

Umbrales de lluvia para el desencadenamiento de inestabilidades de ladera en el norte de Portugal y de España: estado del arte

Rainfall thresholds for the triggering of landslides in northern Portugal and Spain: state of the art

Pablo Valenzuela^{1*}, Teresa Vaz², Susana Pereira³, María José Domínguez-Cuesta⁴, Txomin Bornaetxea⁵, Victoria Rivas⁶, Juan Remondo¹, Alberto González-Díez¹, Jaime Bonachea¹, José Luis Zêzere², Carlos Bateira³, Javier Sánchez-Espeso⁷, Eliezer San Millán¹ y Lucía Francos⁴.

¹ Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Univ. de Cantabria, Avda. de los Castros 48, 39005 Santander. pablo.valenzuela@unican.es; juan.remondo@unican.es; alberto.gonzalez@unican.es; jaime.bonachea@unican.es; esanmi@gmail.com

² CEG, IGOT, Univ. de Lisboa, Rua Branca Edmée Marques, 1600-276 Lisboa.

tvaz@campus.ul.pt; zezere@campus.ul.pt

³ CEG, Univ. de Lisboa, FLUP, Univ. do Porto, Via Panorâmica s/n, 4150-564 Porto.

sspereira@letras.up.pt; cbateira@letras.up.pt

⁴ Dpto. de Geología, Univ. de Oviedo, C. Jesús A. de Velasco, s/n, 33005 Oviedo.

dominguezmaria@uniovi.es; francostrevias@hotmail.com

⁵ Dpto. de Geología, Univ. del País Vasco (UPV/EHU), Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa - Bizkaia.

txomin.bornaetxea@ehu.eus

⁶ Dpto. de Geografía, Urbanismo y Ord. del Territorio, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros 44, 39005 Santander.

maria.rivas@unican.es

⁷ Dpto. de Ing. Geográfica y Téc. de Expres. Gráfica, Univ. de Cantabria, Avda. Los Castros 44, 39005 Santander; javier.sanchez@unican.es

*Corresponding author

ABSTRACT

A great number of works focused on the calculation of empirical rainfall thresholds for the triggering of landslides have been developed in the northern areas of Portugal and Spain. Because of a review, 103 thresholds have been compiled. More than 30% of them have not yet been published. The comparison of four regional thresholds highlights relevant differences linked to the use of multiple methodologies to define the critical rainfall conditions.

Key-words: Landslide, Rainfall, Threshold, N of Portugal, N of Spain.

Geogaceta, 74 (2023), 99-102

<https://doi.org/10.55407/geogaceta98196>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Por sus características climáticas, geológicas y orográficas, amplias zonas del NO de la Península Ibérica son altamente susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades de ladera. Desde los años 80, diversos grupos de investigación han trabajado en la caracterización de las condiciones de precipitación y humedad del suelo que desencadenan inestabilidades mediante el cálculo de umbrales empíricos, siguiendo para ello diversas metodologías. A pesar de la abundancia de trabajos, muchos resultados han tenido escasa difusión o permanecen sin publicar, lo que ha dificultado el análisis global de los avances obtenidos hasta la fecha. En este contexto, se considera de interés abordar una recopilación exhaustiva que ponga de manifiesto los

resultados alcanzados y permita, en fases posteriores, su análisis y comparación. Este artículo esboza por primera vez el estado del arte relativo a los umbrales de lluvia en la zona de estudio y compara 4 umbrales regionales, representativos de cada área estudiada.

Área de estudio

El presente trabajo se centra en las Comunidades Autónomas del País Vasco (provincias de Guipúzcoa y Vizcaya), Cantabria y el Principado de Asturias, en España, así como en los distritos portugueses de Viana do Castelo, Braga, Oporto, Aveiro, Vila Real y Viseu (Fig. 1). Se trata de un área caracterizada por un relieve abrupto y por unas condiciones climáticas relativamente homogéneas. La proximidad e influencia del océano

RESUMEN

Gran número de trabajos sobre umbrales de lluvia para el desencadenamiento de inestabilidades de ladera se ha desarrollado en áreas del norte de Portugal y España. Como resultado de una revisión, se han recopilado 103 umbrales. Más del 30% aún no han sido publicados. La comparación de cuatro umbrales regionales pone de manifiesto importantes diferencias ligadas al uso de múltiples metodologías para definir las condiciones críticas de lluvia.

Palabras clave: Inestabilidad de ladera, Lluvia, Umbral, N de Portugal, N de España.

Fecha de recepción: 01/02/2023

Fecha de revisión: 20/04/2023

Fecha de aceptación: 26/05/2023

da lugar a abundantes precipitaciones, alcanzando valores medios de 1000 mm/año que pueden elevarse por encima de los 2000 mm/año en algunas zonas de Galicia y del norte de Portugal. La precipitación presenta un máximo invernal (diciembre-febrero) y un mínimo durante el verano (julio-agosto). El número de días con precipitaciones mayores o iguales a 1 mm es de 100, lo que ilustra que los eventos de lluvia continua durante varias jornadas son frecuentes, contribuyendo a mantener la humedad del suelo en niveles altos durante periodos largos (García Couto *et al.*, 2011) (Fig. 1).

Estado del arte

Se han recopilado 38 trabajos que tratan esta temática y que contienen 103 umbrales de lluvia, de los cuales el 66% ha

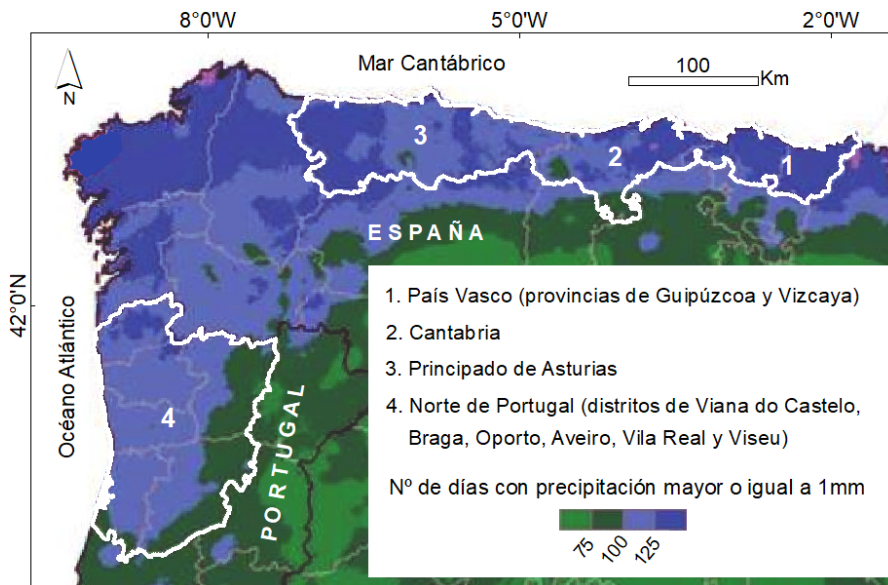


Fig. 1.- Número de días con precipitación ≥ 1 mm en el NO de la Península Ibérica (modificado de García Couto, 2011). Se indican las regiones que forman parte del área de estudio del presente trabajo. Ver figura en color en versión web.

Fig. 1.- Number of days with rainfall ≥ 1 mm in the NW of the Iberian Peninsula (modified from García Couto, 2011), showing the regions within the study area of the present work. See color figure on web.

sido presentado en medios científicos de amplia difusión, mientras que el restante 34% no ha sido publicado hasta la fecha. Dieciocho de ellos se han definido como umbrales descriptivos, que caracterizan las condiciones previas o simultáneas a la ocurrencia de un evento de inestabilidad individual o múltiple mediante el análisis de datos climáticos, pero sin un abordaje estadístico. Por otro lado, se han recopilado 85 umbrales expresados en forma de ecuación y resultantes de un análisis estadístico de las condiciones desencadenantes de una población de inestabilidades de ladera inventariadas en una determinada zona.

País Vasco

Se han inventariado 9 umbrales descriptivos centrados en eventos múltiples de inestabilidades registrados a escala local en varios municipios vizcaínos (Cendrero *et al.*, 1987), en las cuencas de Sollube y Mape-Vizcaya (Díaz *et al.*, 2012) y en la cuenca del río Deba-Guipúzcoa (Duque *et al.*, 1990; Remondo, 2001; Bonachea, 2006; Bonachea *et al.* 2012). En concreto, los eventos múltiples registrados en el municipio de Deba (Guipúzcoa) fueron objeto de análisis estadístico por parte de Rivas *et al.* (2022), obteniéndose 3 umbrales de tipo intensidad-duración (ID). Además, Bornaetxea *et al.* (2018) analizaron estadísticamente las condiciones desencadenantes de una pobla-

ción de inestabilidades registradas en la provincia guipuzcoana durante 10 años, definiendo 2 umbrales regionales de tipo precipitación acumulada-duración (ED).

Cantabria

Varios eventos múltiples de inestabilidades han sido objeto de estudio, obteniéndose 2 umbrales descriptivos para las cuencas del río Pas (González-Díez *et al.* 1999) y de los ríos Saja-Besaya (González-Díez *et al.* 2022). También se ha calculado un umbral descriptivo local para inestabilidades de ladera ligadas a procesos de tubificación (FODISPIL, 2005). A escala regional, San Millán (2015) calculó 4 umbrales estadísticos de tipo ID basados en un inventario recopilado durante un periodo de 9 años.

Principado de Asturias

Domínguez-Cuesta *et al.* (1999, 2012) calcularon los primeros umbrales descriptivos para caracterizar las condiciones desencadenantes de eventos múltiples de inestabilidades, tanto en la Cuenca Carbonífera Central como a escala regional. Posteriormente, Valenzuela *et al.* (2018) aplicaron una aproximación estadística a escala regional, calculando 16 umbrales de tipo ID que consideran la precipitación y la humedad del suelo. Además, Valenzuela (2017) y Valenzuela *et al.* (2019) utilizaron dos aproximacio-

nes estadísticas diferentes y un inventario recopilado durante 37 años para calcular 4 umbrales regionales, 8 umbrales temáticos considerando diversos factores (estacionalidad, tipo de ladera, tipo de inestabilidad y sustrato geológico afectado) y 18 umbrales locales, todos ellos de tipo ED.

Norte de Portugal

Los primeros umbrales descriptivos se desarrollaron en el marco de trabajos monográficos sobre grandes flujos de derrubios y movimientos complejos ocurridos en Cavez-Cabeceiras de Basto (Pedrosa and Marques, 1994), Covêlo do Gerês (Pedrosa *et al.*, 1995), Vila de Muros-Cinfães (Bateira, 2001) y Santa Marinha do Zêzere-Baião (Soares y Bateira, 2007). Los primeros abordajes estadísticos sistemáticos fueron llevados a cabo por Pereira *et al.* (2010, 2012) y Zêzere *et al.* (2015), utilizando un inventario de inestabilidades de 42 años para calcular 9 umbrales ID, ED y de lluvia antecedente (10 días) vs. lluvia del evento (72 horas) para las áreas de Casal Soeiro y Vila Real. En 2021, Vaz utilizó un inventario de inestabilidades de 146 años para calcular 13 umbrales para la zona de Oporto, 4 umbrales para el área de Santa Marta de Penaguião y otros 4 umbrales a escala regional, todos ellos de tipo ED.

Características de los umbrales

El cálculo de los 18 umbrales descriptivos se ha basado en el análisis de series de datos de precipitación diaria (78%) y horaria (22%), predominando los valores de lluvia acumulada en 24 horas o en un periodo de duración variable previo al evento; en 2 casos se aportan también datos de intensidad horaria. Cuatro de los umbrales describen las condiciones desencadenantes de movimientos en masa o flujos de derrubios concretos, mientras que el resto hacen referencia a eventos múltiples, aunque no en todos los casos se dispone de un inventario de inestabilidades desencadenadas durante los mismos.

Los 85 umbrales estadísticos han sido calculados en base a inventarios de inestabilidades de carácter regional (45%) o local (55%) con poblaciones de entre 26 y 688 datos, recopiladas en momentos concretos o a lo largo de periodos muy variables que oscilan entre 2 meses y 146

años. La mayoría de los inventarios se nutren de información procedente de la prensa, aunque otras fuentes como informes técnicos, testimonios de la población, fotografía aérea o registros de Protección Civil también han sido utilizadas.

La mayoría de los umbrales estadísticos se han calculado utilizando series de precipitación diarias. El 46% se basan en datos provenientes de estaciones meteorológicas representativas de un área, bien por su ubicación o por la calidad de sus registros; el 33% consideran la estación más cercana con datos disponibles y el 21% restante consideran el dato aportado por un ráster en el mismo punto de ocurrencia de cada inestabilidad. Cabe destacar la gran diversidad de criterios utilizados para definir la duración del evento de precipitación crítico. En concreto, 42 umbrales definen dicho evento como el periodo de lluvia antecedente, acumulada en intervalos variables de 1 a 90 días, con el mayor periodo de retorno, siempre igual o superior a 3 años. Otros 18 umbrales consideran únicamente la duración del evento de lluvia desencadenante, que se delimita con respecto al evento anterior considerando un determinado número de días sin precipitación, que suele ser diferente en función del periodo estacional. Así mismo, 16 umbrales definen dicho periodo crítico como el intervalo previo al desencadenamiento de la inestabilidad en el que el suelo presenta porcentajes de humedad cercanos a la saturación. Otras aproximaciones menos generalizadas utilizan periodos de días fijos (6 umbrales) o lo definen como el número de días previos con una precipitación mínima determinada (3 umbrales).

Una vez determinada la duración del evento crítico, las condiciones desencadenantes de cada inestabilidad se han expresado como pares de datos precipitación acumulada-duración (55 umbrales), intensidad-duración (27 umbrales) o como la combinación de la lluvia acumulada en 10 y 3 días antecedentes (3 umbrales).

Finalmente, las ecuaciones que definen 37 umbrales han sido calculadas aplicando un método probabilístico frecuentista, mientras que, en los 48 casos restantes, estas se han calculado por regresión lineal o potencial; en algunos de estos últimos, la probabilidad es estimada considerando la relación entre los eventos desencadenantes y no desencadenantes situados por encima del umbral.

Región	Autores	N.º inestab.	Ecuación	Prob.
País Vasco	Bornaetxea et al. (2018)	298	$E = 4,4 \pm 0,7 \cdot D^{0,47 \pm 0,04}$	5%
Cantabria	San Millán (2015)	97	$I = 0,4846 \cdot D^{-0,539}$	Mínima
Asturias	Valenzuela (2017)	463	$E = 1,19 \cdot D^{0,55}$	5%
N Portugal	Vaz (2021)	326	$E = 0,5 \cdot D^{0,9}$	5%

Tabla I.- Umbrales regionales para la ocurrencia de inestabilidades en el área de estudio.
Table I.- Regional thresholds for the triggering of landslides within the study area.

Comparación de los umbrales

Como queda patente, los umbrales anteriormente descritos han sido calculados con base en diferentes datos de partida y siguiendo criterios metodológicos muy diversos, lo que supone un inconveniente a la hora de compararlos.

Con carácter preliminar, y dado el elevado número de umbrales compilados, se han seleccionado cuatro umbrales estadísticos representativos de las zonas de estudio con el fin de abordar su comparación (Tabla I). Los cuatro representan condiciones de lluvia mínimas para la ocurrencia de inestabilidades, se han calculado a escala regional, usando inventarios de noticias de prensa que incluyen un número representativo de inestabilidades (entre 97 y 463) y considerando únicamente el evento de precipitación desencadenante. Sin embargo, existen relevantes diferencias entre ellos. En primer lugar, el umbral del País Vasco utiliza registros de precipitación a escala horaria, mientras que el resto utilizan datos diarios. Además, el umbral calculado para Cantabria

es de tipo ID, mientras que el resto son de tipo ED. Finalmente, se han empleado diferentes criterios para definir la duración del periodo crítico de lluvia. Dichas diferencias desaconsejan una comparación directa de las cuatro ecuaciones. Por ello, se ha optado por la representación de los datos de duración de los eventos de lluvia desencadenante (en horas) vs. los valores de precipitación acumulada durante los mismos (en mm) en un diagrama de dispersión (Fig. 2); el ajuste lineal de cada población de datos permite resaltar las semejanzas y diferencias existentes.

En un análisis a escala regional, como el presente, la diversidad de condiciones geológicas y ambientales que han condicionado cada inestabilidad particular hace que la influencia de estos factores en la definición de las condiciones desencadenantes quede algo enmascarada. A esto pueden también contribuir las particularidades metodológicas empleadas por cada autor; este trabajo centra el análisis en este segundo aspecto.

Los periodos de precipitación desencadenante son más cortos en el País Vas-

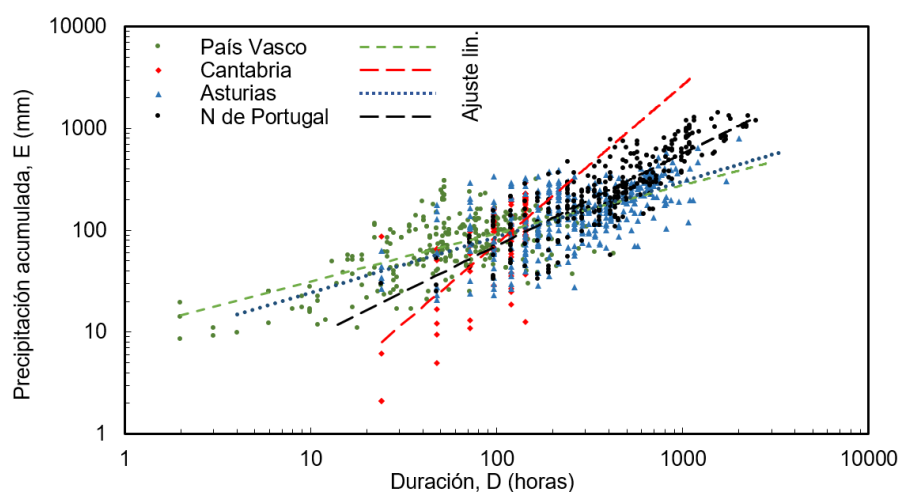


Fig. 2.- Condiciones de precipitación acumulada-duración utilizadas en el cálculo de los umbrales regionales del País Vasco, Cantabria, Asturias y norte de Portugal. Ver figura en color en versión web.

Fig. 2.- Accumulated precipitation-duration conditions used for the calculation of the regional thresholds for the Basque Country, Cantabria, Asturias and the north of Portugal. See color figure on web.

co que en el resto de áreas. Este hecho podría relacionarse con el uso de datos de precipitación horarios, que permitirían un mayor detalle a la hora de definir los periodos críticos en el área vasca. Otra fuente de incertidumbre podría deberse a los diferentes criterios utilizados para delimitar los periodos de lluvia críticos, incluyendo: (i) el algoritmo utilizado por Bornaetxea et al. (2018), los periodos con valores máximos de humedad del suelo considerados por Valenzuela (2017), el número de días con precipitación < 1 mm utilizado por Vaz (2021) o el periodo fijo de 6 días considerado por San Millán (2015). Por otro lado, los menores valores de precipitación acumulada se observan en Cantabria, lo que puede deberse a que todas las inestabilidades analizadas en este caso se han producido en taludes artificiales, más inestables, pero también a la menor duración del periodo crítico considerado. Las líneas de ajuste muestran una mayor semejanza en las condiciones desencadenantes de Asturias y País Vasco, seguidas por las del norte de Portugal. La mayor pendiente de la línea de tendencia correspondiente a Cantabria puede venir condicionada por el menor número de eventos de inestabilidad analizados, la corta duración de los periodos de lluvia definidos y el hecho de que se trate de taludes artificiales.

A pesar de las diferencias señaladas, las cuatro poblaciones de datos muestran una tendencia general que podría sugerir una mayor importancia relativa de la lluvia acumulada frente a la duración para el desencadenamiento de inestabilidades en el área de estudio.

Conclusiones preliminares

La exhaustiva revisión bibliográfica ha puesto de manifiesto por primera vez la existencia de numerosa información relativa a las condiciones de lluvia desencadenantes de inestabilidades de ladera en el NO de la Península Ibérica. Sin embargo, la variedad de metodologías empleadas en su cálculo supone un inconveniente a la hora de comparar los resultados obtenidos a lo largo del área de estudio. Uno de los aspectos más limitantes consiste en la gran diferencia en la duración de los eventos de lluvia considerados, dependiendo de la metodología seguida por cada investigador. De este modo, el abordaje de las siguientes fases del estudio requiere una reflexión

profunda sobre el significado de los resultados recopilados hasta el momento actual y la búsqueda de criterios que permitan su análisis y comparación.

Referencias

- Bateira, C. (2001). *Movimentos de vertente no NW de Portugal, Suscetibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica*. Tesis Doctoral, Univ. de Porto, 469 p.
- Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. Tesis Doctoral, Univ. de Cantabria, 356 p.
- Bonachea, J., Remondo, J., Bruschi, V.M., Díaz de Terán, J.R., González-Díez, A. y Cendrero, A. (2012). En: *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, 171-174.
- Bornaetxea, T., Ormaetxea, O., Antigüedad, I. y Melillo, M. (2018). En: *Metodología de Análise de Riscos através de Estudos de Casos* (L. Luorenço y A. Vieira, Coords.). Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 201-222.
- Cendrero, A., Díaz de Terán, J.R., Fernández, O., Garrote, R., González Lastra, J.R., Inoriza, I., Lüttig, G., Otamendi, J., Pérez, M., Serrano, A. y "Grupo Ikerlana". (1987). En: *Geology for Environmental planning. Special publication* (F.C. Wof y "Grupo Ikerlana", Eds.). Geological Survey of Norway 2, 25-41.
- Díaz, E., Sáenz de Olazagoitia, A., Ormaetxea, O. y Ibisate, A. (2012). *Cuaternario y Geomorfología*, 26, (1-2) 171-190.
- Domínguez-Cuesta, M.J., Francos Garrote, L. y Jiménez-Sánchez, M. (2012). En: *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, 61-64.
- Domínguez-Cuesta, M.J., Jiménez Sánchez, M. y Rodríguez García, A. (1999). *Geomorphology*, 30 (1-2), 125-132. <https://doi.org/bskbdv>
- Duque, A., Echeverría, G., Fernández, E., Kerejeta, A., Cendrero, A. y Tamés, P. (1990). En: *Environmental Geology and Natural Hazards in the Andean Region* (M. Hermelin, Ed.), AGID Report nº 13, 189-206.
- FODISPIL. (2005). *Aplicación de la fotogrametría digital al análisis de la susceptibilidad y peligrosidad de los procesos de inestabilidad de laderas*. Informe de monitorización, Segundo año.
- García Couto, M.A. (Ed.). (2011). *Iberian climate atlas*. Agencia Estatal de Meteorología (España) e Instituto de Meteorología (Portugal), Madrid, 79 p.
- González Díez, A., Barreda Argüeso, J.A., Valenzuela, P., Del Jesús Clemente, M.D. y Díez Barrio M.A. 2022. En: *X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 1-12.
- González Díez, A., Remondo, J., Díaz de Terán, J.R. y Cendrero, A. (1999). *Geomorphology*, 30 (1-2), 95-133.
- Pedrosa, A. y Marques, B.S. (1994). *Territorium*, 1, 23-34.
- Pedrosa, A., Bateira, C. y Soares, L. (1995). *Territorium*, 2, 21-77.
- Pereira, S., Zêzere, J.L. y Bateira, C. (2010). En: *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. II Seminário Ibero-americano de Geografia Física*, 1-15.
- Pereira, S. y Zêzere, J.L. (2012). En: *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*, 109-112.
- Remondo, J. (2001). *Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial*. Tesis Doctoral, Univ. de Cantabria, 404 p.
- Rivas, V., Remondo, J., Bonachea, J. y Sánchez-Espeso, J. (2022). *Physical Geography*, 43, 419-439. <https://doi.org/jtwh>
- San Millán, E. (2015). *Influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de los movimientos de ladera en Cantabria*. Trabajo Fin de Master, Univ. de Cantabria, 50 p.
- Soares, L. y Bateira, C. (2007). *Revista da Faculdade de Letras-Geografia-Universidade do Porto*, II Série, 1, 87-126.
- Valenzuela, P. (2017). *Landslide triggering in Asturias (NW Spain): rainfall and soil moisture conditions modelling*. Tesis Doctoral, Univ. de Oviedo, 179 p.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M.J., Mora García, M.A. y Jiménez-Sánchez, M. (2018). *Landslides*, 15, 273-282. <https://doi.org/gczz4b>
- Valenzuela, P., Zêzere, J.L., Domínguez-Cuesta, M.J. y Mora García, M.A. (2019). *Landslides*, 16, 1285-1300. <https://doi.org/jtwm>
- Vaz, T. (2021). *Movimentos de vertente desencadeados pela precipitação em Portugal continental*. Tesis Doctoral, Univ. de Lisboa, 264 p.
- Zêzere, J. L., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S.C., Marques, R. y García, R.A.C. (2015). *Environmental Earth Sciences*, 73(6), 2917-2936. <https://doi.org/f64h2m>