas	19
Cartografía de peligrosidad por aludes	21
Cartografía de elementos de protección.....	24
3. Resultados.....	25
Cartografía de formaciones superficiales.....	25
Caracterización del macizo rocoso y estudio de estabilidad de taludes.....	26
Estación geomecánica 1 (EG-1)	26
Estación geomecánica 2 (EG-2)	28
Estación geomecánica 3 (EG-3)	28
Estación geomecánica 4 (EG-4)	31
Estación geomecánica 5 (EG-5)	32
Análisis de la trayectoria de bloques rocosos desprendidos.....	33
Peligrosidad por aludes	48
Cartografía de elementos de contención	54
4. Conclusiones.....	63
5. Referencias bibliográficas	64



Anexos	69
Anexo 1: Estaciones geomecánicas	69
Anexo 2: Cartografías realizadas	74



Resumen

La carretera de acceso al puerto de San Isidro desde el Principado de Asturias (AS-253) es una zona donde son frecuentes los desprendimientos de rocas y de desencadenamientos de aludes. En este Trabajo Fin de Máster, 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, se aborda una caracterización del trazado de esta vía entre la localidad de Cuevas y el Puerto de San Isidro (Asturias-León) con el objetivo de valorar la peligrosidad de la misma en relación a los citados fenómenos. Para ello, tras una exhaustiva recopilación bibliográfica de toda la información geológica disponible sobre esta zona, se efectuó un reconocimiento de las formaciones superficiales cercanas a todo el trazado, se caracterizó el macizo rocoso mediante el levantamiento de estaciones geomecánicas y se abordó un estudio de las cuencas hidrográficas vertientes a la carretera para valorar el peligro por aludes. Asimismo, se llevó a cabo un análisis informático de estabilidad de las diferentes zonas con mayor peligrosidad de desprendimientos. Como principales aportaciones de este trabajo, cabe señalar la elaboración de cartografías de peligrosidad por aludes, de elementos de protección presentes, y de formaciones superficiales y procesos gravitacionales, así como la modelización de trayectorias de caídas de bloques y su energía cinética.

Abstract

The access road to the mountain's port of San Isidro from the Principality of Asturias (AS-253) it's a zone where the rock falls and snow avalanches are frequents. In this master's thesis, within the framework of the agreement between the University of Oviedo and the Ministry of Infrastructure, Environment and Climate Change of the Government of the Principality of Asturias, a characterization of the route layout between Cuevas and the mountain pass of San Isidro (Asturias-León) is addressed in order to assess the danger of it in relation to the aforementioned phenomena. For this, after an exhaustive bibliographic compilation of all the geological information available on this area, a geomorphological survey of the entire route was carried out, the rock massif was characterized by surveying geomechanical stations, and a study of the hydrographic basins facing the road was undertaken to assess the avalanche hazard. Likewise, a computer stability analysis of the different areas with the greatest danger of landslides was carried out. As main contributions of this work, it is worth noting the elaboration of cartographies of avalanche danger, of present protection elements, and of superficial formations and gravitational processes, as well as the modeling of block fall trajectories and their kinetic energy.

1. Introducción

Antecedentes

Son conocidos los daños causados tanto por caída de rocas como formación de aludes en el tramo de la carretera AS-253 que asciende desde la localidad de Cuevas (Aller, Asturias) hasta el Puerto de San Isidro (límite provincial entre Asturias y León). Incluso, han quedado recogidos por los medios de comunicación, dado el impacto que han tenido en la circulación a través de esta vía. O por la pérdida de vidas humanas, tal y como ocurrió en diciembre de 2007 por la caída de una roca sobre un vehículo en el punto kilométrico (a partir de ahora PK) 16. Sin duda, es el desencadenamiento de aludes el fenómeno que ha causado más inconvenientes en la circulación por esta carretera, cortada por este motivo en numerosas ocasiones, como, por ejemplo, recientemente en enero y febrero de 2015, febrero de 2018 o enero y noviembre de 2019. Todo ello a pesar de las medidas adoptadas para la protección de la vía, que consistieron en la instalación de varias viseras de derivación de aludes y mallas dinámicas a comienzos del año 2013. Debido a esta problemática la Consejería de Infraestructuras, Medioambiente y Cambio Climático del Gobierno del Principado de Asturias ha marcado la temática de este Trabajo Fin de Máster como de interés prioritario dentro del convenio firmado con la Universidad de Oviedo.

Existen algunos estudios previos de peligrosidad de esta vía, como por ejemplo el informe geotécnico encargado por la Consejería de Infraestructuras, Medioambiente y Cambio Climático del Gobierno del Principado de Asturias para el acondicionamiento parcial de la misma en 1991, el informe de ensayos dinámicos llevado a cabo con motivo de los hundimientos de la plataforma en 1992, o un informe para la corrección de deslizamientos y desprendimientos de roca en el año 2001. Desde el ámbito científico Rodríguez (1995) abordó un estudio geomorfológico del puerto de San Isidro, Poblete *et al.* (2016) y Poblete *et al.* (2019) analizaron el impacto de los aludes en la carretera AS-253.

Zona de estudio y características del vial

Desde un punto de vista geográfico la zona de estudio se encuentra en la zona suroriental de Asturias y pertenece al concejo asturiano de Aller (Figura 1). Se trata de una zona marcadamente montañosa donde se pueden observar dos alineaciones de montañas E-W, la primera al Norte, con las cumbres Peñas del Hombre (1.191 m), Peña Agúa (1633 m) y Pico Negro (1.837 m). Y la segunda al Sur, con las cumbres Peña

Cotelbu (1589 m), Peña Lagarelo (1.649 m), Pico Valverde (1.967 m) y Pico Torres (2.100 m), separando la cuenca cantábrica y la del Duero. La vegetación natural de esta zona ha sido modificada por el hombre debido a la actividad ganadera y agrícola generando zonas de pastos y prados, no obstante, destacan la presencia de hayedos, brezales, robledales, piornales, pequeñas fresnedas y helechales. En general se trata de una zona prácticamente despoblada, pero de elevado valor turístico, tanto por sus recursos naturales, cercana al parque natural de Redes, como deportivos, constituyendo el único acceso desde Asturias a las pistas de esquí de San Isidro y Fuentes de Invierno.

Las precipitaciones son abundantes, con más de 1.500 mm de media anual y temperaturas promedio inferiores a 6 °C a partir de los 1.500 m de altitud (Muñoz, 1982; Quirós y Fernández, 1996). Atendiendo a datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la precipitación total del año 2019 fue de 1056.1 mm, no obstante, estos datos están incompletos ya que el registro no es continuo y falta la información de los meses febrero, agosto y noviembre. Las principales precipitaciones se dan durante los meses de enero (221 mm), octubre (146 mm) y diciembre (275 mm), la temperatura media anual fue de 2.3 °C, registrándose temperaturas medias mensuales por debajo de los 0 °C entre diciembre y abril. El espesor máximo absoluto de nieve de los últimos cinco años ha variado entre los 100 cm (febrero de 2017) y los 425 cm (marzo de 2015 y abril de 2018), atendiendo a datos de la estación de esquí Fuentes de Invierno. Teniendo en cuenta los datos de precipitaciones y temperaturas, es frecuente que la mayor parte de las precipitaciones sean en forma de nieve, dando lugar a importantes acumulaciones de nieve desde finales de otoño hasta principios de primavera.

El número de estaciones meteorológicas en este sector de la Cordillera es reducido, y el registro de la estación meteorológica de San Isidro es incompleto. Lo que reduce la cantidad de información disponible. Las pocas estaciones existentes son relativamente recientes y aún no se dispone de un registro significativo.

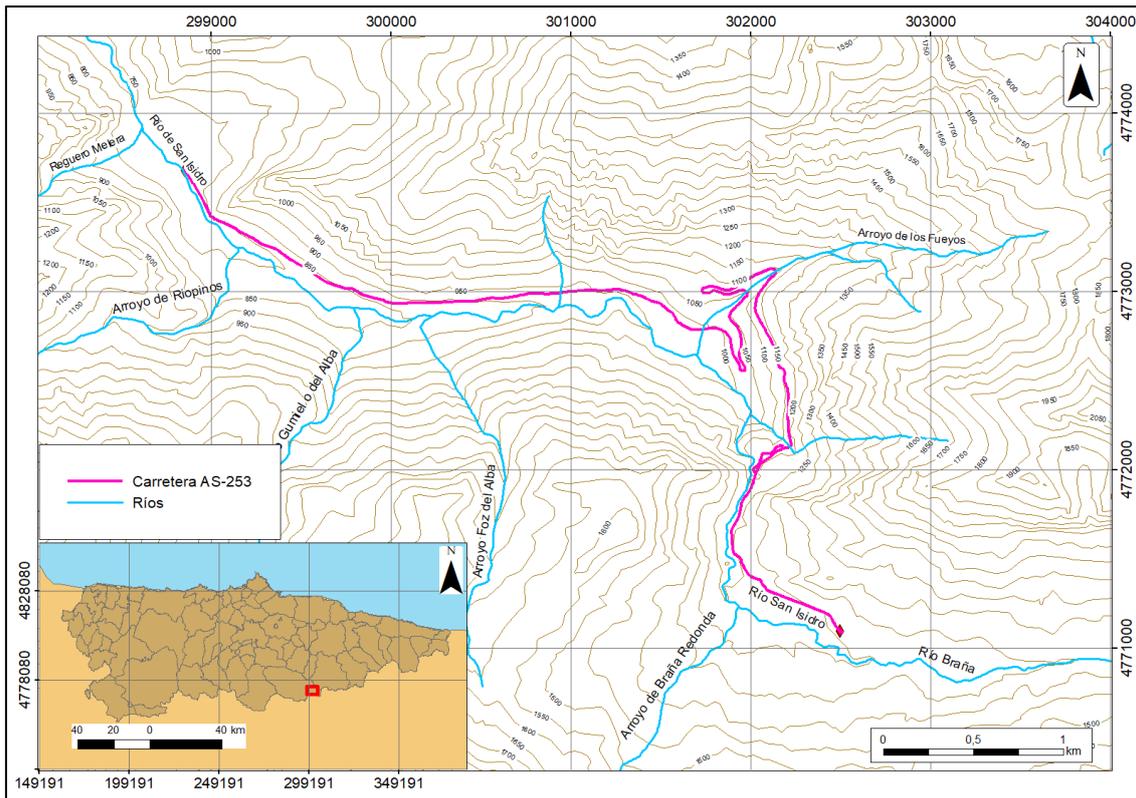


FIGURA 1: SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO (EL DIAMANTE IZQUIERDO SEÑALA LA LOCALIDAD DE CUEVAS Y EL DERECHO EL PUNTO KILOMÉTRICO 23 DE LA CARRETERA AS-253).

La zona objeto de estudio corresponde a un tramo de la carretera AS-253 que comienza en la localidad de Cuevas (Asturias) y termina en el punto kilométrico 23, a 2 km del puerto de San Isidro, (León) a 1520 m de altitud, el tramo se encuentra en su totalidad dentro del concejo asturiano de Aller.

Esta carretera pertenece a la Red de Carreteras del Principado de Asturias, a su vez, se considera como una carretera convencional atendiendo al Real Decreto 1812/1994, de 2 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Carreteras. (BOE, de 23 de septiembre de 1994).

Datos de IMD y % pesados en estaciones de aforo Principado de Asturias					
Carretera	Estación aforo	Ubicación (PK)	IMD 2012	IMD pesados 2012	% pesados 2012
AS-253	AS-253-015	15.000	567	34	5.91

TABLA 1: INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS Y PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS

Según los datos del año 2012 del Plan Director de infraestructuras para la movilidad de Asturias 2015-2030 este tramo de carretera tiene una intensidad media diaria (IMD) de vehículos de 567 vehículos y una IMD de vehículos pesados de 34, representando estos últimos un 5,91 % del total (Tabla 1). Atendiendo al nivel de servicio (Medida cuantitativa de la calidad de la vía y de las condiciones de explotación) se establece una clasificación que va de la A a la F. La AS-253 se clasifica como un tramo con un nivel de servicio A, encontrándose dentro del 57,85 % del total de la red comarcal con este nivel de servicio.

El tramo estudiado presenta una longitud aproximada de 7,5 km con un ancho de calzada que se encuentra entre los 6 y los 7 m de ancho y una velocidad media que se encuentra entre los 60 y los 79 km/h. Se considera que discurre por terreno accidentado al tener pendientes superiores al 25 %.

Según datos del Plan Director citado anteriormente el firme de aglomerado fue renovado en el año 2002, no obstante, debido al estado en que se encuentra se decidió realizar una tramificación. Del PK 0,000 al 7,197 se considera que el estado es bueno, entre los PK 7,197 y 12,520 (5,323 km) se considera regular y entre los PK 12,520 y 22,223 (9,703 km) se considera que su estado es malo.

Contexto geológico

Desde un punto de vista geológico esta zona se encuentra dentro de la Región de Pliegues y Mantos Julivert (1965). Con carácter general se caracteriza por la alternancia de cuarcitas ordovícicas, calizas y pizarras carboníferas. Desde un punto de vista estructural se pueden observar dos escamas de cabalgamientos, Laviana y Rioseco, que se han desplazado desde el oeste hacia el este y que posteriormente fueron plegadas formando el denominado anticlinal de San Isidro, por cuyo flanco norte transcurre la AS-253.

En la base de la sucesión estratigráfica se encuentran las calizas de la formación Láncara (Fig. 2), por encima aparecen las pizarras y areniscas de la formación Oville, seguidamente las cuarcitas de la formación Barrios, seguidas de las formaciones Ermita, Vegamián y Alba y posteriormente la formación Barcaliente. No obstante, a partir de este punto en el manto de Laviana se depositaron los materiales de la caliza de Peña Redonda

y del grupo Lena, correspondiendo a los materiales de la Cuenca Carbonífera Central (zona noroccidental de la Fig. 2). En la unidad del Ponga por encima de la formación Barcaliente se depositaron las formaciones Beleño, Escalada y Fito (zona suroriental de la Fig. 2).

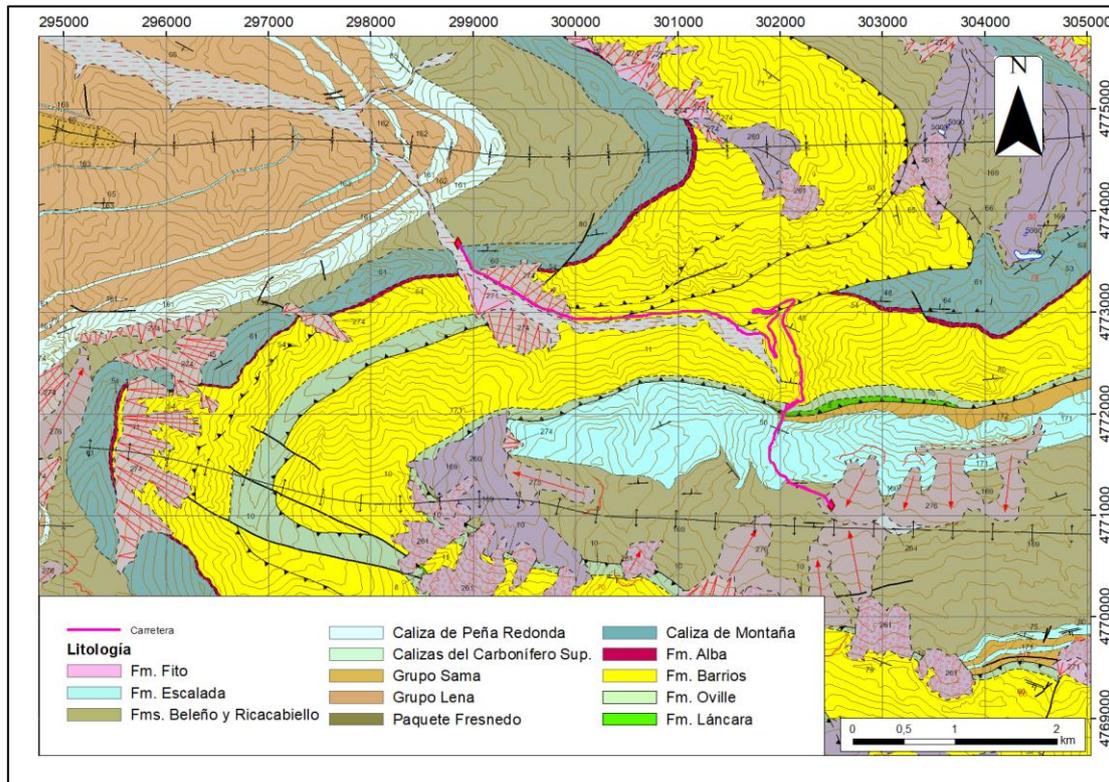


FIGURA 2: MAPA GEOLÓGICO GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO. TOMADO DE ÁLVAREZ-MARRÓN ET AL (1990).

Sustrato rocoso

Las principales características geológicas de las formaciones atravesadas por el trazado de la carretera objeto de estudio son las siguientes:

Fm. Láncara

Se trata de una formación principalmente carbonatada formada por calizas y dolomías en la que se diferencian dos miembros. El inferior está formado por depósitos litorales de llanura mareal, es un nivel calcáreo-dolomítico caracterizado por la presencia de dolomías amarillentas que presentan laminaciones debido a la presencia de bandas con pellets y cuarzo (Zamarreño, 1972; Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990). El miembro superior está formado por calizas grises bioclásticas y glauconíticas que corresponden con una plataforma marina abierta. (Zamarreño, 1972; Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990;

Álvarez *et al.*, 1994). Esta formación constituye el principal nivel de despegue de los cabalgamientos de la región.

Fm. Oville

Es una formación constituida principalmente por pizarras con un espesor que varía desde los 100 hasta los 800 m, aumentando hacia la zona más occidental de Asturias (Compte, 1937; Álvarez *et al.*, 1994). La parte inferior son pizarras verdosas con una sucesión de limolitas y areniscas glauconíticas a techo, con gran contenido paleontológico que permite datarlas como Cámbrico medio. La parte superior es una alternancia de areniscas cuarcíticas y pizarras grisáceas y verdosas. Las cuarcitas predominan a techo en transición con la formación cuarcítica que se encuentra encima. Son materiales de un ambiente sedimentario marino somero, con depósitos de plataforma que evoluciona a un delta. (Álvarez *et al.*, 1994)

Fm. Barrios

Formación equivalente a la Cuarcita Armoricana de Barrois (1882); se trata de cuarcitas blancas homogéneas con estratos decimétricos a métricos, un espesor que varía entre los 100 y los 1000 m y una edad que abarca desde el Cámbrico medio hasta el Ordovícico inferior (Álvarez *et al.*, 1994). Se trata de una secuencia transgresiva, en la base se encuentran depósitos fluviales que pasan a facies de transición y después a facies marinas. Desde un punto de vista paleontológico se encuentran icnofósiles como cruzianas y skolithos (Álvarez *et al.*, 1994).

Fms. Vegamián y Alba

La primera fue definida por Compte en 1959 y por Ginkel en 1965. Se trata de pizarras negras y verdes con niveles de chert y nódulos fosfatados (Álvarez *et al.*, 1994), aunque presenta también niveles de arenisca y de caliza. El espesor máximo que llega a alcanzar es de 50 m y se ha datado con conodontos como Tournaisiense. Son sedimentos de plataforma carbonatada en condiciones anóxicas (Adrichem Boogaert, 1967; Colmenero *et al.* 1988).

La segunda fue definida por Ginkel en 1965. Son calizas rojas nodulosas, margas y lutitas rojizas, llega a alcanzar los 45 m de potencia. Atendiendo a criterios paleontológicos se le ha asignado una edad Viseense-Namuriense. El ambiente sedimentario es una

plataforma uniforme, somera pero por debajo del nivel de base del oleaje (Wagner, 1963; Evers, 1967; Winkler Prins, 1968; Raven, 1983 y Colmenero *et al.* 1988).

Fm. Barcaliente

Esta formación está constituida por calizas micríticas tableadas de color negro o gris oscuro, con capas centimétricas o decimétricas. A techo pueden aparecer conglomerados calcáreos con cantos redondeados a subredondeados. Presenta un espesor variable entre los 15 y los 450 m y un tránsito gradual con la formación infrayacente (Álvarez *et al.*, 1994). Para datar esta unidad se utilizaron las edades del techo de la formación Alba (Namuriense) y de la base de las unidades del Ponga (Alportense). Se formaron en una plataforma carbonatada somera de circulación restringida (González Lastra, 1978).

Paquete Fresnedo

Se trata de pizarras calcáreas que pasan a pizarras arcillosas marrones que presentan niveles negros y pasadas de areniscas finas, poligénicas y generalmente cuarcíticas. Posee una potencia total de 470 m y marca el paso de la sedimentación calcárea representada por la Caliza de Montaña a la sedimentación terrígena (Álvarez *et al.*, 1994). La edad no ha podido ser determinada con exactitud, pero se le asigna una edad entre Namuriense y Westfaliense debido a su relación estratigráfica con la caliza de Peña Redonda (Álvarez *et al.*, 1994).

Grupo Lena

Potente grupo situado en la Cuenca Carbonífera Central, de hasta 650 m de espesor (Aller, 1981), formado por pizarras con intercalaciones de areniscas, limolitas, calizas y capas de carbón. Se le asigna una edad Namuriense superior o Westfaliense A inferior (Julivert, 1960).

Calizas de Peña Redonda

Se trata de una unidad integrada por calizas masivas de color gris claro descritas por Julivert (1960) y por García-Loygorri *et al.* (1971). Se diferencian dos bancos calcáreos entre los cuales se encuentra un nivel de pizarras calcáreas que, en conjunto, alcanzan un espesor total de 110 m y pertenecen al Westfaliense A (Álvarez *et al.*, 1994).

Fms. Beleño y Ricacabiello

La formación Ricacabiello pertenece al Manto del Ponga y fue descrita por Sjerp en 1967. Está formada por lutitas rojizas y nódulos de sílice y dióxido de manganeso, limolitas e intercalaciones carbonatadas en la base, presenta una potencia de 50 m y estudios paleontológicos le asignan una edad de Namuriense B inferior a Wesfaliense A (Álvarez *et al.*, 1994). Se puede encontrar en las zonas central y occidental de la Zona Cantábrica, no siguiendo las estructuras tectónicas (Pérez-Estaún, 1990).

La formación Beleño en este sector de Asturias está formada por pizarras grises con nódulos de siderita, con alguna intercalación de caliza de escasa importancia y alternancias de areniscas y pizarras (Pérez-Estaún, 1990). Presenta un espesor variable entre los 400 y los 800 m (Pérez-Estaún, 1990). Se le asigna una edad Kashiriense (Leyva *et al.*, 1985) y corresponde con facies de talud, abanico submarino y facies de plataforma (Pérez-Estaún, 1990; Winkler Prins, 1968).

Fm. Escalada

Situada sobre la Fm. Beleño, fue denominada Caliza de Escalada en 1965 por Ginkel. Está formada por calizas masivas entre las que se encuentran niveles detríticos con horizontes carbonosos a techo. Tiene 300 m de potencia y una edad que oscila entre el Vereiense y el Podolskiense superior-Myachkoviense inferior (Villa, 1981, 1985, 1989). Son calizas bioclásticas depositadas en un medio de plataforma carbonatada somera.

Fm. Fito

Definida por Ginkel en 1965, está formada por pizarras, areniscas, capas de carbón y capas calcáreas que alcanzan hasta los 50 m de espesor. La potencia máxima de la formación es de 700 m y se le asigna edad Podolskiense-Myachkoviense según los estudios paleontológicos (Villa, 1981, 1985). Los primeros 500 m corresponden con facies de regresión donde van aumentando las facies de canal, disminuyendo las deltaicas. Los últimos 200 m por el contrario representan una transgresión (Pérez-Estaún, 1990).

Estructura

A nivel regional la carretera de estudio se encuentra dentro de la región de pliegues y mantos de Julivert donde se pueden encontrar 3 unidades mayores: la Cuenca Carbonífera Central, la Unidad del Ponga y la Unidad del Pisuerga-Carrión (Julivert, 1971; Pérez-Estaún *et al.*, 1988). Destacan un conjunto de cabalgamientos de trazado muy

sinuoso debido a la presencia de pliegues E-O que los deforman. También existen numerosas fracturas, algunas de gran extensión lateral que cortan los cabalgamientos (Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990) (Fig. 3).

En la región Julivert y Marcos (1973) describieron dos sistemas de pliegues superpuestos, se trata de pliegues longitudinales y transversales para toda la zona cantábrica. Los primeros tienen la traza axial paralela a la traza de los cabalgamientos, están asociados a estructuras frontales y se encuentran mejor representados en las Unidades Occidentales y Meridionales, siendo difíciles de observar en la zona de trabajo. Los segundos serían perpendiculares a estos y en ellos tendríamos englobado el anticlinal de la zona de estudio, están asociados a rampas laterales (Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990).

Cortando los pliegues y cabalgamientos hay un sistema de fallas, por lo general inversas, que se sitúan preferentemente en el núcleo de los antiformes transversales. Poseen una dirección E-O (Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990).

La estructura local es un pliegue anticlinal con dirección este-oeste con cierre periclinal en el lado oeste que deforma dos o tres láminas de cabalgamiento como se puede observar en la figura 2.

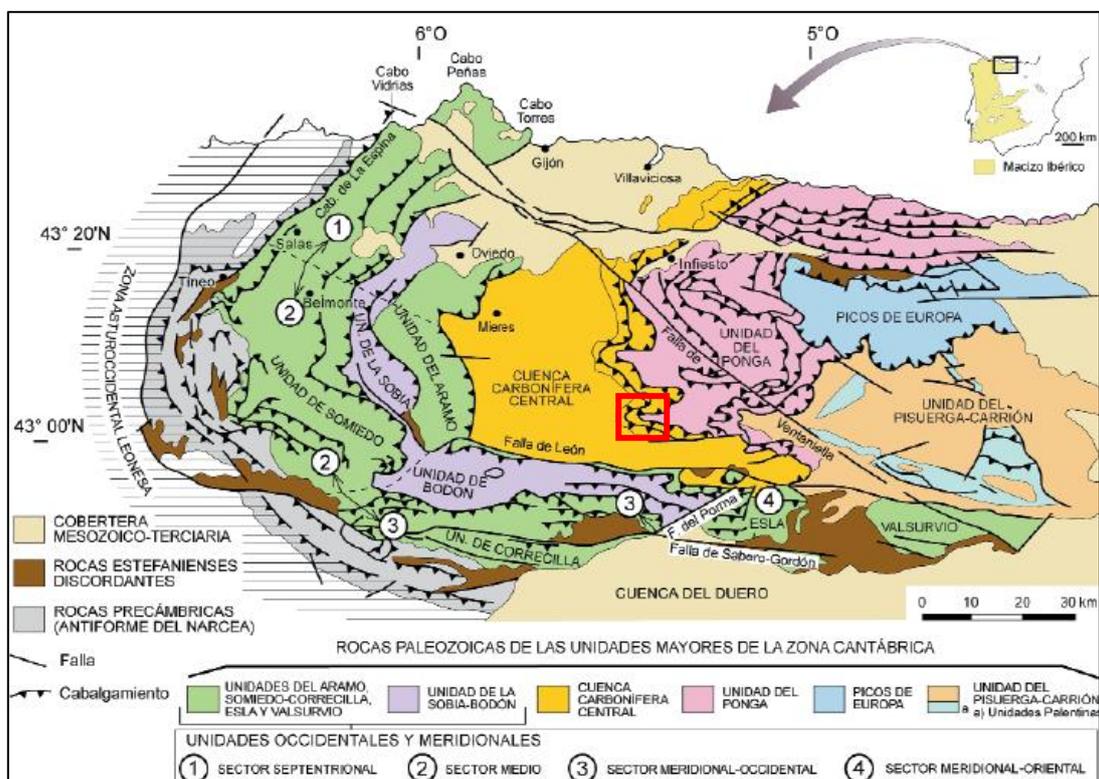


FIGURA 3: UNIDADES PRINCIPALES DE LA ZONA CANTÁBRICA (BASADO EN JULIVERT, 1971) (TOMADO DE VERA, 2004).

Hidrogeología

Desde un punto de vista hidrogeológico la zona de estudio se encuentra enmarcada dentro de la Unidad Hidrogeológica de la Región del Ponga (Murillo, 2010). Las principales formaciones susceptibles de actuar como acuíferos dentro de esta unidad son las carbonatadas, en especial, por sus características, las formaciones Barcaliente, Escalada y la caliza de Peña Redonda, ya que en zonas cercanas forman sinclinales con terminaciones periclinales hacia el Este y con charnelas inclinadas hacia el Oeste (Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990), presentan, en general, niveles de permeabilidad elevada, pero variable debido a la fisuración y karstificación presentes (Ortuño *et al*, 2004). Queda patente la importancia económica de estas unidades en el Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas de 1984 realizado por el IGME, donde se observa la presencia de 3 manantiales con un caudal superior a 25 l/s (Fig. 4). Cabe destacar por su importancia el manantial situado en la localidad de Cuevas, situado en estas litologías, por su alto caudal, la calidad del agua y por encontrarse actualmente en explotación.

La Formación Barrios posee interés hidrogeológico, ya que, a pesar de que presentan fuertes pendientes que favorecen la escorrentía superficial (Pérez-Estaún y Álvarez-Marrón, 1990) y se trata de una formación de permeabilidad muy baja o nula, a nivel de roca matriz existen zonas en las que se encuentra fracturada o alterada constituyendo niveles acuíferos asociados (Ortuño *et al*, 2004).

Los depósitos coluviales, pese a ser poco potentes, son de alta permeabilidad, y la formación infrayacente impermeable (Fm. Barrios) permite la acumulación de agua, en algunas zonas presentan una brecha superficial muy cementada por debajo de la cual se encuentran materiales más finos, en la zona de cambio granulométrico existen importantes aportaciones de agua.

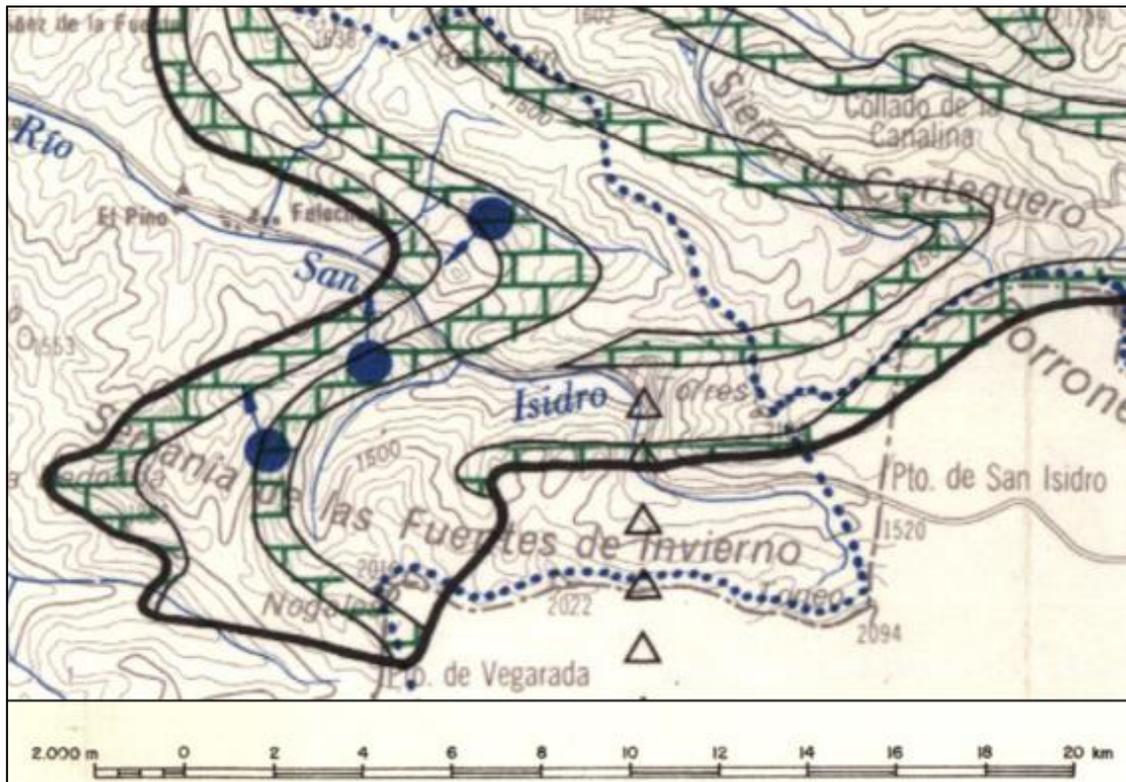


FIGURA 4: EXTRACTO DEL MAPA DE SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA DE ENTORNO DEL RÍO SAN ISIDRO DEL IGME (1984); LOS PUNTOS AZULES CORRESPONDEN CON MANANTIALES CON CAUDALES SUPERIORES A 25 L/S, LA TRAMA VERDE CORRESPONDE CON UNIDADES CALIZO-DOLOMÍTICAS DE ALTA PERMEABILIDAD.

Formaciones superficiales

En cuanto a las formaciones superficiales se pueden distinguir tres tipos de depósitos cuaternarios: de origen glaciar y periglacial, de origen fluvial y depósitos de gravedad.

Los primeros corresponden con depósitos glaciares rocosos, morrenas y depósitos fluvioglaciares. Son abundantes al Norte del puerto de San Isidro, pero no se encuentran en las proximidades de la zona de estudio (Modroño, 1991).

Los de origen aluvial se encuentran en el fondo de valle y están constituidos por gravas y bolos redondeados silíceos. También se pueden encontrar depósitos torrenciales situados por lo general, en cotas superiores a los 800 m de altitud observándose los canales en donde se encuentran bloques angulosos debido a avalanchas periódicas de rocas condicionados por la mayor o menor incidencia de las lluvias torrenciales (Modroño, 1991).

Por último, los depósitos de gravedad son los más abundantes, correspondiendo principalmente a canchales y coluviones. Los de naturaleza coluvial están constituidos por gravas y bloques angulosos dentro de una matriz areno-limosa. En algunas zonas, sus niveles más superficiales aparecen cementados, sector que puede alcanzar los tres metros de espesor. Los canchales se sitúan por lo general por encima de los 900 m de altitud y están constituidos por gravas y bloques silíceos, calcáreos o mixtos, angulosos y de dimensiones variadas (Modroño, 1991).

Riesgos geológicos

En zonas de montaña el riesgo se genera cuando fenómenos naturales pueden afectar a infraestructuras, como es el caso de la carretera AS-253, objeto de estudio en este trabajo. Son frecuentes los cortes en el acceso al puerto debido a los aludes desencadenados por las fuertes nevadas que suceden anualmente. Además de este fenómeno, esta carretera también suele verse afectada por diversos procesos gravitacionales.

Un alud es una porción del manto nival que, debido a una ruptura en las condiciones de equilibrio, se desprende y se desplaza por una vertiente o cuenca. En estos procesos se contraponen dos tipos de fuerzas, las motoras y las resistentes al movimiento. Por un lado, las fuerzas motoras son la componente tangencial del peso del manto nivoso o de cualquier carga que se pueda situar encima del mismo, y son lo que propicia el movimiento hacia la parte inferior de la ladera. Por el contrario, las fuerzas resistentes al movimiento son las que dificultan el mismo, como puede ser la cohesión de la nieve, la fricción y los posibles anclajes (Furdada, 2006).

La nieve, tras depositarse, sufre una serie de transformaciones condicionadas por la meteorología y el gradiente geotérmico, ya que estos alteran el gradiente térmico del manto nival. Como consecuencia, los copos de nieve, inicialmente independientes, se unen entre ellos de distintas formas en función de las condiciones (por ejemplo, granos pequeños unidos por puentes de hielo, granos grandes sin cohesión, o esferas de hielo unidas por capilaridad debida a una fina película de agua de fusión). En función del tipo de unión, evolucionarán de forma diferente y podrán desencadenar aludes de distinto tipo (Furdada, 2006).

De esta forma, y de forma simplificada, se puede decir que existen tres tipos de aludes diferentes:

- De nieve reciente: Se producen durante o inmediatamente después de las nevadas, su velocidad puede alcanzar los 300 km/h, suelen seguir trayectorias rectilíneas y suelen ser de nieve seca.
- De placa: Placas de nieve acumuladas por el viento se desplazan por encima de una placa de hielo o de nieve más competente que sirve como superficie de despegue. Presentan una cicatriz en la coronación.
- De fusión: Se producen cuando hay un aumento de la temperatura, tienen mayor capacidad erosiva que los anteriores, no suelen alcanzar los 20 km/h, se adaptan a la topografía del terreno y son de nieve húmeda.

Los aludes que afectan a la zona de estudio se corresponden, principalmente, con los aludes de fusión, siendo estos desencadenados por el paso de borrascas polares que entran en contacto con masas de aire cálido y producen la fusión del manto nival, aumentando el peso y reduciendo su estabilidad (Poblete *et al.*, 2019).

Por otro lado, para determinar el riesgo debido a procesos gravitacionales hay que tener en cuenta los dos tipos de materiales en los que se pueden desarrollar. Por un lado, tendríamos los materiales que presentan un comportamiento tipo suelo, donde se encuentran todos los depósitos de ladera, y por otro, los materiales que presentan comportamiento tipo roca. Este sería el caso de las principales formaciones rocosas del área de estudio.

En los primeros se pueden encontrar deslizamientos rotacionales y movimientos en masa (Fig. 5) y en los segundos se pueden encontrar roturas planares, en cuña, avalanchas rocosas y desprendimientos fundamentalmente debido a la elevada fracturación que presenta el macizo rocoso.

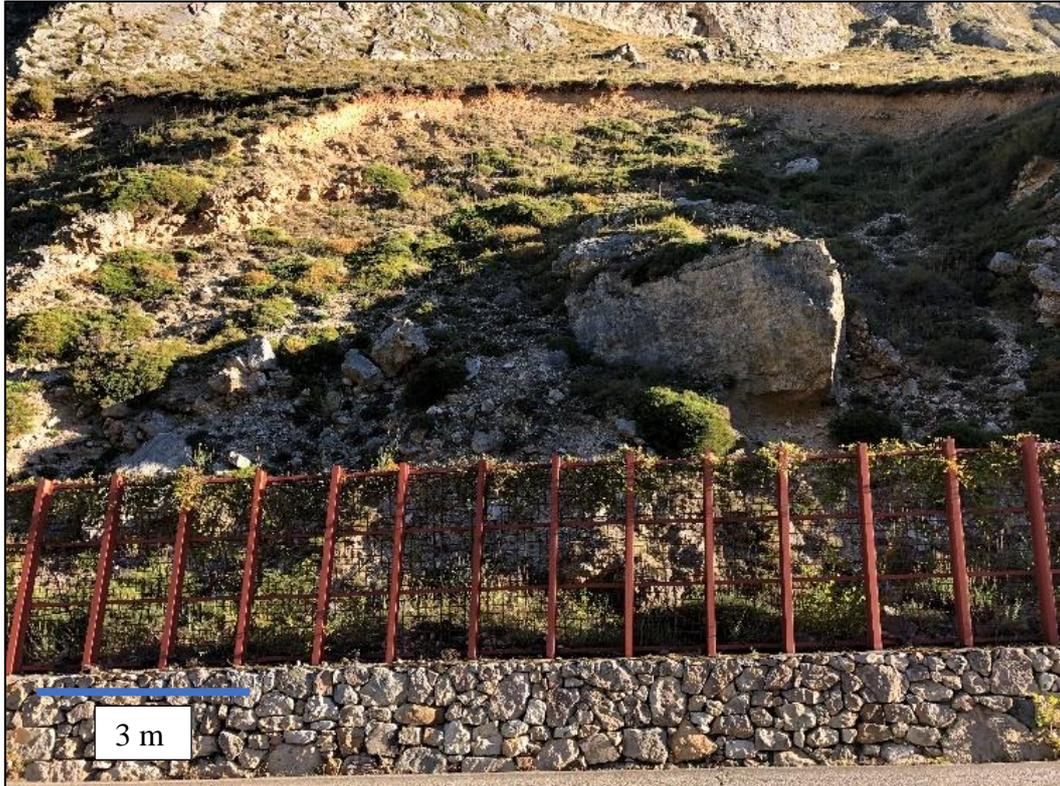


FIGURA 5: EJEMPLO DE DESLIZAMIENTO ROTACIONAL AFECTANDO A DEPÓSITOS COLUVIALES EN PK 15.790 DE LA CARRETERA AS-253.

Objetivos

Este Trabajo Fin de Máster se ha planteado la consecución de tres objetivos principales:

Identificar los sectores del trazado con mayor vulnerabilidad ante procesos gravitacionales en aquellas laderas donde no se hayan adoptado medidas de estabilización o protección (bulonado, hormigón proyectado, mallas de alambre, etc.) y adicionalmente valorar el estado de los diversos tipos de barreras, tanto estáticas como dinámicas, ya instaladas en la zona.

Elaborar una cartografía donde se diferencien las diferentes formaciones superficiales y procesos de inestabilidad de ladera observados (canchales, avalanchas, flujos, deslizamientos rotacionales, etc.), incidiendo especialmente en aquellos que pudieran afectar a la carretera.

Analizar la peligrosidad por aludes en la zona, delimitando las cuencas de recepción/acumulación de nieve y su potencial afección al trazado de la carretera. Asimismo, se ha tratado de identificar aquellas zonas que precisen nuevas medidas de protección a partir de la generación de una cartografía de elementos de protección.

2. Metodología

El primer paso realizado y sobre el que se fundamenta el cuerpo del trabajo es la elaboración de diversas cartografías, como son la de formaciones superficiales y procesos de inestabilidad de ladera, una cartografía con la ubicación de los diversos elementos de protección y sostenimiento existentes y una cartografía de zonas de peligrosidad de aludes.

A partir de esta documentación cartográfica se seleccionaron las zonas en las que realizar las estaciones para caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso y así determinar las zonas susceptibles a presentar roturas en cuña, deslizamientos planares o caídas de rocas. Para poder alcanzar estos objetivos se realizó una campaña de seis jornadas de campo, con el consiguiente trabajo de gabinete.

La primera de ellas se utilizó para obtener una visión general de la zona, analizar de forma preliminar el estado de los materiales presentes y vislumbrar los problemas que planteaba el tramo de carretera, como por ejemplo los tipos de deslizamientos que se pueden encontrar en función del tramo. También se identificaron los materiales que afloraban bajo el trazado de la carretera en las zonas accesibles con el objetivo de comprobar su nivel de apoyo, depósitos de tipo coluvión o de origen aluvial.

Para la realización de estas cartografías se utilizó como base la ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de máxima actualidad (2017) y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) LiDAR (Light detection and ranging) de 0.5 m de resolución, pertenecientes ambos al Instituto Geográfico Nacional y montados en el software ArcGIS, v. 10.5. Para elaborar el MDE se descomprimieron los archivos tipo LAZ con la herramienta *LAStools* para, a continuación, transformarlos en archivos de tipo LAS. Posteriormente se confeccionó un mosaico con todos los archivos que abarcan la totalidad de la zona mediante la herramienta *LASdataset* para, seguidamente, transformarlo en un archivo ráster con los datos de elevación.

Cartografía de formaciones superficiales

Para la elaboración de este mapa se realizó en primer lugar una cartografía previa en gabinete mediante las ortofotografías y el MDE generado anteriormente. Se creó una *geodatabase* general para todo el trabajo y un *feature class* de tipo polígono llamado “Formaciones superficiales”. En este nuevo archivo se definieron subtipos para poder

crear la clasificación de los diversos elementos, concretamente estos subtipos son: deslizamientos rotacionales, movimientos en masa, canchales activos, canchales inactivos, avalanchas rocosas, coluvión y fondo de valle (Anexo 2.2). Para facilitar el trabajo, a partir del MDE se generó un modelo sombreado de la zona, con y sin vegetación, así como un mapa de curvas de nivel.

Para determinar la actividad o inactividad de los canchales se tomó como único criterio la cantidad de vegetación que presentaran, considerándose inactivos los que aparecen recubiertos por la misma, ya que la presencia de esta implica la existencia de un periodo de tiempo en los que el canchal no ha recibido nuevo material y por lo tanto ha tenido tiempo para ser vegetado. Durante la segunda jornada de trabajo se comprobó y complementó esta cartografía de gabinete, inspeccionando las zonas en las que había dudas de la actividad del canchal y para determinar si ciertas zonas eran canchales o por el contrario podían clasificarse como avalanchas rocosas atendiendo al tamaño de los bloques.

Caracterización geomecánica del macizo

Para analizar las potenciales inestabilidades en roca que se pudieran producir en el macizo rocoso, se efectuó una caracterización del mismo a partir del levantamiento de cinco estaciones geomecánicas en las zonas del trazado que no poseían ningún tipo de sistema de protección y que, por su fracturación, son susceptibles de desencadenar procesos gravitacionales como caída de bloques, roturas planares o rotura de cuñas.

En estas estaciones geomecánicas se tomaron todos los datos estructurales necesarios para caracterizar el macizo rocoso, se estimó la resistencia a compresión simple mediante el uso de un martillo Schmidt de tipo N (Fig. 6) y se clasificó el mismo de acuerdo a su RMR (Bienawski, 1976). La ubicación de las estaciones geomecánicas realizadas se muestra en la figura 7.

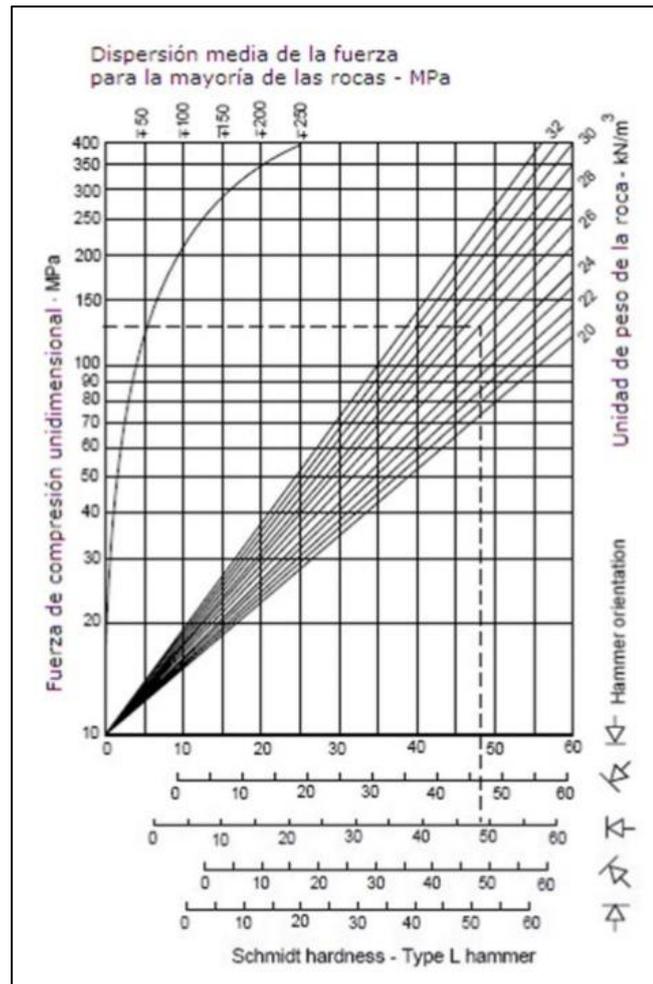


FIGURA 6: GRÁFICO DE MILLER DE DISPERSIÓN MEDIA DE VALORES DE RESISTENCIA (MILLER, 1965).

Los datos estructurales fueron integrados en el software Dips v. 5.1, del paquete RocScience, para obtener las proyecciones estereográficas y determinar las familias de juntas existentes mediante mapas de densidad de polos. Comparando las orientaciones de las juntas con la orientación del talud se determinó si existe la posibilidad de que generen roturas planares o cuñas.

Se considera que se pueden producir roturas planares cuando se cumplen dos condiciones:

- i. Que la diferencia de dirección entre junta y talud sea inferior a 20°
- ii. Que el buzamiento de la junta sea inferior al del talud para que la discontinuidad aflore en la pendiente del mismo.

Se ha considerado que se pueden producir cuñas cuando, en la proyección estereográfica dos familias de juntas intersectan entre sí y el buzamiento de la línea de intersección sea menor que el del plano del talud.

Una vez obtenidos estos datos se trabajó con los softwares RocPlane, versión 2.0, Swedge, versión 4.0 y RocFall, versión 4.0, para determinar las posibilidades de que se produzcan roturas planares, en cuña y caídas de bloques respectivamente.

Para el cálculo del Factor de Seguridad (FS) en RocPlane y Swedge se utilizaron el coeficiente de rozamiento interno (φ) y la cohesión (c), calculados por correlación con el RMR de Bienawski (1976) mediante las siguientes fórmulas:

$$c = 5 * RMR \text{ (kPa)}$$

$$\varphi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (deg)}$$

Una vez calculados los parámetros, se consideran estables todos aquellos taludes cuyo FS es igual o superior a 1.

Modelización de caída de rocas

Para la realización del estudio de desprendimientos rocosos se han seleccionado un total de siete perfiles topográficos (Fig. 7) en zonas sin presencia de barreras rígidas, con indicios de fenómenos de gravedad, tales como depósitos de canchales o de avalanchas rocosas, así como en zonas de grandes pendientes cercanas a la AS-253.

A lo largo de estos perfiles, obtenidos con el software ArcGIS, se abordó un estudio de las trayectorias seguidas por las rocas potencialmente desprendidas a lo largo del mismo. En cada caso, mediante el programa RocFall v. 4.0, se modelizaron las trayectorias seguidas por 500 rocas a partir de una zona de lanzamiento situada en la parte superior del perfil y se estimó la energía cinética de los que alcanzarían la carretera.

Considerando la cartografía de formaciones superficiales realizada, el MDE de la zona y la ortofotografía del PNOA se dividió cada perfil en sectores, asignando a cada uno un tipo de material. Se asignaron los coeficientes de restitución normal (R_n) y tangencial (R_t) más idóneos en cada sector del perfil de entre los sugeridos por el propio software RocFall (Tabla 2). El ángulo de fricción se calculó a partir del RMR, tomando como dato el valor medio de las cinco estaciones geomecánicas realizadas ($33,38^\circ$). Dada la

heterogeneidad de tamaños de los bloques se realizaron las simulaciones con bloques de 10 kg en los perfiles donde se observan canchales con bloques de tamaño centimétrico y de hasta 1.300 kg donde son de gran tamaño; este valor se ha obtenido tomando como densidad media de una cuarcita $2,6 \text{ g/cm}^3$ y un volumen medio de aproximadamente $0,5 \text{ m}^3$.

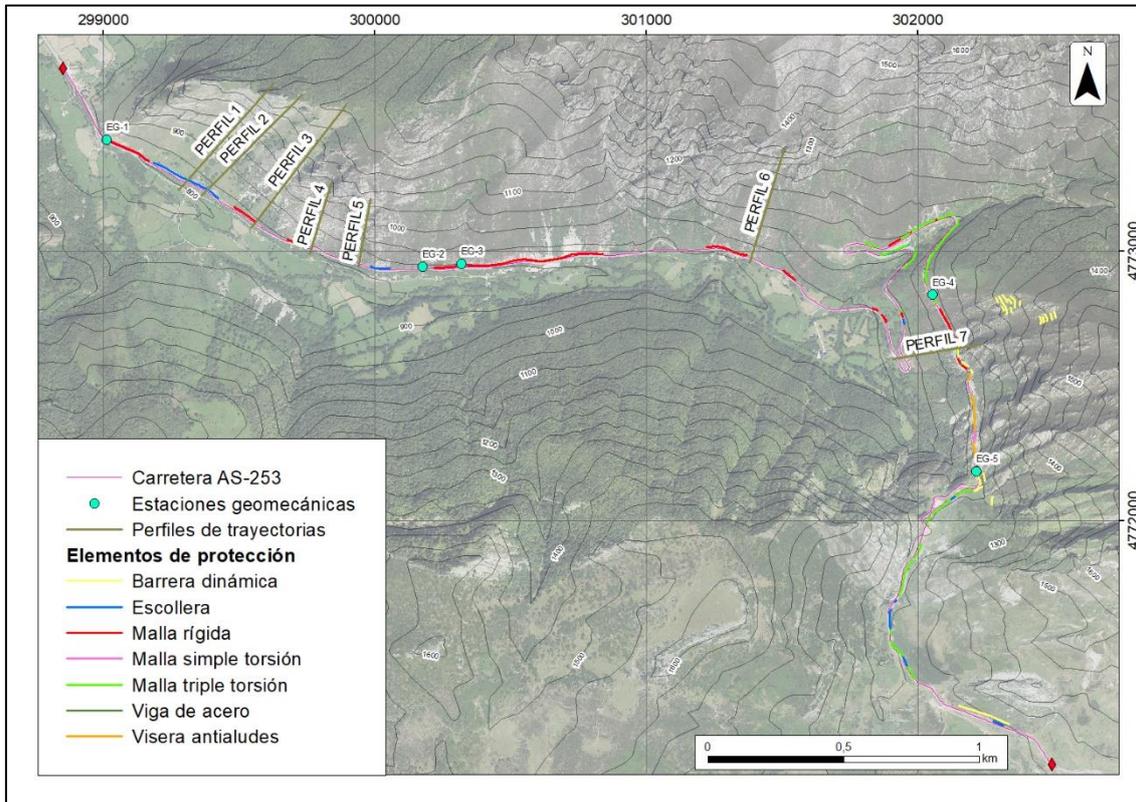


FIGURA 7: LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES GEOMECAÑICAS Y DE LOS PERFILES EN LOS QUE SE HAN ANALIZADO LAS POTENCIALES TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS.

Tipo de material	Coef. de restitución normal		Coef. de restitución tangencial	
	Media	desviación estándar	Media	desviación estándar
Asfalto	0,4	0,04	0,9	0,04
	Media	desviación estándar	Media	desviación estándar
Canchal	0,2	0	0,24	0
	Media	desviación estándar	Media	desviación estándar
Suelo con vegetación	0,39	0	0,57	0
	Media	desviación estándar	Media	desviación estándar
Sustrato rocoso	0,53	0,04	0,99	0,04
	Media	desviación estándar	Media	desviación estándar

TABLA 2: COEFICIENTES DE RESTITUCIÓN EMPLEADOS EN EL SOFTWARE ROCFALL EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MATERIAL DEL TALUD

Cartografía de peligrosidad por aludes

Para la elaboración de esta cartografía se partió del archivo ráster obtenido del LASdataset con los datos del MDE LiDAR de 0.5 m de resolución. Se creó un modelo de pendientes generando tres rangos, de 0 a 10°, de 10 a 30°, de 30 a 50° y de 50 a 90°. Se generó un modelo de orientaciones y un archivo ráster con la información de la cubierta vegetal a partir de los datos de (Álvarez *et al*, 1994) Se utilizó la herramienta ArcHydro, implementable en el software ArcGIS, para obtener un archivo vectorial con los polígonos que forman las cuencas de drenaje de la zona. El principal objetivo fue conocer los puntos en los que descargan dichas cuencas y delimitar su extensión.

Para generar las cuencas de drenaje y los cauces primero se comprobó que el MDE estuviera completo rellenando posibles celdas vacías con el comando *fill sinks*, se determinó seguidamente la dirección de flujo para cada una de las celdas para, posteriormente crear un mapa de flujo acumulado. A partir de este mapa se obtuvieron una serie de cauces mediante el comando “stream definition”. Por último, se segmentaron estos cauces y se establecieron las cuencas de drenaje. Dado el gran número de pequeñas cuencas calculado se fusionaron todas las cuencas que desembocaban en el mismo punto de la carretera.

Una vez obtenida toda esta información (cauces, cuencas de drenaje, mapa de pendientes, mapa de orientaciones, mapa de vegetación, modelo de altitud) se procedió a delimitar una zona de 10 m entorno a los cauces (*buffer*) y convertir los polígonos obtenidos a un archivo de tipo ráster. Dentro de cada ráster se efectuaron varias divisiones y se les adjudicó un valor entre 0 y 10 (Tabla 2).

Para el ráster de cauces se diferenciaron las zonas donde se encontraban los cauces y su zona anexa de 10 m, con un valor 10 y con un valor 0 para las zonas sin cauces de entidad.

Para el ráster de pendientes se separaron las zonas de 0 a 10° con valor 4, de 10 a 30° con valor 6, de 30 a 50° con valor 10, y de 50 a 90° con valor 6. La repetición de este valor 6 es debida a que estas altas pendientes no permiten la acumulación de un volumen de nieve suficiente como para producir aludes de entidad, no obstante, pueden ser factores desencadenantes de aludes en zonas con pendientes entre 30 y 50° que se encuentren por debajo.



Para las altitudes se separaron zonas cada 200 m, asignando valores mayores a mayor altitud, ya que el peligro de aludes se incrementa con la altura.

Para el ráster de vegetación se tuvo en cuenta la capacidad para retener la nieve, otorgando un valor mínimo a la vegetación arbórea, ya que tiene mayor capacidad de retención, y un valor máximo a la vegetación rupícola, ya que se trata prácticamente de roca desnuda.

Para el ráster de orientaciones se dio un valor máximo para las laderas Sur, valor 2 para las laderas Norte y un valor intermedio para las orientaciones Este y Oeste.

Una vez obtenidos los ráster se multiplicaron por un factor de corrección para darles distinto peso dentro del mapa final, considerando como variable más importante la presencia de uno de los cauces calculados previamente, seguido por la pendiente y la altitud, y estos seguidos por la vegetación y la orientación. Estos valores de ponderación se encuentran en la Tabla 3.

En el mapa obtenido el valor de celda varía entre 1,20 y 9,39. Los valores obtenidos y su correspondiente peligrosidad se encuentran recogidos en la Tabla 4.

Ponderación	Variable	Tipos / rangos	Valor
0,4	Cauce	No	0
		Sí	10
0,2	Pendiente	0-10	4
		10-30	6
		30-50	10
		50-90	6
0,2	Altitud	<1000 m	1
		1000-1200 m	2
		1200-1400 m	4
		1400-1600 m	6
		1600-1800 m	8
		>1800 m	10
0,1	Vegetación	Árboles	1
		Arbustos	6
		Hierba y prados	8
		Rupícola	10
0,1	Orientación	N/NE/NW	2
		S/SE/SW	10
		E/W	6

TABLA 3: VARIABLES DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE ALUDES.

Valor de celda	Peligrosidad
< 2	Muy baja
2-3	Baja
3-4	Media
4-5	Alta
> 5	Muy alta

TABLA 4: ASIGNACIÓN DE PELIGROSIDAD EN FUNCIÓN DEL VALOR DE CELDA.



Cartografía de elementos de protección

Esta cartografía se realizó íntegramente en fase de gabinete mediante el uso de *Google Earth* y de la ortofotografía del PNOA. Para ello se generó un archivo vectorial de tipo polilínea generando los siguientes subtipos: malla rígida, malla dinámica, malla de triple torsión, malla de simple torsión, escollera, viseras antialudes y vigas de contención (Anexo 2.1).

Una vez contrastado y complementado en fase de campo, se consideró necesaria la generación de un nuevo campo dentro de la tabla de ArcGIS para describir el estado de las barreras existentes, si estas presentan desperfectos graves, evidencian necesidad de ser vaciadas o, por el contrario, están en buen estado. Para realizar esta nueva clasificación se utilizó la tercera jornada de campo.

3. Resultados

Cartografía de formaciones superficiales

A la vista de la cartografía de formaciones superficiales realizada (Fig. 8) se pueden encontrar dos sectores claros. El primero, en la zona septentrional, con una dirección E-O donde destaca la presencia de un gran coluvión. Tapizando este, en la zona occidental destaca la presencia de 22 canchales activos y 8 inactivos. En la zona oriental, por otro lado, destaca la presencia de depósitos asociados a avalanchas rocosas de mayor entidad (Fig. 8).

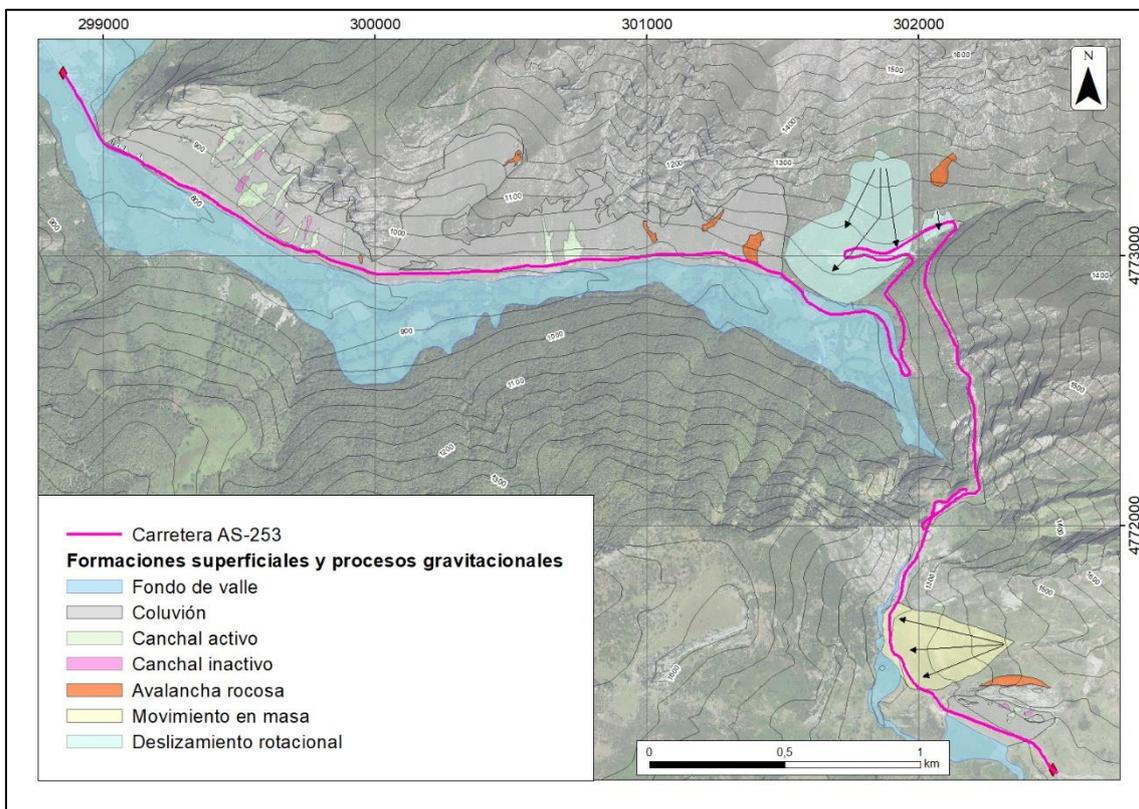


FIGURA 8: CARTOGRAFÍA DE FORMACIONES SUPERFICIALES Y PROCESOS GRAVITACIONALES.

También se observan cinco deslizamientos rotacionales de poca entidad en el coluvión en el PK 16, así como otro gran movimiento en masa en el PK 20, aparentemente estables en la actualidad. El cambio de vegetación permite distinguir la cicatriz de este movimiento, a la par que la presencia de vegetación indica de que se trata de un movimiento antiguo.

El segundo sector tiene una dirección N-S, comienza en el PK 20,412 y se caracteriza por la ausencia de suelos desarrollados, presencia del sustrato rocoso en superficie y altas

pendientes en las laderas. En la zona más meridional destaca la presencia de un gran movimiento en masa antiguo en el PK 22,220 y de un nuevo coluvión donde la carretera vuelve a tener una orientación E-W (Fig. 8).

Caracterización del macizo rocoso y estudio de estabilidad de taludes

A continuación, se describen los resultados de la caracterización del macizo rocoso en cinco estaciones geomecánicas. Estas han sido levantadas en diferentes puntos del trazado de la carretera y han sido utilizadas para realizar el estudio de estabilidad de taludes. Estas estaciones fueron realizadas en taludes donde aflora el sustrato rocoso, no hay presente ningún tipo de medida protectora y que puedan ser susceptibles de generar algún tipo de rotura (Fig. 7), tratando de realizarlas de tal modo que sean representativas de todo el trazado estudiado.

Estación geomecánica 1 (EG-1)

La estación geomecánica (EG-1) se encuentra en el PK 15,780, en un talud con orientación 84/224, en calizas tableadas de la Formación Barcaliente (Caliza de Montaña). El macizo rocoso se encuentra fracturado en bloques pequeños con un índice J_v entre 10 y 30. Presenta una resistencia muy dura de la matriz, un grado de meteorización I-II y no se aprecia presencia de agua en las discontinuidades.

A la altura del PK 15,760 se observa una falla de orientación 24/263 en cuyo plano se observa una surgencia de agua de carácter permanente (Fig. 9).

Se estimó una resistencia a compresión simple con martillo Schmidt entre 50 y 100 MPa, un RQD entre 25 y 50 % y un espaciado medio entre discontinuidades de aproximadamente 30 cm, con una longitud de las discontinuidades que en algunos puntos alcanzaba los 10 m, la apertura de juntas medida siempre es inferior a 1 mm y sin relleno. Se calculó un RMR de 47, siendo por tanto un macizo rocoso de clase III y calidad media (Anexo 1.1).

Se distinguen, por un lado, dos familias de discontinuidades: F1, con un buzamiento y sentido de buzamiento 58/177, y F2 86/082. Por otro lado, se identificó un grupo de diaclasas que no pertenecen a estas familias (J1, J2, J3, J4 y J5).

En la proyección estereográfica de estos datos se observa que las familias de juntas F1 y F2 son susceptibles de producir roturas en cuña. En cuanto a las discontinuidades no asignables a familias claras, muestran una dirección subparalela a la orientación del talud, pero, buzan en direcciones opuestas, por lo que no son susceptibles de producir roturas planares (Anexo 1.1).

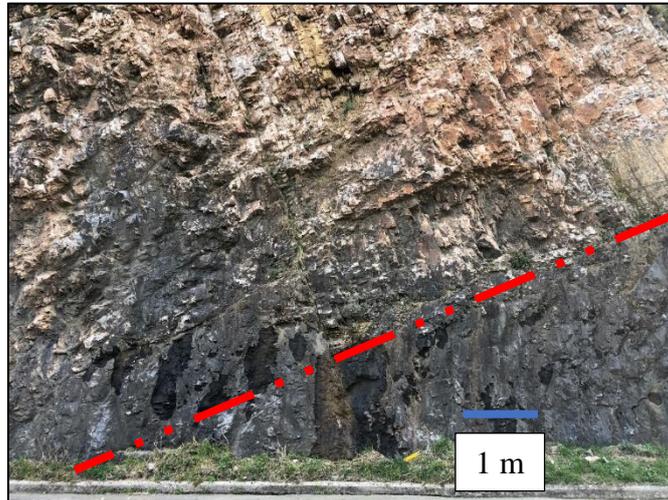
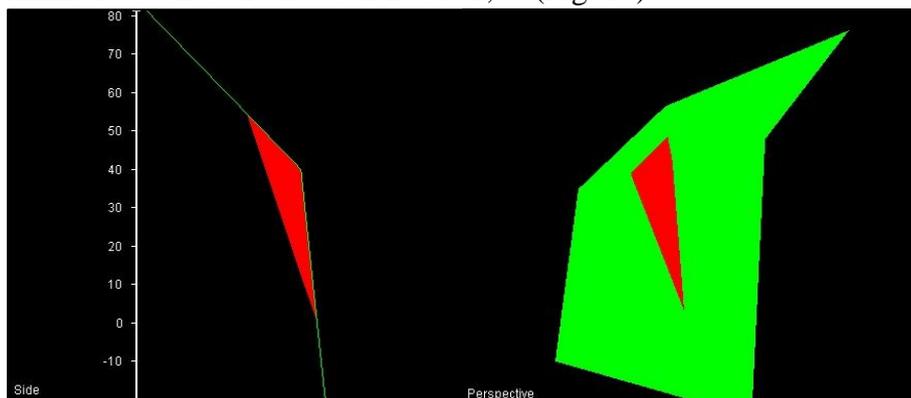


FIGURA 9: ASPECTO DEL MACIZO ROCOSO EN LA ESTACIÓN GEOMECÁNICA EG-1. EN ROJO SE INDICA EL TRAZADO DE UNA FALLA A LO LARGO DE LA CUAL ES POSIBLE ENCONTRAR SURGENCIAS DE AGUA.

Se ha estimado una cohesión de 234,95 kPa ($c = 5 \cdot \text{RMR}$ (kPa)) y un ángulo de rozamiento de $28,5^\circ$ para la posible rotura en cuña entre las F1 y F2. Esta se trataría de una cuña inversa, ya que ambas buzan en la misma dirección. Mediante un análisis de tipo determinístico se ha calculado un FS de 2,88 (Fig. 10).



Factor de Seguridad	2,88
Altura de cuña (en el talud)	40 m
Anchura de cuña (en cara superior)	20 m
Volumen de cuña	1699 m ³
Peso de cuña	4417 t
Fuerza resistente	10803 t

FIGURA 10: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA SWEDGE EN LA ESTACIÓN EG-1.

Estación geomecánica 2 (EG-2)

La EG-2 se encuentra en el PK 17,187, en un talud con orientación 78/180, en cuarcitas de la formación Barrios. El macizo rocoso se encuentra fracturado en bloques pequeños, con un índice J_v entre 10 y 30, una resistencia muy dura de la matriz, leves signos de meteorización, grado I-II y sin presencia de agua.

Se estimó una resistencia a compresión simple mediante martillo Schmidt entre 100 y 250 MPa, un RQD entre 25 y 50 % y un espaciado medio de las discontinuidades entre los 20 y los 60 cm con una continuidad entre los 3 y los 10 m. La apertura por lo general es inferior a 1 mm y sin relleno. Se calculó un RMR de 57, siendo por tanto un macizo rocoso de clase III y calidad media (Anexo 1.2).

Se distinguen 3 familias claras de diaclasas, dos de ellas subverticales: F1 (81/169) y F2 (87/061) y una subhorizontal: F3 (03/053). Aparte de estas 3 familias claras se tomaron datos de 4 diaclasas que no encajan dentro de ninguna de estas tres familias, J1 (70/281), J2 (61/320), J3 (48/002), J4 (60/257).

En la proyección estereográfica se observa que, todas las juntas medidas tienen orientaciones que reflejan condiciones de estabilidad, sin posibilidades de generar roturas planares o en cuña. F1 tiene una dirección subparalela al talud con solo 11° de diferencia y un buzamiento mayor que el del talud, por lo que no es susceptible de producir rotura planar (Anexo 1.2).

Estación geomecánica 3 (EG-3)

La EG-3 se encuentra en el PK 17,387, en un talud con orientación 72/180, en cuarcitas de la Formación Barrios. El macizo rocoso se encuentra fracturado en bloques pequeños, con un índice J_v entre las 10 y las 30 juntas por m^3 . Presenta una resistencia muy dura de la matriz, sin aparentes signos de meteorización y sin presencia de agua.

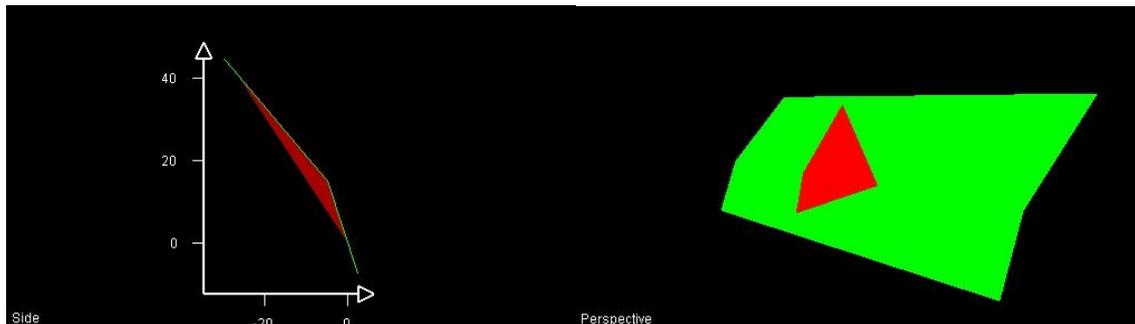
Se estimó una resistencia a compresión simple mediante martillo Schmidt entre 100 y 250 MPa, un RQD entre 50 y 75 % y un espaciado medio de las discontinuidades entre los 20 y los 60 cm, con una continuidad entre 1 y 3 m. La apertura es inferior a 1 mm y presenta un relleno cuarcítico menor de 5 mm. Se calculó un RMR de 69, siendo por tanto un macizo rocoso de clase II y buena calidad (Anexo 1.3).

Se distinguen 3 familias de diaclasas, F1 (58/185), F2 (79/081) y F3 (80/302). A parte se midieron cuatro diaclasas que no encajan dentro de estas tres familias J1 (25/016), J2 (69/268), J3 (54/066) y J4 (38/060).

F1 es susceptible de generar roturas planares, ya que su dirección solo varía 5° respecto a la orientación del talud y presenta un buzamiento menor que el de este.

La carretera se sitúa al sur del talud, por lo que la junta aflora en la superficie de este. F2 y F3 intersectan con F1 al sur del talud, pudiendo generar roturas en cuña. La intersección de F2 y F3 se produce al norte del talud, dándose condiciones de estabilidad. J1, J2, J3 y J4 no son susceptibles de generar roturas en el talud (Anexo 1.3).

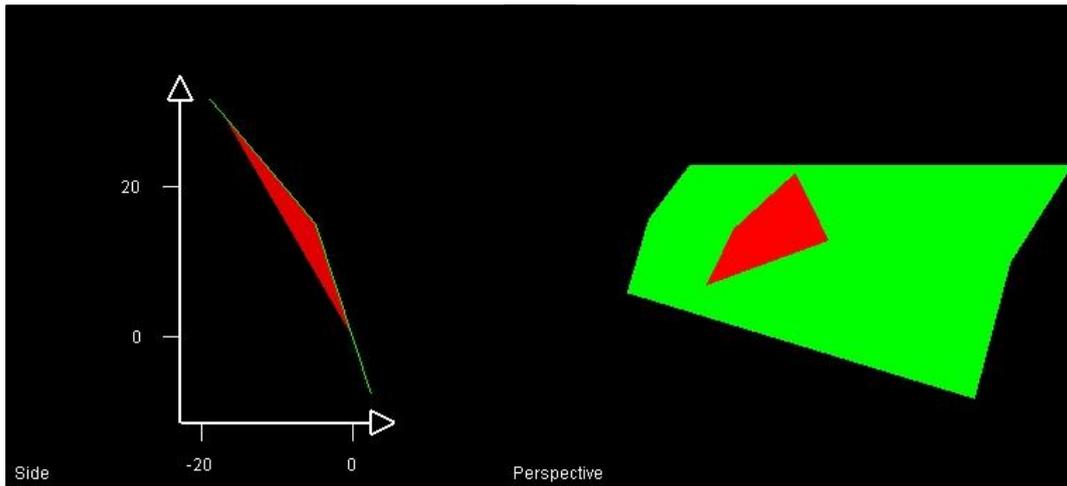
Se ha estimado una cohesión de 355,02 kPa y un ángulo de rozamiento de 39.5° para la posible rotura en cuña entre F1 y F2. Se trata de una cuña normal, ya que cada junta buza en distinta dirección. Mediante un análisis de tipo determinístico se ha calculado un FS de 14,09, presentando por tanto condiciones de estabilidad (Fig. 11).



Factor de Seguridad	14,09
Altura de cuña (en el talud)	15 m
Anchura de cuña (en cara superior)	35 m
Volumen de cuña	1897 m ³
Peso de cuña	4932 t
Fuerza resistente	56400 t

FIGURA 11: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA SWEDGE EN LA ESTACIÓN EG-3 ENTRE F1 Y F2.

Se ha estimado una cohesión de 355,02 kPa y un ángulo de rozamiento de 39.5° para la posible rotura en cuña entre F1 y F3. Se trata de una cuña inversa. Mediante un análisis de tipo determinístico se ha calculado un FS de 14,88, presentando por tanto condiciones de estabilidad (Fig. 12).



Factor de Seguridad	14,88
Altura de cuña (en el talud)	15 m
Anchura de cuña (en cara superior)	19 m
Volumen de cuña	850 m ³
Peso de cuña	2211 t
Fuerza resistente	27888 t

FIGURA 12: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA SWEDGE EN LA ESTACIÓN EG-3 ENTRE F1 Y F3.

Utilizando los mismos valores de cohesión y ángulo de rozamiento interno, para una posible rotura planar producida por F1 mediante un análisis determinístico, se ha calculado un FS de 8,75, reflejando condiciones de estabilidad (Fig. 13).

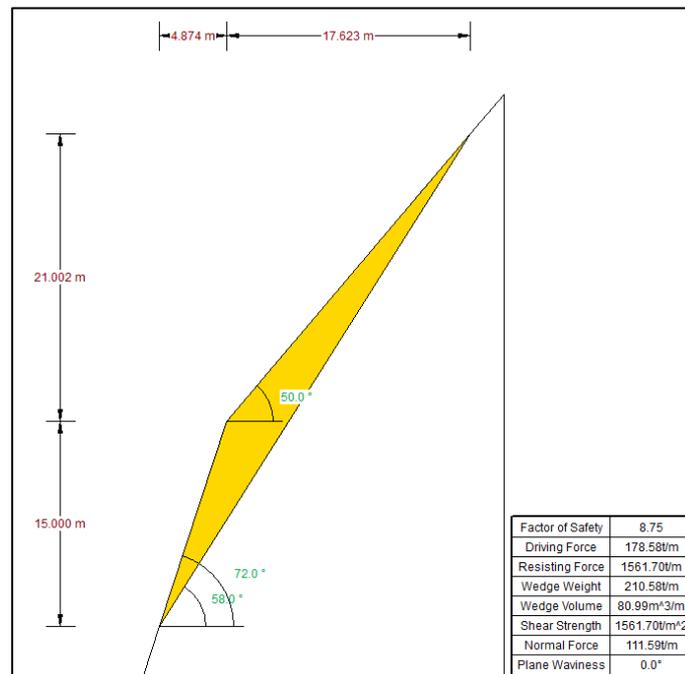


FIGURA 13: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCPLANE EN LA ESTACIÓN EG-3 PARA F1

Estación geomecánica 4 (EG-4)

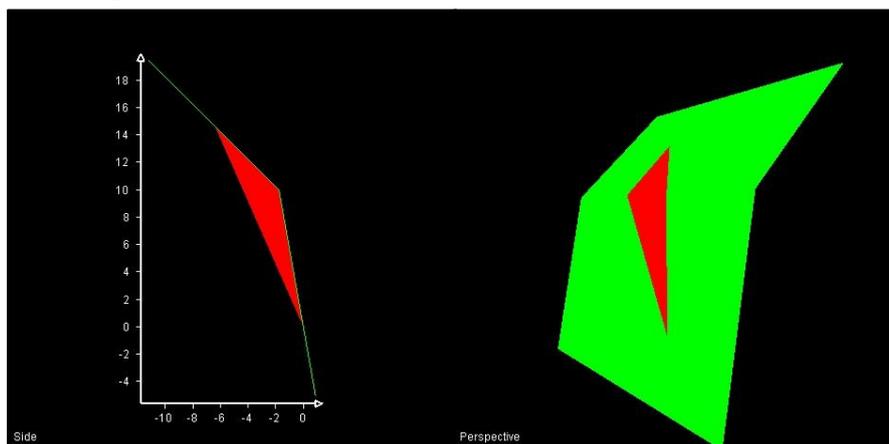
La EG-4 encuentra en el PK 20,668, en un talud con orientación 80/240, en cuarcitas de la formación Barrios. El macizo rocoso se encuentra fracturado en bloques muy pequeños, con un índice J_v superior a 30. Presenta una resistencia muy dura de la matriz, leves signos de meteorización (grado I-II) y no hay presencia de agua.

Se estimó una resistencia a compresión simple mediante martillo Schmidt entre 100 y 250 MPa, un RQD entre el 25 y el 50 % y un espaciado medio de las discontinuidades entre los 6 y los 20 cm, con una continuidad entre 3 y 10 m. La apertura es inferior a 1 mm con un relleno cuarcítico menor de 5 mm. Se calculó un RMR de 58, siendo por tanto un macizo rocoso de clase III y calidad media (Anexo 1.4).

Se distinguen tres familias claras de diaclasas: F1 (55/193), F2 (89/100) y F3 (39/037).

F1 y F2 intersectan al suroeste del talud, siendo susceptibles de generar cuñas. F3 no es susceptible de generar rotura planar ya que supera los 20° de diferencia respecto a la orientación del talud y buza en sentido opuesto a la carretera (Anexo 1.4).

Se ha estimado una cohesión de 289,95 kPa y un ángulo de rozamiento de 34° para la posible rotura en cuña entre F1 y F2. Se trata de una cuña inversa. Mediante un análisis de tipo determinístico se ha calculado un FS de 8,68, presentando por tanto condiciones de estabilidad (Fig. 14).



Factor de Seguridad	8,68
Altura de cuña (en el talud)	15 m
Anchura de cuña (en cara superior)	10 m
Volumen de cuña	120 m ³
Peso de cuña	312 t
Fuerza resistente	2215 t

FIGURA 14: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA SWEDGE EN LA ESTACIÓN EG-4.

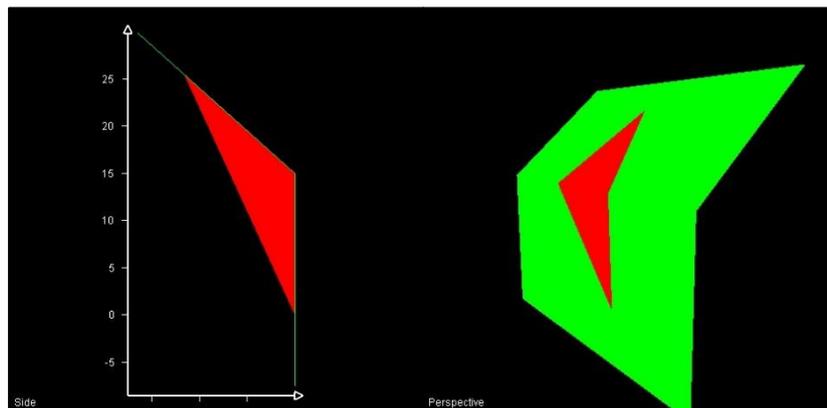
Estación geomecánica 5 (EG-5)

La EG-5 se encuentra en el PK 21,622, en un talud con orientación 90/233, en cuarcitas de la Formación Barrios. El macizo rocoso se encuentra muy brechificado, con un índice J_v superior a 60. Presenta una resistencia muy dura de la matriz, leves signos de meteorización (grado I-II) y sin presencia de agua.

Se estimó una resistencia a compresión simple mediante martillo Schmidt entre 100 y 250 MPa, un RQD entre 25 y 50 %, con un espaciado medio de las discontinuidades entre los 6 y los 20 cm y una continuidad entre 3 y 10 m. La apertura de forma generalizada es inferior a 1 mm con un relleno cuarcítico menor de 5 mm. Se calculó un RMR de 53, siendo por tanto un macizo rocoso de clase III y calidad media (Anexo 1.5).

Se distinguen tres familias de diaclasas: F1 (61/195), F2 (59/040) y F3 (88/112). A parte se midió una diaclasa J1 (33/028), que no se puede asignar a ninguna de estas familias. F1, F2 y F3 presentan condiciones de estabilidad para roturas planares, no obstante, F1 y F3 intersectan al suroeste del talud, siendo susceptibles de generar roturas en cuña (Anexo 1.5).

Se ha calculado una cohesión de 265,04 kPa y un ángulo de rozamiento de $31,5^\circ$ para la posible rotura en cuña entre F1 y F3. Se trata de una cuña normal. Mediante un análisis de tipo determinístico se ha calculado un FS de 8,59, presentando por tanto condiciones de estabilidad (Fig. 15).



Factor de Seguridad	8,59
Altura de cuña (en el talud)	15 m
Anchura de cuña (en cara superior)	16 m
Volumen de cuña	16 m ³
Peso de cuña	976 t
Fuerza resistente	7336 t

FIGURA 15: RESULTADOS DE ANÁLISIS DETERMINÍSTICO REALIZADO CON EL PROGRAMA SWEDGE EN LA ESTACIÓN EG-5 ENTRE F1 Y F3.

Análisis de la trayectoria de bloques rocosos desprendidos

A continuación, se describen los resultados de las modelizaciones de trayectorias de rocas desprendidas efectuadas en siete perfiles representativos de la carretera objeto de estudio. La localización de estos perfiles puede consultarse en la figura 7.

Perfil 1

Este perfil se encuentra en el PK 16,185. Alcanza una longitud de 415 m y presenta una orientación NE-SO. Se pueden distinguir en el mismo cuatro sectores.

(i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta una fuerte pendiente próxima a los 60° y abarca los primeros 143 m; (ii) el segundo corresponde con un canchal de 129 m de longitud que posee una pendiente de 41° ; (iii) el tercero corresponde a suelo con vegetación, asociado al coluvión desarrollado en la ladera que posee una pendiente media de 35° ; (iv) el cuarto corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 375 m (Fig. 16).

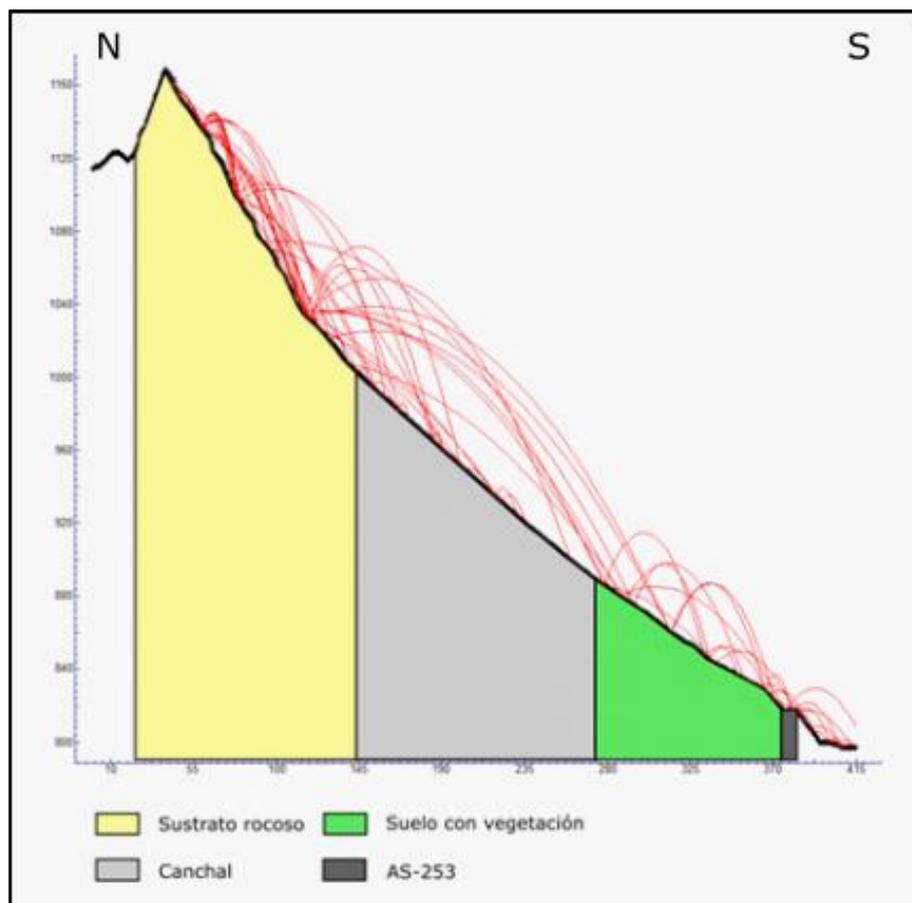


FIGURA 16: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 1 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 25 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar la carretera objeto de estudio (Fig. 17), el 69 % quedan retenidos en el canchal, mientras que el 6 % lo hacen en el coluvión.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metro 381,6 del perfil) se observa que la energía cinética de los bloques que la alcanzan se sitúa entre 0,66 kJ, y 7,31 kJ, no obstante, el 80 % de los datos se encuentran por debajo de 2,00 kJ (Fig. 18).

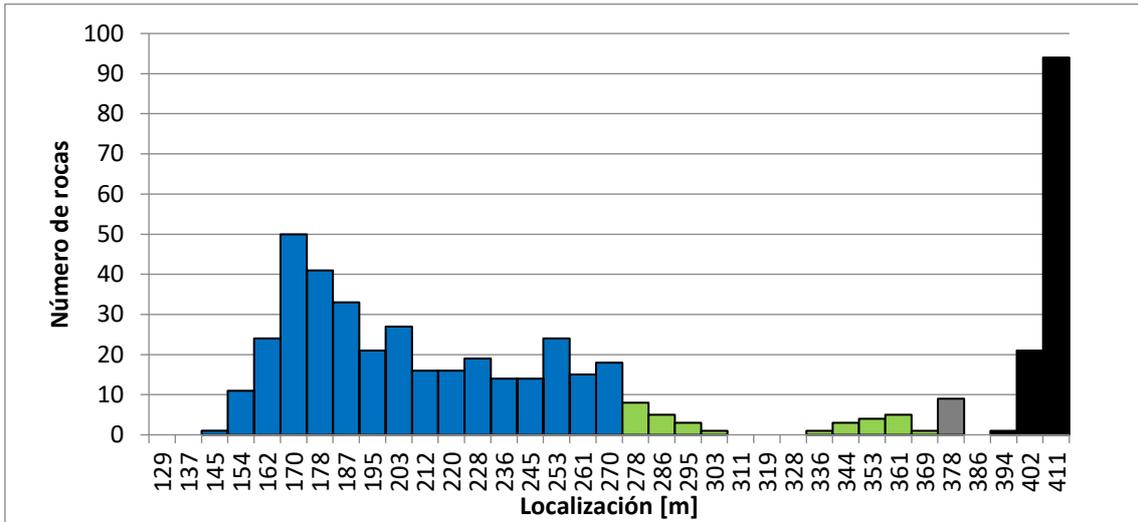


FIGURA 17: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 10 KG LANZADAS EN EL PERFIL 1; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN GRIS LAS ROCAS QUE ALCANZAN LA AS-253, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

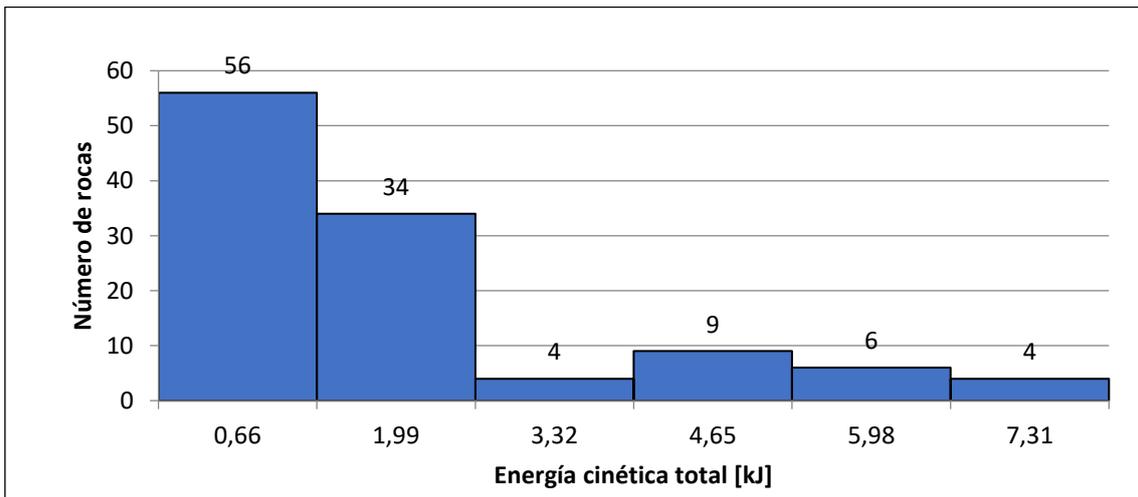


FIGURA 18: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 1, CONSIDERANDO QUE SE LANZARON 500 BLOQUES.

Perfil 2

Este perfil se encuentra en el PK 16,266. Alcanza una longitud de 415 y presenta una orientación NE-SO. Se pueden distinguir cinco sectores.

(i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta dos escalones con fuertes pendientes próximas a los 85° en el inicio que llega a suavizarse hasta los 42° y abarca los primeros 104 m; (ii) el segundo corresponde con 35 m de suelo con vegetación con una pendiente de 44° ; (iii) el tercero corresponde con un canchal de 135 m de longitud con una pendiente media de 42° ; (iv) el cuarto corresponde de nuevo con materiales de coluvión (106 m) con una pendiente media de 37° ; (v) el quinto corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 389 m (Fig. 19).

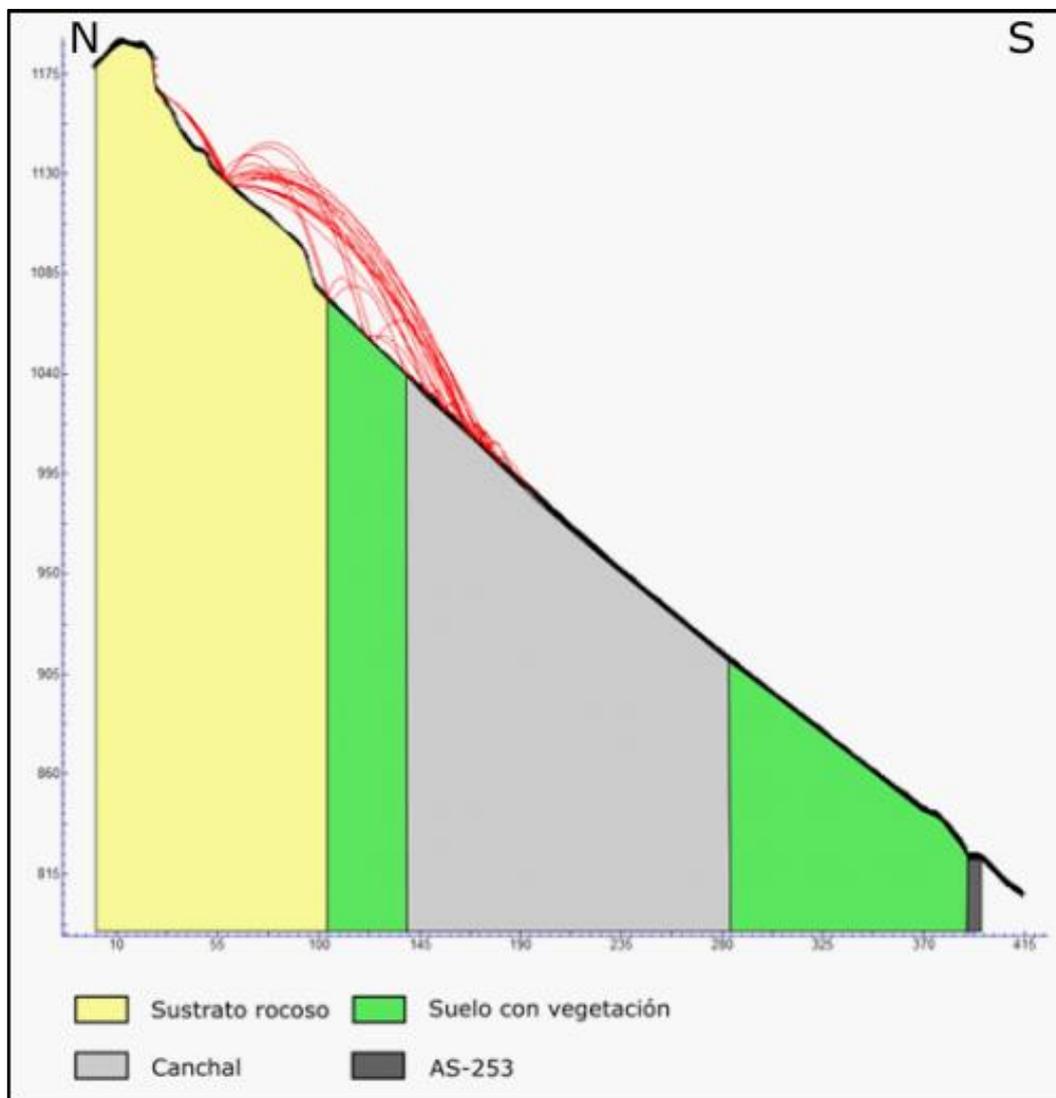


FIGURA 19: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 2 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

El 100 % de los bloques quedan detenidos en el canchal, por lo que ninguna roca llega a la carretera (Fig. 20).

En la figura 21 se observa un pico de energía cinética de 15,57 kJ, energía disipada antes de alcanzar el final del canchal.

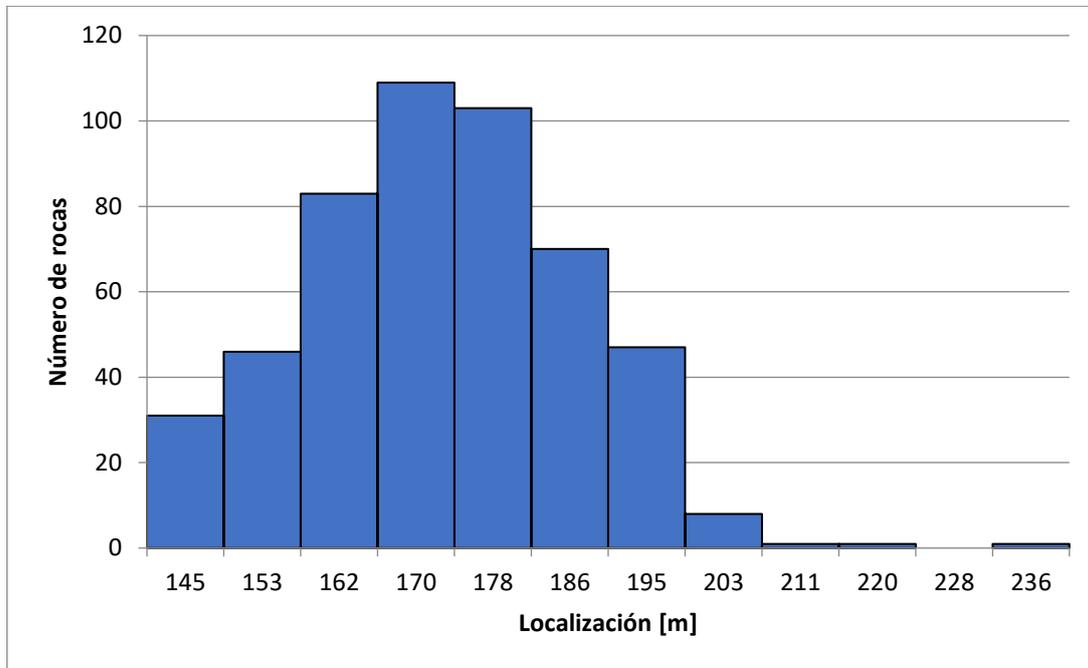


FIGURA 20: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 10 KG LANZADAS EN EL PERFIL 2; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL.

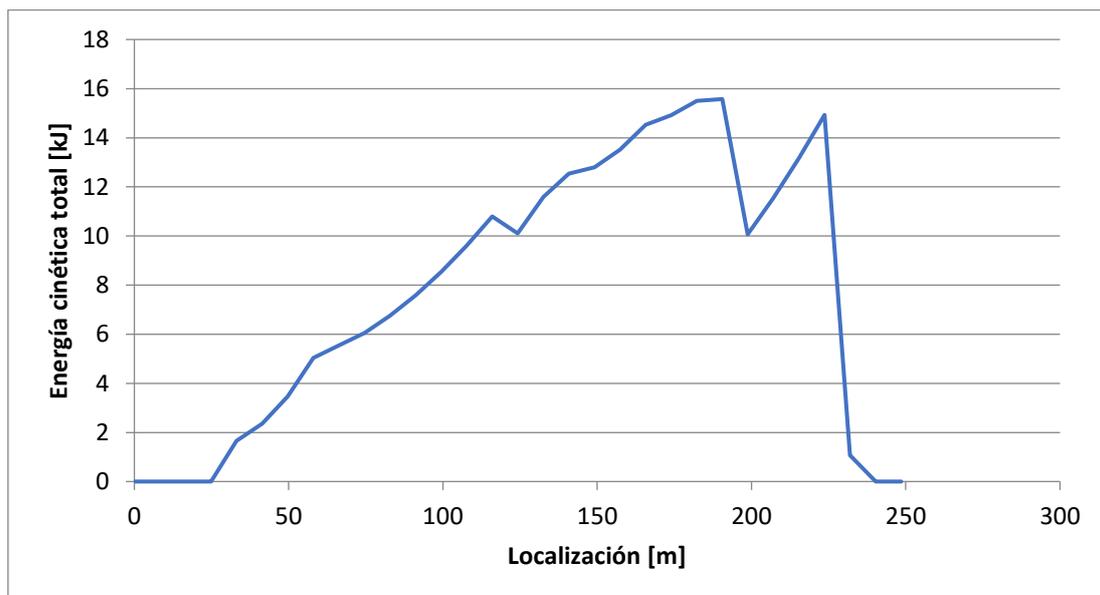


FIGURA 21: EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA PARA ROCAS DE 10 KG EN EL PERFIL 2.

Perfil 3

Este perfil se encuentra en el PK 16,482. Alcanza una longitud de 440 m y presenta una orientación NE-SO. Se pueden distinguir siete sectores.

(i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta una pendiente próxima a los 40° y abarca los primeros 107 m; (ii) el segundo corresponde con 73 m de suelo con vegetación con una pendiente de 45° ; (iii) el tercero corresponde de nuevo con 40 m de sustrato rocoso con una pendiente media de 44° ; (iv) el cuarto corresponde de nuevo a 15 m de suelo con vegetación (coluvión) con una pendiente media de 44° ; (v) el quinto corresponde con el canchal (167 m) con una pendiente de 40° ; (vi) el sexto corresponde con un tercer tramo de coluvión, con una pendiente de 40° y una longitud de 32 m; (vii) el último tramo corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 428 m (Fig. 22).

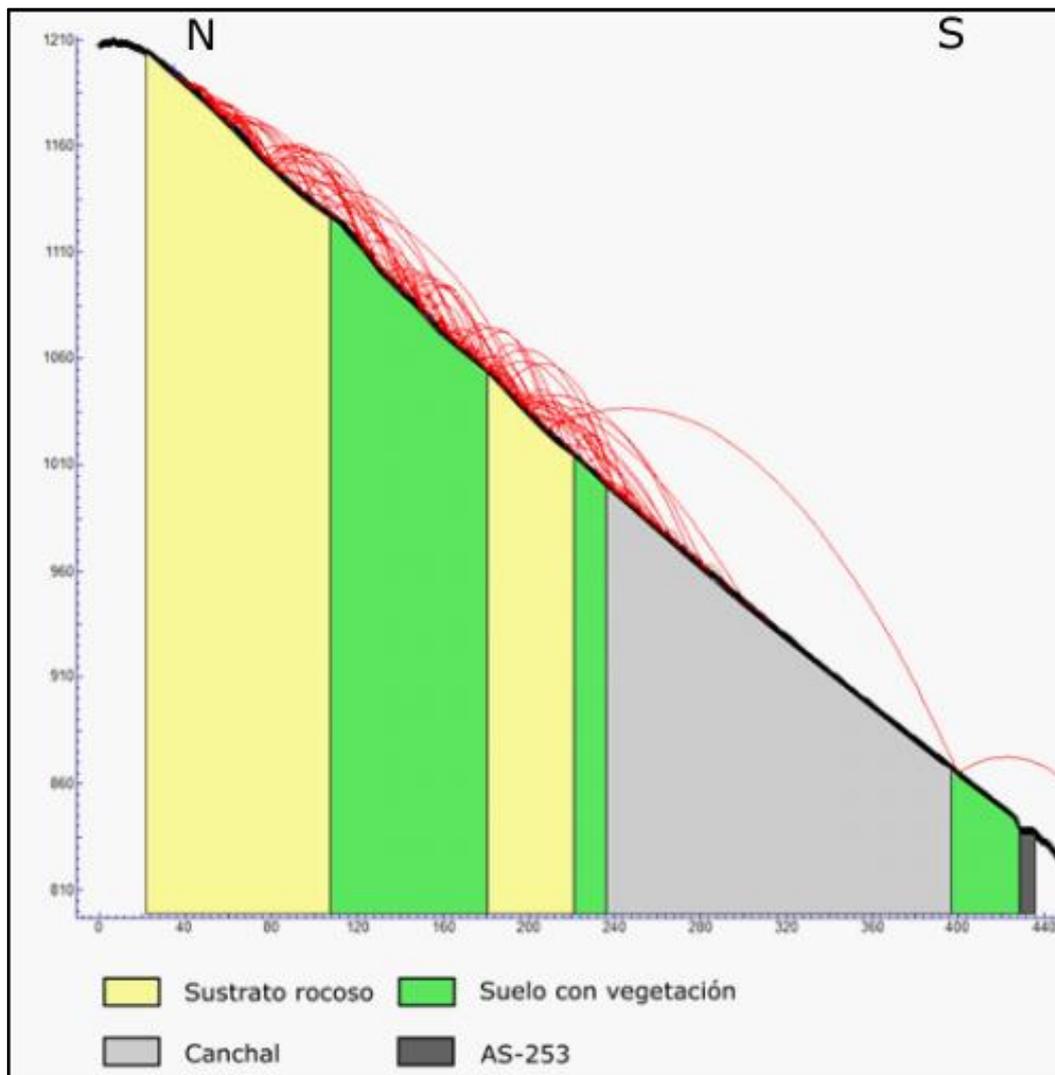


FIGURA 22: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 3 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 1,6 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar la carretera objeto de estudio (Fig. 23), el 86,8 % quedan retenidos en el canchal, mientras que el 3,4 % lo hacen en el coluvión y el 0,2 lo hace en el sustrato rocoso.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metro 434,4 del perfil) se observa que la energía cinética de los bloques que la alcanzan se sitúa entre 0,61 kJ, y 1,82 kJ (Fig. 24).

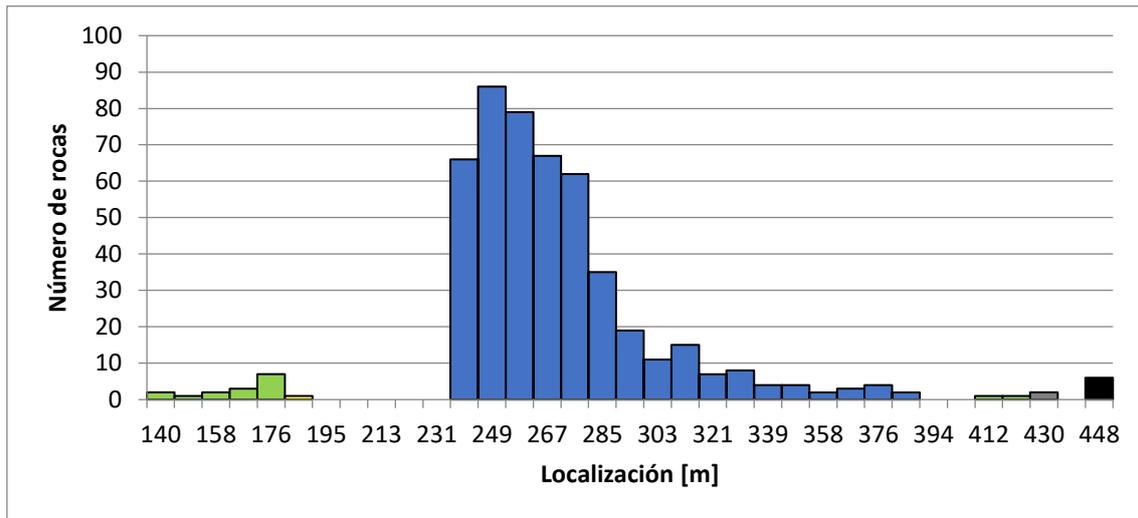


FIGURA 23: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 10 KG LANZADAS EN EL PERFIL 3; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN AMARILLO LAS ROCAS DETENIDAS EN EL SUSTRATO ROCOSO, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN GRIS LAS ROCAS QUE ALCANZAN LA AS-253, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

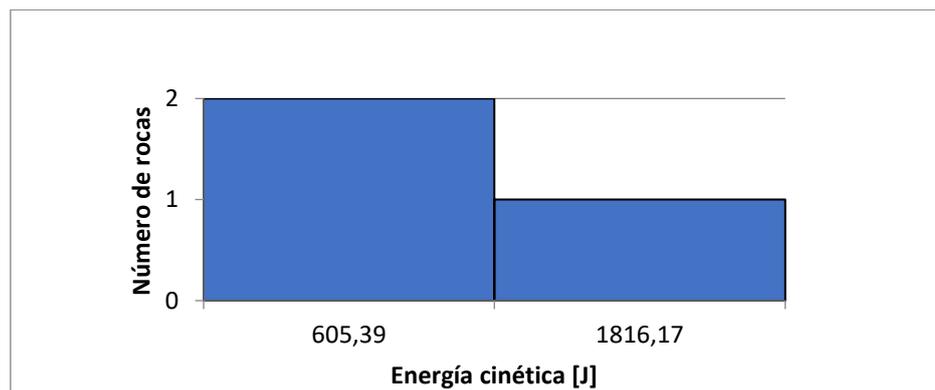


FIGURA 24: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 3, CONSIDERANDO QUE SE LANZARON 500 BLOQUES.

Perfil 4

Este perfil se encuentra en el PK 16,712. Alcanza una longitud de 225 m y presenta una orientación NNE-SSO. Se pueden distinguir cinco sectores.

- (i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta varios escalones con fuertes pendientes próximas a los 85° y abarca los primeros 81 m;
- (ii) el segundo corresponde con 45 m de suelo con vegetación con una pendiente de 43° ;
- (iii) el tercero corresponde con un canchal de 57 m de longitud con una pendiente media de 41° ;
- (iv) el cuarto corresponde de nuevo con materiales de coluvión (8 m) con una pendiente media de 55° ;
- (v) el quinto corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 190 m (Fig. 25).

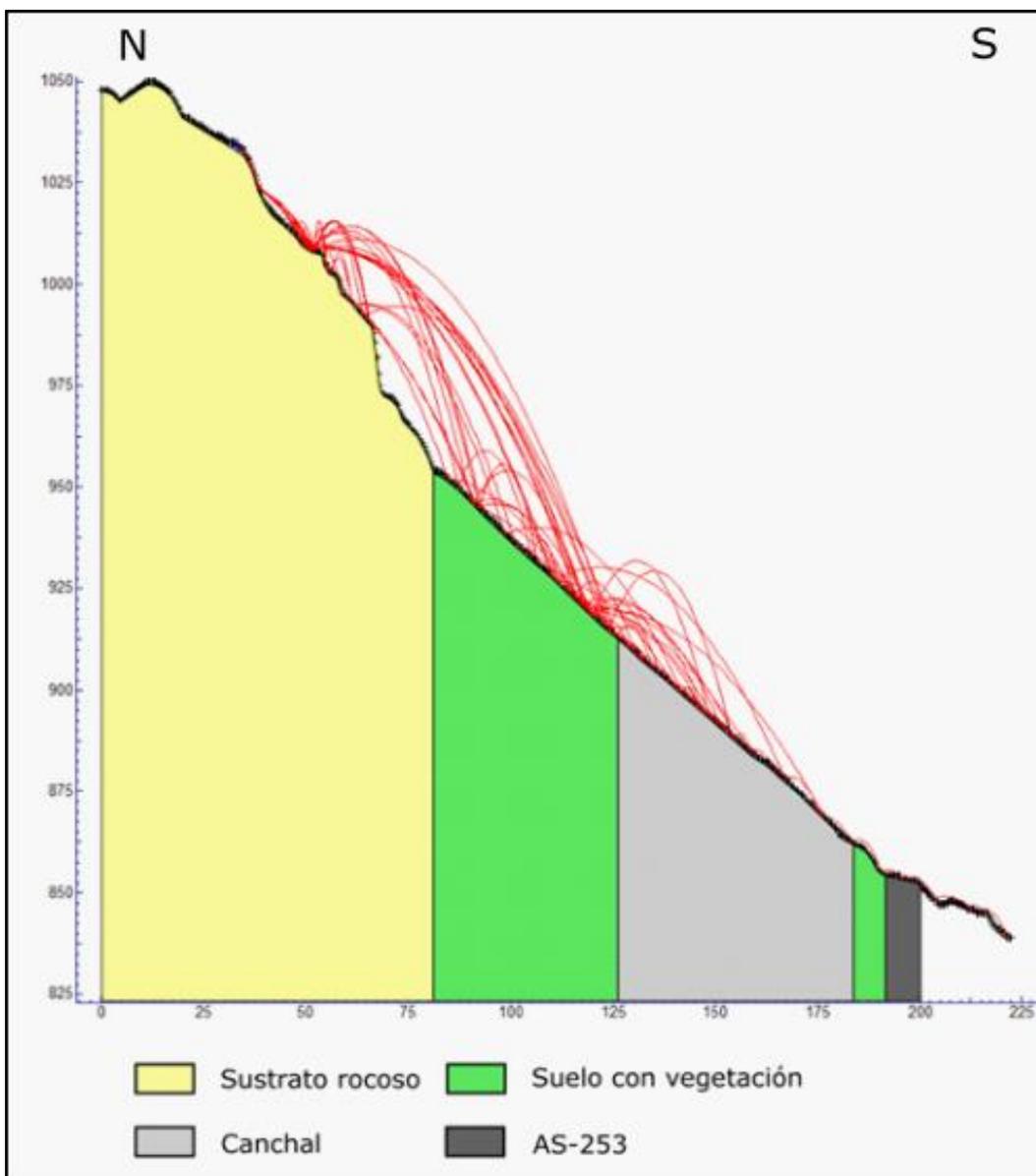


FIGURA 25: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 4 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 2,2 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar la carretera objeto de estudio (Fig. 26), el 89 % quedan retenidos en el canchal, mientras que el 4,6 % lo hacen en el coluvión y el 4,2 lo hace en el sustrato rocoso.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metro 191,1 del perfil) se observa que la energía cinética de los bloques que la alcanzan se sitúa entre 0,30 kJ, y 0,91 kJ (Fig. 27).

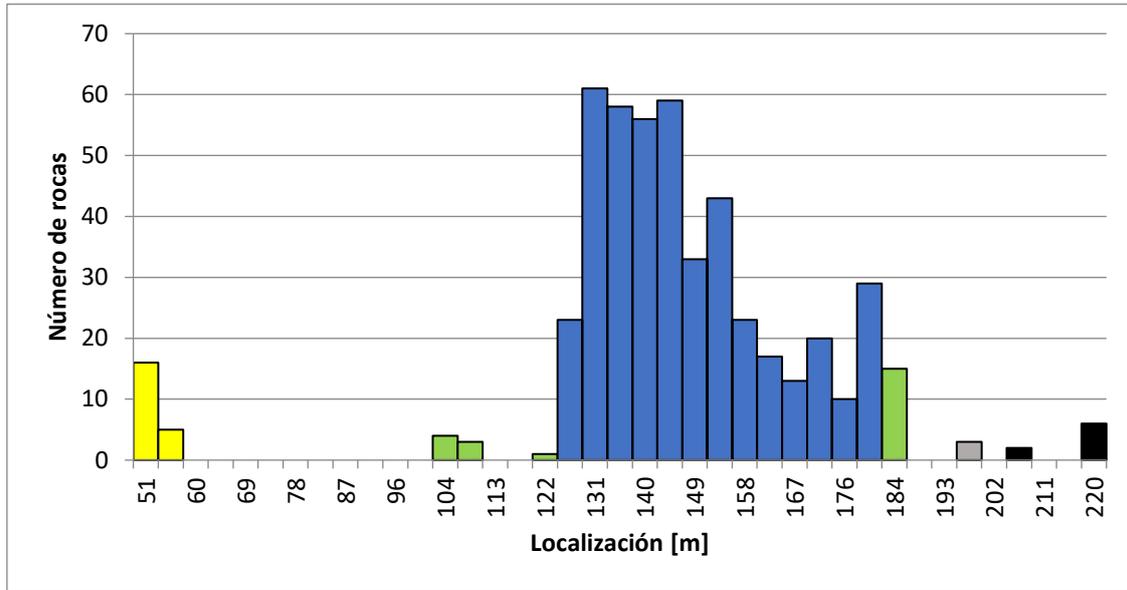


FIGURA 26: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 10 KG LANZADAS EN EL PERFIL 4; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN AMARILLO LAS ROCAS DETENIDAS EN EL SUSTRATO ROCOSO, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN GRIS LAS ROCAS QUE ALCANZAN LA AS-253, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

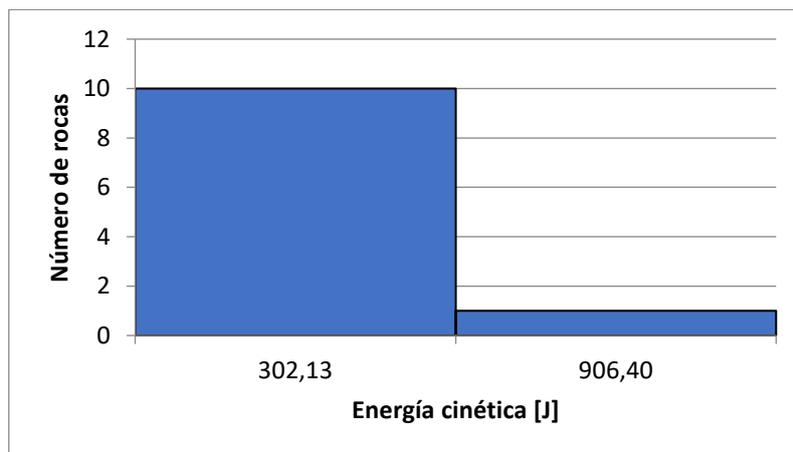


FIGURA 27: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 4, CONSIDERANDO QUE SE LANZARON 500 BLOQUES.

Perfil 5

Este perfil se encuentra en el PK 16,897. Alcanza una longitud de 200 m y presenta una orientación N-S. Se pueden distinguir cinco sectores.

(i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta varios escalones y resaltes, abarca los primeros 119 m; (ii) el segundo corresponde con 35 m de suelo con vegetación que comienza con una pendiente de 72° y cambia a 40° ; (iii) el tercero corresponde con un depósito de avalancha de 22 m de longitud con una pendiente media de 40° ; (iv) el cuarto corresponde de nuevo con materiales de coluvión (12 m) con una pendiente media de 35° ; (v) el quinto corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 188 m (Fig. 28).

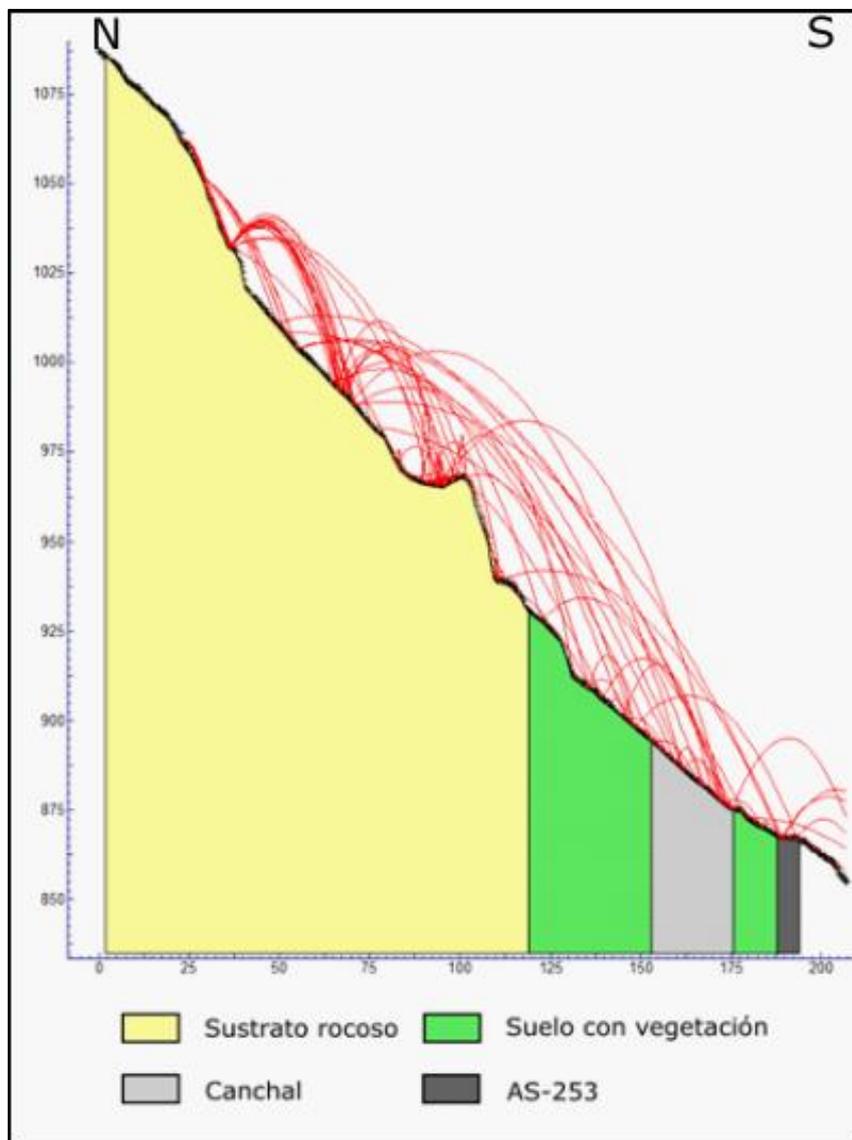


FIGURA 28: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 5 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 49,2 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar la carretera objeto de estudio (Fig. 29), el 33,2 % quedan retenidos en el canchal, mientras que el 8,8 % lo hacen en el coluvión y el 8,8 lo hace en el sustrato rocoso.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metro 190,5 del perfil) se observa que la energía cinética máxima de los bloques que la alcanzan es de 2207,86 kJ, no obstante, el 59 % de las rocas llega con energías cinéticas inferiores a 283,06 kJ (Fig. 30).

Hay que destacar que la vegetación presente en los tramos de coluvión es de mayor entidad que la del resto de perfiles, por lo que es posible que el número de rocas que llega a la AS-253 y su correspondiente energía cinética sean menores.

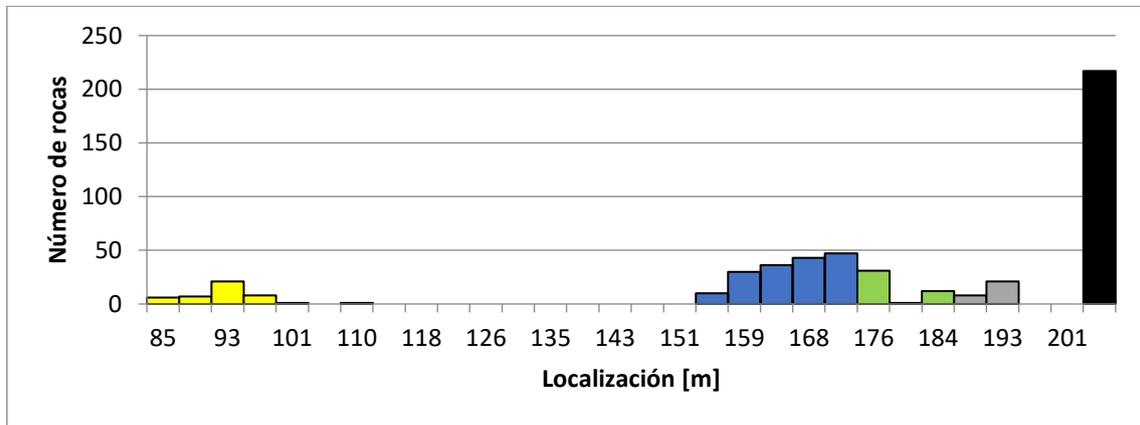


FIGURA 29: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 10 KG LANZADAS EN EL PERFIL 5; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN AMARILLO LAS ROCAS DETENIDAS EN EL SUSTRATO ROCOSO, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN GRIS LAS ROCAS QUE ALCANZAN LA AS-253, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

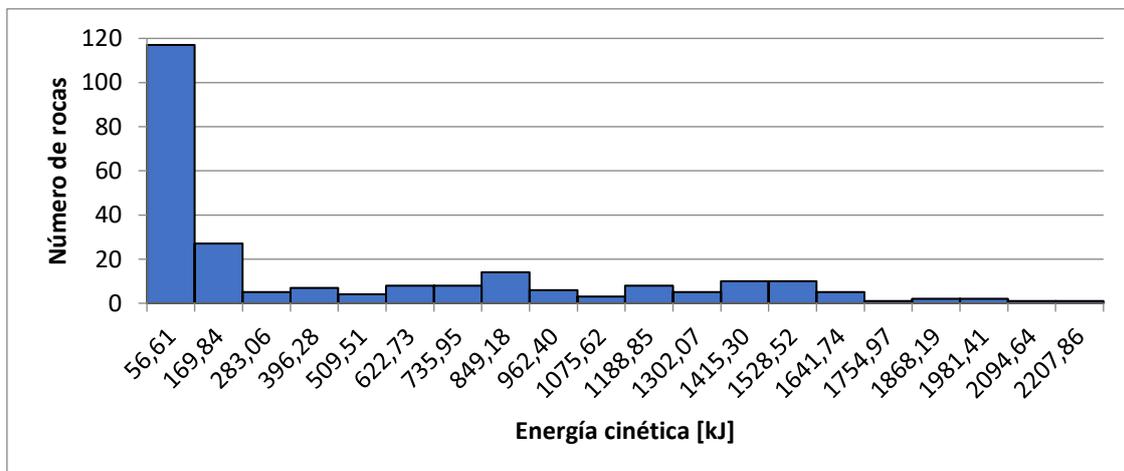


FIGURA 30: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 1300 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 5, CONSIDERANDO QUE SE LANZARON 500 BLOQUES.

Perfil 6

Este perfil se encuentra en el PK 18,360. Alcanza una longitud de 360 m y presenta una orientación N-S. Se pueden distinguir cuatro sectores.

(i) el primero corresponde con el sustrato rocoso, presenta una fuerte pendiente de 65° y abarca los primeros 89 m; (ii) el segundo corresponde con 148 m de suelo con vegetación con una pendiente de 42° ; (iii) el tercero corresponde con un depósito de avalancha de 87 m de longitud con una pendiente media de 41° ; (iv) el cuarto corresponde con la carretera AS-253, que comienza a los 324 m (Fig. 31).

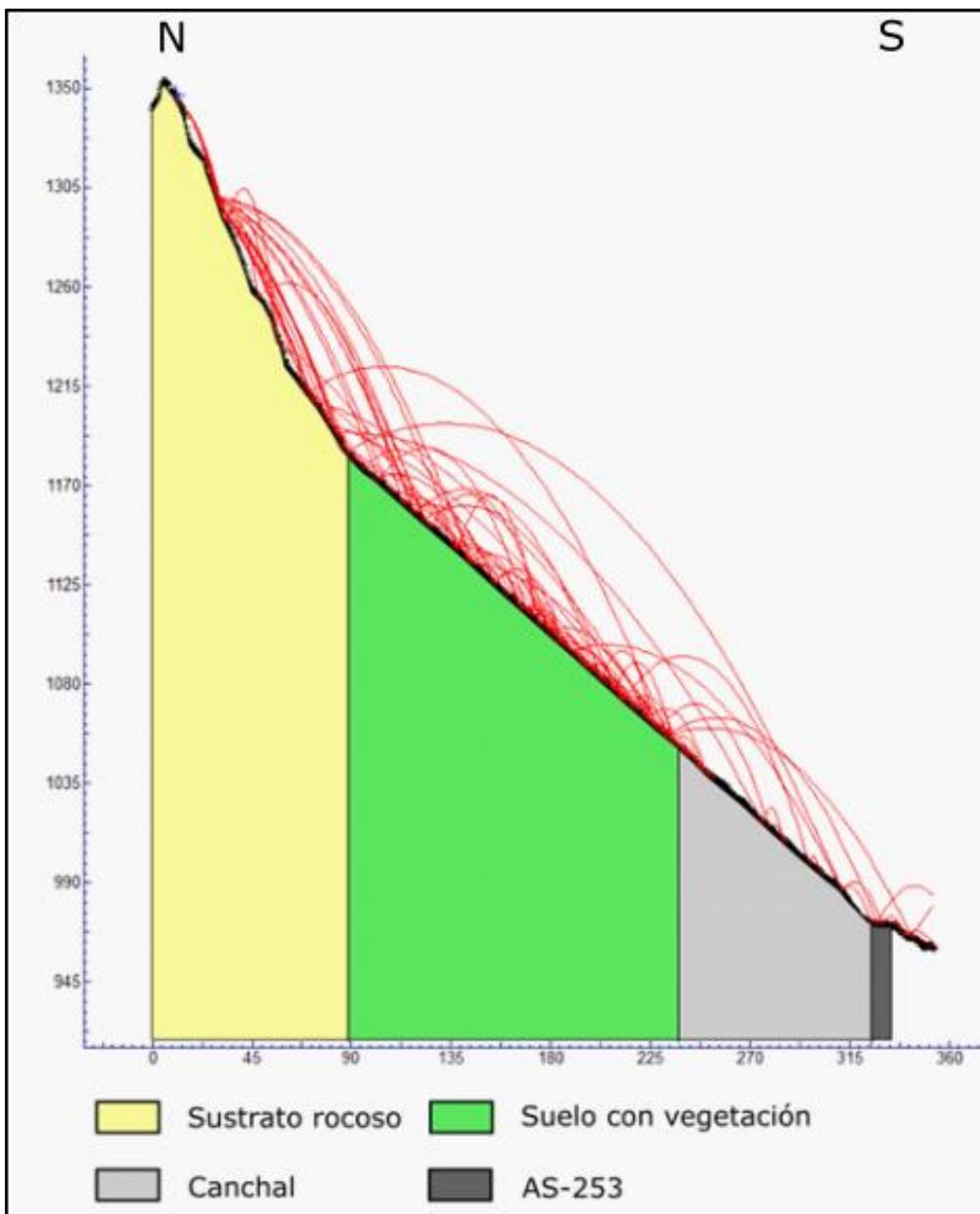


FIGURA 31: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 6 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 3 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar la carretera objeto de estudio (Fig. 32), el 76,6 % quedan retenidos en el canchal, mientras que el 15,2 % lo hacen en el coluvión.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metro 324,6 del perfil) se observa que la energía cinética máxima de los bloques que la alcanzan es de 4050,17 kJ, no obstante, el 94 % de las rocas llega con energías cinéticas inferiores a 1557,76 kJ (Fig. 33).

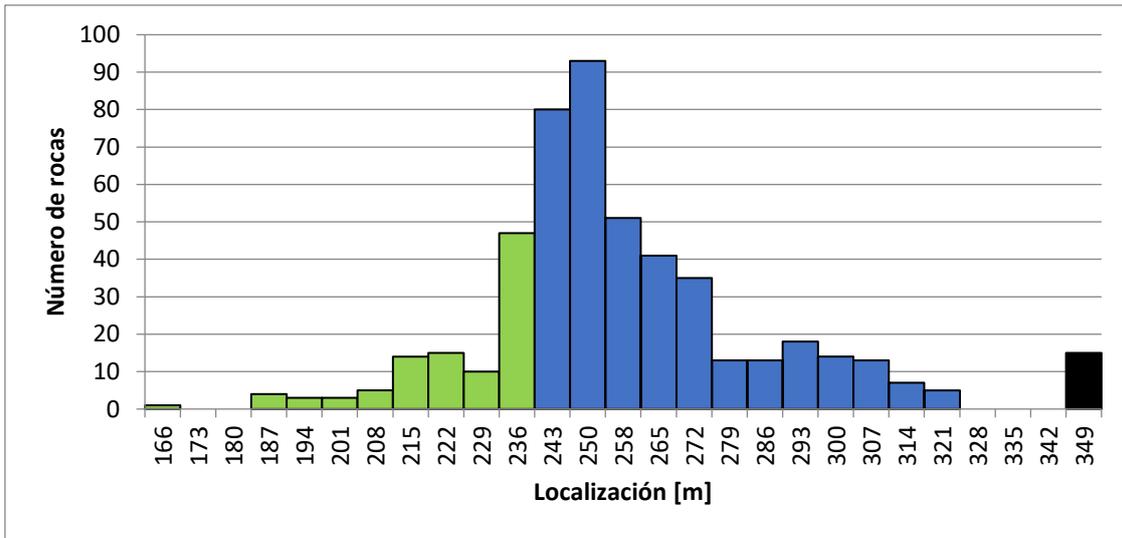


FIGURA 32: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 1300 KG LANZADAS EN EL PERFIL 6; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

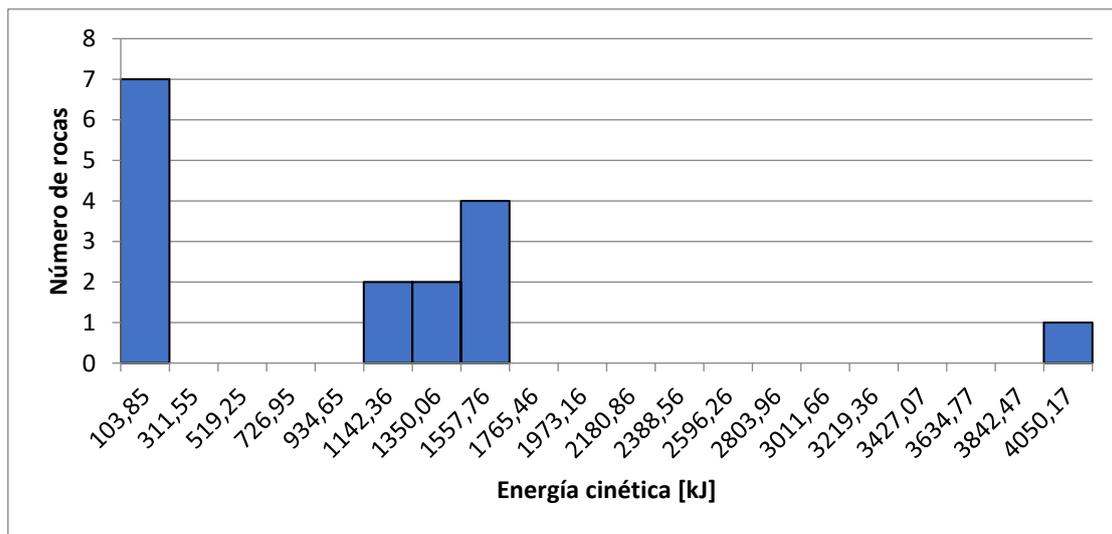


FIGURA 33: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 1300 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 6, CONSIDERANDO QUE SE LANZARON 500 BLOQUES.

Perfil 7

Este perfil se encuentra en el PK 19,095. Alcanza una longitud de 265 m y presenta una orientación E-O. Se pueden distinguir siete sectores (dos de sustrato rocoso, tres de asfalto y dos de suelo con vegetación).

Los correspondientes con el sustrato rocoso, presentan una fuerte pendiente que varía entre 75° y 45° abarca los primeros 97 m. Los correspondientes con suelos con vegetación abarcan el resto del perfil y presentan una pendiente media de 37° . Los tramos de asfalto correspondientes a la carretera AS-253 se encuentran dentro de estos (Fig. 34).

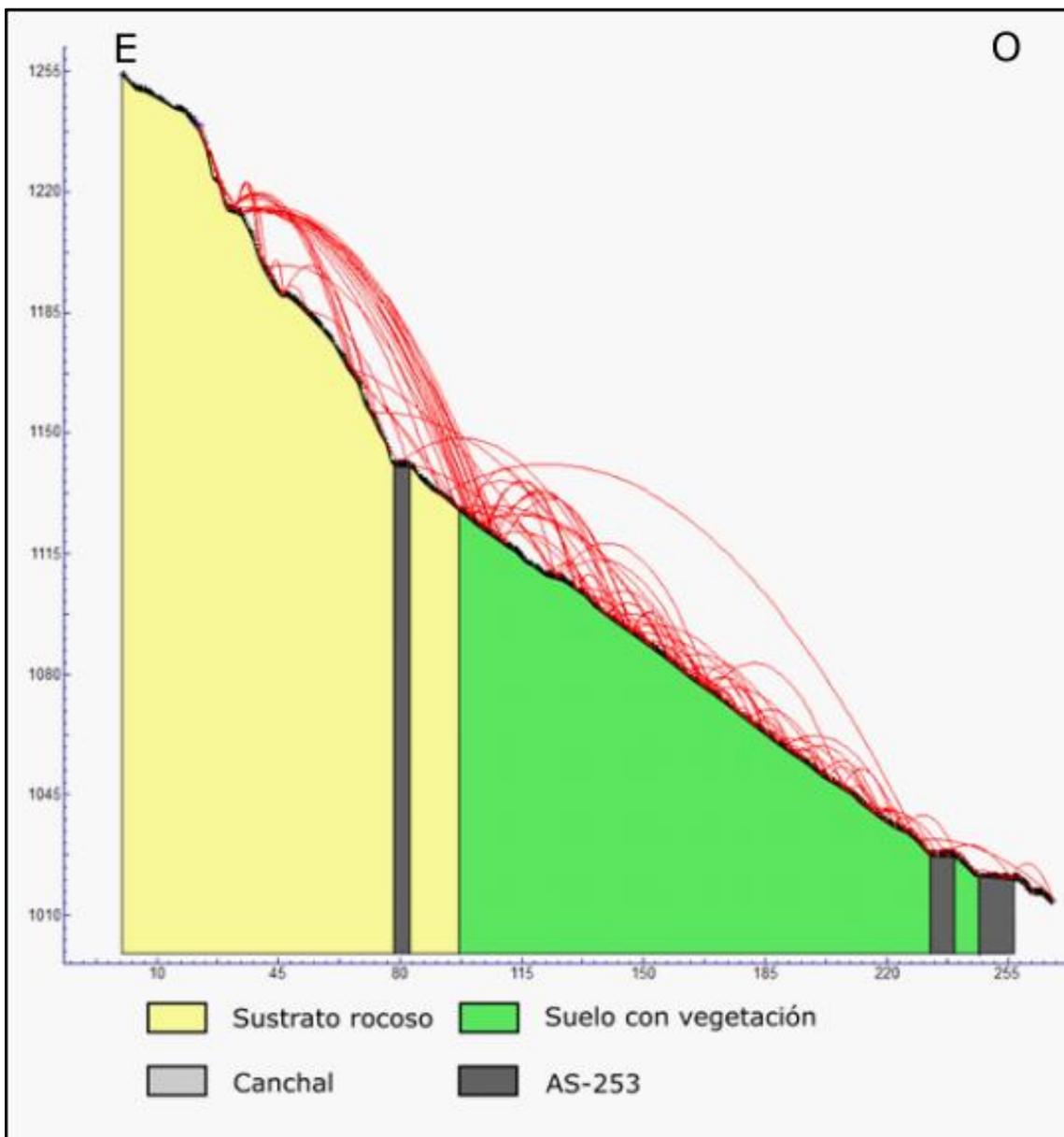


FIGURA 34: MODELO DE TRAYECTORIAS SEGUIDAS POR ROCAS DESPRENDIDAS EN EL PERFIL 7 REALIZADO CON EL PROGRAMA ROCKFALL.

Un 0,6 % de los bloques rocosos desprendidos desde la zona superior pueden llegar a alcanzar el primer sector de carretera, el 6,4 % en el segundo y el 4,8 % en tercer sector de la carretera objeto de estudio (Fig. 35), el 76,2 % quedan retenidos en el coluvión y el 1,4 lo hace en el sustrato rocoso.

Tomando como referencia la situación de la carretera AS-253 (metros 80,3; 235,6 y 251,7 del perfil) se observa que la energía cinética máxima es de 8,29 kJ para los bloques que impactan en el primer punto. De 14,61 kJ para los que impactan en el segundo punto. Y de 4,3 kJ para los que impactan en el tercer punto (Figs. 36, 37 y 38).

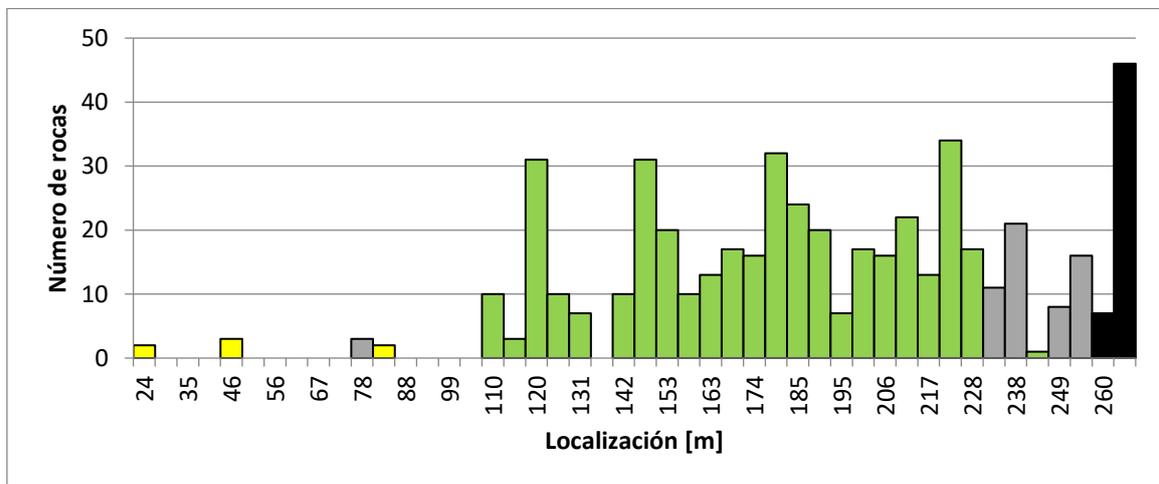


FIGURA 35: DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LAS ROCAS DE 1300 KG LANZADAS EN EL PERFIL 7; EN AZUL SE SIMBOLIZAN LAS ROCAS DETENIDAS EN EL CANCHAL, EN AMARILLO LAS ROCAS DETENIDAS EN EL SUSTRATO ROCOSO, EN VERDE LAS ROCAS DETENIDAS EN COLUVIÓN, EN NEGRO LAS ROCAS DETENIDAS LADERA DEBAJO DE LA CARRETERA.

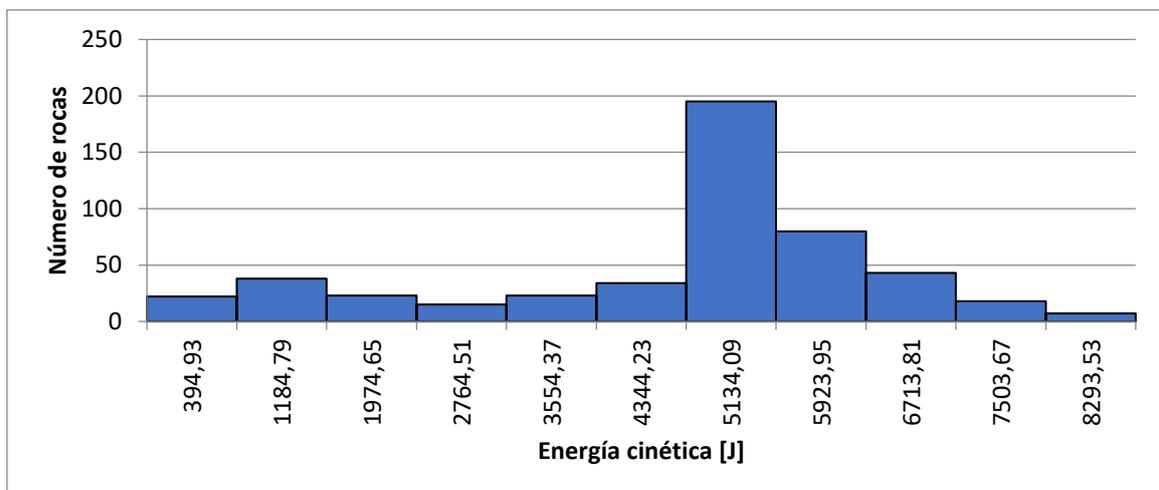


FIGURA 36: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 7 (1^{ER} TRAMO DE CARRETERA).

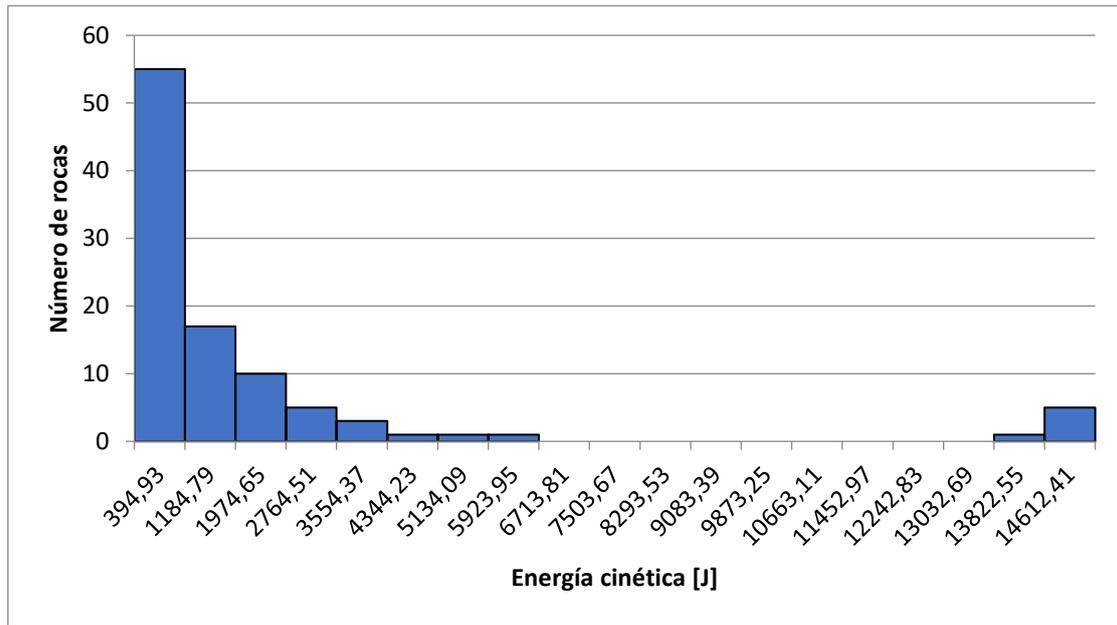


FIGURA 37: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 7 (2º TRAMO DE CARRETERA).

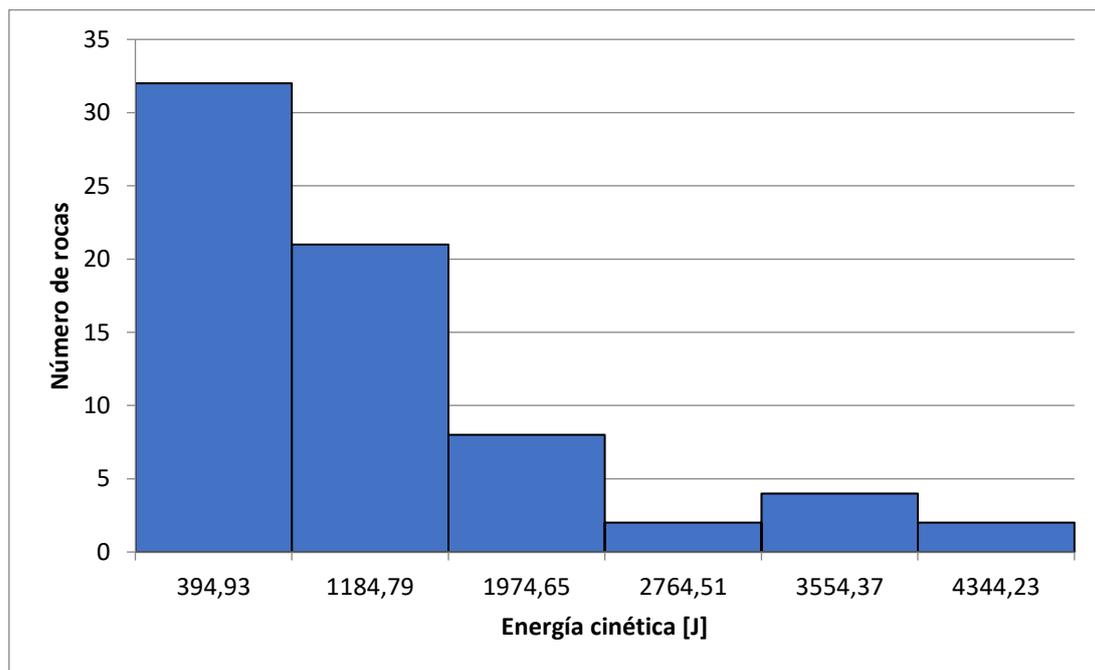


FIGURA 38: ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ROCAS DE 10 KG QUE ALCANZAN LA AS-253 EN EL PERFIL 7 (3ER TRAMO DE CARRETERA).

Peligrosidad por aludes

La integración de los modelos de altitud, orientaciones, vegetación, pendientes y peligrosidad realizados y su comparación con datos de aludes previos ha permitido caracterizar las zonas en que se concentran este tipo de fenómenos. En las figuras 39, 40, 41, 42 y 43 se presenta la cartografía de aludes documentados en el trabajo de Poblete *et al.* (2019) sobre los modelos de altitud, orientaciones, vegetación, pendientes y peligrosidad elaborados en este trabajo.

En los modelos de altitud y de orientaciones (Figs. 39 y 40) se observa que la mayor parte de las cabeceras de los aludes se encuentran por encima de los 1.400 m de altitud y en las caras de solana. Esto coincide con los resultados obtenidos por Wozniak y Marquínez (2004), cuyo estudio determinó que las superficies nevadas se encuentran por encima de los 1.000 m de altitud, que el manto nival alcanza espesores importantes a partir de los 1.600 m y que los aludes de nieve, en la zona central y occidental de Asturias se originan a partir de los 1.400 m.

Si se observan los mapas de vegetación (Fig. 41), y de orientaciones (Fig. 40) se puede constatar que la vegetación con capacidad de retener nieve, como es el caso de los bosques y prebosques, se encuentra en las laderas de umbría, mientras que la vegetación con una menor capacidad de retención (arbustos, plantas herbáceas y vegetación rupícola) se encuentra en las caras de solana. Aunque en las laderas de umbría también pueden desencadenarse aludes, se ha observado que estos son de menor entidad que los situados en las zonas de solana. Esto se debe también a que estas laderas reciben mayor radiación solar, lo que conlleva unas mayores variaciones de temperatura e incrementan la velocidad de los cambios en el manto nival.

En el mapa de pendientes (Fig. 42) se puede observar que las cabeceras de los aludes se encuentran de forma predominante en pendientes comprendidas entre los 30° y los 50°, y en muy pocos casos en pendientes superiores a 50°. Estos resultados coinciden con las investigaciones de Lied y Bakkehoi, (1980), Lied y Toppe, (1989), Furdada, (1996) y Furdada y Vilaplana (1998), en donde las zonas de salida de aludes importantes se encuentran entre los 30° y los 50°, las zonas de tránsito entre los 10° y los 30° y las zonas de llegada en las pendientes menores a 10° (McClung y Schaerer, 1996).

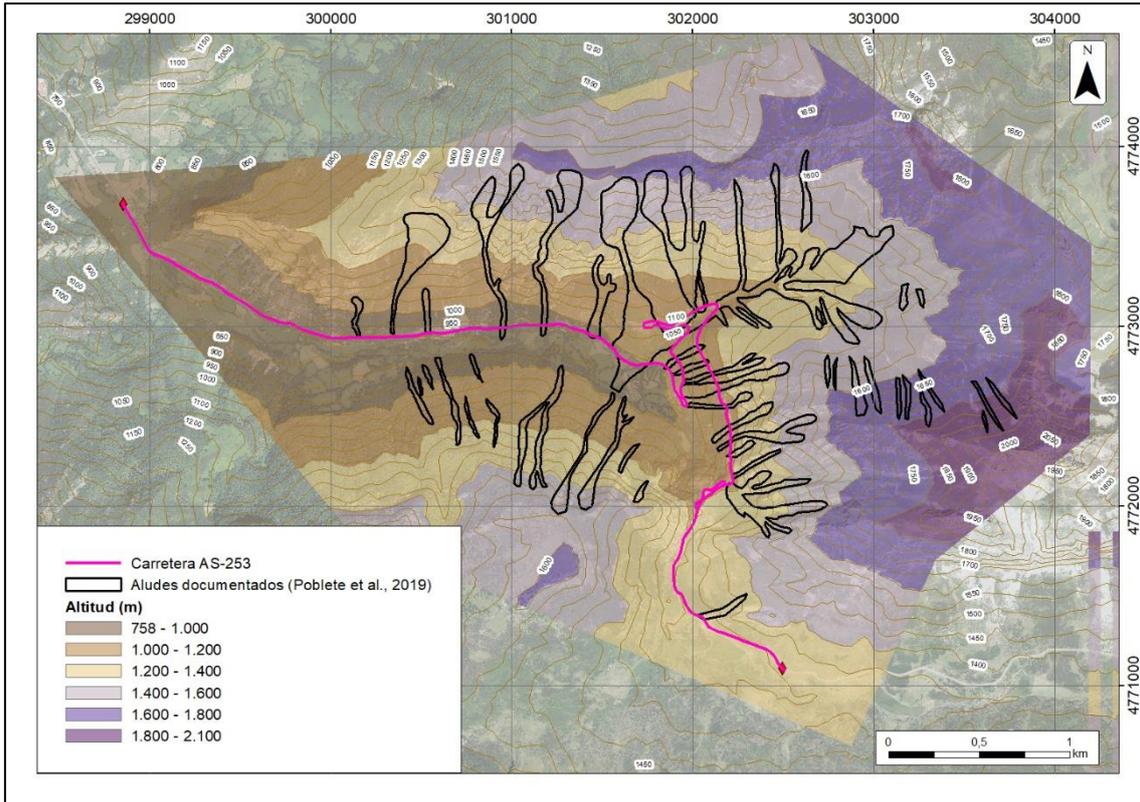


FIGURA 39: MODELO DE ALTITUDES CON DIVISIONES CADA 200 M (CON ALUDES DOCUMENTADOS POR POBLETE *ET AL.* 2019).



FIGURA 40: MODELO DE ORIENTACIONES DE LA ZONA OBJETO DE ESTUDIO.

A partir de los datos obtenidos se ha determinado que el 7,54% del área de estudio tiene una peligrosidad muy baja, el 19,94 % una peligrosidad baja, el 38,22 % una peligrosidad media, el 23,94% una peligrosidad alta y el 10,16 % del área restante una peligrosidad muy alta (Fig. 43).

La zona de peligrosidad muy baja se sitúa en la zona suroeste y corresponde con zonas próximas al fondo de valle, con orientación al norte y vegetación arbórea. No obstante, hay que mencionar que no se tuvieron en cuenta las cuencas de drenaje y sus correspondientes drenajes ya que estos no alcanzaban la carretera. Esto podría suponer un riesgo adicional para dicha infraestructura y debería tenerse en cuenta en futuros estudios más específicos.

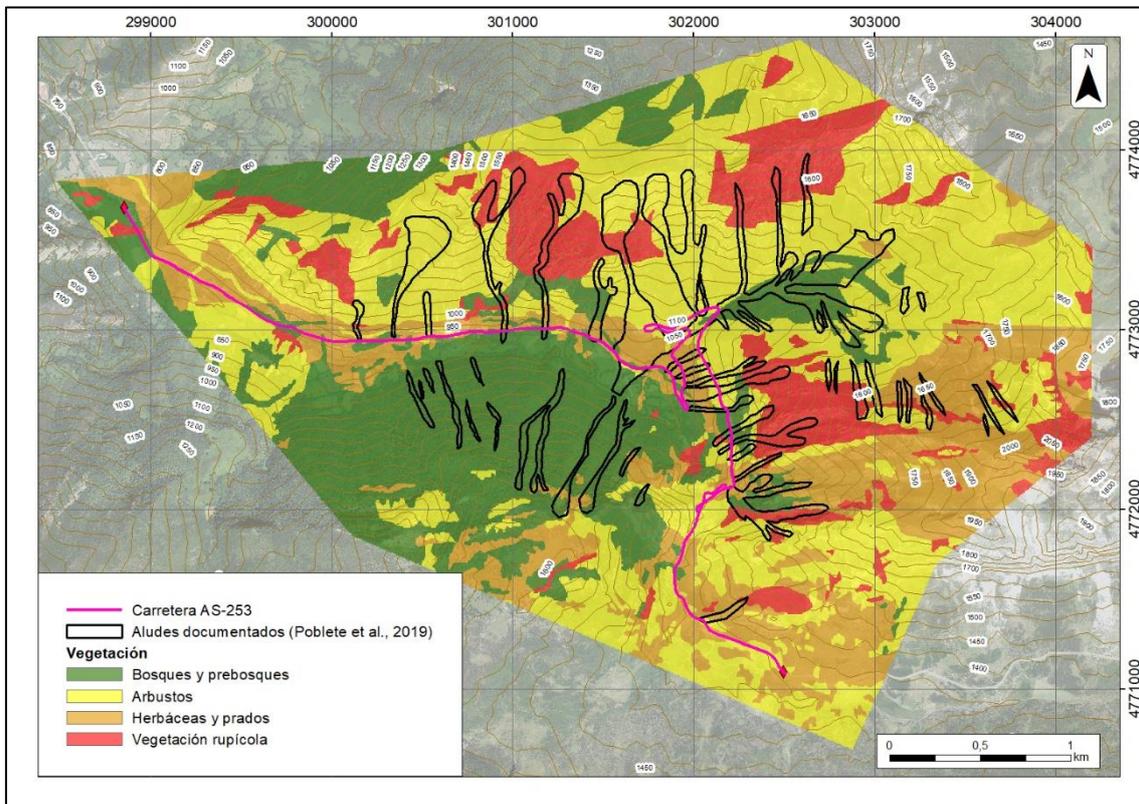


FIGURA 41: CARTOGRAFÍA DE VEGETACIÓN DEL ENTORNO DEL TRAZADO OBJETO DE ESTUDIO (MODIFICADO DE ÁLVAREZ ET AL, 1994).

Se pueden identificar 18 puntos a lo largo de la carretera que se corresponden con las zonas donde las líneas de drenaje de las cuencas identificadas intersectan con la carretera. Se observa que los principales aludes coinciden con los citados canales de drenaje y que las zonas de cabecera de estos aludes se encuentran en zonas de peligrosidad alta o muy alta, siendo por tanto resultados coherentes con estudios previos realizados sobre la zona (Fig. 43).

De esos 18 puntos 15 no tienen ninguna medida de protección y de los 3 puntos restantes 2 se encuentran en mal estado y únicamente uno de ellos solo presenta una malla rígida diseñada para retener los materiales procedentes de los canchales, pero que no está diseñado para frenar el poder destructivo de los aludes. En las figuras 44 y 45 se pueden observar algunos ejemplos relativos al efecto de estos aludes sobre las barreras rígidas y barreras dinámicas. Si se observa el mapa de medidas preventivas existentes realizado y el mapa de aludes documentados puede comprobarse que gran parte de estos aludes se han producido en zonas que no presentan ningún tipo de medida de protección. Para abordar un estudio de las zonas en las que implementar nuevas medidas sería necesario realizar un estudio más detallado de las cuencas existentes dentro de las cuencas y subcuencas mostradas en la figura 46.

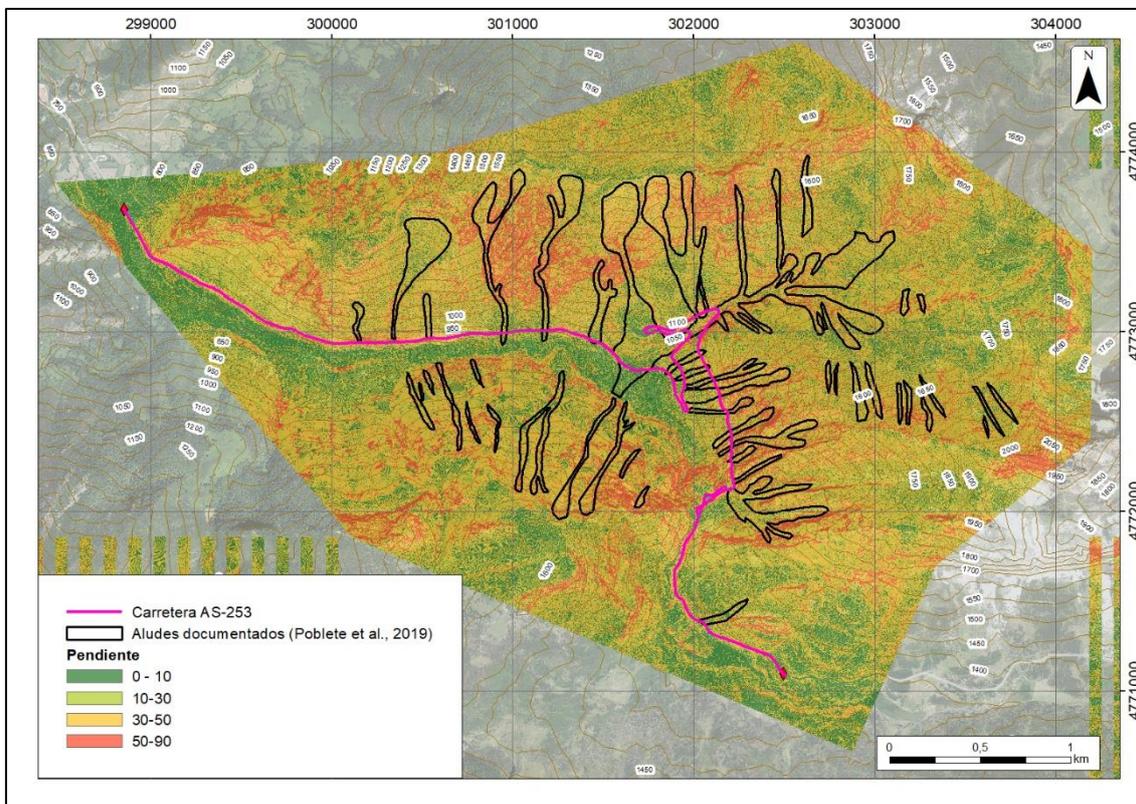


FIGURA 42: MODELO DE PENDIENTES DE LA ZONA OBJETO DE ESTUDIO.

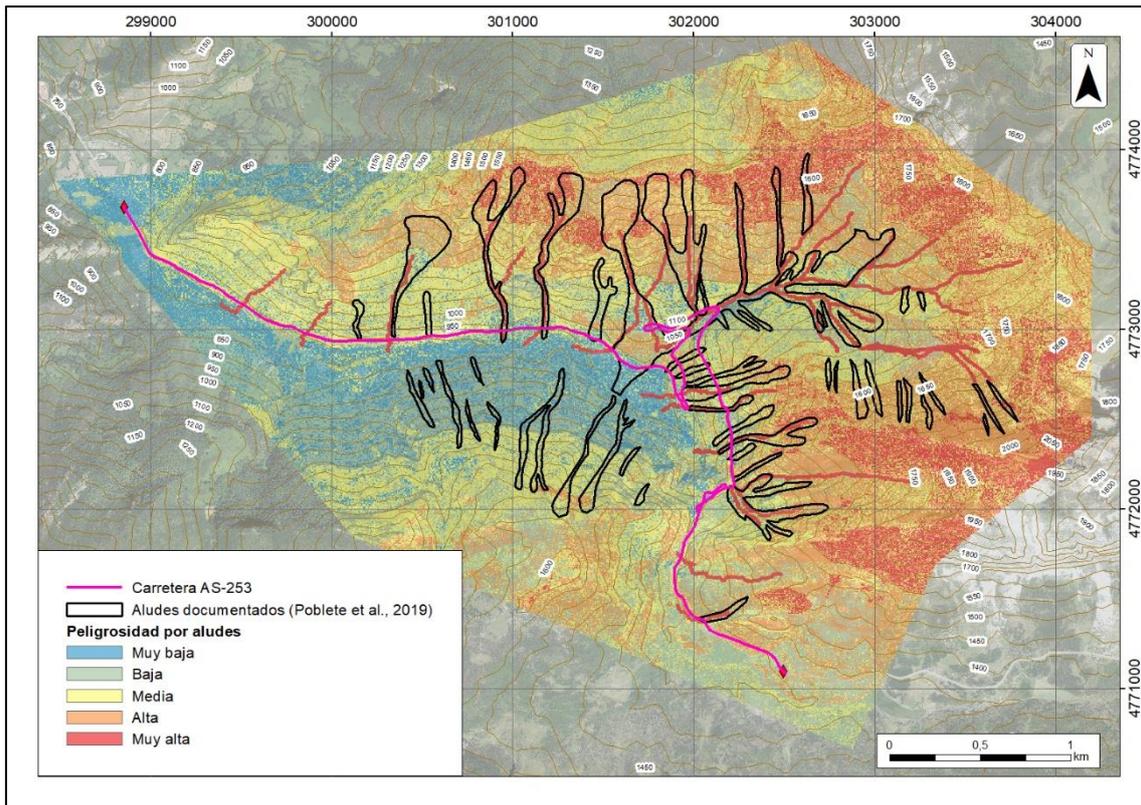


FIGURA 43: MAPA DE PELIGROSIDAD DE ALUDES EN EL SECTOR POR EL QUE TRANSCURRE LA CARRETERA AS-253 ENTRE CUEVAS Y EL PUERTO DE SAN ISIDRO.



FIGURA 44: ASPECTO DE LA BARRERA RÍGIDA Y DE LAS MALLAS DINÁMICAS ANTES (IZQUIERDA) Y DESPUÉS (DERECHA) DE UN ALUD OCURRIDO EN EL PK 20,960.

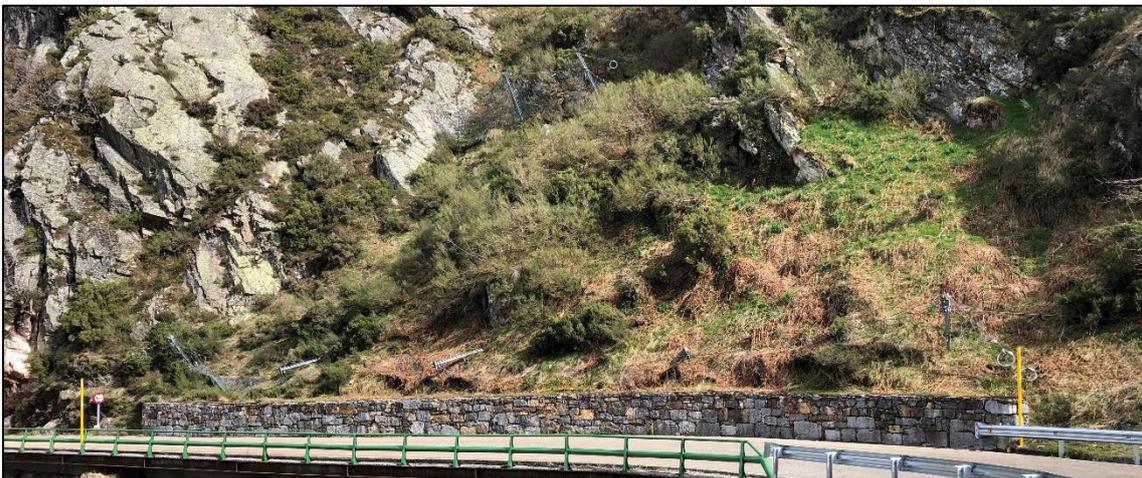


FIGURA 45: MALLAS DINÁMICAS ANTES (ARRIBA) Y DESPUÉS (MEDIO Y ABAJO) DE LA OCURRENCIA DE ALUDES EN EL PK 21,512.

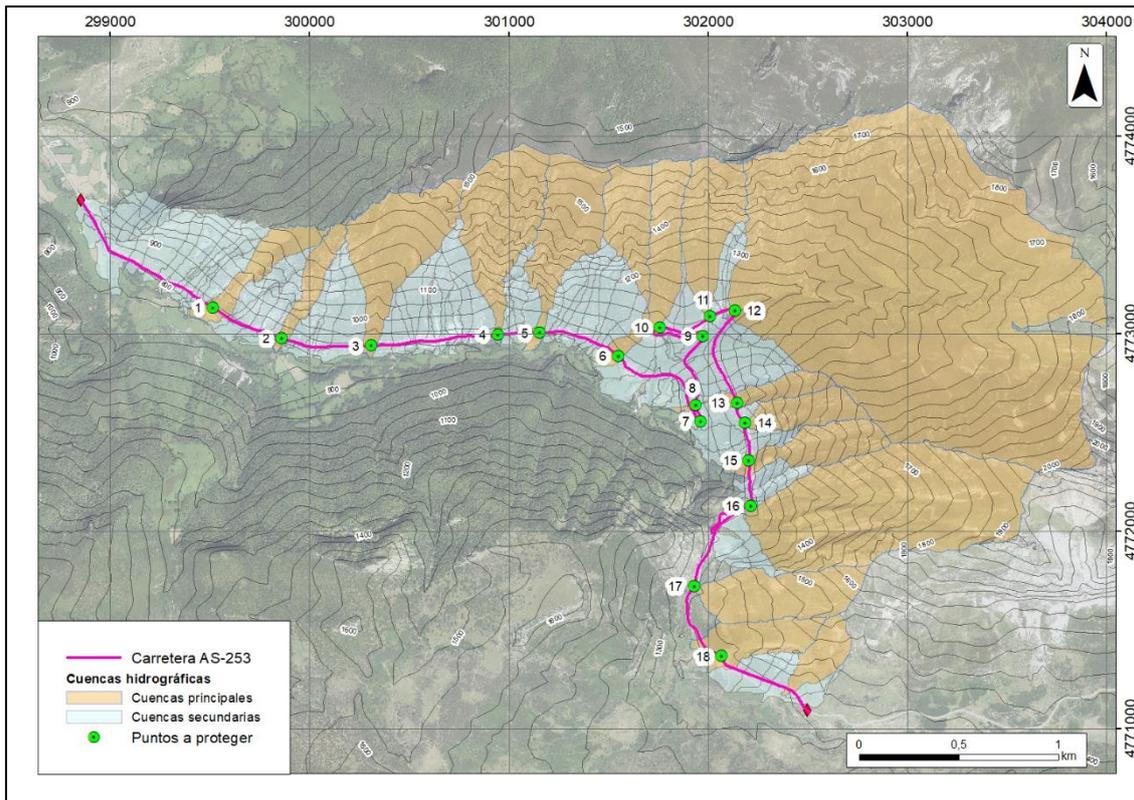


FIGURA 46: CUENCAS HIDROGRÁFICAS PRINCIPALES Y PUNTOS DEL TRAZADO DE LA AS-253 CON MAYOR PELIGROSIDAD DE IMPACTO DE ALUDES.

Cartografía de elementos de contención

Una vez realizado el mapa con las medidas de protección existentes (Fig. 47) se ha realizado el siguiente inventario:

- 23 sectores con barreras dinámicas, con una extensión total de 816 m.
- 9 sectores de escollera, con una longitud de 659 m.
- 17 sectores de malla rígida, con una extensión total de 1402 m.
- 1 sector de malla de torsión simple de 44 m de longitud.
- 17 sectores de malla de triple torsión, con una extensión total de 1406 m.
- 2 sectores de vigas de acero, de 4 m cada uno.
- 3 viseras de derivación de aludes, con una extensión total de 213 m.

En estos sectores con malla rígida es frecuente encontrar tramos en los que los depósitos detenidos son tantos que casi llegan a rebasar estas barreras (Figs. 48 y 49). Se puede observar una necesidad de mantenimiento de éstas, llegando en algunos puntos a estar estos depósitos colonizados por plantas arbustivas (Fig. 50).

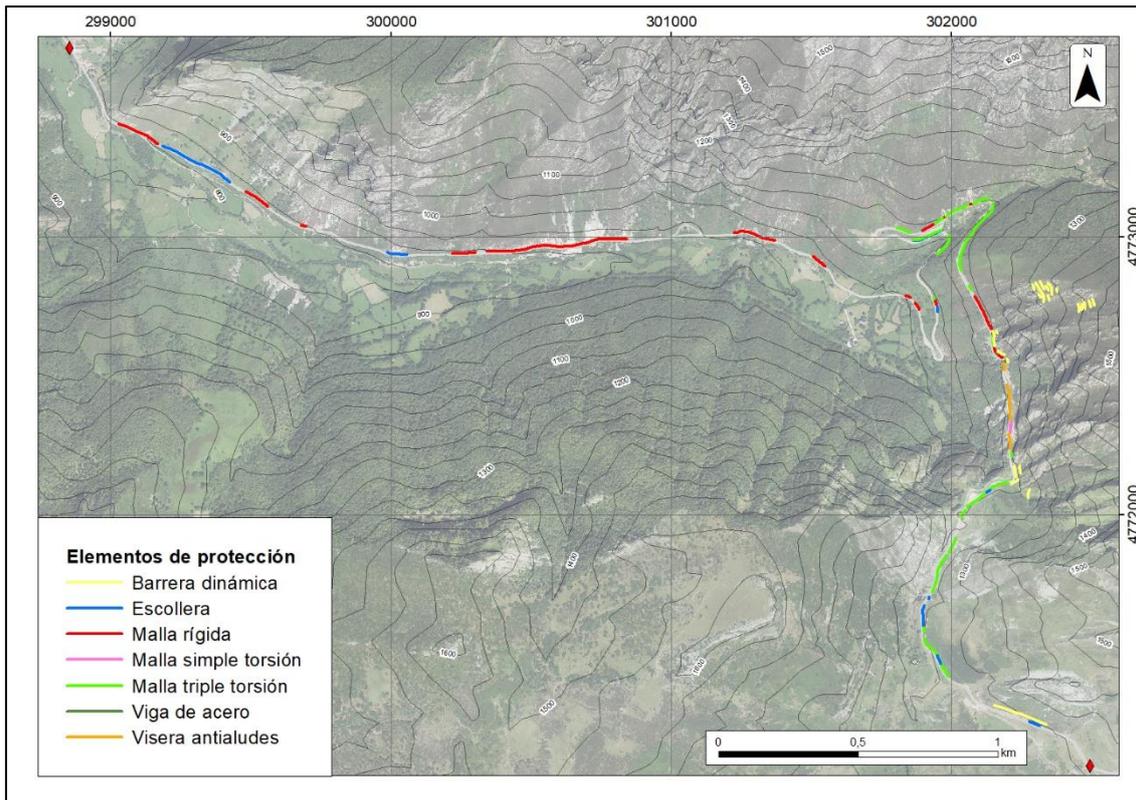


FIGURA 47: LOCALIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN ACTUALMENTE EXISTENTES EN LA AS-253 ENTRE CUEVAS Y EL PUERTO DE SAN ISIDRO.



FIGURA 48: MALLA RÍGIDA 1 CONTENIENDO MATERIAL DESLIZADO EN EL PK 16 (ALTURA DE LA BARRERA = 3 M).



FIGURA 49: MALLA RÍGIDA 5 CONTENIENDO MATERIAL DESLIZADO EN EL PK 17,500 (ALTURA DE LA BARRERA = 3 M).



FIGURA 50: MATERIAL RETENIDO POR LA MALLA RÍGIDA 4 EN EL PK 17,200 (ALTURA DE LA BARRERA = 3 M).

En otros puntos, como en la malla rígida 13 los desprendimientos rocosos son de mayor tamaño, provocando un deterioro importante en estos elementos de contención análogos a los observados en la figura 44, donde la barrera rígida quedó completamente desmantelada. (Fig. 51).



FIGURA 51: ASPECTO DE LA MALLA RÍGIDA Nº 13 CON EVIDENCIAS DE IMPACTOS EN EL PK 20,330 (ALTURA DE LA BARRERA = 3 M).

A la vista de los datos observados las mallas rígidas 1, 2, 4 y 5 requieren operaciones de mantenimiento (Figs. 48 y 49); las mallas rígidas 6 y 13 necesitan ser redimensionadas, ya que los bloques que se desprenden superan su resistencia (Fig. 51) y la malla rígida 15 necesita ser reconstruida (Fig. 44) (Tabla 5).

Las barreras dinámicas presentes deben ser revisadas en su totalidad, ya que, en general, importantes daños (Figs. 44 y 45) (Tabla 5).

Los sectores de escollera, mallas de torsión simple y triple, vigas de acero y viseras de derivación de aludes no presentan desperfectos (Tabla 5).

La localización de todos los elementos de la tabla 5 se puede consultar en las figuras 52, 53, 54 y 55.

Tipo	Longitud (m)	Nombre	Estado	Tipo	Longitud (m)	Nombre	Estado
Bar. dinámica	41	BD 1	Derribada	Malla rígida	506	MR 5	Rellena
Bar. dinámica	29	BD2	Derribada	Malla rígida	153	MR 6	Dañada
Bar. dinámica	31	BD3	Derribada	Malla rígida	56	MR 7	Buen estado
Bar. dinámica	30	BD4	Buen estado	Malla rígida	20	MR 8	Buen estado
Bar. dinámica	199	BD 5	Buen estado	Malla rígida	30	MR 9	Buen estado
Bar. dinámica	23	BD 6	No accesible	Malla rígida	21	MR 10	Buen estado
Bar. dinámica	24	BD 7	No accesible	Malla rígida	54	MR 11	Buen estado
Bar. dinámica	29	BD 8	No accesible	Malla rígida	7	MR 12	Buen estado
Bar. dinámica	22	BD 9	No accesible	Malla rígida	9	MR 13	Dañada
Bar. dinámica	27	BD 10	No accesible	Malla rígida	132	MR 14	Buen estado
Bar. dinámica	14	BD 11	No accesible	Malla rígida	9	MR 15	Destruída
Bar. dinámica	51	BD 12	No accesible	Malla rígida	25	MR 16	Buen estado
Bar. dinámica	22	BD 13	No accesible	Malla rígida	21	MR 17	Buen estado
Bar. dinámica	19	BD 14	No accesible	Malla simple torsión	44	MS 1	Buen estado
Bar. dinámica	32	BD 15	No accesible	Malla triple torsión	7	MT 1	Buen estado
Bar. dinámica	78	BD 16	No accesible	Malla triple torsión	88	MT 2	Buen estado
Bar. dinámica	19	BD 17	No accesible	Malla triple torsión	110	MT 3	Buen estado
Bar. dinámica	17	BD 18	No accesible	Malla triple torsión	53	MT 4	Buen estado
Bar. dinámica	30	BD 19	Buen estado	Malla triple torsión	41	MT 5	Buen estado
Bar. dinámica	41	BD 20	Buen estado	Malla triple torsión	97	MT 6	Buen estado
Bar. dinámica	13	BD 21	Derribada	Malla triple torsión	61	MT 7	Buen estado
Bar. dinámica	13	BD 22	Derribada	Malla triple torsión	281	MT 8	Buen estado
Bar. dinámica	11	BD 23	Buen estado	Malla triple torsión	20	MT 9	Buen estado
Escollera	274	ES 1	Buen estado	Malla triple torsión	41	MT 10	Buen estado
Escollera	73	ES 2	Buen estado	Malla triple torsión	11	MT 11	Buen estado
Escollera	19	ES 3	Buen estado	Malla triple torsión	177	MT 12	Buen estado
Escollera	111	ES 4	Buen estado	Malla triple torsión	31	MT 13	Buen estado
Escollera	19	ES 5	Buen estado	Malla triple torsión	60	MT 14	Buen estado
Escollera	9	ES 6	Buen estado	Malla triple torsión	144	MT 15	Buen estado
Escollera	80	ES 7	Buen estado	Malla triple torsión	14	MT 16	Buen estado
Escollera	34	ES 8	Buen estado	Malla triple torsión	168	MT 17	Buen estado
Escollera	41	ES 9	Buen estado	Viga de acero	4	V 1	Buen estado
Malla rígida	159	MR 1	Rellena	Viga de acero	4	V 2	Buen estado
Malla rígida	96	MR 2	Rellena	Visera antialudes	29	VA 1	Buen estado
Malla rígida	20	MR 3	Buen estado	Visera antialudes	127	VA 2	Buen estado
Malla rígida	82	MR 4	Rellena	Visera antialudes	57	VA 3	Buen estado

TABLA 5: ESTADO DE LAS MEDIDAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PRESENTES.

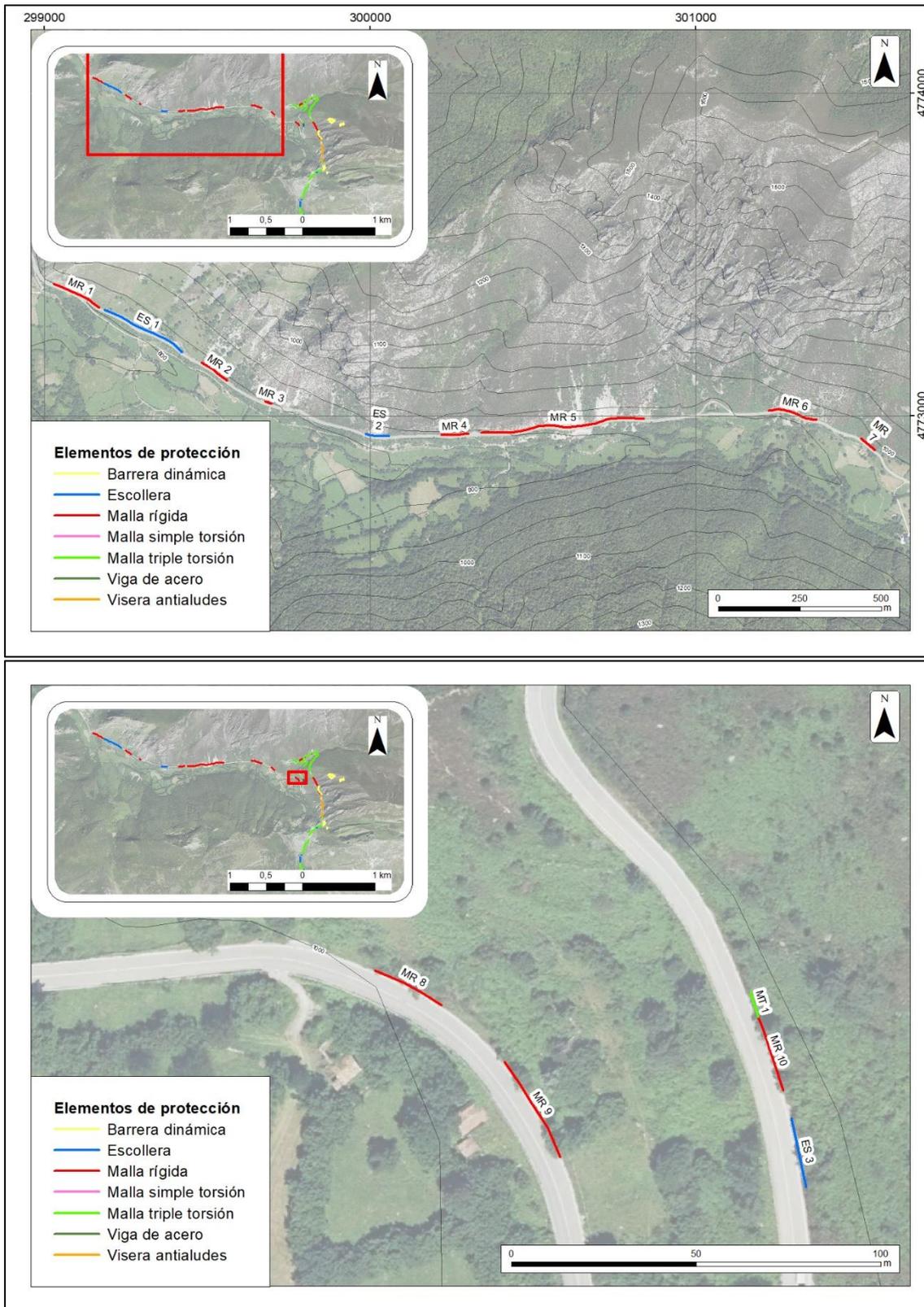


FIGURA 52: LOCALIZACIÓN DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN Y SOSTENIMIENTO ACTUALMENTE EXISTENTES ENTRE LOS PK 15 Y 20 DEL TRAZADO.

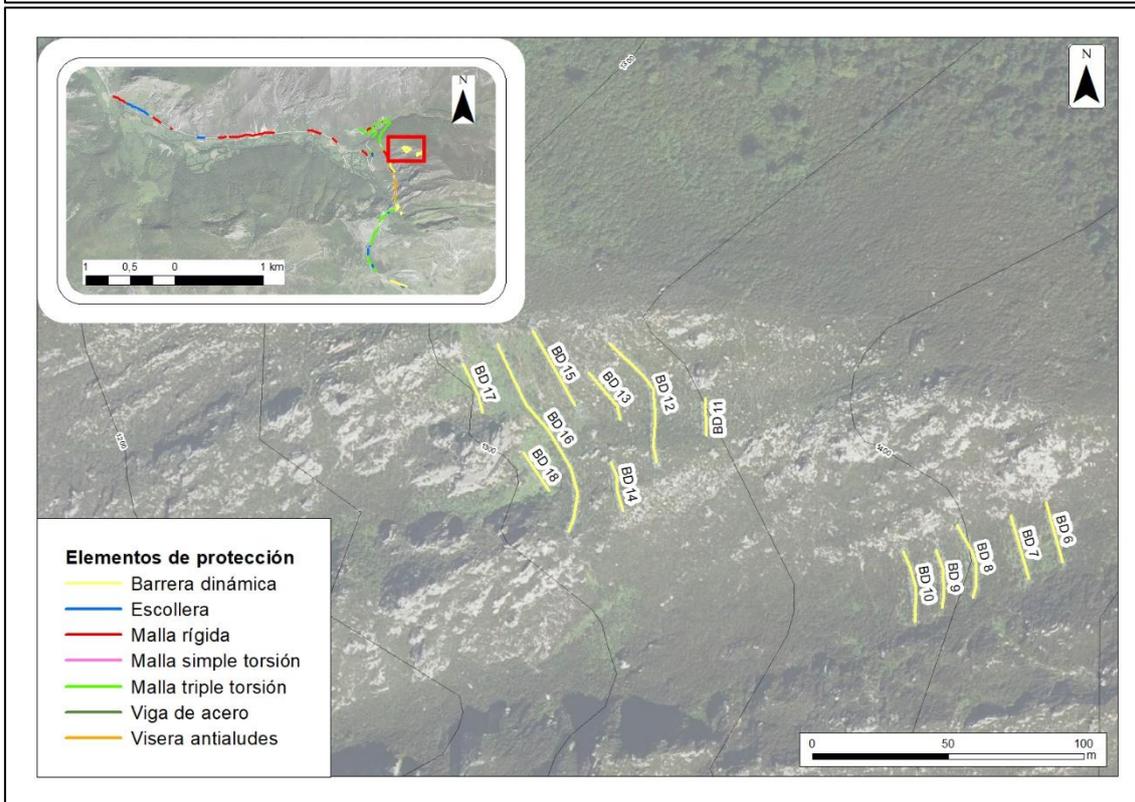
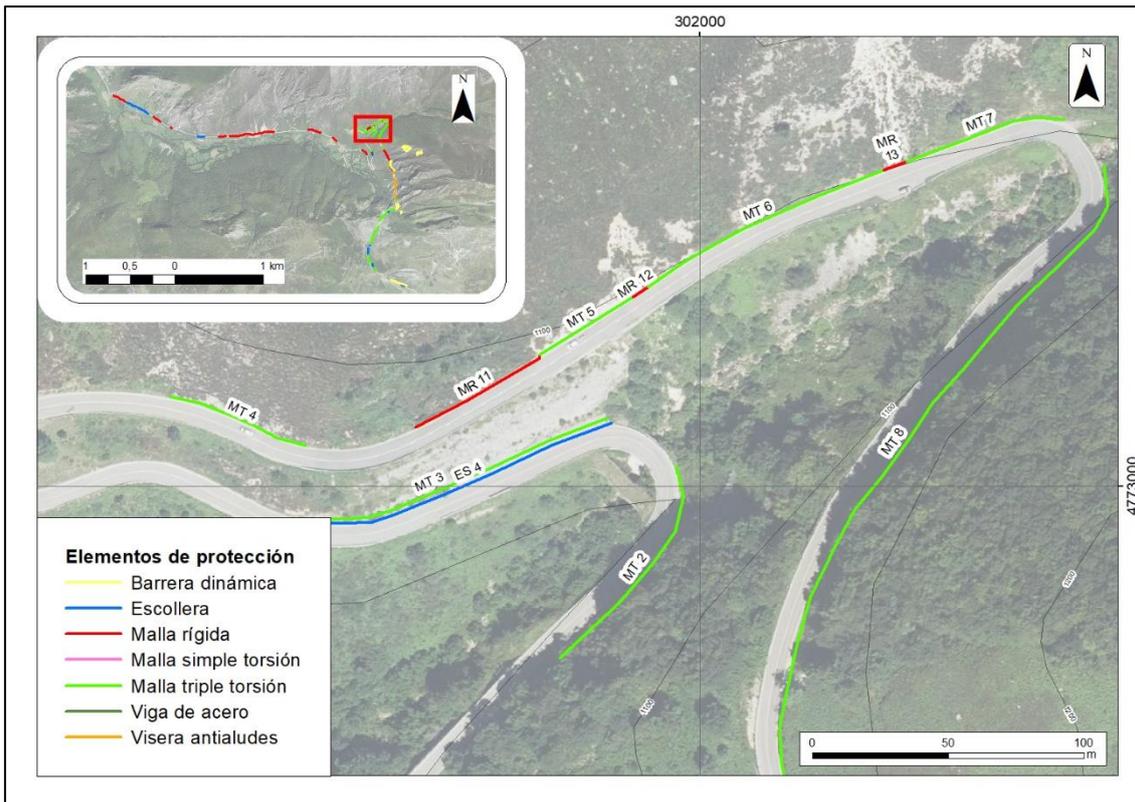


FIGURA 53: LOCALIZACIÓN DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN Y SOSTENIMIENTO ACTUALMENTE EXISTENTES ENTRE LOS PK 19 Y 20 DEL TRAZADO.

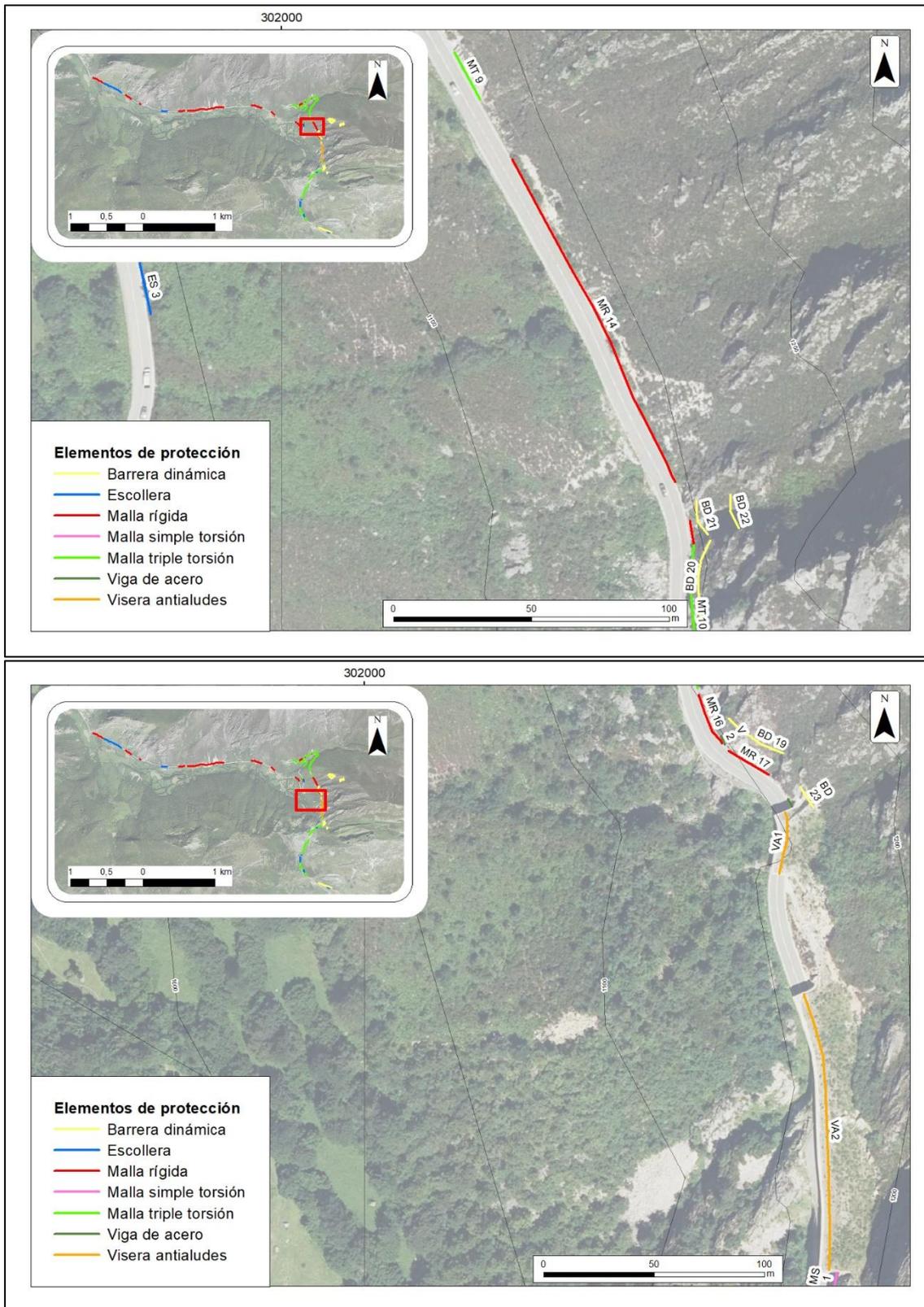


FIGURA 54: LOCALIZACIÓN DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN Y SOSTENIMIENTO ACTUALMENTE EXISTENTES ENTRE LOS PK 20 Y 22 DEL TRAZADO.

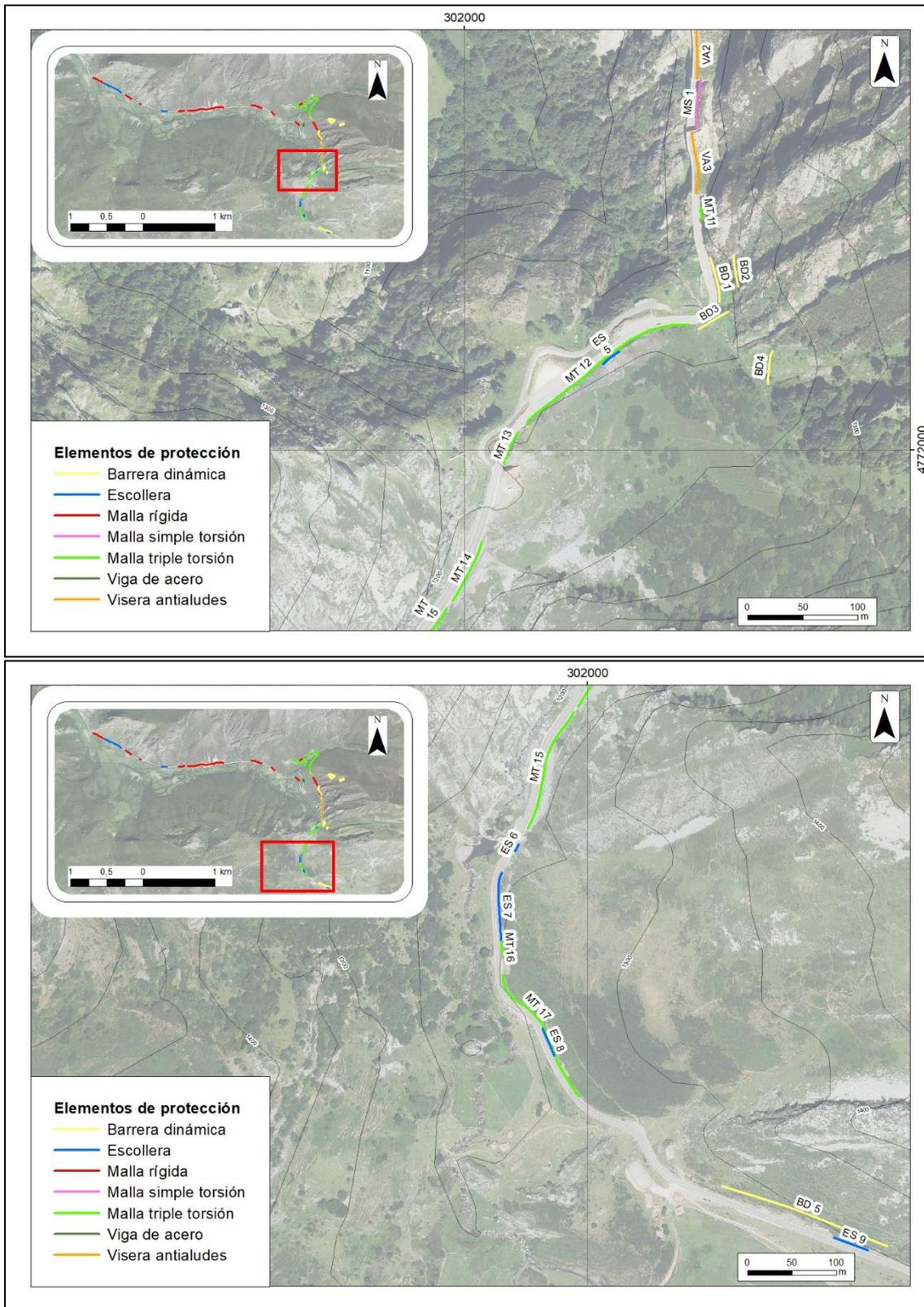


FIGURA 55: LOCALIZACIÓN DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN Y SOSTENIMIENTO ACTUALMENTE EXISTENTES ENTRE LOS PK 21 Y 23 DEL TRAZADO.

4. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster se pueden destacar las siguientes conclusiones relativas a la peligrosidad por aludes y a los fenómenos de ladera que afectan la carretera AS-253 (Cuevas-Puerto de San Isidro).

- Se presenta un mapa de peligrosidad por aludes donde se puede observar que las zonas de mayor peligrosidad se encuentran en las cabeceras de grandes cuencas hidrográficas principales identificadas. Por otro lado, las zonas de menor peligrosidad se encuentran en las laderas orientadas al norte y presentan además vegetación arbórea que dificulta el desencadenamiento de aludes.
- Teniendo en cuenta la situación de los cauces de drenaje de las cuencas hidrográficas identificadas se han encontrado 18 puntos donde resultaría necesario adoptar medidas de protección frente a aludes.
- En lo relativo a la caracterización del macizo rocoso, generalmente, en este sector ofrece una calidad media-buena, no observándose grandes variaciones a lo largo del trazado. Éste transcurre en su mayor parte por la formación Cuarcita de Barrios, siendo las cuarcitas la litología predominante. En general, son esperables pequeños fenómenos de inestabilidad, tales como roturas planares o en cuña, si bien las características del macizo rocoso favorecen la estabilidad de los taludes artificiales.
- Se han identificado diversas zonas de ladera a lo largo del trazado de la carretera donde se observan desprendimientos de rocas que dan lugar a canchales y algunos sectores donde se identifican importantes avalanchas. La modelización de las trayectorias que siguen los bloques desprendidos ha permitido identificar los sectores donde potencialmente podrían impactar con la carretera y estimar la energía cinética con la que alcanzan la misma.
- La cartografía de los elementos de contención a lo largo del trazado ha permitido identificar numerosos puntos donde estos sistemas pueden no resultar eficaces actualmente dada la ausencia de mantenimiento.

5. Referencias bibliográficas

Álvarez García, M. A.; Álvarez Arbesú, R. L.; Farias Arquer, P.; Fernandez Menéndez, S.; Fernández Prieto, J. A.; García Manteca, P.; Menéndez Duarte, R. (1994): Cartografía temática ambiental Felechosa 79-I (E. 1:25.000) Oviedo: INDUROT.

Adrichem Boogaert, H. A. Van (1967): Devonian and Lower Carboniferous Conodonts of the Cantabrian Mountains (Spain) and their stratigraphic application. *Leidse Geol. Meded.*, 39: 129-192.

Aller, J. A. (1981): La estructura del borde sudeste de la Cuenca Carbonífera Central (Zona Cantábrica, NW de España). *Trab. Geol., Univ. Oviedo*, 11: 3-14.

Álvarez-Marrón, J.; Pérez-Estaún, A.; Aller Manrique, J.; Heredia, N. (1990): Mapa geológico de la hoja nº79 (Puebla de Lillo) Mapa Geológico de España E. 1:50.000 Segunda Serie (MAGNA). Primera edición. IGME. Depósito legal: M-24821-1990.

BOE (1994). Núm. 228, de 23 de septiembre de 1994. En: <https://www.boe.es/boe/dias/1994/09/23/pdfs/A29237-29262.pdf>.

Barrois, Ch. (1882): Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. *Mem. Soc. Géol. du Nord.*, 2 (1): 630 pp.

Bieniawski Z.T. (1976): Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp.*, (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town, Balkema.

Colmenero Navarro, J. R.; Fernández, L. P. y Vera, C. (1988): Informe estratigráfico y sedimentológico de las formaciones Láncara, Baleas, Vegamián, Alba y Barcaliente para la Hoja nº. 79 (Puebla de Lillo) a escala 1: 50.000. Fondo Documental del I.T.G.E.: 93 pp.

Compte, P. (1937): La série cambrienne et silurienne du Leon (Espagne). *C.R. Ac. Sc. París*, 204: 604-606.

Compte, P. (1959): Recherches sur les terrains anciens de la Cordillère Cantabrique. *Mém. Inst. Géol. Min. España*, 60: 1-440. Madrid.



- Evers H. J. (1967): Geology of the Leonides between the Bernesga and Porma rivers. Cantabrian Mountains. *Leidse Geol. Meded.* 41: 83-151.
- Furdada, G. (1996): Estudi de les allaus al Pirineu Occidental de Catalunya: Predicció espacial i aplicacions de la cartografia. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 315 pp.
- Furdada, G. (2006): Aludes de nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Cuaternario y Geomorfología*, 20 (3-4): 73-88.
- Furdada, G. y Vilaplana, J. M. (1998): Statistical prediction of maximum run-out distances from topographic data in the western Catalan Pyrenees northeast Spain. *Annals of Glaciology*, 26. 285-288.
- García Loygorri, A.; Ortuño, G.; Caride de Liñán, C.; Gervilla, M.; Greber, Ch. y Feys, R. (1971): El Carbonífero de la Cuenca Central Asturiana. *Trab. Geol. Univ. Oviedo*, 3: 101-150.
- Ginkel, A. C. van (1965): Carboniferous fusulinids from the Cantabrian Mountains (Spain). En: *Leidse Geol. Meded.*, 31, 1-225.
- González Lastra, J. (1978): Facies salinas en la Caliza de Montaña (Cordillera Cantábrica). *Trab. Geol. Univ. Oviedo*, 10: 249-265.
- Murillo Díaz, J.M.; Azcón González de Aguilar, A.; Ballesteros Navarro, B.; Aragón Rueda, R.; Meléndez Asensio, M.; Ruíz Hernández, J.M.; Martínez Cortina, L. López Gutiérrez, J.C. (2010): Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 4: identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Demarcación hidrográfica 016 Cantábrico. Memoria resumen.
- Julivert, M. (1960a): Estudio geológico de la Cuenca de Beleño, valles altos del Sella, Ponga, Nalón y Esla de la Cordillera Cantábrica. *Bol. Inst. Geol. Min. Esp.*, LXXI: 1-346.



Julivert, M. (1965): Sur la tectonique hercynienne à napes de la Chaîne Cantabrique (étude géologique de la région à l'est du Bassin Central, Espagne). Bull. Soc. Geol. Fr., 7 (4), 644-651.

Julivert, M. (1971): Dècollement tectoniques in the Hercynian Cordillera of NW Spain. Am Jour. Sci, 270, 1-29.

Julivert, M. y Marcos, A. (1973): Superimposed folding under flexural conditions in the Cantabrian Zone (Hercynian Cordillera, NW. Spain). Am. Jour. Sci., 273, 353-375.

Leyva, F.; Granados, L. F.; Solvieva, M. N.; Laveine, J. P.; Lys, M.; Loboziak, C.; Martínez Díaz, C.; Brousmiche, C.; Candilier, A.M.; García, A. y Esnaola, J. M. (1985): La estratigrafía del Carbonífero medio en la zona de Campo de Caso-Tanes (Sector Central de la Región de Mantos). Compte Rendue X Congr. Int. de Strat. et Geol. du Carbonifère, I: 249-268. Madrid.

Lied, K y Bakkehoi, S. (1980): Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. Journals of Glaciology, 26 (94), 165-177.

Lied, K. y Toppe, R. (1989): Calculation of maximum snow-avalanche run-out distance by use of digital terrain models. Annals of Glaciology, 13, 164-169.

McClung, D. y Schaerer, P. (1996): Avalanchas. Sua Edizioak-Ediciones Desnivel, 309 págs.

Miller, E. P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. Tesis doctoral. Universidad de Illinois.

Modroño, R. (1991): Informe geológico-geotécnico para el proyecto de reacondicionamiento parcial en la cra. AS-253 de Cabañaquinta al puerto de San Isidro, P.K. 33,420 al 39,190 en el concejo de Aller. 25 pp.

Muñoz Jiménez, J. (1982). Geografía de Asturias. Ayalga Ediciones, Oviedo, 271 pp.

Ortuño, A.; Meléndez, M.; Rodríguez, M.L. (2004): Relación entre litología y características hidroquímicas de las aguas subterráneas. Red de Control de la Calidad del Principado de Asturias. Boletín Geológico y Minero, 115 (1): 35-46.



Pérez-Estaún, J. y Álvarez-Marrón, J. (1990). Memoria de la Hoja nº 79 (Puebla de Lillo). Mapa Geológico de España E. 1:50.000 (MAGNA), Segunda Serie, Primera edición. IGME, 60 pp.

Poblete, M.A.; Beato, S.; Marino, J.L. (2016): Los aludes de nieve en el Alto Aller: su incidencia en la carretera AS-253 del Puerto de San Isidro (Macizo Central Asturiano). In: *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro* (eds. J.J. Durán, M. Montes, A. Robador & A. Salazar). Instituto Geológico y Minero de España, pp. 751-758, Madrid.

Poblete Piedrabuena, M. Á., Beato Bergua, S., y Marino Alfonso, J. L. (2019). El riesgo de aludes en el Alto San Isidro (Macizo Central Asturiano): la vulnerabilidad de la carretera AS-253. *Cuaternario y Geomorfología*, 33 (3-4).

Quirós, F. y Fernández, G. (Dirs.) (1996). Gran atlas del Principado de Asturias. Atlas Geográfico. Tomo I. Ediciones Nobel, Oviedo, 295 pp.

Raven, J. G. M. (1983): Conodont biostratigraphy and depositional history of the Middle Devonian to Lower Carboniferous in the Cantabrian Zone (Cantabrian Mountains, Spain). *Leidse Geol. Meded.*, 52: 265-339.

Rodríguez, C. (1995): Estudio geomorfológico del Puerto de San Isidro. *Ería*, 36. 63-87

Sjerp, N. (1967): The geology of the San Isidro-Porma area (Cantabrian Mountains, Spain). *Leidse Geol. Meded.*, 39: 55-128.

Vera, J. A. (Ed.). (2004). *Geología de España*. Igme.

Villa, E. (1981): Datos sobre el contenido en fusulínidos de las formaciones Escalada y Fito de la Cuenca de Beleño (Asturias, NW España). *Brev. Geol. Astúrica*, vol. XXV (1-2): 9-12.

Villa, E. (1985): Foraminíferos de la región oriental de Asturias (Cordillera Cantábrica, N de España). *C. R. X Congr. Int. Strat. Geol. Carb.*, 1: 333-344. Madrid, 1983.

Villa, E. (1989): Fusulináceos carboníferos del Este de Asturias (N de España). Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. 378 pp.

Wagner, R. H. (1963): A general account of the Paleozoic Rocks between the rivers Porma and Bernesga. *Bol. Int. Geol. Min. España*. Vol. LXXIV: 163-331.



Winkler Prins, C. F. (1968): Carboniferous productidina and chonetidina of the cantabrian mountains: Systematics, stratigraphy and paleoecology. *Leidse Geol. Meded.*, 43: 41-155.

Wozniak, E.; Marquínez, J. (2004): Evaluación de la susceptibilidad por aludes de nieve a escala regional: el caso de Asturias. En: *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (G. Benito; A. Díez, eds.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, 509-518.

Zamarreño, I. (1972): Las litofacies carbonatadas del Cámbrico de la zona Cantábrica (NO de España) y su distribución paleogeográfica. *Trab. Geol., Univ. Oviedo*, 5, 1-118.

Investigación Hidrogeológica De La Cuenca Norte: Asturias: Plan Nacional De Investigación De Aguas Subterráneas Instituto Geológico y Minero de España 1984.

Plan director de infraestructuras para la movilidad de Asturias 2015-2030.

Anexos

Anexo 1: Estaciones geomecánicas

		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 15.780		ESTACIÓN: EG-1					
LITOLOGÍA:		CALIZA			FORMACIÓN: BARCALIENTE (CALIZA DE MONTAÑA)				
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60		
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martil.) 6		
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual			
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	(CAUDAL ESTIMADO)			
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	40	10	40	42	24	10	30	OBSERVACIONES: Seco en su mayor parte, hacia el SW gotea agua siguiendo falla 24/253	
FOTOGRAFÍA					PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA 				

RMR		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 15.780		ESTACIÓN: EG-1					
1	Resistencia roca matriz	E. carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
	Valor		20	17	13	6	3		
3	Espaciado		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm		
	Valor		20	15	10	8	5		
4	Longitud discontinuidades		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
	Valor		6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	< 0.1 mm	0.0-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
	Valor		6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada	Suave		
	Valor		6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
Valor		6	4	2	2	0			
Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderad. alterada	Muy alterada	Descompuesta			
Valor		6	5	3	1	0			
5	Agua freática	Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		
Clasificación RMR									
Clase		I	II	III	IV	V			
Calidad		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA			
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20			

ANEXO 1.1: ESTACIÓN GEOMECAÍNICA 1, RMR Y PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS DISCONTINUIDADES.

		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 17.187		ESTACIÓN: EG-2																					
LITOLOGÍA:		CUARCITA			FORMACIÓN: BARRIOS																				
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60																		
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martill.) 6																		
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual																			
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	(CAUDAL ESTIMADO)																			
RESISTENCIA "R" ESCLEROMETRO	66	60	42	36	42	54	66																		
OBSERVACIONES:																									
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA																					
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Dip / Direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>70 / 281</td></tr> <tr><td>2</td><td>61 / 320</td></tr> <tr><td>3</td><td>48 / 002</td></tr> <tr><td>4</td><td>60 / 257</td></tr> <tr><td>5</td><td>78 / 180</td></tr> <tr><td>2 m</td><td>87 / 061</td></tr> <tr><td>3 m</td><td>03 / 057</td></tr> <tr><td>1 m</td><td>81 / 169</td></tr> </tbody> </table>				ID	Dip / Direction	1	70 / 281	2	61 / 320	3	48 / 002	4	60 / 257	5	78 / 180	2 m	87 / 061	3 m	03 / 057	1 m	81 / 169
ID	Dip / Direction																								
1	70 / 281																								
2	61 / 320																								
3	48 / 002																								
4	60 / 257																								
5	78 / 180																								
2 m	87 / 061																								
3 m	03 / 057																								
1 m	81 / 169																								

RMR		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 17.187		ESTACIÓN: EG-2				
1	Resistencia roca matriz	E. carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa		
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %	
		Valor	20	17	13	6	3	
3	Espaciado		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm	
		Valor	20	15	10	8	5	
4	Longitud discontinuidades		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m	
		Valor	6	4	2	1	0	
	Abertura		Nada	< 0.1 mm	0.0-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm	
		Valor	6	5	3	1	0	
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada	Suave	
		Valor	6	5	3	1	0	
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
Valor		6	4	2	2	0		
Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderad. alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Valor	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0	
Clasificación RMR								
Clase		I	II	III	IV	V		
Calidad		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA		
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20		

ANEXO 1.2: ESTACIÓN GEOMECÁNICA 2, RMR Y PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS DISCONTINUIDADES.

PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 17.387		ESTACIÓN: EG-3					
LITOLOGÍA:	CUARCITA			FORMACIÓN: BARRIOS			
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martil.) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	(CALIDAD ESTIMADO)	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	58	66	58	30	44	44	58
OBSERVACIONES:							
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			
				<p>Orientations ID Dip / Direction 1 25 / 016 2 69 / 308 3 54 / 065 4 38 / 090 5 72 / 180 1 m 58 / 185 2 m 79 / 081 3 m 80 / 302</p> <p>Equal Angle Lower Hemisphere 17 Poles 17 Entries</p>			

RMR		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 17.387		ESTACIÓN: EG-3					
1	Resistencia roca matriz	E. carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	10 - 20 %	< 25 %	
		Valor	20	17	13	6	3		
3	Espaciado		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm		
		Valor	20	15	10	8	5		
4	Longitud discontinuidades		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	< 0.1 mm	0.0-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderad. alterada	Muy alterada	Descompuesta			
	Valor	6	5	3	1	0			
5	Agua freática	Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		
Clasificación RMR									
Clase		I	II	III	IV	V			
Calidad		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA			
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20			

ANEXO 1.3: ESTACIÓN GEOMECÁNICA 3, RMR Y PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS DISCONTINUIDADES.

PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 20.668		ESTACIÓN: EG-4					
LITOLOGÍA: CUARCITA			FORMACIÓN: BARRIOS				
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martil.) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	(CAUDAL ESTIMADO)	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	56	46	54	20	48	60	34
OBSERVACIONES:							
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			

RMR		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 20.668		ESTACIÓN: EG-4					
1	Resistencia roca matriz	E. carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %		< 25 %	
		Valor	20	17	13	6	3		
3	Espaciado		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm		< 6 cm	
		Valor	20	15	10	8	5		
4	Longitud discontinuidades		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m		> 20 m	
		Valor	6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	< 0.1 mm	0.0-1.0 mm	1-5 mm		> 5 mm	
		Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada		Suave	
		Valor	6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm		Relleno blando > 5 mm	
		Valor	6	4	2	2	0		
Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderad. alterada	Muy alterada		Descompuesta		
	Valor	6	5	3	1	0			
5	Agua freática	Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando		Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0		
Clasificación RMR									
Clase		I	II	III	IV	V			
Calidad		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA			
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20			

ANEXO 1.4: ESTACIÓN GEOMECÁNICA 4, RMR Y PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS DISCONTINUIDADES.

PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 21.622		ESTACIÓN: EG-5													
LITOLOGÍA:	CUARCITA			FORMACIÓN: BARRIOS											
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60								
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadam. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martill.) 6								
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual									
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua		Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	(CAUDAL ESTÁNDAR)								
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	56	44	14	62	28	58	66								
OBSERVACIONES:															
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA											
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Dip / Direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>90 / 253</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>33 / 028</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>88 / 112</td> </tr> </tbody> </table> <p>Equal Angle Lower Hemisphere 15 Poles 15 Entries</p>				ID	Dip / Direction	1	90 / 253	2	33 / 028	3	88 / 112
ID	Dip / Direction														
1	90 / 253														
2	33 / 028														
3	88 / 112														

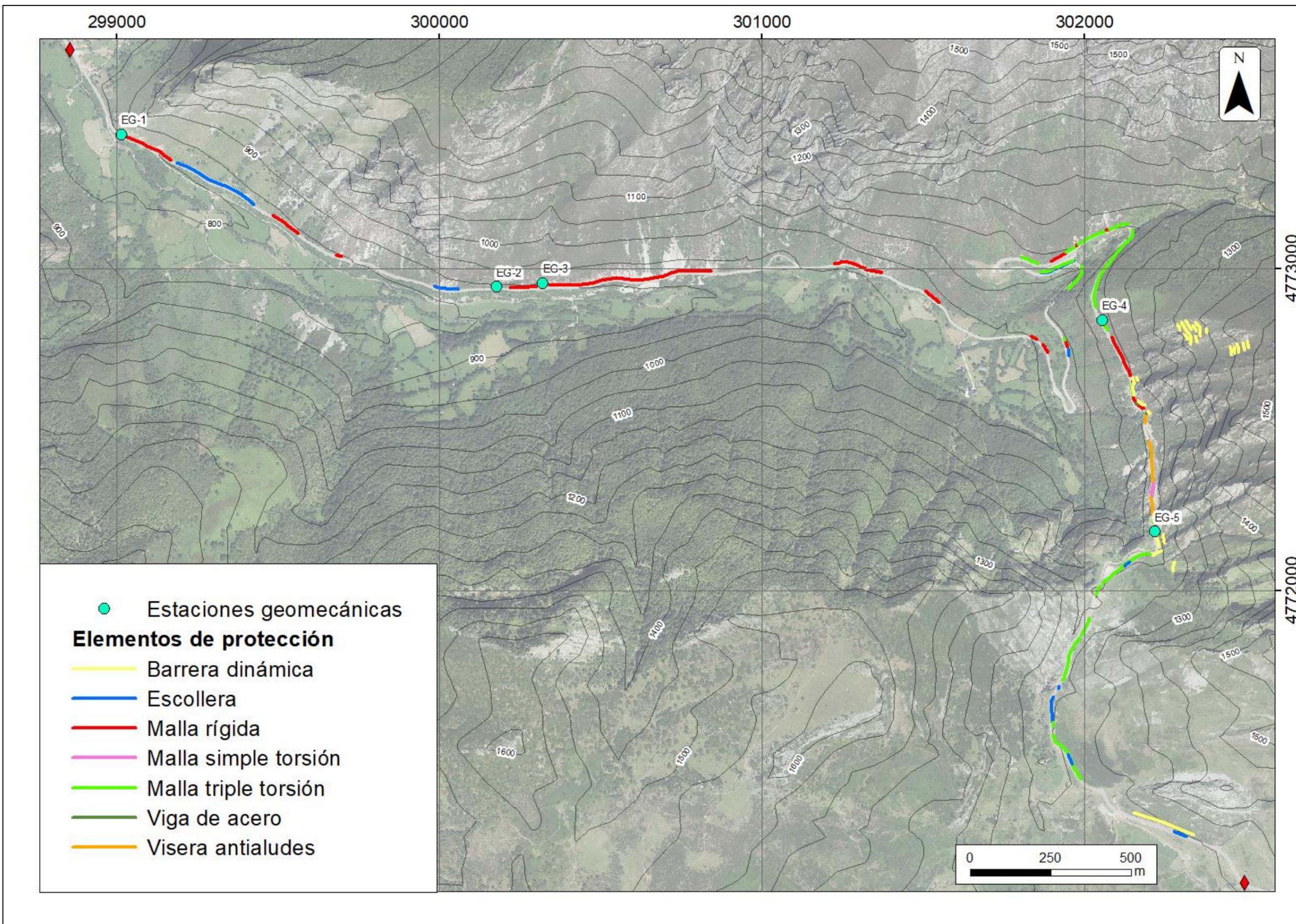
RMR		PROYECTO: TFM FECHA: 27/02/2020 LOCALIZACIÓN: PK 21.622		ESTACIÓN: EG-5					
1	Resistencia roca matriz	E. carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	10 - 20 %	5 - 10 %	< 5 %
	Valor		20	17	13	6	3	2	1
3	Espaciado		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.1 - 0.2 m	0.05 - 0.1 m	0.02 - 0.05 m	< 0.02 m
	Valor		20	15	10	8	5	3	2
4	Longitud discontinuidades		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m	> 20 m	> 20 m
	Valor		6	4	2	1	0	0	0
	Abertura		Nada	< 0.1 mm	0.0-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm	> 5 mm	> 5 mm
	Valor		6	5	3	1	0	0	0
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. rugosa	Ondulada	Suave	Suave	Suave
	Valor		6	5	3	1	0	0	0
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	Relleno blando > 5 mm	Relleno blando > 5 mm
	Valor		6	4	2	2	0	0	0
Alteración		Inalterada	Ligeram. alterada	Moderad. alterada	Muy alterada	Descompuesta	Descompuesta	Descompuesta	
Valor		6	5	3	1	0	0	0	
5	Agua freática	Estado general	seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluendo	Agua fluendo	
	Valor		15	10	7	4	0	0	
Clasificación RMR									
Clase		I		II		III		IV	
Calidad		MUY BUENA		BUENA		MEDIA		MALA	
Puntuación		100-81		80-61		60-41		40-21	

ANEXO 1.5: ESTACIÓN GEOMECÁNICA 5, RMR Y PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS DISCONTINUIDADES.

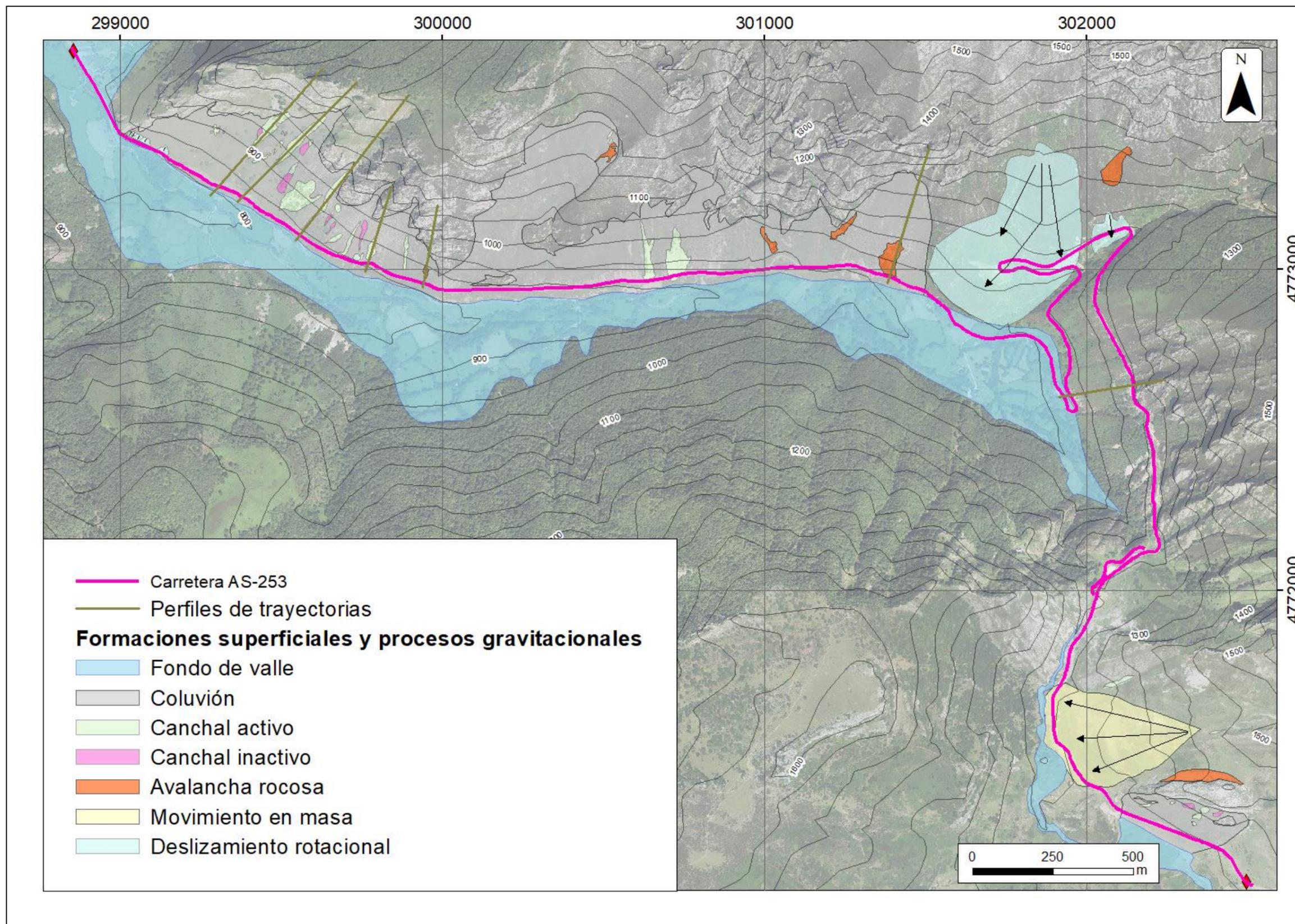


Anexo 2: Cartografías realizadas

ANEXO 2.1: MAPA DE PROTECCIÓN EXISTENTES Y UBICACIÓN DE ESTACIONES GEOMECAÑICAS



ANEXO 1.2: CARTOGRAFÍA DE FORMACIONES SUPERFICIALES, PROCESOS GRAVITACIONALES Y LOCALIZACIÓN DE PERFILES DE TRAYECTORIAS REALIZADOS EN EL ENTORNO DEL TRAZADO DE LA CARRETERA



ANEXO 2.3: MAPA DE PELIGROSIDAD POR ALUDES

