



Facultad de Ciencias



Facultad de Ciencias

Influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de los movimientos de ladera en Cantabria

**(The Influence of precipitations on the
occurrence of landslides in Cantabria)**

Trabajo de Fin de Máster

para acceder al

**MÁSTER OFICIAL EN TÉCNICAS DE ANÁLISIS,
EVALUACIÓN Y GESTIÓN SOSTENIBLE DE PROCESOS
Y RIESGOS NATURALES**

Autor: Eliezer San Millán Revuelta

Director: Dr. Alberto González Díez

Co-Director: Dra. Gema Fernández Maroto

Septiembre-15

Índice de Contenidos

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2. OBJETIVOS	13
3. ÁREA DE ESTUDIO	13
3.1. CLIMA	14
3.2. GEOLOGÍA	14
3.3. CARRETERAS DE CANTABRIA	16
4. METODOLOGÍA	16
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
4.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL	19
4.3. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE PLUVIOMETRÍA	20
4.4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	22
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	24
5.2. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA ALTURA	26
5.3. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA PENDIENTE	28
5.4. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA LITOLOGÍA	29
5.5. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y SU OCURRENCIA TEMPORAL	29
5.6. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LAS PRECIPITACIONES	30
5.7. UMBRALES DE PRECIPITACIÓN.	36
6. CONCLUSIONES	43
7. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	44
AGRADECIMIENTOS	44
8. BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXO	49

RESUMEN

En este trabajo se analiza la contribución de la precipitación al desencadenamiento de procesos de ladera en Cantabria. En el planteamiento del problema se describe qué son los procesos de ladera, los factores que los determinan, el papel de la lluvia como factor desencadenante de deslizamientos y una discusión sobre el umbral de precipitación necesario para iniciar el desencadenamiento de deslizamientos en esta región. Determinar esta magnitud es de gran utilidad en la construcción de herramientas de mitigación que atenúen la acción de estos procesos sobre los bienes humanos. En el apartado de objetivos se plantean las hipótesis que se pretenden verificar y las principales metas que se persiguen, entre ellas, la propuesta de una primera aproximación al umbral de precipitación requerido para producir argayos en Cantabria, usando datos de taludes de carreteras que han sido argayados tras periodos de lluvias intensas, y durante los últimos diez años. La metodología aplicada en este trabajo se basa en la consulta de la hemeroteca digital del Diario Montañés, usando sus motores de búsqueda y empleando las palabras deslizamiento y argayo, como palabras clave. El inventario de registros encontrado fue filtrado por fecha de ocurrencia y lugar, descartando aquellos registros sin información de ambas variables. Estos datos se cruzaron con los registros climáticos de AEMET para dichas zonas y fechas, considerando los valores de precipitación en los cinco días anteriores a la rotura. Los principales resultados obtenidos con este método son, que las roturas están aumentando hacia el futuro, sin correlación con incrementos de precipitación, siendo los años 2010, 2013 y 2015, los que más roturas registran. Desde un punto de vista anual, el mayor número de roturas se da en enero y junio. La zona norte de Cantabria es más proclive a las roturas que la zona sur y los materiales más susceptibles son cretácicos y cuaternarios, fundamentalmente. La mayor parte de las roturas se han producido con precipitaciones con intensidades de 23 a 92 mm en 24h y con precipitaciones acumuladas superiores a 102 mm. El 80% de los deslizamientos requieren de cuatro días de lluvias acumuladas antecedentes. En Cantabria se generan movimientos de tierra en taludes artificiales con bajos valores de intensidad de lluvia (valores medios de intensidad de precipitación próximos a 45,55 mm/24 h), pero para la mayoría de los casos son necesarios más de 4 días de precipitaciones. Los umbrales derivados de la base de los valores máximos absolutos, así como la de los valores máximos relativos obtenidos a partir de la muestra de intensidades mínimas filtrada, presentan resultados coincidentes con los obtenidos en taludes naturales en otros entornos geográficos.

Palabras Clave: Deslizamientos, umbrales de precipitación, Cantabria, taludes artificiales, laderas naturales

ABSTRACT

In the introduction, mass movement processes as well as their landslide conditioning factors, and the role of rainfall as a landslide triggering factor are described. Besides, precipitation threshold needed to develop these processes in this region is discussed. Determining this magnitude is considerably useful for the development of mitigation schemes which may lessen the damage of these processes over human belongings. In the Objective section, the hypothesis and the main pursuing goals, are planned to verify; among these, the proposal of a first approximation to the rainfall threshold required to produce landslide in Cantabria, which will be based on road cut slope data, which have been slipped during intense rainfall periods, over the last 10 years. The Methodology section relies on data collected from the digital library of "*El Diario Montañés*" newspaper. Words '*deslizamiento*' and '*argayo*' were searched in the digital library using its web search engine. The findings were filtered according to their date and place of happening; records without these information were dismissed. These data were then cross-matched with climatic records from the *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET) for the same locations and date, taking into account precipitation values, over five previous days to the ruptures. Several interesting findings were obtained in this works, for instance, ruptures are increasing over the time, without correlation to the rainfall raise, as well as the fact of years 2010, 2013, 2015 accounting for the highest number of recorded ruptures. Annually, the highest number of ruptures are recorded in January and June. Northern Cantabria is more prone to record ruptures than the South of the region. Moreover, the most susceptible materials to landslides are mainly those from the Cretaceous and Quaternary period. The most part of ruptures has been produced by precipitation intensities between 23 to 92 mm; with an accumulated rainfall higher than 102 mm. 80% of landslides requires four days of accumulated rainfalls. In Cantabria, landslides in cut slopes with low rainfall intensities (mean value of rainfall intensity close to 45,55 mm/24h) are generated, but for most of the events they occur after a period of more than 4 days of accumulated rainfalls. The thresholds derived from the basis of the maximum absolute values, and the maximum values relative obtained from the sample filtered of the minimum intensities, have matching results with those obtained in natural slopes in other geographic areas.

Key words: Landslides, precipitation thresholds, Cantabria, cut slopes, natural slopes

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una primera aproximación al análisis de la contribución de las precipitaciones al desencadenamiento de procesos de ladera en Cantabria. En el planteamiento del problema se describe qué son los procesos de ladera, los factores que los determinan, el papel de la lluvia como factor desencadenante de deslizamientos y una discusión sobre el umbral de precipitación necesario para iniciar el desencadenamiento de deslizamientos en esta región. Determinar esta magnitud es de gran utilidad en la construcción de herramientas de mitigación que atenúen la acción de estos procesos sobre los bienes humanos. Dada la dificultad material de poder disponer de una muestra de deslizamientos en laderas naturales se han utilizado taludes de carretera, que aunque no son laderas naturales permiten establecer unas primeras relaciones entre precipitaciones y movimientos del terreno. En el apartado de objetivos se plantean las hipótesis que se pretenden verificar y las principales metas que se persiguen, entre ellas la propuesta de una primera aproximación al umbral de precipitación requerido para producir argayos en Cantabria. En el apartado de metodología se revisa el método de trabajo puesto en práctica en este estudio. Los principales resultados obtenidos con este método, y su discusión, se muestran en el apartado resultados y discusión. Por último, las conclusiones más relevantes se exhiben en el apartado de conclusiones. Este trabajo queda completado con un apartado bibliográfico.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos de ladera, también conocidos como deslizamientos de tierras o movimientos en masa (*Sharpe, 1938; Varnes, 1978; Brunsden, 1984; Crozier, 1986; Cruden, 1991; Cruden y Varnes, 1996; Corominas y García Yagüe, 1997*), constituyen uno de los principales procesos erosivos, representado una importante contribución a la evolución del relieve en zonas húmedas (*Cendrero y Dramis, 1996; González et al., 2013*). En la zona norte de España, Asturias, Cantabria y País Vasco, a este tipo de procesos se les denominan también argayos (*Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua*).

El estudio de los movimientos de ladera ha sido abordado por numerosos autores, debido a que se trata de un tema de gran importancia ya que son el tercer riesgo natural en el mundo en cuanto al número de víctimas producidas, por detrás de los terremotos y las inundaciones (*Ayala-Carcedo, 2002*). Los movimientos de ladera suponen un importante impacto económico, ya que su actividad supone pérdidas en bienes y recursos (*Bonachea, 2006*), provocando fundamentalmente afecciones en los núcleos de población y vías de comunicación. El mayor número de deslizamientos en España se producen en las zonas montañosas, como son los Pirineos, Cordilleras Béticas, Sierras Costero-Catalanas, etc. (*Corominas, 2006*). En la Cordillera

Cantábrica supone un proceso ampliamente desarrollado (*Bonachea et al., 2014*) entre otras cosas por la presencia de litologías susceptibles, una topografía abrupta y la elevada pluviosidad que se da en esta zona durante todo el año.

El desarrollo de este tipo de procesos se ve muy influenciado por una serie de factores que los determinan (Factores determinantes, *Palmquist y Bible, 1980*). A su vez, éstos se dividen en factores condicionantes (condicionan la aparición del movimiento) y factores desencadenantes (desencadenan el movimiento). Como señala *González (1995)* los factores condicionantes se mantienen más o menos estables a lo largo de amplios periodos de tiempo, por lo que pueden considerarse como “pasivos” en lo referente al análisis de la estabilidad de laderas. A continuación se presentan estos factores agrupados en cuatro grandes conjuntos.

- **La topografía:** dado que los movimientos de ladera son fenómenos gravitacionales, es necesaria cierta pendiente (ángulo de inclinación máximo) para que se desarrolle la rotura y se produzca movimiento. La pendiente está relacionada con la geometría de la ladera, y ésta con parámetros como tipo y forma de la ladera, gradiente, altura, etc.
- **La geología:** los diferentes materiales terrestres, ya sean rocas, hielo, así como todo tipo de materiales blandos o derrubios (que se conocen en ámbitos constructivos como suelos) tienen distintas propiedades geomecánicas (ángulo de rozamiento interno, cohesión, límites líquido y plástico, peso específico, resistencia a la compresión, etc.), que condicionan la estabilidad de un material. Estas propiedades están determinadas por sus características mineralógicas, textura, características sedimentológicas, el espesor o potencia del material implicado, así como la capacidad que tienen los materiales para meteorizarse. También influyen la estructura geológica y las discontinuidades que conforman el macizo rocoso (estratos, fracturas, lineaciones, etc.), así como el número, tipo, tamaño, espaciamiento y orientación de estas discontinuidades respecto a la ladera. Adicionalmente, también influye la posibilidad de contener fluidos o gases en su interior, así como la facilidad para almacenarlos, o dejar que éstos circulen a su través, (facilidad que se mide mediante variables como son la transmisividad, capacidad de infiltración, porosidad, etc.). En sedimentos con abundancia de minerales arcillosos se puede producir, en épocas de lluvia, un hinchamiento por la absorción de agua, lo que fomenta la inestabilidad. Es también frecuente el lavado de las sales contenidas en determinadas arcillas marinas, produciendo un reordenamiento en la estructura de las partículas, y dando lugar a una reducción de su resistencia al corte y la inestabilidad del material.
- **La vegetación:** la vegetación juega un doble papel en la estabilidad de la superficie de las laderas (*Gray y Leiser, 1982*). Son varias las formas en que la vegetación afecta a la

estabilidad de las laderas; así por ejemplo, las raíces aumentan su resistencia a la cizalla, reforzando su cohesión, pero también favoreciendo la disgregación del material y reduciendo esta cohesión. En otras ocasiones, la vegetación regula la cantidad de humedad en el terreno, evitando la aparición de esfuerzos por saturación, pero también favoreciendo la infiltración y su saturación.

- **La climatología:** el clima de un territorio está definido por su temperatura, precipitación, evapotranspiración, etc. Estas variables, actúan dentro de los análisis de estabilidad, sacando o introduciendo agua en el sistema, lo que da lugar a modificaciones de la resistencia de los materiales implicados.

Los segundos factores tenidos en cuenta por *Palmquist y Bible (1980)* son los desencadenantes. Éstos actúan a modo de estímulos externos al sistema, provocando la modificación de las condiciones de equilibrio en la ladera, obteniéndose como resultado la rotura de la misma debido a una disminución de la resistencia del material (*González, 1995*). Pueden distinguirse cinco factores desencadenantes, la sismicidad, las actividades constructivas, el tectonismo, relajación litostática y el clima. Seguidamente se describirá el papel ejercido por estos factores en la inestabilidad utilizando como ejemplo el estado de equilibrio de un bloque que desliza por una ladera. En materiales blandos y en fracturas el criterio de rotura que suele aplicarse habitualmente es el criterio de *Mohr-Coulomb (1860)*, en el cual la resistencia del material viene expresada por la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma_n \times \tan \phi$$

Donde:

τ = resistencia al corte del material

c = cohesión del material

σ_n = componente normal del esfuerzo

ϕ = ángulo de rozamiento interno del material.

Por otra parte, en condiciones de saturación del material, la presión intersticial ejercida en sus poros por el fluido que alberga, afecta a la cohesión, a la componente normal del esfuerzo y al ángulo de rozamiento interno del material. En esta situación se habla de condiciones efectivas, y su resistencia viene expresada por la siguiente expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu) * \tan \phi'$$

Donde:

c' = cohesión efectiva del material

ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo del material.

σ' = componente normal del esfuerzo efectiva ($\sigma' = \sigma_n - \mu$)

μ = presión intersticial

Evidentemente, cualquier variación del estado de esfuerzos que conlleve una disminución de la resistencia del material fomentará la rotura de la ladera. Estas variaciones pueden deberse a las situaciones que a continuación se indican:

- **Las vibraciones.** En una sacudida sísmica se producen aceleraciones en el terreno que conllevan variaciones en las componentes normal y tangencial del esfuerzo. Estas aceleraciones también generan cambios en la presión intersticial. En función de la orientación de la aceleración resultante es posible que la componente tangencial se incremente notablemente en módulo, en relación con la normal, a igualdad de otros factores, desencadenándose la rotura. Además, frecuentemente ocurre un debilitamiento de los enlaces entre partículas, reduciéndose la cohesión, y produciéndose en algunas ocasiones la fluencia del material.
- **Las actuaciones antrópicas.** Las excavaciones alteran la geometría del talud, aflorando en muchos casos, sobre la superficie de la nueva ladera, algunas de las discontinuidades existentes en el macizo rocoso. Éstas pueden poseer caras libres de movimiento y desarrollar roturas. En otras ocasiones, aparecen superficies de rotura de antiguos deslizamientos estabilizados, que al quedar sin sujeción vuelven a inestabilizarse. Otras veces, se modifica la morfología de la ladera, sobrecargando la cabecera del talud, o bien descalzando su base, modificando las condiciones de equilibrio. Las explosiones incontroladas también modifican el estado de equilibrio de esfuerzos aportando nuevo material a la zona inestable a través de un incremento de la componente horizontal del esfuerzo.
- **El tectonismo.** Se manifiesta como modificaciones del nivel de base. La ladera cambia su pendiente; curvatura; etc., fomentándose la excavación del pie de la ladera por los cursos fluviales, etc. En definitiva se modifican las componentes de esfuerzo presentes en el estado de equilibrio.
- **La relajación litostática, o fatiga mecánica del material.** Este factor facilita la rotura debido a la relajación de las tensiones internas apareciendo grietas en el material. También pueden producirse roturas bajo cargas dinámicas cíclicas (tensión-relajación).
- **Los cambios climáticos.** Las variaciones bruscas de temperatura, precipitación y/o evapotranspiración, sobre los materiales expuestos en la ladera, supone el factor que más contribuye a la inestabilidad. El agua aportada por la precipitación puede saturar los materiales geológicos, produciendo en ellos incrementos rápidos de la presión intersticial. Este proceso es llevado a cabo, tanto por lluvias prolongadas y poco intensas, como por tormentas de alta intensidad de precipitación desarrolladas en un corto lapso de tiempo, así

como en deshielos, etc. Si los materiales no permiten la liberación de las sobrepresiones registradas se produce una reducción de la resistencia del material, dando lugar a roturas. Otro proceso importante es el impacto de las gotas de lluvia durante tormentas. Este impacto fomenta la aparición de escorrentía superficial difusa, y/o el desarrollo de flujos instantáneos de lodos o derrubios. Por otra parte, las variaciones bruscas de temperatura ocasionan el deshielo del manto de nieve o de hielo pero también favorecen la termoclastia o crioclastia, que rompen los materiales.

Existen en la literatura muchos trabajos que analizan el papel jugado por el clima en el desarrollo de los movimientos de ladera, entre los que pueden destacarse las revisiones realizadas por *Corominas (2000)*; *Corominas (2006)*, *González Díez et al. (2005)*; *González Díez, (2015)*.

Caine (1980) estudió las relaciones existentes entre la formación de deslizamientos y las precipitaciones, mediante un inventario de casos que aportaba una amplia casuística y una gran variabilidad de condiciones geológicas y climáticas. En su estudio investigó un total de 73 deslizamientos superficiales (es decir arroyos con profundidades inferiores a tres metros) situados en laderas no afectadas por alteraciones antrópicas ni por socavamiento basal fluvial. Del análisis de los datos obtuvo una relación entre la intensidad de precipitación y la duración de las tormentas para la producción de deslizamientos ($I=14.82 D^{-0.39}$, donde I es la intensidad de precipitación, medida en mm/h, y D es la duración de la precipitación medida en horas). Sus resultados muestran un ajuste muy bueno con lluvias de duración entre 10 minutos y 3 días (Figura 1). Posteriormente, *Crozier (1997)* plantea un tratamiento similar al de Caine, pero deshaciendo el sesgo estadístico implícito en el estudio de Caine, puesto que incluye eventos climáticos en los que no se desarrollaron deslizamientos.

Tomando como base la idea inicial de Caine, otros autores (*Cannon y Ellen, 1985*; *Wieczorek, 1987*; o *Wieczorek et al., 2000*), llevaron a cabo análisis similares. Estos autores proponen considerar el papel de la lluvia antecedente junto con la intensidad y duración de la precipitación. Así, Cannon y Ellen trabajaron en deslizamientos superficiales de las montañas North Shore (Columbia Británica), mientras que *Wieczorek et al. (2000)* lo hizo en las montañas Blue Mountains (Virginia). Como se puede apreciar en la Figura 2 la mayoría de los puntos de estos estudios caen por debajo de la línea propuesta por Caine.

La comparación de los datos demuestra la variabilidad de las condiciones hidroclimáticas responsables de la ocurrencia de deslizamientos y enfatiza la necesidad que tienen los umbrales de calibrarse para regiones específicas, dado que los valores de estos autores se sitúan sobre la línea de Caine (*González Díez, 2015*).

En otro tipo de trabajos se presentan umbrales obtenidos en diversas partes del mundo, de manera que puedan compararse los resultados, incluyendo tanto a los umbrales ya descritos, como otras propuestas, como la presentada por *Wieczorek (1987)* para intervalos de duración de 1-6,5 horas que fueron obtenidos en Las Montañas de Santa Cruz en California; o

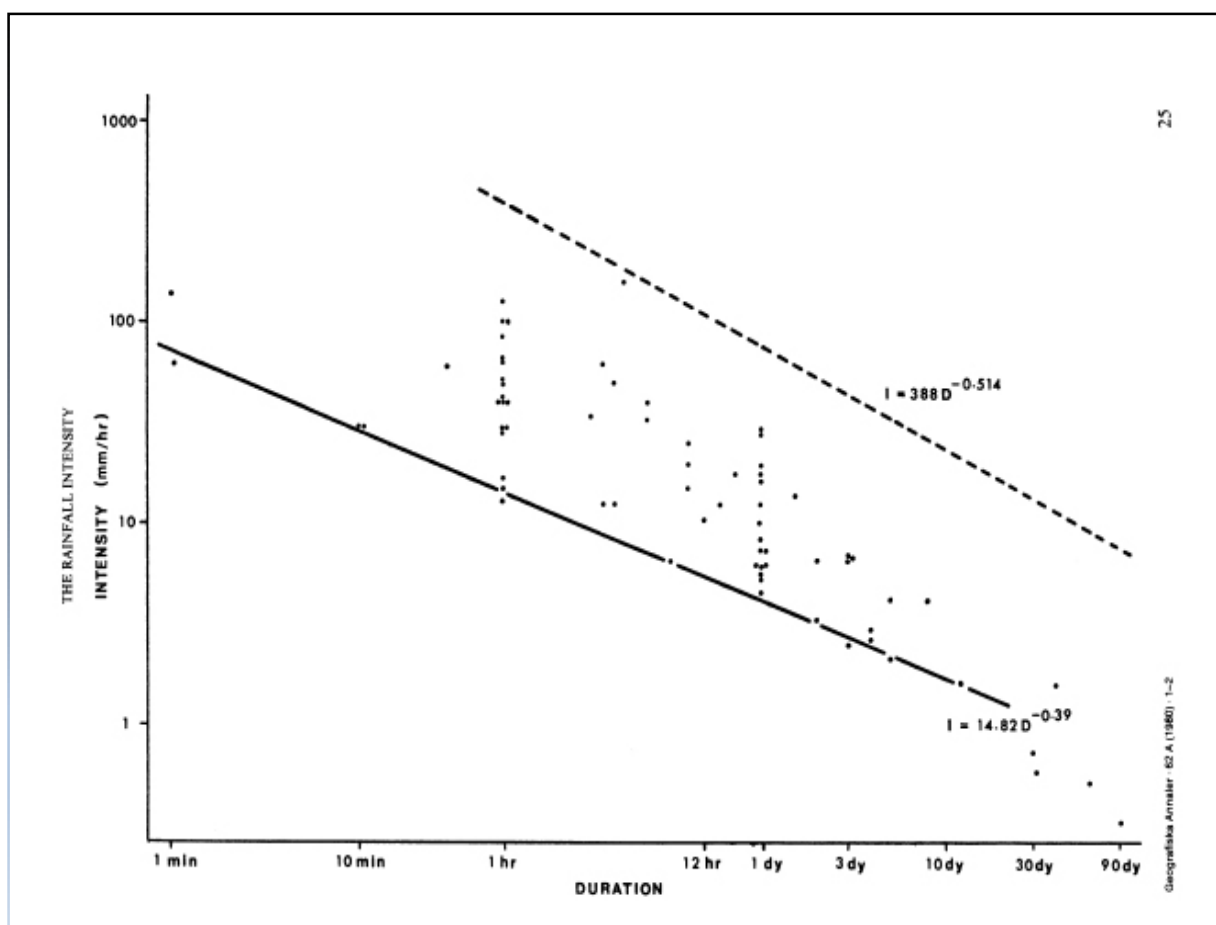


Fig. 1. Figura en la que se muestra las relaciones entre precipitaciones y ocurrencia de deslizamientos encontradas en un área de Estados Unidos (tomada de Caine 1980).

por *Corominas et al. (2005)* para duraciones de la precipitación por encima de las 165 horas en Los Pirineos; o las obtenidas por *Guzzetti et al. (2008)* para duraciones entre 48-1000 horas y aplicable a cualquier parte del mundo; o aquellas propuestas por *Crosta y Frattini (2001)* para intervalos de 0,1-1000 horas; o las presentadas por *Tuñol y Regalado (1996)* para unos intervalos entre 0,167-3 horas en unos estudios realizados en Filipinas.

Un trabajo muy interesante desarrollado con posterioridad a los de Caine, Wieczorek, etc., fue el realizado por *Shakoor y Smithmyer (2005)*. Este estudio se basó en analizar la cantidad de precipitación necesaria para desencadenar roturas en depósitos coluviales (en Marietta, Ohio, USA), usando los datos de precipitaciones tomados a 24, 48 y 72 horas antes de la rotura.

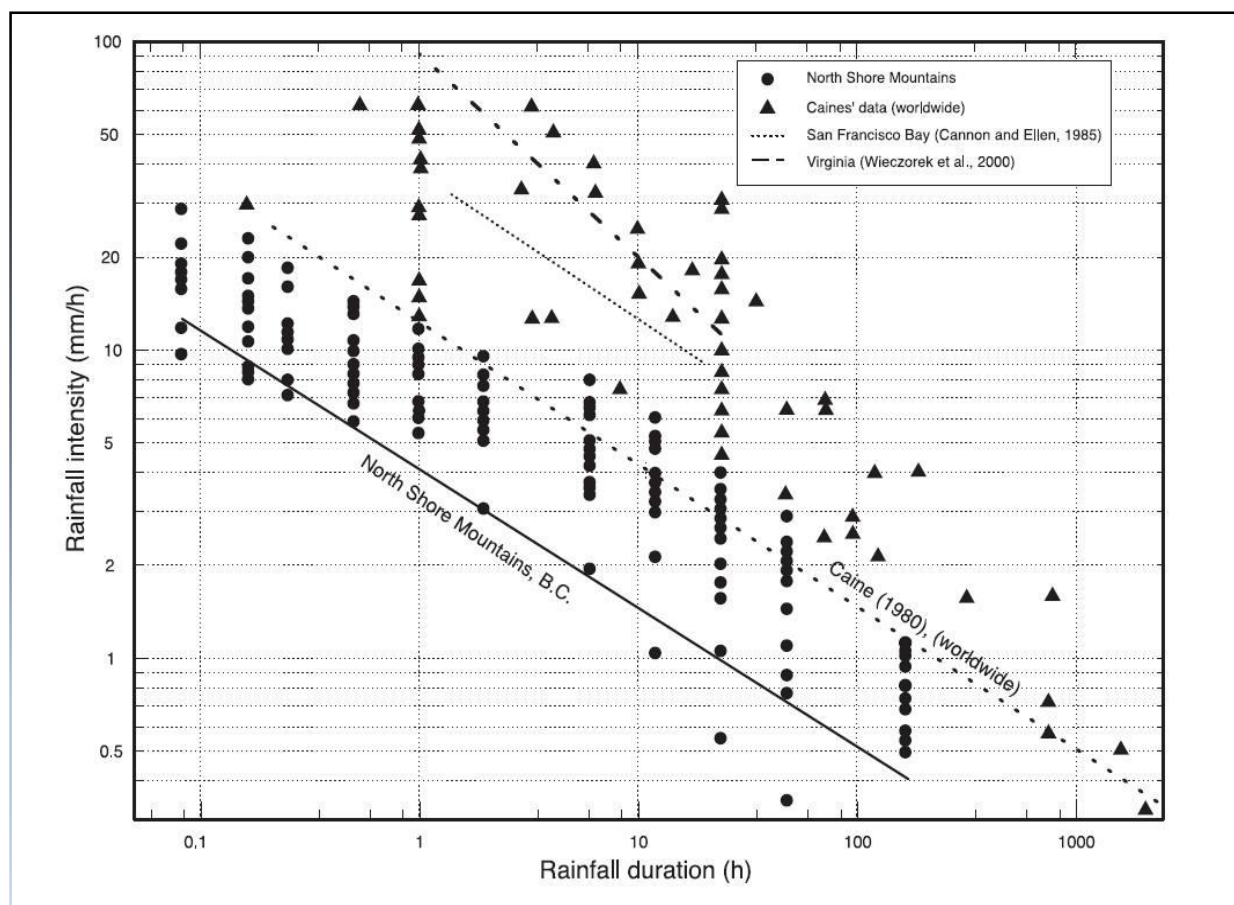


Fig. 2. Diferentes propuestas de umbrales de precipitación de deslizamientos obtenidas en Norte America y Canada (tomado de Wieczorek et al., 2000).

Los resultados obtenidos fueron similares a los propuestos por Caine pero con diferencias interesantes. Así por ejemplo, se constató que las roturas correspondían fundamentalmente con movimientos traslacionales y se originaban a poca profundidad, a lo largo del contacto entre el depósito superficial y la roca del sustrato, por lo que pueden equivaler a modelos de talud infinito. Además, se requiere que el material deslizado tenga un grado de saturación muy alto, entre el 90 y 100%, dependiendo, evidentemente, de los ángulos de pendiente de la ladera. Otro dato interesante observado, en relación con las roturas, es que éstas se ven claramente influenciadas por la vegetación, puesto que las grietas se desvían en las proximidades de masas arboladas y arbustos.

Conocida la influencia de las precipitaciones acumuladas en días previos a la ocurrencia del evento, la discusión se centra en la consideración de cuántos días de lluvia precedente son necesarios para producirse la rotura. Existen ciertas discrepancias en la literatura en cuanto a la consideración del número de días de precipitación acumulada y de las lluvias detonantes de corto plazo, que influyen en el desencadenamiento de los deslizamientos. *Mayorga (2003)* analiza la importancia de las lluvias acumuladas precedentes de 180 días antes del deslizamiento y las

lluvias de corto plazo ocurridas dentro de las 24 horas antes del deslizamiento. Otros autores como *Guidicini e Iwasa (1977)* y *Chleborad (2001)*, usaron las lluvias acumuladas en los 15 días anteriores al evento y las precipitaciones de alta intensidad durante los 3 días anteriores, como las causantes de los deslizamientos. *Lumb (1975)* estudió la relación entre las lluvias acumuladas en los 15 días anteriores en relación a las ocurridas el día del deslizamiento. *Crozier (1986)* propuso un método mediante el cual se obtiene el número de días que aportan lluvia efectiva en la generación de deslizamientos; este método se expresa a través de la fórmula $P_{ef} = KP_1 + K^2P_2 + \dots + K^nP_n$, donde P_{ef} es la lluvia efectiva, P_1 son las precipitaciones en las 24 horas anteriores al evento, P_2 es el día anterior al anterior, y así sucesivamente, K es un coeficiente empírico función de las características hidrológicas de los materiales, y varía entre 0.8-0.9. De este método se deduce que las lluvias caídas 30 días antes de la formación del deslizamiento son prácticamente despreciables. Otros autores, en cambio, proponen indicadores para normalizar el papel de la lluvia como por ejemplo el coeficiente del evento (*Guidicini y Iwasa, 1997*), que mide la relación existente entre el total de precipitación del evento y la precipitación media anual. Este indicador se ha mostrado muy útil en varios trabajos (*Govi y Sorzana, 1980; Cannon y Ellen, 1988; Mark y Newman, 1988; Pierson et al. 1991*). No obstante debe señalarse que este coeficiente varía, según la zona de estudio, entre 0,16 y 0,06 como señalan diversos autores (*Guidicini y Iwasa, 1997; Polloni et al. 1996; Harp y Savage, 1998*).

Uno de los resultados más interesantes a nivel científico, en los trabajos presentados hasta el momento, es el concepto de umbral de precipitación. Un umbral es el nivel mínimo o máximo de alguna magnitud a partir del cual un proceso tiene lugar (*Reichenbach, 1998*). Por ejemplo, en relación con los movimientos de ladera, por debajo de este umbral hay pocas probabilidades de que se produzca un deslizamiento, mientras que por encima aumenta rápidamente la posibilidad de formación de los mismos. El umbral mínimo debe representar la cantidad de lluvia por encima de la cual la probabilidad de ocurrencia de un evento aumenta drásticamente. Así mismo, el umbral máximo representaría la cantidad de lluvia en la cual ha ocurrido el mayor porcentaje de eventos. El estudio del umbral permitiría aportar una predicción a corto plazo y una mejora de los sistemas de alerta (*Corominas 2000*).

Se han realizado numerosos trabajos en los que se ha estudiado el umbral de lluvia que se requiere para producir deslizamientos. Los resultados parecen indicar que el umbral de precipitaciones cambia de una región a otra. Así por ejemplo, en India se citan umbrales de precipitación de 200 mm en 24 horas (*Bhandari et al., 1991*). Mientras que en Hong Kong se producen movimientos con 70 mm de precipitación (*Brand, 1985; Au, 1998*). Por otra parte, en Hawai, se requieren, al menos precipitaciones entre 250-300 mm (*Pierson et al., 1991*). En lo que se refiere a Cantabria se han fijado umbrales de 100 mm/24 h para la producción de argayos

durante las lluvias intensas de los años 1983 y 1994, (González Díez, 1995, González Díez et al., 2012).

Sin embargo, no hay muchos estudios que permitan poder extender los análisis de Caine, Wieczorek, etc., a Cantabria y mejorar los resultados aportados por González Díez (1995) y González Díez et al. (2012), por lo que realizar un estudio de esta temática resulta muy interesante. Una importante dificultad es que la región de Cantabria tiene una extensión superior a 5.000 km², y además, mucho de su territorio está situado en terreno montañoso, de relieve abrupto, que da lugar a zonas de difícil acceso a la observación. En estas zonas resulta dificultoso realizar un seguimiento de los deslizamientos que puedan ocurrir tras fuertes e intensas precipitaciones. Adicionalmente, aparece el problema de no contar con una red de observaciones meteorológicas homogéneamente distribuidas en esas zonas inaccesibles, que puedan aportar la información climática necesaria para realizar un análisis similar. Y además, los problemas de datación del deslizamiento, puesto que para muchos de los deslizamientos inventariados no hay una idea clara de cuándo se han producido.

Una posible vía de solución consiste en llevar a cabo el análisis a lo largo de carreteras. Indicar que un análisis de este tipo mostrará el comportamiento geomecánico de taludes y no tanto de laderas naturales. Evidentemente, esta aproximación no es completa respecto al problema a resolver porque los deslizamientos en taludes no son exactamente deslizamientos naturales, ya que las laderas están intervenidas, y esto es un inconveniente puesto que las propiedades naturales han cambiado. Pero por contra, permite contar con registros de la ocurrencia temporal de los deslizamientos, que en laderas naturales es problemático de obtener. Además, existen registros sistemáticos para la mayoría de las vías de comunicación de cuándo han sido afectadas por movimientos de ladera, ya que su desarrollo ha requerido de limpieza o reconstrucción. Muchos de estos sucesos aparecen en registros, como por ejemplo en noticias de periódicos regionales.

La hipótesis contenida en este trabajo es que es posible llevar a cabo un estudio similar a los descritos anteriormente, analizando los deslizamientos que han afectado a las carreteras de la región durante los últimos diez años. Los registros de roturas producidas en las carreteras, correlacionadas con las lluvias registradas y precedentes, permitirán aportar una primera aproximación del umbral de precipitación necesario en Cantabria para producir roturas debidas a este factor desencadenante.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de esta tesis de master son:

- **Realización de un inventario de deslizamientos** a través de búsqueda periodística. En él se identificarán los principales deslizamientos que han ocurrido en las carreteras de la región en los últimos años, se anotará el lugar de ocurrencia y la fecha del evento.
- **Recopilación de información meteorológica** del entorno a los lugares identificados. Se obtendrán los valores de la precipitación en los cinco días precedentes a la fecha de génesis de cada evento así como los del mismo día de su ocurrencia.
- **Representación espacial** del inventario obtenido con el fin de establecer las relaciones con diversos factores condicionantes.
- **Planteamiento y cálculo de un valor** de umbral de precipitación para los argayos que han afectado a carreteras de Cantabria.

3. ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio abarca toda la Comunidad Autónoma de Cantabria (5.326 km²). Esta comunidad se divide en 10 comarcas, que de mayor a menor superficie son: Campóo-Los Valles, Saja-Nansa, Valles Pasiegos, Liébana, Trasmiera, Besaya, Costa Occidental, Santander, Asón y Costa Oriental. Algo más del 50% de su superficie se sitúa en cotas por encima de los 600 m de altitud. Los principales relieves montañosos se localizan en el Macizo de Picos de Europa, con altitudes por encima de los 2000 m.a.s.n.m. Los picos más altos son, de mayor a menor, Peña Vieja (2.613 m), Peña Prieta (2.536 m), Peña Remoña (2.240 m), Cuchillón (2.174 m), Tresmares (2.171 m), Cornón de Peñasagra (2.047 m) y Peña Labra (2.018 m). Aparte de los Picos de Europa, están la Sierra del Escudo de Cabuérniga, Montes de Ucieda, Alto del Gueto, Sierra de la Matanza y Sierra de Breñas, que son cadenas montañosas que no superan los 1000 m de altitud. Estas cuerdas montañosas forman parte de la Cordillera Cantábrica, que se encuentra cortada perpendicularmente por los valles fluviales de los ríos Agüera, Asón, Miera, Pas, Besaya, Saja, Nansa y Deva. Todos ellos desembocan sus aguas en el Cantábrico, dando lugar en sus desembocaduras a bahías y estuarios, que resaltan respecto al relieve de la Cordillera. Solamente el Ebro, que nace en Fontibre, desemboca en aguas del Mediterráneo. Casi el 45% de la superficie de la región presenta pendientes por debajo de 10°, más del 50% se sitúa sobre pendientes entre 10-30°, y solamente un 2% de Cantabria se encuentran en pendientes por encima de los 30°.

3.1. CLIMA

En general en Cantabria se da un tipo de clima Oceánico o Atlántico, que se caracteriza por temperaturas suaves con poca oscilación térmica y abundantes lluvias durante todo el año, aunque suelen ser más abundantes en invierno (*Ancell y Célis, 2013*). Los vientos dominantes son del Oeste, y están cargados de masas de aire húmedo, condicionando el clima norte de la región. En la zona sur el clima se hace más seco, de carácter mediterráneo. La temperatura media durante el invierno está en torno a los 9 °C y en verano sobre los 20 °C, con unas temperaturas medias anuales entorno a los 14 °C. Las precipitaciones varían entre los 1200 mm/año en la costa y los 2.400 mm/año en las zonas montañosas (Figura 3). Aunque las lluvias son frecuentes y abundantes, dada la compleja orografía de la región, la pluviometría varía mucho de unos valles a otros. No obstante, como generalidad se puede afirmar que existen dos máximos de precipitaciones, uno a finales de otoño y otro en primavera. En general, las precipitaciones superan los 1.000 mm/año en la mayor parte de Cantabria, no obstante hay dos zonas donde las precipitaciones son notablemente superiores, uno en la cabecera de los valles de Miera y Pas, con precipitaciones por encima de los 2.400 mm/año, y el otro en Picos de Europa, por encima de los 2000 mm/año. Como contrapunto, las zonas donde se registran menos cantidad de lluvia son Campóo y los fondos del valle de Liébana, con precipitaciones por debajo de los 700 mm/año.

3.2. GEOLOGÍA

Desde un punto de vista geológico, Cantabria está dominada por materiales mesozoicos. Existe también Paleozoico (Ordovícico, Silúrico, Devónico y Carbonífero) en la zona occidental, Comarca de Liébana y relieves montañosos del Frente Cabalgante del Escudo de Cabuérniga. El Cenozoico está ligado fundamentalmente a la zona costera centro-occidental (La Marina) en la que aparece dentro de estructuras de deformación, junto con materiales del Mesozoico superior. El Mesozoico (Triásico, Jurásico y Cretácico medio-inferior) al sur del Frente Cabalgante del Escudo de Cabuérniga, aflora dentro de una gran estructura sinformal. Discordante con estos materiales aparece el Cretácico medio-superior, basculado hacia la cuenca Vasco-Cantábrica. Sobre todo este substrato aparece una amplia diversidad de depósitos superficiales cuaternarios, que varían desde ámbitos costeros, fluviales, glaciares-periglaciares y de ladera, con un importante desarrollo edáfico en toda la región.

Desde un punto de vista estructural, toda la región se encuentra dentro de un dominio estructural superior (formado por pliegues de amplio radio de curvatura y una tectónica frágil muy desarrollada, en la que los sistemas de facturas son muy notables en el relieve).



Figura 3. Distribución espacial de la precipitación media anual en Cantabria (Tomado de Ancell y Célis, 2013).

Desde un punto de vista sísmico existen evidencias de sismicidad reciente ligada a fracturas con comportamiento latente (González Díez *et al.*, 2009). Una amplia revisión de la Geología de Cantabria se encuentra en Heredia *et al.*, (1990). Una cartografía más actualizada es la presentada por el Gobierno de Cantabria y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) del año 2013 (Figura 4). Una recopilación actualizada de la información geológica de Cantabria se encuentra en la web <http://mapas.cantabria.es/>.

3.3. CARRETERAS DE CANTABRIA

En Cantabria coexisten dos redes de carreteras, la red de carreteras del Estado y la red de carreteras Autonómicas (Figura 5). Esta red está ampliamente desarrollada en la zona de la Marina, mientras que presenta un desarrollo más escaso en La Montaña, sirviendo de comunicación para los núcleos de población aislados en el territorio. Algunas de estas vías se sitúan en áreas montañosas de alto relieve afectando a numerosas litologías blandas y depósitos superficiales. El estado de conservación de las vías es bueno, ya que muchas de ellas se han remozado recientemente.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se ha basado en la propuesta realizada por Guzzetti *et al.* (2008). Se trata de un método **estadístico o empírico** fundamentado en datos históricos de precipitaciones relacionadas con deslizamientos. Los datos obtenidos son fácilmente interpretables, su mayor limitación es disponer de un buen registro histórico de los movimientos e inventarios climáticos. Estos métodos proporcionan información de en qué momento se pueden desencadenar nuevos eventos a partir de las precipitaciones caídas en un tiempo determinado, basándose en las experiencias pasadas. La localización geográfica de cada punto estudiado ha sido obtenida a través de la información registrada en la prensa, aportando también datos de su ocurrencia temporal. No ha sido posible realizar visitas a los lugares de ocurrencia, ya que se trata de un elevado número de puntos, distribuidos por una amplia región, y a lo largo de un periodo importante de tiempo. La metodología empleada en este trabajo, se resume los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica, exclusivamente el Diario Montañés, de los deslizamientos ocurridos en la región, utilizando la hemeroteca digital de la publicación, la cual posee registros desde 2006 al 2015.

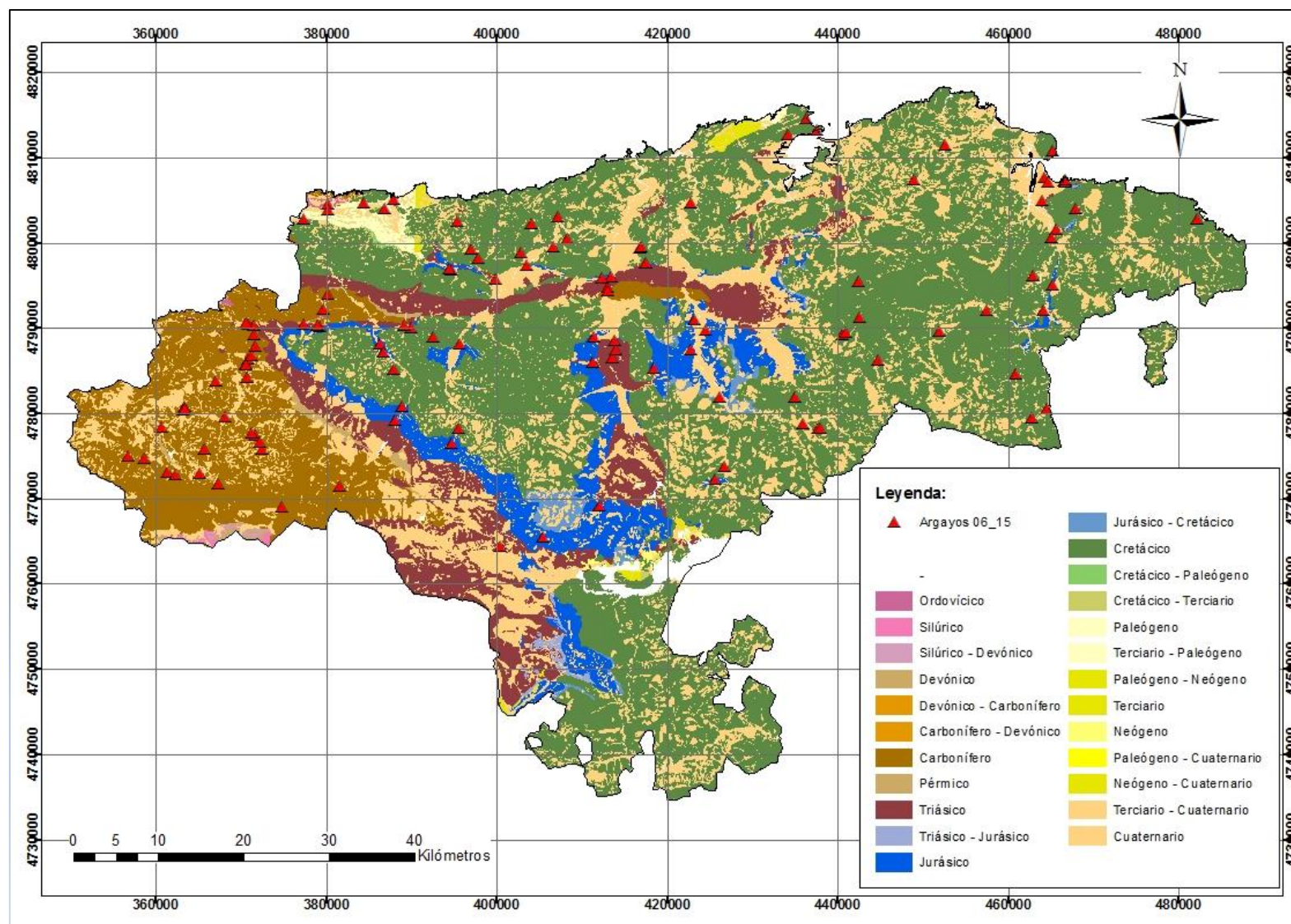


Figura 4. Localización de los deslizamientos sobre el Mapa geológico de Cantabria, realizado a partir de la información del IGME (obtenida de la página <http://mapas.cantabria.es/>, Gobierno de Cantabria).



Figura 5. Red de carreteras de Cantabria. Gobierno de Cantabria.

- Localización espacial de los deslizamientos inventariados utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Consulta de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la búsqueda de estaciones meteorológicas próximas a los deslizamientos, localización espacial de las estaciones y tratamiento de los datos meteorológicos, en el entorno temporal del evento localizado previamente.
- Procesamiento de los datos.

A continuación se describen en detalle los pasos seguidos en cada uno de los apartados anteriores.

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El primer paso consistió en la consulta de la información contenida en el periódico sobre la ocurrencia de deslizamientos o argayos en Cantabria, entre los años 2006 y parte del 2015. Para ello, se realizó una consulta sistemática de todos los ejemplares existentes en su hemeroteca digital, utilizando los motores de búsqueda presentes en el portal digital del periódico. Las palabras clave empleadas fueron argayos o deslizamientos, y los eventos identificados pudieron ser datados. La información recopilada fue posteriormente filtrada con el fin de buscar aquellas relaciones directas (causa-efecto) entre deslizamiento y lluvias ocurridas, así como descartar eventos repetidos en diferentes noticias publicadas. Posteriormente, también se descartaron del tratamiento aquellos eventos identificados temporalmente pero no espacialmente (es decir, aquellos en los que la noticia no aportaba datos concretos de su localización espacial). La mayor parte de las noticias de prensa encontradas proporcionan información de su situación, nombrando la carretera afectada y el punto kilométrico (PK.) exacto de ocurrencia.

4.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL

Una vez realizado el inventario de deslizamientos, éstos fueron situados geográficamente mediante un SIG. El programa empleado ha sido *ArcGis*, con la ayuda del servidor del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que se puede localizar en la siguiente dirección web <http://www.ign.es/wms-inspire/mapa-raster?>. El mapa empleado del IGN ha aportado información relevante respecto al elipsoide de referencia (ED_1950_UTM_Zone_30N) y Proyección (Projection: Transverse_Mercator, False_Easting: 500000,000000; False_Northing: 0,000000; Central_Meridian: -3,000000; Scale_Factor: 0,999600; Latitude_Of_Origin: 0,000000; Linear Unit: Meter; GCS_European_1950; Datum: D_European_1950) que han sido utilizadas en el resto de los mapas elaborados. Este soporte permite representar toda la información planimétrica de Cantabria con precisión, permitiendo una localización de los puntos bastante

exacta, a través de los datos periodísticos recopilados anteriormente. Una vez representados en el mapa de Cantabria, y a través del software mencionado, se obtuvieron las coordenadas de situación X e Y de cada deslizamiento y se confeccionó la correspondiente geodatabase.

Con el fin de correlacionar la información bibliográfica obtenida con la meteorológica aportada posteriormente, se empleó un Modelo Digital del Terreno (MDT) de Cantabria procedente del IGN (<http://www.ign.es/>). Se usó el modelo con paso de malla de 25 m que para toda la región comprende 23 hojas. Este modelo permite correlacionar la ubicación de las diferentes estaciones meteorológicas sin merma de precisión altimétrica, permitiendo la manipulación de un volumen importante de datos. Adicionalmente, se emplearon otras fuentes de información procedentes de bases ambientales gratuitas del Gobierno de Cantabria disponibles en el siguiente portal <http://www.territoriodecantabria.es> .

4.3. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE PLUVIOMETRÍA

Una vez obtenidos los puntos de interés para este estudio, se solicitó a la AEMET la información de las precipitaciones registradas en los entornos de las localizaciones identificadas previamente. Se tuvo en cuenta la estación más cercana a cada evento, el día de la ocurrencia del evento, y los datos de precipitación del día del evento, más los de un periodo de tiempo antes del mismo. En este trabajo se intenta conocer la contribución de la precipitación a la inestabilidad, es decir de la lluvia efectiva de cada día a la rotura. El fin de este conocimiento es el diseño de sistemas de alerta útiles. Se consideró que contribuciones por debajo del 50% de la lluvia diaria registrada deberían descartarse del análisis, en una primera aproximación. Aplicando la propuesta de Crozier (1986) para la Precipitación efectiva (P_{ef}), y considerando que los valores de K son los máximos de la horquilla de valores propuestos (0,9), a partir del séptimo día de precipitación, ésta contribuye por debajo del 50 % de la misma. Además, se da otra circunstancia de carácter logístico que justifica la utilización de un periodo de seis días antes del evento, y es el costo de los datos (que es relevante en un contexto de Trabajo de Fin de Máster). Por ello, se optó por seleccionar hasta el 5º día anterior a la fecha del evento como periodo de lluvia antecedente. De esta manera, se le proporcionó a la AEMET una tabla con los datos de situación de los argayos (coordenadas X e Y), fecha de ocurrencia del evento, y un mapa de situación de los mismos. Con esta información AEMET confeccionó otra tabla (Tabla1) en la que aportó los datos siguientes: el año y mes de ocurrencia del evento, el nombre de la estación meteorológica de donde se toman los datos, las coordenadas X e Y, longitud y latitud de situación de la estación, la altitud de la estación y los datos pluviométricos de los días solicitados. La precipitación diaria está expresada en décimas de milímetro, medida desde las 07:00 horas del día de la fecha, hasta las 07:00 horas del día siguiente. Adicionalmente, AEMET aportó los datos de precipitación del día posterior a la ocurrencia del deslizamiento.

Tabla 1: Tabla tipo proporcionada por AEMET para cada punto de deslizamiento.

ID	AÑO	MES	NOMBRE	ALT	X	Y	NOM_PROV	LONGITUD	LATITUD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P31
1172E	2005	12	POTES-LA TRESORA	310	367589	4778204	CANTABRIA	437422	430842							181
1172E	2006	1	POTES-LA TRESORA	310	367589	4778204	CANTABRIA	437422	430842	29	55	19	0	14	133	
1174I	2005	12	TAMA	260	369837	4782358	CANTABRIA	436062	431058							100
1174I	2006	1	TAMA	260	369837	4782358	CANTABRIA	436062	431058	130	80	8	15	5	185	

Los datos de pluviometría fueron obtenidos de un total de 36 estaciones meteorológicas, de las que también se conocen sus coordenadas geográficas, por lo que fueron localizadas con exactitud sobre el mapa de Cantabria a través del SIG. La Tabla 2a muestra las 36 estaciones meteorológicas empleadas, con sus respectivas coordenadas, y en la Tabla 2b (localizada como Anexo al final de este trabajo) aparecen todos los argayos empleados en el análisis, con los datos de precipitación recogidos en cada uno de ellos (precipitaciones acumuladas totales, precipitaciones el día del evento, intensidad y duración de precipitación). En la Figura 6 aparecen representados geográficamente estos argayos y estaciones meteorológicas.

Tabla 2a: Estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio, y su situación.

FID	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ALTITUD	X	Y	FID	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ALTITUD	X	Y
0	ALDUESO	810	411407	4763332	18	PUNTA GALEA (GOLF)	90	498425	4802547
1	ALTAMIRA	150	408911	4803320	19	ROZADIO	220	387429	4786487
2	ARREDONDO	160	451560	4791280	20	RUENTE	180	397146	4790437
3	BARCENA MAYOR-TORIZ	460	401271	4777849	21	SAN VICENTE, FARO	40	387248	4805437
4	BAREYO	110	452569	4813053	22	SANTANDER I,CMT	52	435270	4815666
5	BUELLES	80	375947	4799062	23	SANTANDER OJAIZ	40	428454	4810490
6	CABEZON DE LA SAL LA PLATA	240	399626	4796478	24	SOBA-ALTO MIERA	700	444272	4782204
7	COBRECES	70	401745	4804316	25	TAMA	260	369837	4782358
8	COS	140	400830	4794085	26	TAMA	260	369837	4782358
9	ENTERRIAS	730	363193	4773138	27	TERAN	260	394190	4785978
10	FUENTE DÉ-TELEFÉRICO	1100	352587	4778389	28	TORRELAVEGA-SIERRAPANDO	110	416739	4801152
11	LAREDO	80	466778	4806022	29	TRETO	10	461961	4804973
12	MERUELO-VERTEDERO	250	450268	4808782	30	UDALLA	90	463173	4796205
13	MIRONES	200	442903	4793846	31	VALDEPRADO (PESAGUERO)	820	376933	4770129
14	NESTARES	870	405392	4760574	32	VILLACARRIEDO	212	434176	4786336
15	NOVALES	60	404544	4803319	33	VILLACARRIEDO - SANTIBÁÑEZ	190	431039	4788434
16	PIÑERES	580	373194	4789207	34	VILLAVEDE DE PONTONES(CLARI- SAS)	20	443823	4806981
17	POTES-LA TRESORA	310	367589	4778204	35	ZURITA	100	418992	4799459

En un primer análisis de las precipitaciones, se identificaron catorce registros, en los cuales las lluvias acumuladas en estos 6 días eran nulas, eliminándose del estudio. Dado que algunos de los eventos localizados pueden correlacionarse con más de una de las estaciones aportadas por la AEMET, ya que éstas se encuentran a una distancia similar con respecto a la zona argayada, se optó por elegir los datos de la estación cuya altitud se asemejara más a la del deslizamiento correspondiente. Empleando el SIG fue sencillo encontrar la altitud del evento identificado sobre el MDT anteriormente descrito, e identificar la estación meteorológica más adecuada.

4.4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Los registros usados en este trabajo fueron tratados estadísticamente con el fin de analizar las características generales de las lluvias que han ocasionado estos deslizamientos. Posteriormente, los datos de cada deslizamiento se representaron en un gráfico similar al empleado por *Wieczorek et al., (2000)*, introduciendo su intensidad de precipitación en 24 h y los días que duró la misma. Finalmente, estos eventos se correlacionaron con datos de otros factores determinantes.

Existe toda una serie de limitaciones que han de tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados aquí obtenidos. Por un lado, se trata de taludes de carretera, es decir taludes artificiales, y sus características no son totalmente similares a las de los taludes naturales, sin embargo, en primera aproximación son bastante parecidos. Hay que tener presente que es muy difícil obtener muestras de taludes naturales en este tipo de Trabajos de Fin de Máster. Por otro lado, se trata de un estudio espacial para un amplio territorio, cuyas características climáticas pueden no ser totalmente homogéneas frente a los umbrales obtenidos. Otro tipo de limitación está derivada del tratamiento estadístico de los datos. Se emplean lluvias que ocasionan deslizamientos y no se consideran lluvias de igual intensidad que no los ocasionan. Adicionalmente, aparecen otras limitaciones referidas a la adecuación de los datos empleados. Como ya se ha comentado la fiabilidad de la localización espacial empleada depende de la fiabilidad en la publicación de la noticia, pues no se han visitado los eventos, pero también de la precisión de las herramientas de localización empleadas. Respecto a las precipitaciones, las incertidumbres provienen de los datos asociados a cada deslizamiento. Las precipitaciones usadas de la estación meteorológica más cercana, no tienen por qué ser las mismas que las que pudieron precipitar en el punto exacto donde se generó el evento. Otro factor es que no se conoce la hora exacta de la ocurrencia del evento. Tampoco se conoce el tipo de precipitación, solo las ocurridas en 24 horas, pero no se tiene conocimiento de cómo han ocurrido dichas precipitaciones, es decir, no se sabe si se produjeron con una intensidad constante a lo largo del día, o si se han alternado intervalos de altas intensidades de precipitación con períodos sin lluvia.

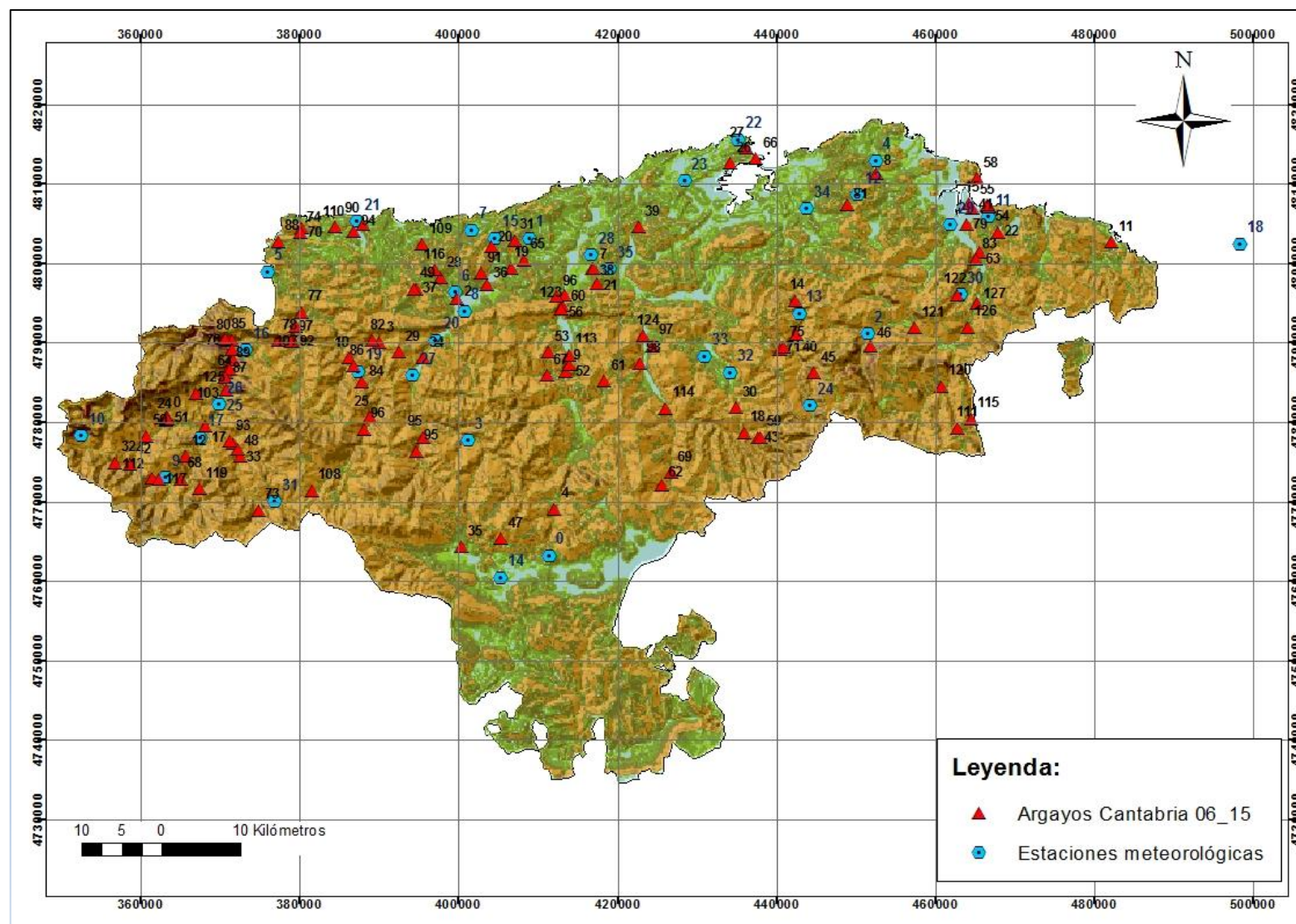


Figura 6: Distribución espacial de los 121 deslizamientos (triángulos rojos) y de las 36 estaciones de la AEMET, presentadas en la Tabla 2 (círculos azules), representados sobre MDT de Cantabria (el número corresponde con el identificador del elemento).

Respecto al proceso, se desconoce el tipo de deslizamiento y las implicaciones que este hecho tiene en la interpretación de los umbrales. Otros factores relativos al tipo de material tampoco han sido contemplados.

Una vez localizados geográficamente todos los argayos, y habiendo obtenido su información en cuanto a altitudes y pendientes, se pasó a analizar cuáles son los materiales geológicos más susceptibles de sufrir deslizamientos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los principales resultados obtenidos del estudio de los deslizamientos (eventos) que han afectado a las carreteras de Cantabria, recopilados en el periódico, desde 2006 a febrero de 2015. Los resultados se presentan agrupados en varios apartados junto con una discusión de los mismos.

Se recopilaron unas 200 noticias relacionadas con argayos-roturas en taludes de carretera a través de la revisión bibliográfica efectuada. En una primera aproximación, se extrajeron 150 eventos en las que se encontró una causa-efecto directa entre precipitación y deslizamientos, en consulta de prensa. De los eventos encontrados sólo en 135 casos se posee de una localización y fecha de ocurrencia adecuada. Otros catorce fueron descartados al no existir correlación real entre el evento periodístico y lluvias, según los datos proporcionados por AEMET, quedando una población de 121 deslizamientos para el análisis final; su distribución espacial aparece en la Figura 6. Otros 24 eventos, presentan una desconexión entre la fecha de ruptura marcada en el periódico y los días en los que AEMET registró precipitaciones. Evidentemente, la discrepancia en este grupo está en la fecha real de ruptura, que pudo quedar recogida por el periódico días después de cuando verdaderamente ocurrió. Este grupo se ha excluido del análisis únicamente en el apartado en el que se consideran las correlaciones entre lluvias y deslizamientos, no en el resto del trabajo.

5.1. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

En la Figura 7 se presenta la distribución geográfica por comarcas de los argayos (eventos) analizados. Los mayores porcentajes se encuentran en las Comarcas de Saja-Nansa y Liébana, con un 21% de los eventos en cada una de ellas (Figura 8). No obstante, si se normalizan por la superficie ocupada por cada comarca, la concentración es ligeramente mayor en la zona de Liébana. Con porcentajes notablemente menores, les siguen las comarcas del Besaya y Costa Occidental con un 11% del total cada una. Seguidamente, la de los Valles Pasiegos (10%), Comarca del Asón (8%) y Costa Oriental el (7%). Por último, las comarcas de Trasmiera,

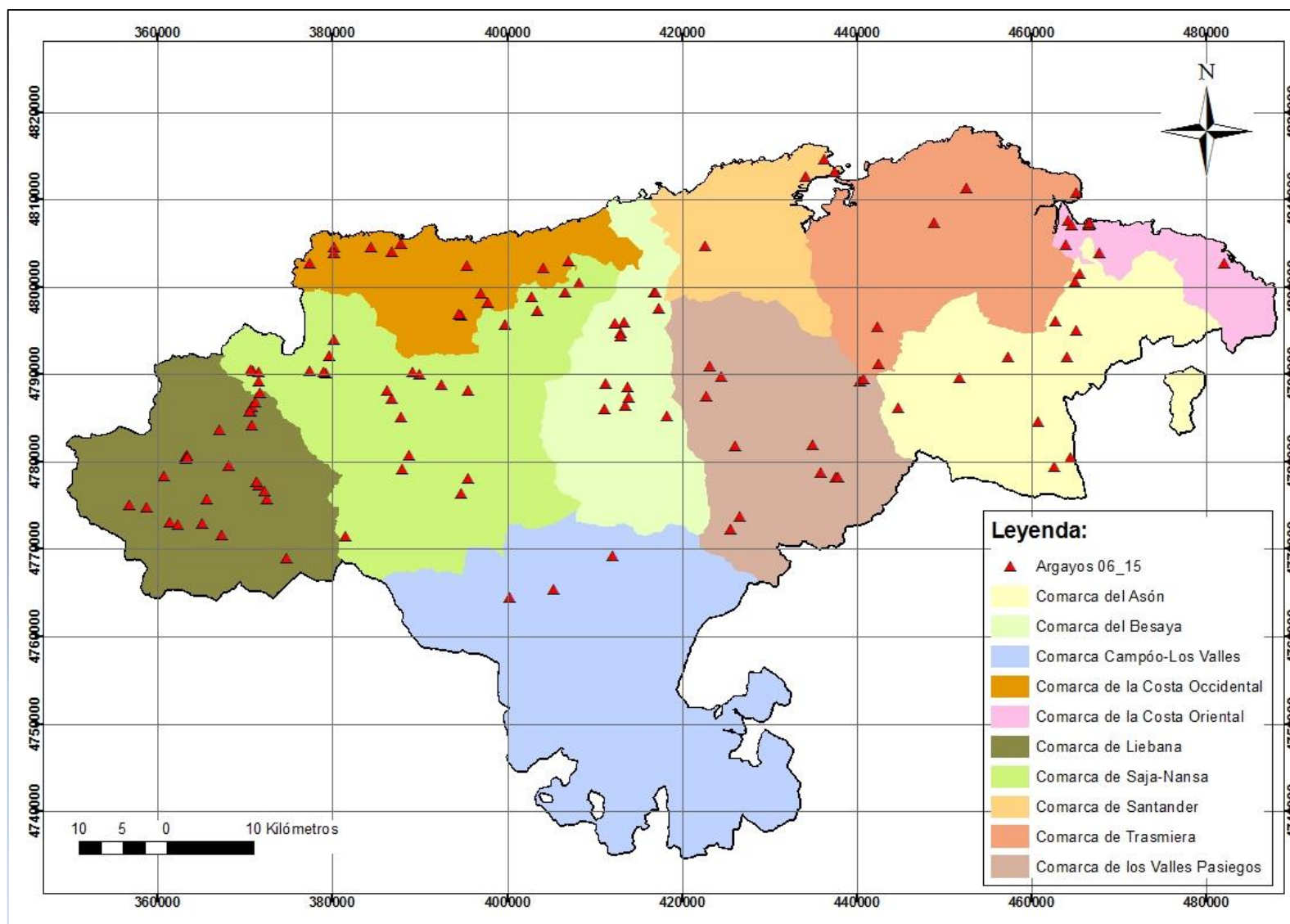


Figura 7. Distribución espacial, de los eventos, por comarcas.

Santander y Campóo, poseen un 5, 3 y 2%, respectivamente, del total de los eventos inventariados. La Comarca de Campóo es la que menor concentración de eventos presenta, siendo la que más extensión ocupa dentro de la superficie de Cantabria. Como se puede observar estos eventos son más frecuentes en la mitad norte de la región, especialmente en la zona occidental, siendo escasos en la zona norte oriental y prácticamente nulos en la zona sur.

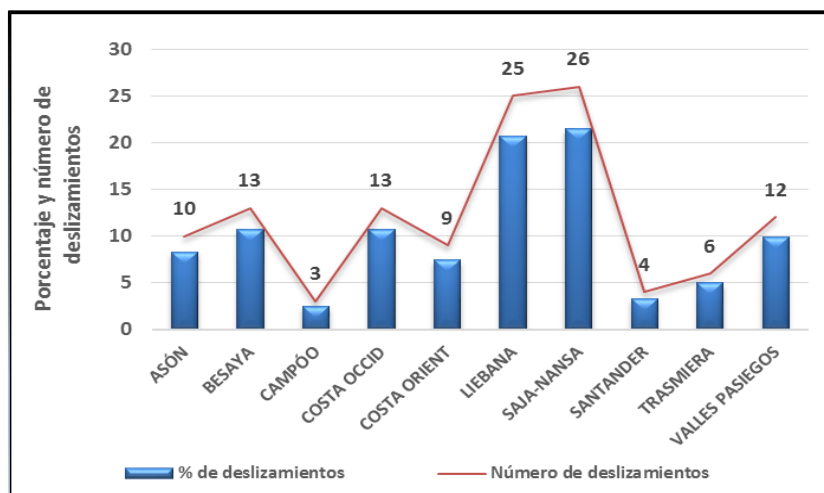


Figura 8. Porcentaje y número eventos distribuidos por comarcas.

5.2. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA ALTURA

En cuanto a las relaciones existentes entre estos eventos y la altura sobre el nivel del mar (a.s.n.m) o elevación, cabe señalar que los argayos identificados se han generado a cotas variables entre 0 y 1.098 metros (Figura 6), situándose casi el 60% de ellos entre los 0 y los 300 m. El mayor porcentaje de esta concentración (26%) aparece a cotas por debajo de los 100 m (Figura 9).

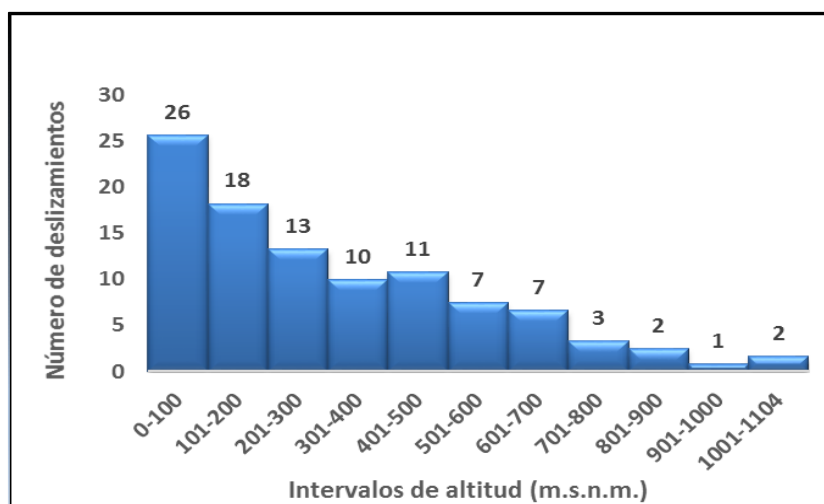


Figura 9: Número de deslizamientos según la altitud (distribuida en intervalos de 100 m).

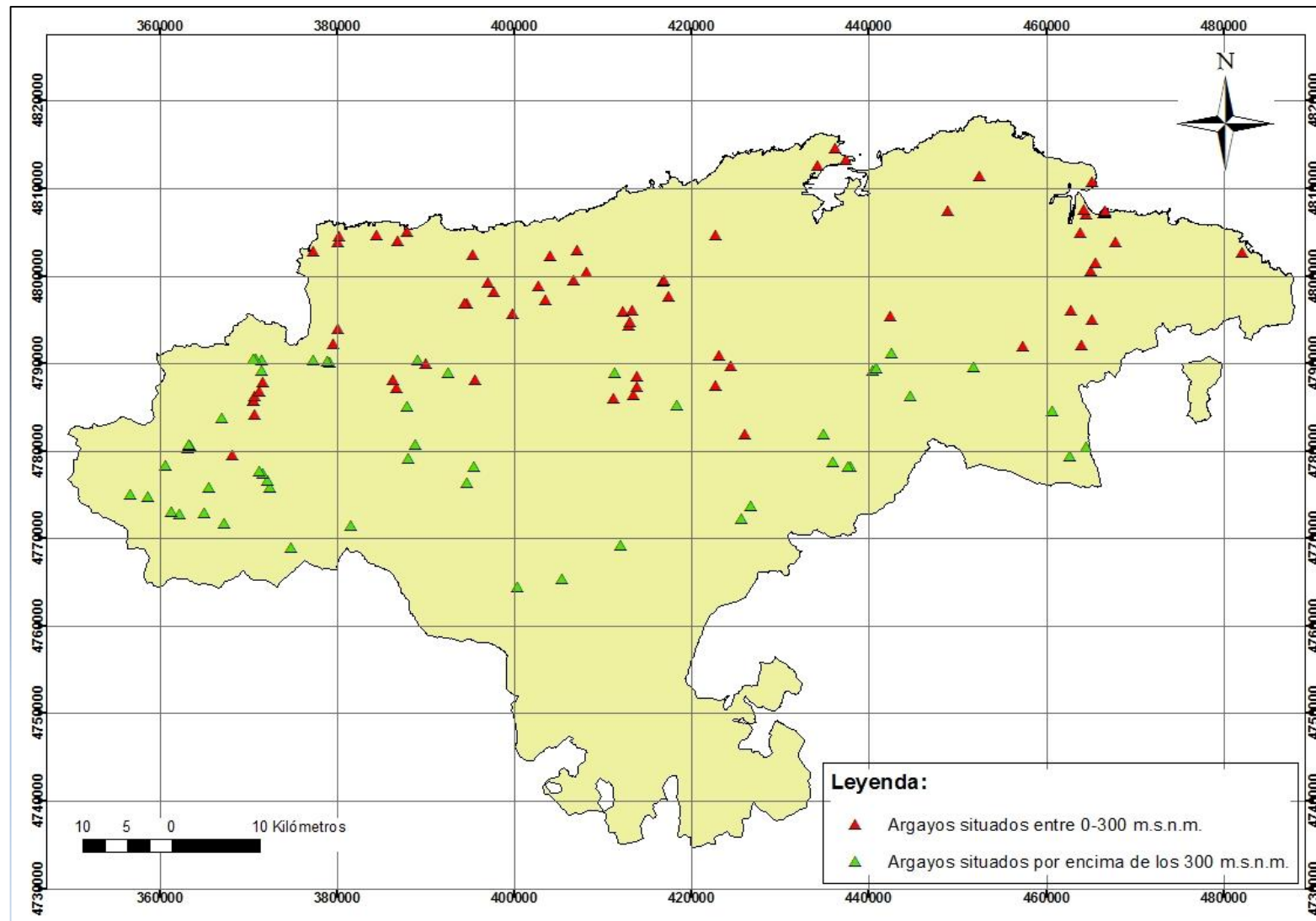


Figura 10. Localización de los deslizamientos representados en dos grupos según la altitud de su localización (hasta los 300 m.s.n.m., triángulos amarillos, y por encima de los 300 m.s.n.m., triángulos verdes).

A partir de los 300 m, el número de deslizamientos disminuye, no apareciendo apenas eventos en altitudes por encima de los 800 m. Debería esperarse que hubiese un número mayor de eventos con la altura, puesto que las precipitaciones en Cantabria aumentan con la altitud (Gutiérrez *et al.*, 2010; Alonso del Val *et al.*, 2012). No obstante, el número de carreteras disminuye súbitamente por encima de los 250 m.a.s.n.m. por lo que esta correlación no puede detectarse mediante esta variable. Geográficamente, este 60% de eventos se distribuye a lo largo de la mitad norte de la región (Figura 10), que es en la que existe una mayor ocupación humana del territorio. Mientras que el 40% de eventos restante se distribuye en la mitad sur, y en la zona de Picos de Europa. Ambas zonas son notablemente más elevadas que la zona norte pero poseen una menor concentración de vías públicas.

5.3. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA PENDIENTE

La correlación entre deslizamientos y pendientes se presenta en la Figura 11. El 85% de los eventos identificados se ha producido en pendientes entre 0-20°, por encima de estas pendientes la frecuencia de aparición de movimientos disminuye bruscamente, no localizándose eventos por encima de los 40°. Esta idea también es un poco confusa, pues las pendientes obtenidas del MDT corresponden con pendientes naturales y no con las correspondientes a los desmontes efectuados (taludes) en cada ladera. Resultados similares en cuanto a la correlación entre deslizamientos y pendientes se han encontrado en otros trabajos dentro de la región (González-Díez, 1995; González-Díez *et al.*, 1999), pero esta vez sobre laderas naturales. También se debe tener presente la escasez de vías de comunicación existente en zonas abruptas del relieve.

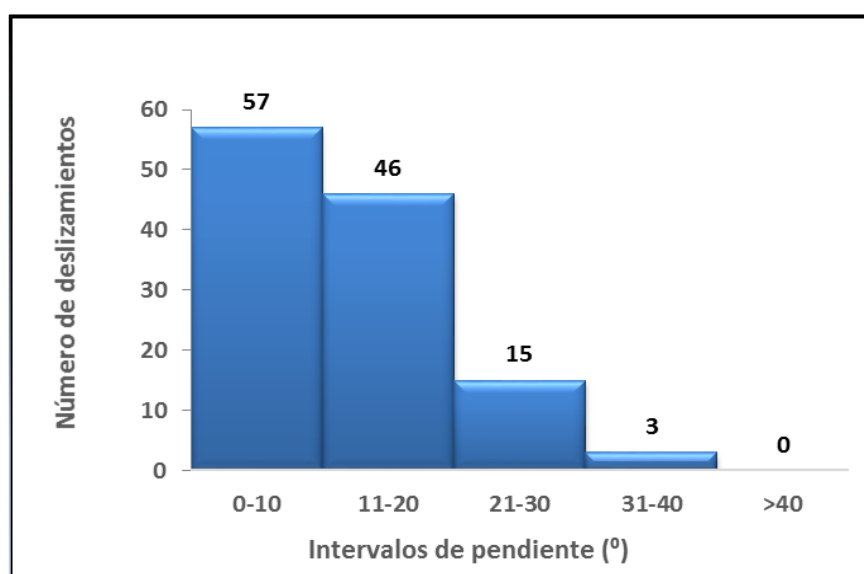


Figura 11: Número de deslizamientos, distribuidos por pendientes (clasificadas en intervalos de 10°).

5.4. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LA LITOLOGÍA

Las relaciones espaciales entre deslizamientos y litología se presentan en la Figura 4, mientras que los porcentajes se muestran en la Figura 12. La mayor parte de los deslizamientos se generan en materiales del Cuaternario y del Cretácico (el 63% del total). Concretamente el 33% aparecen sobre depósitos aluviales y coluviones, y el 30% restante se distribuye entre un 10% sobre las lutitas y areniscas del Weald y un 20% sobre las calizas arrecifales, dolomías y margas del Albiense-Aptiense. Otro gran porcentaje de los deslizamientos (casi el 20%), se desarrolla sobre materiales del Carbonífero, concretamente el 15% aparece en las pizarras, lutitas y areniscas de las Formación Potes, Lebeña y Mogrovejo, y un 5% se localizan en los materiales calizos de la Formación Picos de Europa. Parte de los deslizamientos inventariados también se ha generado en las margas, calizas y margocalizas del Jurásico superior (Facies Purbeck) y las areniscas, conglomerados y lutitas, rojas de la Facies Bundsanstein del Triásico Inferior, representando éstos el 13% del total. Las roturas que quedan se distribuyen de forma homogénea entre el resto de las litologías de la región, con porcentajes inferiores al 1%. Los datos obtenidos son coherentes con otros trabajos efectuados en la región sobre laderas naturales (González-Díez *et al.*, 1999; González-Díez *et al.*, 2013).

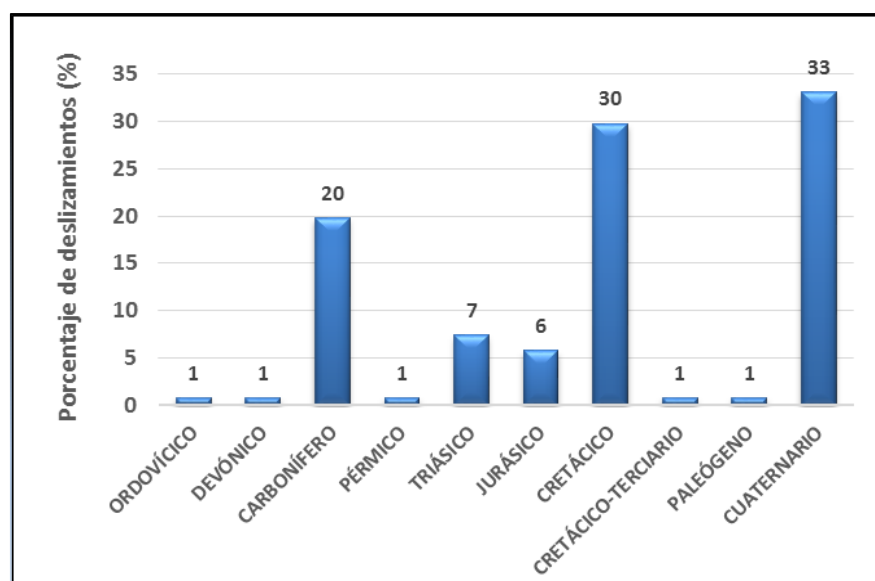


Figura 12: Porcentaje de deslizamientos que aparecen en cada unidad cronoestratigráfica.

5.5. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y SU OCURRENCIA TEMPORAL

La distribución temporal de los 121 deslizamientos dentro del período de tiempo estudiado, pone de manifiesto que los años con mayor número de deslizamientos han sido el 2010 y 2013 (Figura 13) con un 50% de los casos identificados. Los años 2006, 2007 y 2011 presentan una baja

actividad en cuanto a la ocurrencia de movimientos de terreno. Del año 2015 solamente se han analizado los dos primeros meses, pero su tendencia muestra que puede tratarse un año con un número importante de deslizamientos.

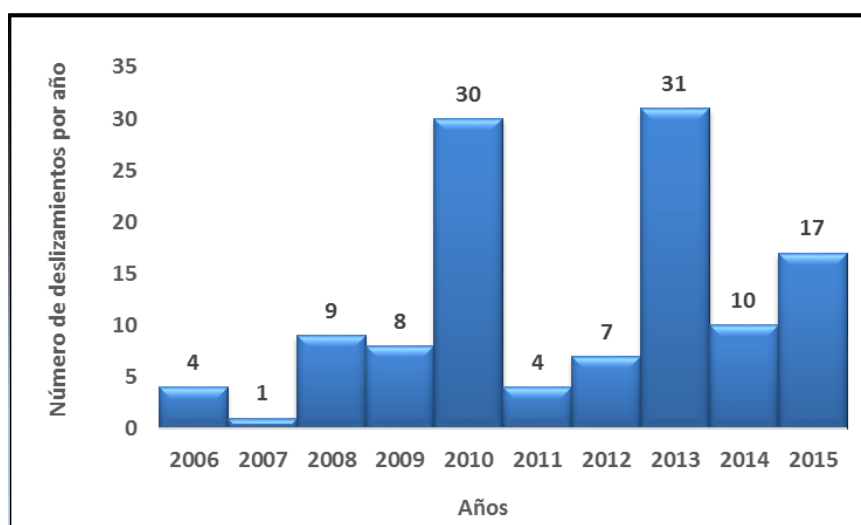


Figura 13: Número de deslizamientos ocurridos cada año en el período 2006-2015.

En detalle, dentro de los años 2010, 2013 y 2015 la mayoría de los deslizamientos se producen en junio de 2010 y enero de 2013 y de 2015. Sólo en esas fechas se registraron el 34% de todos los deslizamientos inventariados. Eliminando de la serie los máximos de los años de 2010 y 2013 (serie bastante corta en el tiempo, ya que sólo abarca un espacio de 10 años), la tendencia sugiere un ligero incremento del número de argayos con el tiempo, aunque se desconoce si el número de eventos ocurridos con anterioridad a 2006 son más o menos abundantes que los actuales. No se puede saber, si el presumible incremento detectado puede obedecer a defectos de construcción, o simplemente a un aumento en la incidencia de los factores desencadenantes como consecuencia del Cambio Global.

5.6. RELACIONES ENTRE DESLIZAMIENTOS Y LAS PRECIPITACIONES

La distribución temporal de los deslizamientos a lo largo del año se presenta en la Figura 14. Esta relación permite establecer las primeras correlaciones con las precipitaciones. Para el conjunto de los años analizados, la serie anual muestra la existencia de dos máximos. El primero, con más de un 25% de los casos, se ubica en el mes de enero; el segundo se localiza en el mes de junio (15% de los casos). La tendencia de ocurrencia de deslizamientos se mantiene creciente desde que comienza el año hidrológico a principios de octubre, disminuyendo a media que la precipitación cesa y que las evapotranspiraciones se incrementan. Este periodo de mayor intensidad de precipitaciones se corresponde habitualmente con la llegada de vientos atlánticos

húmedos de componente Norte. El segundo máximo relativo se localiza con la entrada de vientos también de componente norte que se produce anualmente a finales de la primavera.

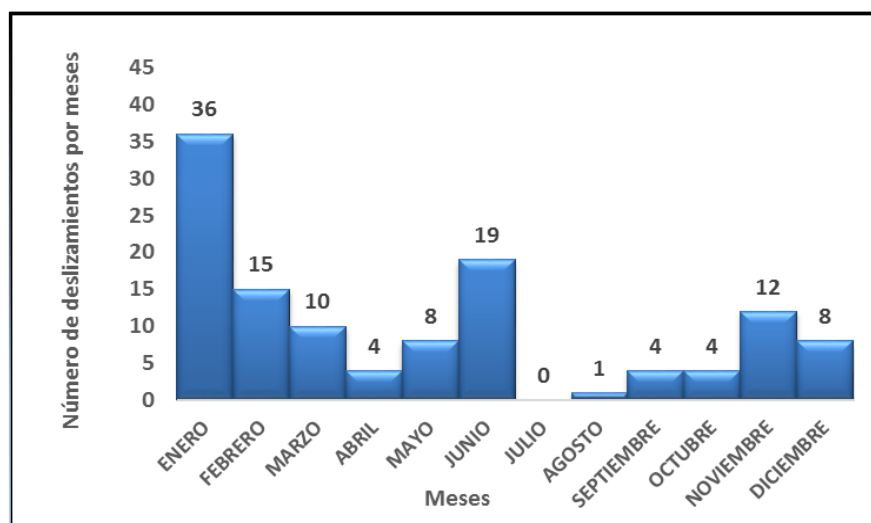


Figura 14: Número de deslizamientos distribuidos por meses, dentro del período 2006-2015.

Los datos de precipitaciones aportados por la AEMET para el estudio del deslizamiento de Sebrango, correspondientes a los últimos 42 años, muestran que, aunque hay años con precipitaciones mayores que la media (2010, 2013 y 2015), existe un descenso progresivo de la precipitación media anual hacia el presente. Atendiendo a dichos valores no parece existir una relación causa-efecto, entre el presumible aumento del número de eventos detectados y un incremento de las precipitaciones. De hecho, hay años con valores importantes de las precipitaciones medias anuales y pocos eventos registrados.

Un análisis interesante de abordar es conocer qué cantidad de agua se necesita para desarrollar roturas en Cantabria. Como se indicó anteriormente se han descartado aquellos eventos en los que no se registraron precipitaciones el mismo día de su formación. Las precipitaciones que generaron estos argayos deben de corresponder a las recogidas en alguno de los 5 días anteriores al evento, de los cuales se poseen registros. Aunque algunos de ellos podrían considerarse relacionados con las precipitaciones, el hecho de no registrarse lluvias el día de su formación hace dudar de su datación, por lo que se ha optado por descartarlos del análisis. Los eventos que se corresponden con esa situación son 24, y se producen en un entorno de lluvias precedentes de 1 a 5 días, con valores de precipitaciones acumuladas que varían entre 3,50 mm y 200,60 mm, con un valor medio de 41,16 mm. De esta forma, la población de deslizamientos seleccionada para el análisis final es de 97 eventos.

La Figura 15 presenta las precipitaciones registradas el día en el que ocurrió cada evento. La gráfica presenta una varianza importante de precipitaciones (entre 0,40 y 137,50 mm), con un

valor medio de 45,55 mm. En la Figura 16 se muestra la frecuencia de precipitaciones registradas el día de la aparición de cada deslizamiento. Casi el 39% de los eventos se desarrolla con lluvias de baja intensidad (registros de 0 a 23 mm, en 24 horas), seguidos de un 19% que lo hacen con precipitaciones más intensas, entre 23-46 mm; algo más de 27% se han desarrollado con precipitaciones entre 46-92 mm, y solamente para un pequeño porcentaje del 13% de la población se han registrado lluvias entre 92-138 mm el día de su formación. La mediana, de las precipitaciones registradas el día de cada evento, se localiza en 36,20 mm.

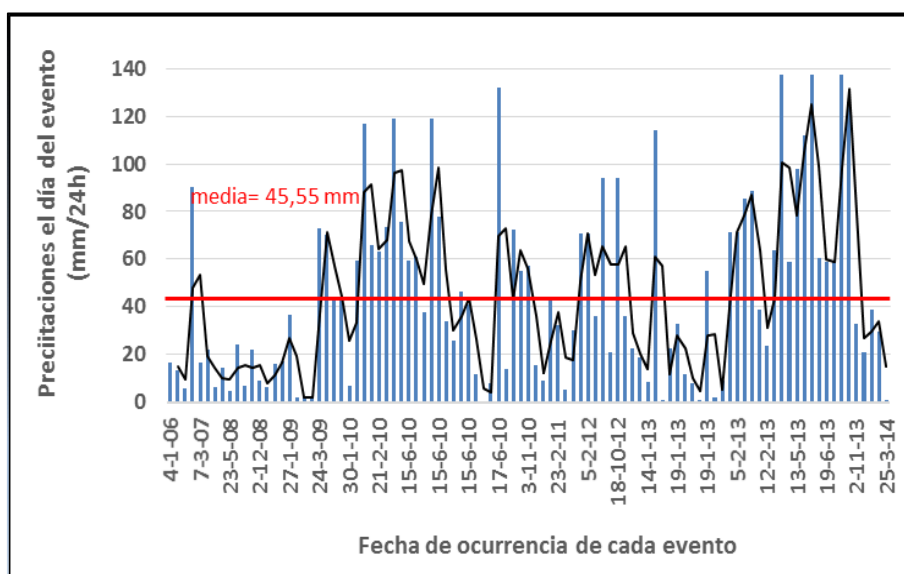


Figura 15. Precipitaciones registradas el día de ocurrencia de cada deslizamiento.

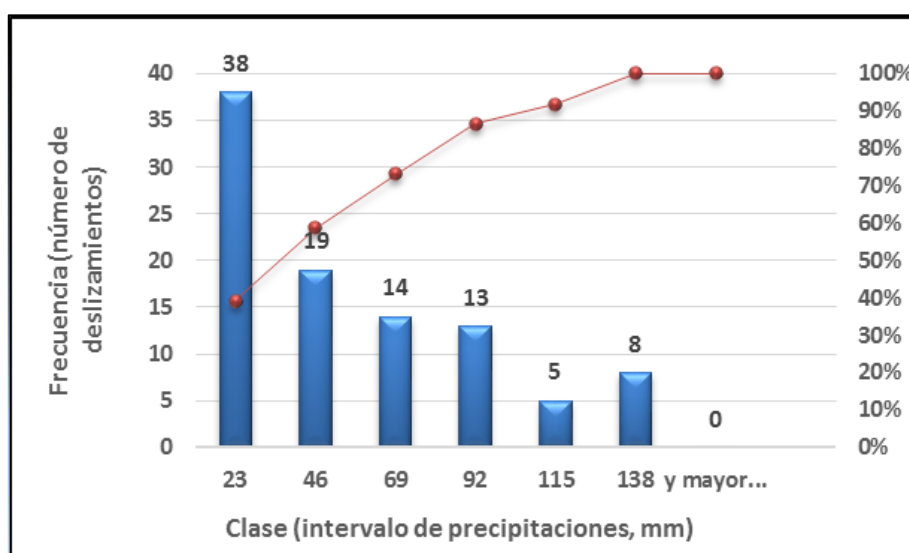


Figura 16: Frecuencia de las precipitaciones registradas el día de formación de cada evento (barras azules) y porcentaje acumulado (línea de puntos).

Con respecto al total de lluvias acumuladas registradas para cada evento, los valores de precipitación acumulada oscilan entre un máximo de 295,60 mm y un mínimo de 2,10 mm, con un valor medio de 109,62 mm (Figura 17). Es evidente que estos valores mínimos no tienen mucho sentido desde un punto de vista geológico a no ser que correspondan con acuitardos, en los que las presiones intersticiales límite se alcanzan con un escaso volumen de agua almacenada.

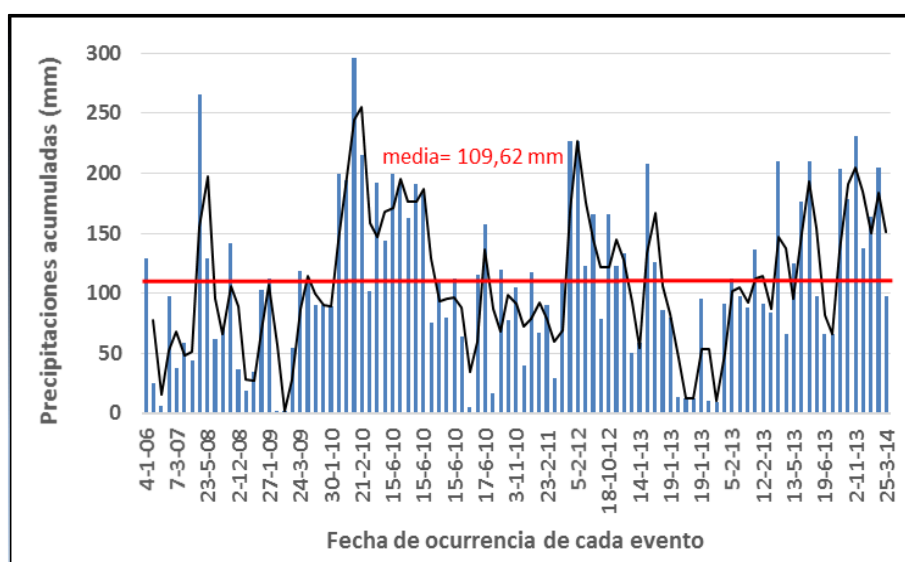


Figura 17. Precipitaciones acumuladas para cada deslizamiento.

En la figura 18 se observa la distribución de la frecuencia, de aparición de deslizamientos, respecto a la precipitación acumulada.

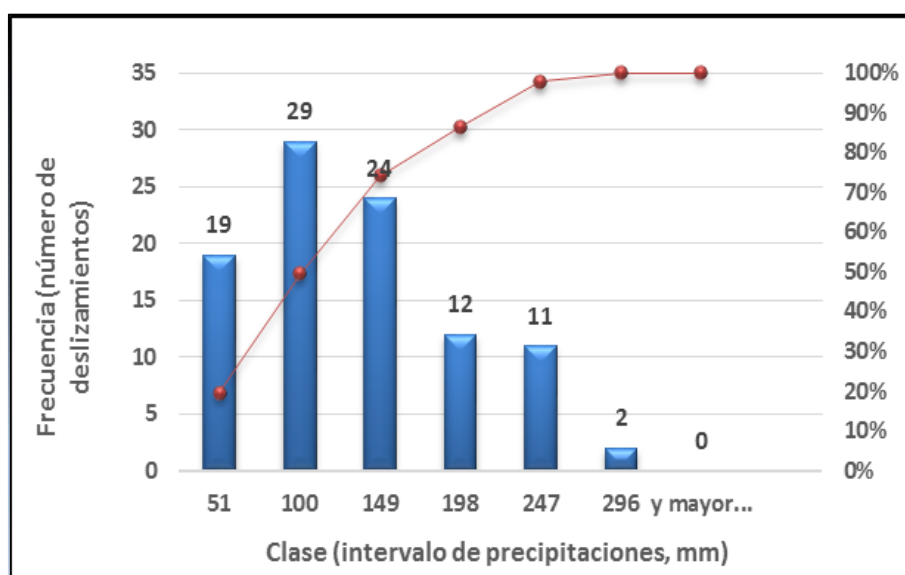


Figura 18: Frecuencia de las precipitaciones acumuladas para la formación de roturas (barras azules) y porcentaje acumulado (línea de puntos).

Más del 19% de los eventos se produce con menos de 51 mm de precipitación acumulada. Casi el 50 % de las roturas se produce entre 2,10 y 100 mm de precipitaciones acumuladas, y más del 75% de las roturas se produce dentro de un intervalo entre 2,10 y 149 mm de precipitación acumulada (la mediana se localiza en los 102,20 mm). A partir de ahí las frecuencias disminuyen hasta el 2% registrado, con valores de precipitaciones acumuladas de entre 247 y 295 mm. Estas cifras indican que la mayoría de las roturas requieren disponer de una precipitación acumulada significativa, estadísticamente superior a los 102 mm. Lógicamente, esta magnitud depende del número de días en los que se está registrando la misma.

En la Figura 19 se muestra un intento de correlación entre ambas variables estudiadas (lluvia registrada dentro de las 24 horas de generación de la rotura, y lluvia acumulada hasta la rotura). Para este análisis se han utilizado los 97 eventos seleccionados anteriormente. El gráfico se ha dividido en 4 zonas, delimitadas por las líneas que marcan los valores de las medianas anteriormente indicadas (36,20 mm para las lluvias el día del evento, en el eje Y; 102,20 mm para las precipitaciones acumuladas, en el eje X).

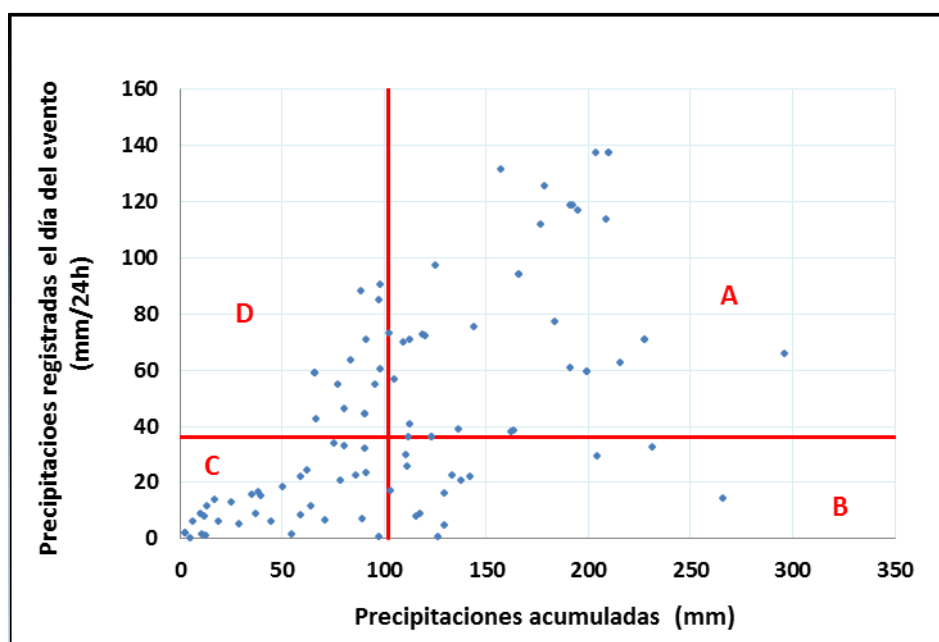


Figura 19: Relación entre las precipitaciones acumuladas frente a las registradas el día de formación de cada deslizamiento.

La zona A muestra aquellos deslizamientos que se generan con precipitaciones por encima de ambas medianas; en la zona B están representados los deslizamientos cuyas precipitaciones totales acumuladas están por encima de la mediana, pero las recogidas el día de su formación están por debajo de la suya; la zona C representa el área que incluye los argayos generados con precipitaciones por debajo de las dos medianas señaladas, por lo que se trata de aquellos

deslizamientos que menos cantidad de lluvia necesitan para su formación; y por último, en la zona D encontramos aquellos en los que el día de su generación se registraron precipitaciones por encima de la mediana pero cuyas precipitaciones totales acumuladas son inferiores a su mediana. La correlación entre los valores de precipitación en el día del evento respecto a la precipitación acumulada da un ajuste muy bajo ($R=0,4$) este valor indica que hay una amplia dispersión de los puntos, lo que pone de manifiesto la enorme variabilidad de escenarios en los que se pueden producir roturas. La zona C de la Figura 19 corresponde con aquellos eventos que están por debajo de ambas medianas, es decir aquellos que requieren el nivel mínimo de agua necesaria para su formación; se trata de 33 deslizamientos, generados a partir de unas precipitaciones en 24 horas, que varían entre 0,40 y 34,20 mm (con un valor medio de 12,57 mm), y unas precipitaciones acumuladas entre 2,10 y 97,20 mm (con un valor medio de 44,34 mm). La mayoría de estos 33 eventos se forman con 4 días de precipitaciones o menos. Estos, lógicamente, marcarán el umbral mínimo que se está buscando en este estudio. Por lo que el ajuste de los umbrales debe tender a considerar exclusivamente estos puntos y no los superiores para roturas en taludes.

La Figura 20 muestra un análisis de las precipitaciones (antecedentes-día) necesarios para la generación de deslizamientos. En ella, se observa que la mayoría de los deslizamientos se producen a partir de 5 días de lluvias (63,9%), y el 80% se genera a partir de los 4 días de precipitaciones. La frecuencia va disminuyendo a medida que disminuye el número de días en los que se registran precipitaciones, y solamente un 4% del total se generan tras un solo día de lluvia. Estos datos indican que, en Cantabria, cuanto más duraderas son las precipitaciones, más número de deslizamientos aparecen, es decir, que los materiales necesitan bastante tiempo para incrementar sus presiones intersticiales y favorecer la rotura. Considerando las precipitaciones registradas el día del evento y teniendo en cuenta que los eventos se producen con lluvia antecedente, la mediana se sitúa en los 40,90 mm para períodos de 6 días de lluvia antecedente, siendo el valor más alto de los obtenidos; seguidamente se observa que la mitad de los deslizamientos que se generan tras períodos de 4 días de lluvias actúan con precipitaciones entorno a 40,60 mm. Para aquellos deslizamientos que se generan tras 5 días de precipitaciones, la mediana se sitúa en los 32,50 mm un poco más baja que la anterior; para 3 días de lluvias, y menos, las medianas presentan valores por debajo de los 20,00 mm. En cuanto a las precipitaciones acumuladas, las medianas de las lluvias precedentes durante 6 días de precipitaciones aportan valores de 133,40 mm; para 5 días la mediana da un valor de 91, 2 mm; para 4 días 101,30 mm; y disminuyendo progresivamente para el resto de los periodos. Llama la atención el mínimo que se presenta para los valores de lluvia a los 5 días y esa especie de oscilación que dibujan los datos. Una posible explicación puede corresponder a la duración típica

de los frentes de precipitación, no encontrándose explicaciones plausibles adicionales para este hecho.

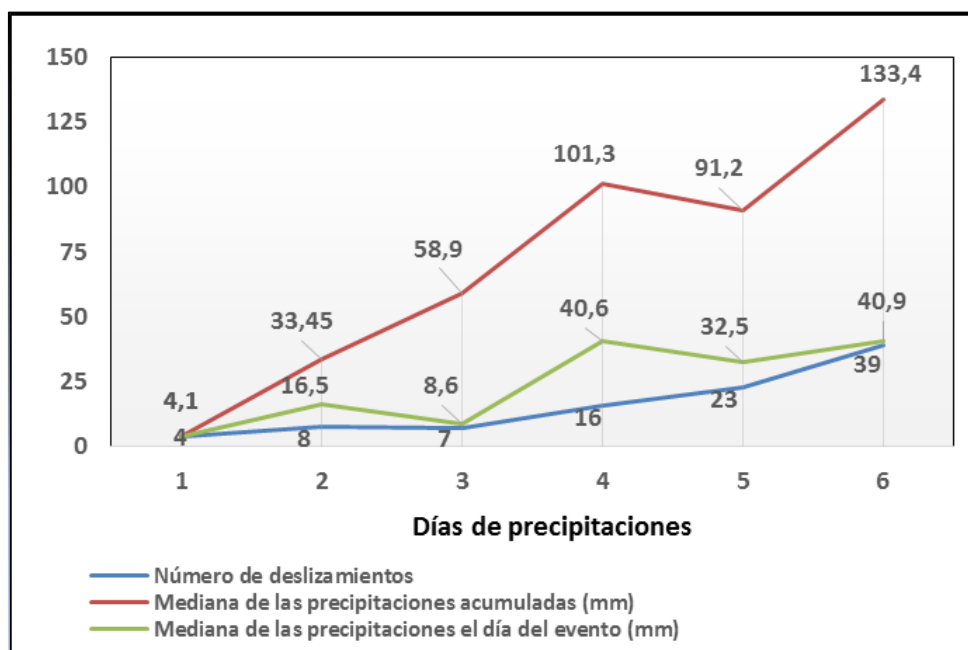


Figura 20: Relación entre el número de días de lluvia antecedente, el número de deslizamientos y las medianas de las precipitaciones (el día del evento y antecedentes).

5.7. UMBRALES DE PRECIPITACIÓN.

Como es conocido, el concepto de umbral de precipitación presentado por Caine en 1980, y otros investigadores, va en la línea de utilizar una referencia que sirva para determinar sistemas de alerta ante la posible ocurrencia de estos eventos producidos por lluvias en el futuro. Para ello, se aplica el principio del actualismo, entendido en sentido inverso (los hechos pasados sirven para explicar hechos futuros, si las condiciones climáticas generales no son muy cambiantes).

La Figura 21 muestra la representación de los 97 individuos utilizados en esta parte final del estudio, usando un gráfico, de intensidad de precipitación y duración, similar al propuesto por *Wieczorek et al. (2000)*. En el mismo, se han representado las rectas que marcan los umbrales definidos por diferentes autores, en diferentes partes del mundo (ver figura). Se pueden observar los valores de umbral definidos por *Caine (1980)*, aplicables a cualquier parte del mundo para un intervalo de duración de las precipitaciones entre 0,167-500 horas; los de *Wieczorek (1987)* para intervalos de duración de 1-6,5 horas obtenidos de estudios en Las Montañas de Santa Cruz en California; los de *Wieczorek et al (2000)* para duraciones entre 2-16 horas y obtenidos en Virginia (USA); los propuestos por *Canon y Ellen (1985)* para intervalos de 2-24 horas en la zona de la Bahía de San Francisco en California; los aportados por *Corominas et al. (2005)* para duraciones

de la precipitación por encima de las 165 horas, en Los Pirineos; además de los propuestos por *Guzzetti et al. (2008)* para duraciones entre 48-1000 horas y aplicable a cualquier parte del mundo; los de *Crosta y Frattini* para intervalos de 0,1-1000 horas; por último, los obtenidos por *Tuñgol y Regalado (1996)* para unos intervalos entre 0,167-3 horas en unos estudios realizados en Filipinas.

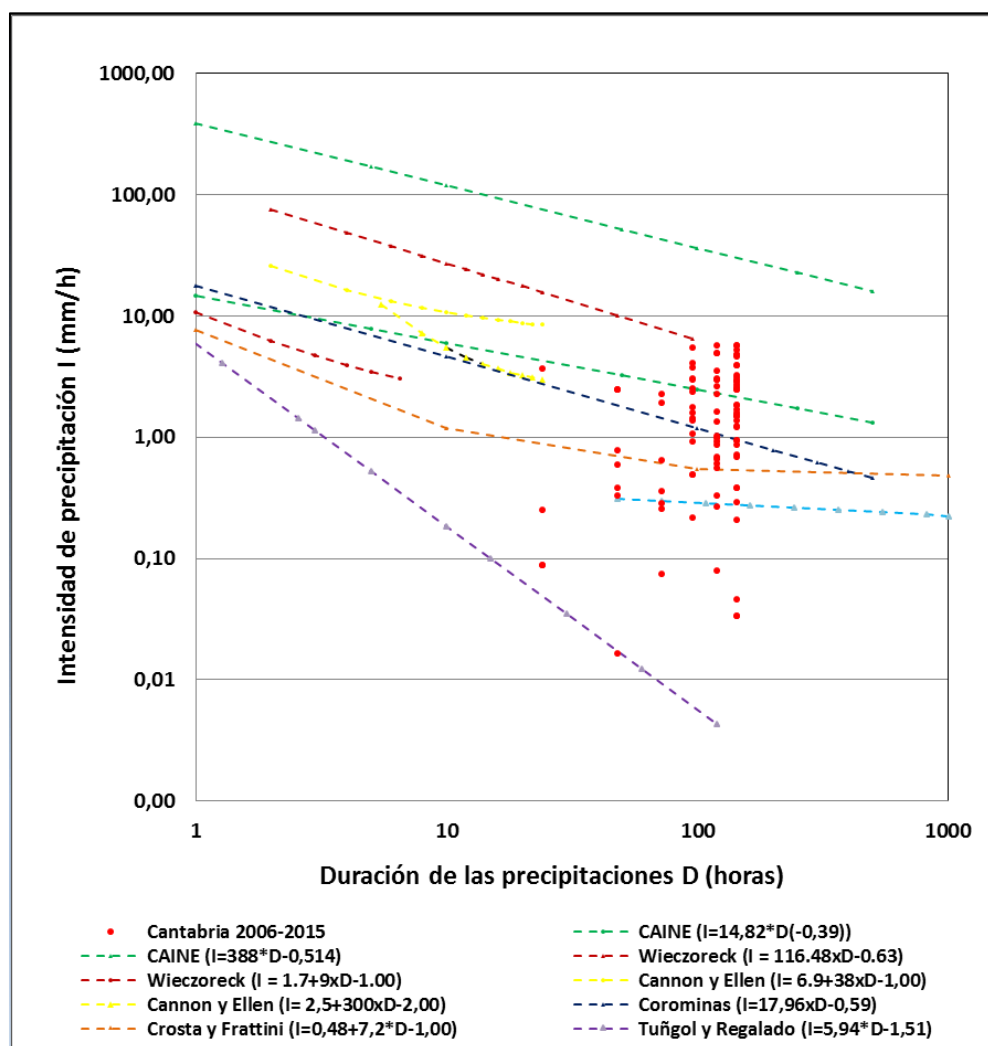


Figura 21: Relación entre intensidad de precipitación, I (mm/h) y duración de las mismas, D (horas).

Como se ha presentado anteriormente, los análisis de intensidad de precipitación y lluvia antecedente realizados, en la población de eventos de este estudio, muestran como las mayores frecuencias de ocurrencia de evento no corresponden a los valores promedios de intensidad de precipitación o de precipitación acumulada. Las modas de las clases se encuentran desviadas hacia la izquierda de las correspondientes gráficas, valores bajos-medios. Siguiendo esta línea de razonamiento, ese valor mínimo de intensidad debe estar próximo al de mayor frecuencia muestral, y alejado de los valores máximos. Los valores más próximos a la media serán, en este

caso, de poca utilidad, porque no son capaces de captar las intensidades o duraciones típicas ocurridas durante las roturas, sino valores más altos. Además, la idea de umbral (nivel mínimo o máximo de alguna magnitud a partir del cual un proceso tiene lugar), propuesta por *Reichenbach (1998)*, condiciona la utilización de los valores menores de intensidad obtenidos para cada rango de duración. Así, y como se ha señalado en el apartado anterior, dicho umbral vendrá definido por aquellos deslizamientos cuyas precipitaciones se sitúen por debajo de la mediana de las lluvias registradas en las 24 horas y por debajo de la mediana de las lluvias antecedentes, Zona C de la Figura 19.

En la Figura 22 aparecen representados estos 33 deslizamientos situados en la Zona C, que además, suponen una muestra estadísticamente representativa para la estimación del umbral mínimo, y dos aproximaciones al mismo. Los valores de Duración – Intensidad de esta muestra se presentan en la Tabla 3. Se trata de individuos con una amplia variación de valores de intensidad.

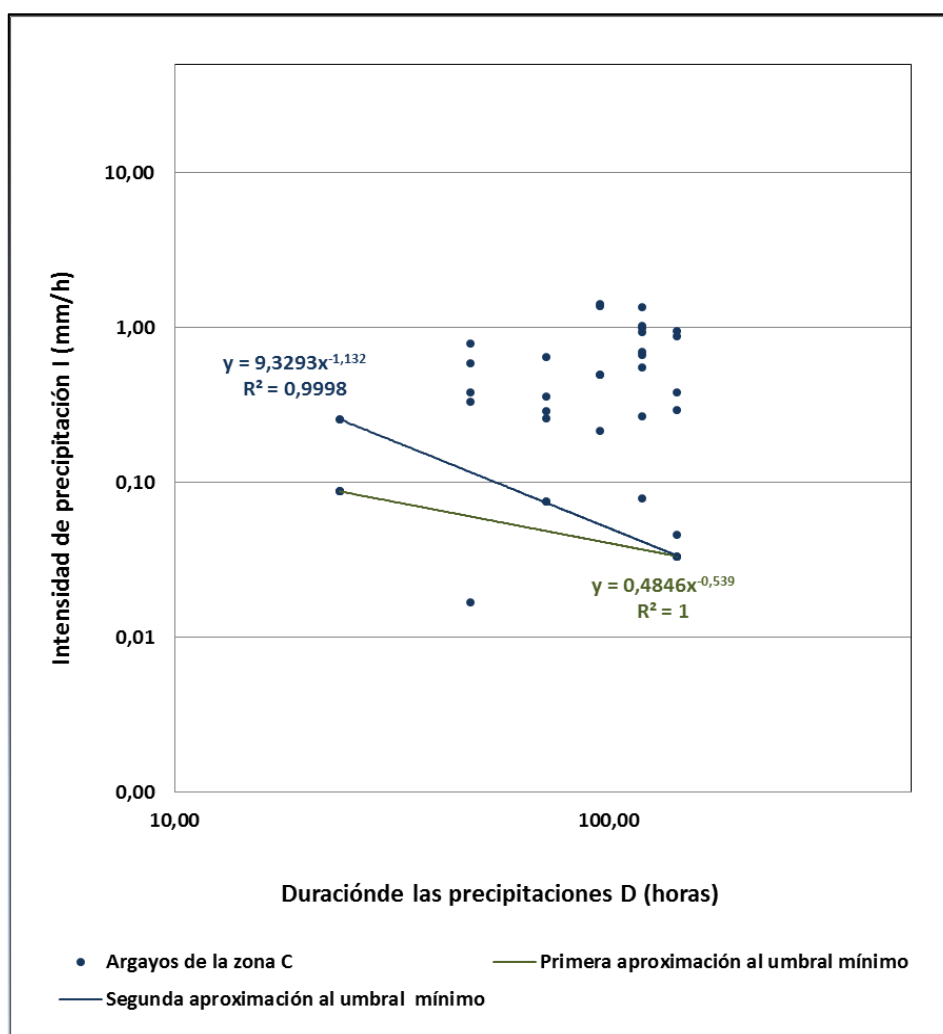


Figura 22: Obtención de los umbrales mínimos de precipitación para los argayos analizados en Cantabria en el período 2006-2015.

En una primera aproximación, se seleccionaron únicamente los valores mínimos de la muestra. Los tres individuos con los valores mínimos de intensidad, discriminando el de valor (I,D) de (0.02, 48) (que, como se puede observar gráficamente en la Figura 23, se desmarca claramente de la tendencia general que presenta el resto de puntos), poseen valores I,D de (0.09, 24), (0.09, 24) y (0.03, 144). Dichos puntos, determinan una recta cuya expresión es $y = 0,4846 x^{-0,539}$, con un valor de $R^2 = 1$. Este ajuste perfecto se debe a que dos individuos, de los tres seleccionados, tienen los mismo valores I,D, por lo que el ajuste gráfico se realiza solamente entre dos puntos con diferentes valores. Por ello, se ha optado por realizar una segunda aproximación, seleccionando los 3 individuos con menores registros de intensidad, y que a la vez representen un rango mayor de duración (24, 72 y 144 horas). Estos 3 nuevos eventos poseen los valores de (I,D) siguientes: (0.25, 24), (0.08, 72) y (0.03, 144), definiendo una ecuación de umbral cuya expresión viene dada por $y = 9,3293 x^{-1,132}$, con un valor de ajuste bastante bueno ($R^2 = 0,9998$).

Tabla 3: Valores de intensidad y duración de la muestra de 33 roturas de la Zona C, seleccionadas para la determinación del umbral mínimo de precipitación.

Id deslizamiento	Duración de la precipitación (horas)	Intensidad de la precipitación (mm/h)
14	24,00	0,09
75	24,00	0,09
2	24,00	0,25
43	48,00	0,02
58	48,00	0,33
89	48,00	0,38
44	48,00	0,59
93	48,00	0,78
56	72,00	0,08
10	72,00	0,26
12	72,00	0,29
51	72,00	0,36
45	72,00	0,65
68	96,00	0,22
86	96,00	0,49
59	96,00	0,49
55	96,00	1,38
25	96,00	1,43
17	120,00	0,08
15	120,00	0,27
0	120,00	0,55
19	120,00	0,67
4	120,00	0,69
73	120,00	0,93
108	120,00	0,99
11	120,00	1,02
62	120,00	1,35
126	144,00	0,03
92	144,00	0,05
84	144,00	0,29
74	144,00	0,38
66	144,00	0,88
94	144,00	0,94

Comparando este último umbral con los propuestos en la literatura por otros autores, se observa que los valores aportados en este trabajo son ligeramente superiores a los propuestos por *Tuñol y Regalado (1996)*, e inferiores a los propuestos por *Corominas et al. (2005)* y *Caine (1980)*. El umbral estimado por *Tuñol y Regalado (1996)*, situado por debajo del umbral calculado, presenta su mejor ajuste para precipitaciones de duración entre 0,167 y 3 horas, lo que se corresponde con precipitaciones muy intensas recogidas en un corto espacio de tiempo, y para un escenario climático muy diferente al de Cantabria. Por lo tanto, este umbral calculado, a pesar de tratarse de una muestra poco representativa estadísticamente, ofrece mayor confianza que el determinado por los autores filipinos. Evidentemente, el umbral mínimo calculado, tiene poco que ver con las laderas naturales existentes en Cantabria, que será lógicamente más alto, ya que éstas laderas generalmente están muy poco intervenidas. Además, se debe tener presente que las características climáticas de la región difieren notablemente de las analizadas con *Tuñol y Regalado*.

Otra propuesta de umbral se ha desarrollado usando los valores máximos, dentro de la muestra seleccionada para la obtención del umbral mínimo (Figura 23); los dos valores de mayor intensidad de precipitación, (I,D), (1.61, 96) y (1.35, 120), junto con los eventos situados inmediatamente por encima de los valores máximos que forman la Zona C, definen un umbral superior que viene expresado por la ecuación $y = 27,109 x^{0,621}$, con un valor de $R^2 = 0,9982$. Los eventos que definen este umbral superior, además abarcan un amplio rango de duración, que comprende el período completo de 6 días analizado en este trabajo, lo que le convierte en un límite muy representativo. Los valores I,D de los eventos que definen la recta son (3.69, 24), (2.46, 48), (1.94, 72), (1.61, 96), (1.35, 120) y (1.23, 144). Este umbral superior se ajusta bastante bien al definido por *Corominas et al.* en 2005, para la zona de los Pirineos, situándose ligeramente por encima del mismo, y sutilmente por debajo del umbral marcado por *Caine* en 1980. El clima de Pirineos es menos lluvioso que el de Cantabria por lo que el umbral determinado puede corresponder con una excelente referencia para los taludes de carreteras cántabras, no así para sus laderas naturales.

Por último, en la Figura 24 se muestra la estimación del umbral máximo de precipitaciones, realizado para la totalidad de los eventos analizados. Para ello, se han tomado los dos valores máximos de intensidad de precipitación del total de los 97 argayos inventariados. Estos puntos poseen coordenadas (I,D) de (5.73, 120) y (5.24, 144). La ecuación de la recta que forma este umbral está definida por la expresión $y = 59,19 x^{0,488}$; a pesar de que se trata de un umbral obtenido con muy baja representación de eventos, nos permite observar que los valores máximos de intensidad de precipitación registrados, se aproximan notablemente al umbral establecido por *Wieczoreck et al. (2000)*, para una zona de clima muy similar al de Cantabria. Este umbral

máximo puede ser muy próximo al que controla la ocurrencia de deslizamientos en taludes naturales en Cantabria entre 2006 y principios de 2015.

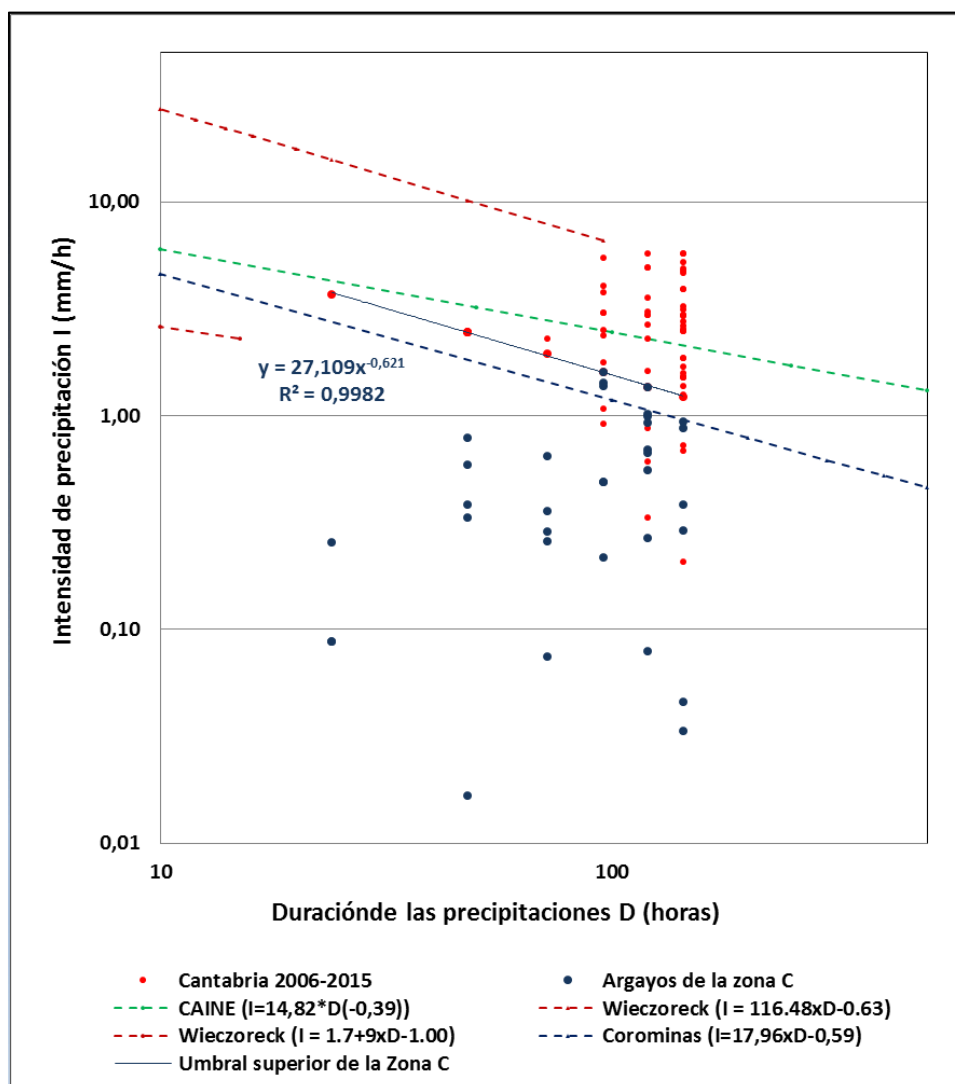


Figura 23: Estimación del umbral superior de precipitaciones.

Los resultados obtenidos parecen indicar que los umbrales mínimos de precipitación obtenidos en Cantabria para taludes artificiales no son útiles para explicar roturas naturales, ya que muestran una notable diferencia de orden con los resultados propuestos en la literatura. Evidentemente, los taludes artificiales presentan alteraciones de las laderas como consecuencia del proceso de excavación que se da en las mismas, apareciendo tensiones por la descompresión del material, etc. No obstante, los umbrales obtenidos en taludes de carretera, sobre la base de los valores máximos de la muestra total, o a partir de las medianas que marcan las intensidades más bajas, aportan resultados muy coincidentes con los que aparecen en la literatura, en áreas de Pirineos y a nivel global en zonas húmedas. A pesar de lo manifestado por Corominas, se considera factible usar los umbrales superiores de precipitación en taludes de

carretera, obtenidos mediante este procedimiento, como primera aproximación al estudio de los umbrales de laderas naturales. Sin embargo, debemos tener presente que la mayor utilidad de este indicador se proyecta en la protección de vías públicas ante precipitaciones, y no en laderas naturales. Estas vías se construyen modificando laderas naturales y generando en ellas taludes artificiales. Taludes que sufren la acción de la entrada de agua en su interior, se hinchan, saturan y rompen cuando sus presiones internas alcanzan un determinado valor, nivel de referencia que, lógicamente, difiere de las laderas naturales. Y este valor es, por lo aquí expuesto, notablemente menor que en las laderas naturales. Por lo que determinar los umbrales, tanto máximos como mínimos tiene una relevancia importante como herramienta de mitigación y en el diseño de escenarios de riesgo ante la acción de precipitaciones en el futuro.

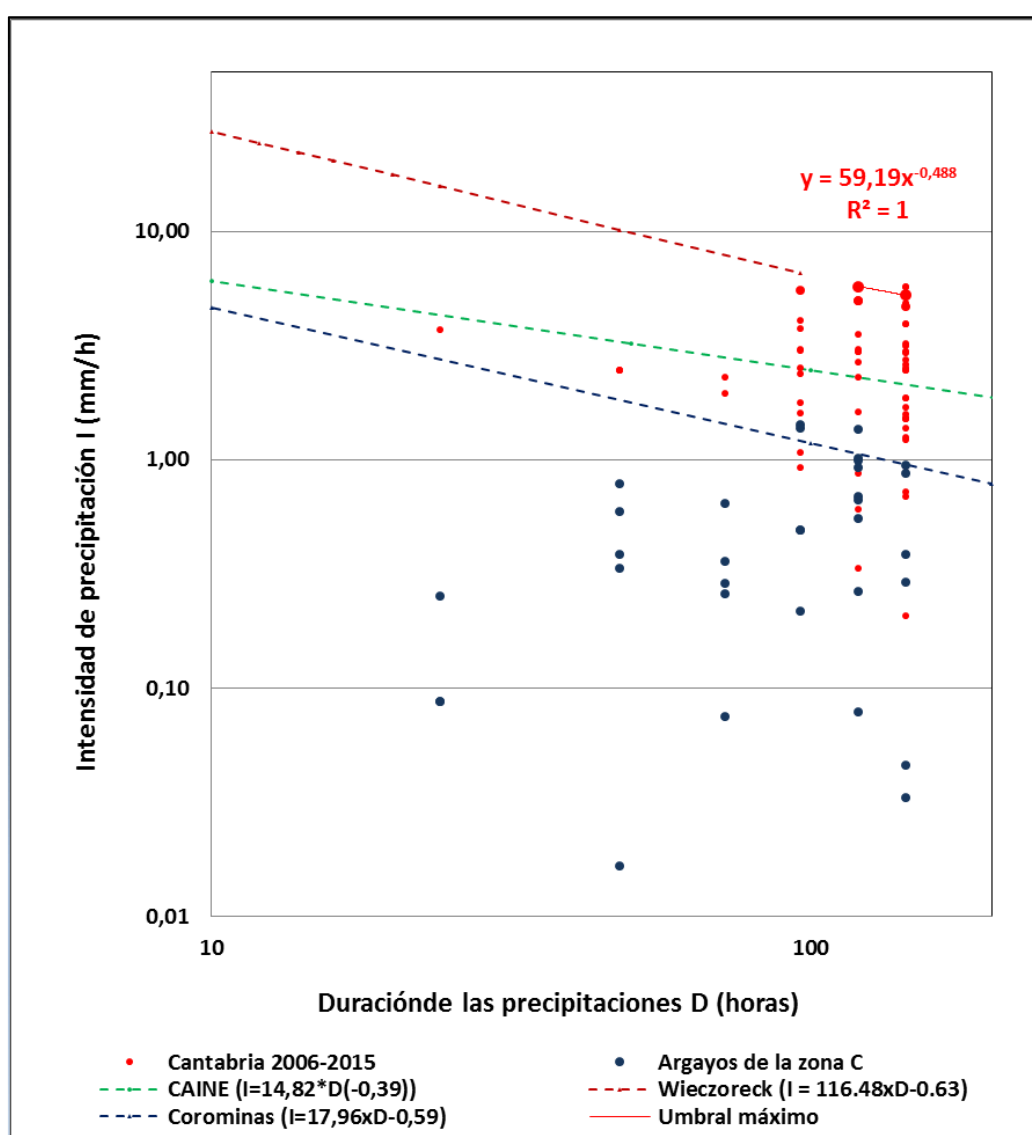


Figura 24: Estimación del umbral máximo de precipitaciones.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio parecen confirmar la hipótesis planteada en el mismo, es posible llevar a cabo un estudio similar a los descritos anteriormente, analizando los deslizamientos que han afectado a las carreteras de la región durante los últimos diez años.

El estudio realizado dentro del período de tiempo comprendido entre los años 2006 y comienzos del 2015, se pone de manifiesto que los años con mayor número de deslizamientos han sido el 2010, 2013 y 2015. La tendencia general de la muestra presenta un aumento del número de roturas hacia el presente no correlacionada con un aumento de las precipitaciones. Los máximos de producción de eventos a lo largo del año se localizan en Enero y Junio.

De los 121 eventos muestreados, el 63% se localiza en la mitad norte de la región, por debajo de 300 metros de altura. El 85% aparece en carreteras construidas sobre laderas con pendientes entre 0 y 20° de inclinación. El 63% de las roturas aparecen en materiales cretácicos y cuaternarios. Fundamentalmente de las facies más susceptibles son el Weald y el Albiense-Aptiense, seguidas por otras litologías susceptibles como el Purbeck, el Triásico.

La mayor parte de las roturas, de los 97 individuos finalmente seleccionados, han ocurrido con precipitaciones con intensidades de 23 a 92 mm en 24h, y con precipitaciones acumuladas superiores a 102 mm. El 80% de los deslizamientos requieren, al menos, de cuatro días de lluvias acumuladas antecedentes, y en un 60% de los casos de 5 días de lluvias antecedentes.

En Cantabria se generan movimientos de tierra en taludes artificiales con bajos registros de lluvia, con unos valores medios de lluvias caídas de 45,55 mm/24 h, pero para la mayoría de los casos son necesarios más de 4 días de precipitaciones.

Los umbrales obtenidos sobre la base de los valores máximos de la muestra total, así como la del nivel superior de los valores situados por debajo de las medianas de precipitación de la muestra filtrada, presentan resultados coincidentes con los obtenidos en taludes naturales en otros entornos geográficos. Mientras que los umbrales obtenidos sobre la base de los valores mínimos suponen una referencia para el diseño de escenarios de mitigación de roturas ante lluvias futuras, en taludes artificiales.

7. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

A partir de los resultados expuestos en este Trabajo Fin de Máster, resultaría interesante ampliar la investigación en las siguientes líneas:

- Ampliar el período de tiempo analizado con el objeto de observar si se producirían variaciones en los resultados, incluyendo también registros climáticos de similar naturaleza y que no dan lugar a argayos.
- Analizar con una muestra estadística más robusta el contexto de la precipitación (los días de precipitaciones que aportan lluvias efectivas en la generación de deslizamientos).
- Dada la variabilidad geográfica en Cantabria, resulta necesario realizar un estudio de los umbrales por comarcas - unidades geológicas - alturas, para lo cual se requiere aumentar el número de deslizamientos que constituyen la muestra.
- Comprobar, en la medida de lo posible las características naturales-constructivas de los taludes afectados con el fin de mejorar la caracterización de los mismos.
- Mejorar la determinación de los umbrales mínimos y máximos.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho estas líneas para agradecer al periódico *El Diario Montañés*, de cuya hemeroteca obtuve los datos que me han servido de base para la realización de este trabajo, por la facilidad de acceso a la información que aporta su formato digital, así como por la cantidad y la calidad de la información obtenida.

Agradecer también a la *Agencia Estatal de Meteorología de Santander* (AEMET), su colaboración conmigo, y la maravillosa disponibilidad que ha mostrado siempre su equipo para facilitarme todo aquello que les he solicitado.

Por supuesto, a todos los profesores de este Máster, a cuyo título accedo con este Trabajo Final, por todo lo que me han aportado a lo largo de este tiempo, por el apoyo, la orientación y la experiencia que siempre han puesto a disposición de los alumnos. Ha sido un placer.

Y muy especialmente, a mis directores de Trabajo Fin de Máster, el Dr. Alberto González Díez y la Dra. Gema Fernández Maroto, por todo el tiempo que me han dedicado, por todo lo que he aprendido en esta recta final del Máster, y sobre todo, por lo difícil que se lo he puesto en alguna ocasión.

A todos, gracias...

8. BIBLIOGRAFÍA

Alonso del Val, F.J. *et al.* (2012). “Escenarios de cambio climático regional en Cantabria aplicados a la cartografía agroclimática de precisión”.

Ancell R., Celis R. (2013). “Termopluviometría de Cantabria durante el periodo 1981-2010”. Unidad de Estudios y Desarrollos, Sección de Climatología. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). 20p.

Ayala-Carcedo, F.J. (2002). “Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites”. En F.J. Ayala-Carcedo y J. Corominas, (eds.). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones en España. Instituto Geológico y Minero de España, 7-20.

Bhandari, R.K., Senanayake, K.S., Thayalan, N. (1991). “Pitfalls in the prediction on landslide through rainfall data”. 6th International Symposium on Landslides. Christchurch. Bell (ed.). A.A. Balkema, Rotterdam. Vol. 2: 887-890.

Bonaechea, J. (2006). “Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos”. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.

Bonaechea, J. *et al.* (2014). “Geomorphic Hazards in Spain”. En: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (eds.). Landscapes and Landforms of Spain.

Brand, E.W. (1985). “Predicting the performance of residual soil slopes”. Proceedings 11th Int. Conf. Soil Mech. y Found. Engineering. San Francisco. Vol. 5: 2541-2578.

Brunsden, D. (1984). “Mudslides”. En: D. Brunsden & D.B. Prior (eds.). Slope instability. Wiley, Chichester, pp. 363-418.

Caine, N. (1980). “The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debrisflows”. Geografiska Annaler, 62 A: 23-27.

Cannon, S.H., Ellen, S. (1985). “Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California”. California Geology 38 (12), 267– 272.

Cannon, S.H., Ellen, S.D. (1988). “Rainfall that resulted in abundant debris-flow activity during the storm”. En: S.D. Ellen, G.F. Wieczorek (eds.). “Landslides, floods and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California”. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1434: 27-33.

Cendrero, A., Dramis, F. (1996). “The contribution of landslides to landscape evolution in Europe”. Geomorphology 15(3-4):191-212.

Corominas, J., García-Yagüe, A. (1997). “Terminología de los movimientos de ladera”. IV Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, Corominas, Alonso, Chacón y Oteo (eds.), V-III, 1051-1072.

Corominas, J. (2000). “Landslides and climate”. In: Bromhead EN (ed) VIII International Symposium on landslides Cardiff UK keynote lectures CD-ROM 200.

Corominas, J. (2005). "Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. B. Riesgos de inestabilidad de laderas". In: Moreno JM (coord). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp 549-579.

Corominas, J. (2006). "El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España". Cuaternario y Geomorfología 20(3-4):89-113.

Crosta, G.B., Frattini, P. (2001). "Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow". In: Proceedings 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, Eds). Siena: 463– 48.

Crozier, M. J. (1986). "Landslides: causes, consequences and environment". Groom Helm, London.

Crozier, M.J. (1997). "The climate-landslide couple: a southern hemisphere perspective". En: Matthews, J.A., Brunsden, D., Frenzel, B., Glaeser, B., Weiss, M.M. (eds.), "Rapid Mass Movement as a Source of Climatic Evidence for the Holocene". Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 333–354.

Cruden, D.M. (1991). "Cowboys and Landslides". Landslide News 5:31-32.

Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). "Landslide types and processes". In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.) Landslides: investigation and mitigation. TRB Special Report, 247. National Academy Press, Washington: 36-75.

Chleborad, A. (2001). "Preliminary Method for Anticipating the Occurrence of Precipitation Induced Landslides in Seattle". Washington. U.S. Geological Survey.

González Díez, A. (1995). "Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje". Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Inédita.

González Díez, A., Remondo, J., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. (1999). "A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides". Geomorphology 30:95-113.

González Díez, A., Remondo, J., Cendrero, A. (2005). "Consideraciones sobre la relación entre movimientos de ladera y el Clima". En: J. Corominas; E. Alonso, M. Romana, M. Hürliman (eds.). VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. UPC Valencia. 3: 1103-1130.

González-Díez, A., Soto, J., Gómez-Arozamena, J., Bonachea, J., Martínez-Díaz, J.J., Cuesta, J.A., Olague, I., Remondo, J., Fernández Maroto, G., Díaz de Terán, J.R. (2009). "Identification of latent faults using a radon test". Geomorphology 110:11–19.

González Díez, A., Fernández-Maroto, G., Doughty, M., Martínez-Cedrún, P., Remondo, J., Bruschi, V.M., Bonachea, J., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. (2012). "La influencia de la tubificación en la génesis de deslizamientos originados por lluvias intensas".

González-Díez, A., Fernández-Maroto, G., Doughty, M.W., Díaz de Terán, J.R., Bruschi, V.M., Cardenal, J., Pérez-García, J.L., Mata, E., Delgado, J. (2013). "Development of a methodological approach for the accurate measurement of slope changes due to landslides, using digital photogrammetry". Landslides (2014) 11:615–628 doi: 10.1007/s10346-013-0413-5.

González Díez, A. (2015). Página web. <http://personales.unican.es/gonzalea/>.

Govi, M., Sorzana, P.F. (1980). "Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount in Piedmont basins (North-Western Italy). *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*. 14: 43-61.

Gray, D.H., Leiser, A.T. (1982). "Biotechnical slope protection and erosion control", Van Nostrand Reinhold, New York.

Guidicini, G., Iwasa, O. Y. (1977). "Tentative correlation between rainfall and landslides in humid tropical environment". *Bull. Int. Assoc. Eng. Geologists*, 16: 13-30.

Gutiérrez, J.M. *et al.* (2010). "Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria": Termoplumiometría. Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria. 105 pp.

Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. P. (2008). "The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update" *Landslides* (2008) 5: pp. 3–17.

Harp, E.L., Savage, W.Z. (1998). "Landslides triggered by the April 1997 tropical storms on Pohnpei, Federated States of Micronesia". *Landslide News*, 11: 29-32.

Heredia, N., Robador, A., Rodríguez Fernández, L.R., Locutura, J., Zapardiel, J.M., Gómez, G., Calderón, V., Díaz, L.A., Peralta, M., Marquínez, J., Gómez Ceballos, R., Rodríguez, M.L. (1990). "Mapa geológico-minero de Cantabria a escala 1:100.000". Instituto Tecnológico Geominero de España y Diputación Regional de Cantabria. Santander. 133 pp.

Lumb, P. (1975). "Slope failures in Hong Kong". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, pp. 31 – 65.

Mayorga, R. (2003). "Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia". *Meteorol. Colomb.* 7 :157-168. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

Mark, R.K., Newman, E.B. (1988). "Rainfall totals before and during the storm: distribution and correlation with damaging landslides". En: S.D. Ellen & G.F. Wieczorek (eds.). "Landslides, floods and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California". U.S. Geological Survey Professional Paper, 1434: 17-26.

Palmquist, R.C., Bible, G. (1980). "Conceptual modelling of landslide distribution in time and space. *Bull.* I.A.E.G., 21,178-186.

Pierson, T.C., Iverson, R.M., Ellen, S.D. (1991). "Spatial and temporal distribution of shallow landsliding during intense rainfall, southeastern Oahu, Hawaii". En: Bell (ed.). *Landslides. Proceedings 6th International Symposium on Landslides*. A.A. Balkema. Vol. 2: 1393-1398.

Polloni, G., Aleotti, P., Baldelli, P., Noretto, A. (1996). "Heavy rain triggered landslides in the Alba area during November 1994 flooding event in the Piemonte Region (Italy)". En: Senneset (Ed.). *Landslides. Proceedings 7th International Symposium on Landslides*. A.A. Balkema. Vol. 2: 1955-1960.

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., Guzzetti, F. (1998). "Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River basin (central Italy)". *Environmental Geology* 35 (2 – 3), 146–159.

Shakoor, A., Smithmyer, A.J. (2005). "An analysis of storm-induced landslides in colluvial soils overlying mudrock sequences, southeastern Ohio, USA". *Engineering Geology*, 78:257-274.

Sharpe, C.F.S. (1938). "Landslides and related phenomena". Columbia. Univ. Press. N. York.

Tuñol, N.M., Regalado, M.T.M. (1996). "Rainfall, acoustic flow monitor records, and observed lahars of the Sacobia River in 1992". In: *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*. Newhall, C.G., Punongbayan, R.S. (eds). Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle, 126 pp.

Varnes, D.J. (1978). "Slope movements and types and processes". In: *Landslides analysis and control*. Transportation Res. Board Nat. Ac. Sci. Washington, Spec. Rep. 176, 11-33.

Wieczorek, G.F. (1987). "Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California". *Reviews in Engineering Geology*. Geological Society of America. 7: 93-104.

Wieczorek, G.F., Morgan, B.A., Campbell, R.H. (2000). "Debris flow hazards in the Blue Ridge of Central Virginia". *Environmental and Engineering Geoscience* 6 (1), 3 – 23.

Páginas Webs:

<http://mapas.cantabria.es/>

<http://www.ign.es/>

ANEXO

Tabla 2b: Deslizamientos analizados, precipitaciones asociadas a cada uno, y duración de las mismas.

Id Argayo	Altitud Argayo (m)	Precipitaciones totales acumuladas (mm)	Precipitaciones el día del evento (mm)	Intensidad; I (mm/h)	Duración; D (horas)
71	419	129,50	16,50	0,69	144
0	508	25,00	13,30	0,55	120
70	96	13,90	0,00	0,00	24
2	125	6,10	6,10	0,25	24
3	274	98,00	90,40	3,77	96
4	47	38,20	16,60	0,69	120
73	701	58,80	22,30	0,93	120
10	282	44,30	6,20	0,26	72
9	179	26,60	14,60	0,61	120
7	77	129,40	5,00	0,21	144
11	41	62,20	24,50	1,02	120
12	728	70,90	6,90	0,29	72
8	21	142,00	22,10	0,92	96
74	0	37,10	9,20	0,38	144
15	3	18,60	6,40	0,27	120
19	72	35,00	16,00	0,67	120
79	3	102,80	17,40	0,73	144
18	333	112,00	36,60	1,53	144
13	0	22,00	0,00	0,00	96
14	208	2,10	2,10	0,09	24
75	360	2,10	2,10	0,09	24
17	450	54,60	1,90	0,08	120
40	309	46,90	0,00	0,00	72
39	9	104,00	63,80	2,66	96
20	172	118,60	73,00	3,04	144
76	512	90,20	44,50	1,85	144
85	477	90,20	44,50	1,85	144
38	89	18,80	0,00	0,00	96
21	158	12,40	0,00	0,00	72
27	20	4,00	0,00	0,00	48
84	355	88,80	7,00	0,29	144
28	167	199,10	59,40	2,48	144
29	598	194,60	117,00	4,88	144
30	567	295,60	66,00	2,75	144
31	237	215,40	63,00	2,63	144
32	897	38,30	0,00	0,00	120
33	405	102,20	73,40	3,06	120
34	221	191,90	118,80	4,95	120
35	941	143,60	75,60	3,15	144
36	98	199,10	59,40	2,48	144
37	88	191,10	60,90	2,54	144
81	83	162,30	38,00	1,58	144
82	267	191,90	118,80	4,95	120
83	3	183,10	77,60	3,23	144
23	567	55,30	0,00	0,00	96
80	472	200,60	0,00	0,00	96
25	518	75,00	34,20	1,43	96
78	429	111,40	25,80	1,08	96
24	539	37,50	0,00	0,00	72
77	260	64,80	0,00	0,00	72
22	121	80,20	46,60	1,94	72
26	32	112,60	40,90	1,70	144
42	828	100,00	0,00	0,00	120
86	253	63,70	11,80	0,49	96
43	692	5,00	0,40	0,02	48
41	4	115,40	8,00	0,33	120
47	1077	157,00	131,80	5,49	96
44	69	16,60	14,20	0,59	48
48	428	119,80	72,50	3,02	96
87	237	77,40	55,00	2,29	120

Id Argayo	Altitud Argayo (m)	Precipitaciones totales acumuladas (mm)	Precipitaciones el día del evento (mm)	Intensidad; I (mm/h)	Duración; D (horas)
49	87	104,60	57,00	2,38	96
45	722	39,60	15,50	0,65	72
46	482	117,60	9,20	0,38	144
69	329	66,60	42,60	1,78	96
62	565	90,20	32,50	1,35	120
68	505	29,00	5,20	0,22	96
54	0	110,20	30,00	1,25	144
97	138	227,20	71,00	2,96	144
98	153	227,20	71,00	2,96	144
52	229	123,00	36,20	1,51	144
53	338	166,00	94,30	3,93	144
66	4	78,40	21,00	0,88	144
67	184	166,00	94,30	3,93	144
96	203	123,00	36,20	1,51	144
91	280	133,40	22,50	0,94	144
93	477	50,30	18,80	0,78	48
51	461	58,90	8,60	0,36	72
64	228	60,90	0,00	0,00	96
63	48	208,30	114,00	4,75	144
95	438	126,00	0,80	0,03	144
94	0	86,20	22,60	0,94	144
60	34	13,90	0,00	0,00	48
55	0	80,00	33,00	1,38	96
59	670	13,20	11,80	0,49	72
90	6	12,40	0,00	0,00	96
58	208	12,00	8,00	0,33	48
92	324	12,40	1,10	0,05	144
50	698	4,80	0,00	0,00	24
65	159	95,50	55,00	2,29	72
61	328	53,00	0,00	0,00	96
88	76	3,70	0,00	0,00	72
56	142	10,80	1,80	0,08	72
89	174	9,60	9,20	0,38	48
57	232	33,20	0,00	0,00	96
95	511	90,80	71,20	2,97	120
96	480	112,40	71,20	2,97	120
97	336	97,10	85,30	3,55	120
102	302	3,50	0,00	0,00	24
103	273	88,50	88,50	3,69	24
104	234	7,50	0,00	0,00	48
106	329	64,50	0,00	0,00	96
107	175	136,50	38,90	1,62	120
108	1095	91,20	23,80	0,99	120
109	69	81,70	0,00	0,00	120
110	103	83,70	63,90	2,66	120
111	731	209,90	137,50	5,73	144
112	833	66,00	59,10	2,46	48
113	105	124,80	97,60	4,07	96
114	175	176,20	111,80	4,66	144
115	433	209,90	137,50	5,73	144
116	284	97,90	60,50	2,52	96
117	802	66,00	59,10	2,46	48
119	691	66,00	59,10	2,46	48
120	332	203,80	137,50	5,73	120
121	103	178,20	125,80	5,24	120
122	143	231,10	32,90	1,37	144
123	51	137,50	20,90	0,87	120
124	92	163,40	38,60	1,61	96
125	606	204,40	29,40	1,23	144
126	93	97,20	0,80	0,03	144
127	83	34,20	0,00	0,00	96