

ANÁLISIS DE LAS LLUVIAS DESENCADENANTES DE DESLIZAMIENTOS EN EL NORTE DE LA CORDILLERA PRELITORAL CATALANA

R. Almirall (1), J. Marturià (2), F. Parera (2) y C. Abancó (1)

(1) Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada
Facultat de Ciències de la Terra
Universitat de Barcelona
almirall.raquel@gmail.com
claudia.abanco@ub.edu

(2) Àrea d'Enginyeria i Prevenció Riscos Geològics
Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
jordi.marturia@icgc.cat
ferran.parera@icgc.cat

RESUMEN

En este estudio se ha utilizado una base de datos que contiene 95 deslizamientos documentados en una zona de estudio de 3.558 km², situada entre la zona norte de la Cordillera Prelitoral y la zona nororiental de la Depresión Central de Cataluña, entre los años 2010-2020. Se han identificado de forma automática los episodios de lluvia responsables de los deslizamientos de tierra y se han caracterizado las condiciones de precipitación que son responsables de los deslizamientos de tierra mediante la comparación con lluvias no desencadenantes de deslizamientos. Se ha aplicado un método de detección automática de lluvias desencadenantes, el algoritmo CTRL-T (Melillo et al., 2015; Melillo et al., 2018), ampliado con tres nuevos algoritmos para identificar los episodios de lluvia y determinar la probabilidad de que estos hayan desencadenado ciertos deslizamientos. Finalmente, se han propuesto dos umbrales de precipitación, incluyendo precipitación antecedente ($E_{max24} = -0.42 \cdot D + 63$) y precipitación desencadenante ($IP = -0.08 \cdot D + 12$).

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos pueden ser generados por fenómenos naturales, antrópicos o una combinación de ambos. La lluvia es uno de los factores desencadenantes más comunes en deslizamientos de tierra (p. ej. Corominas 2006). Una de las herramientas más utilizadas para su predicción son los umbrales de precipitación, tanto a escala global como regional (Guzzetti et al., 2008). La definición de estos es de especial interés para posteriormente crear sistemas de alerta. Para definir estos umbrales es importante entender las características de las precipitaciones con potencial desencadenante. El umbral empírico está basado en el análisis de las condiciones de deslizamientos anteriores (Ramos-Cañón et al., 2015). Obtener los datos de precipitación en el punto ocurrencia del deslizamiento de tierra, es a menudo un trabajo complejo. Por esta limitación, una práctica habitual es el uso de los pluviómetros más cercanos, que pueden estar situados a kilómetros de la zona de interés, aunque en algunos casos también se utilizan productos de lluvia derivada de satélite (Brunetti et al., 2021) o radar (Cremonini & Tiranti, 2018).

2. OBJETIVO

Los principales objetivos de esta investigación son:

- Identificar los episodios de lluvia que han desencadenado deslizamientos de tierras en la zona norte de la Cordillera Prelitoral y la zona nororiental de la Depresión Central de Cataluña, entre los años 2010 y 2020.
- Caracterizar las condiciones de precipitación que son responsables de los deslizamientos.
- Detectar los parámetros de precipitación más influyentes.
- Proponer uno o varios umbrales de precipitación desencadenantes de deslizamientos de tierra.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Marco geográfico

Este estudio se centra en cinco comarcas del noreste de Cataluña a partir del registro de los datos de precipitaciones y de deslizamientos obtenidos (Figura 1). Las comarcas donde se ha desarrollado la investigación son la Selva, Osona, Vallès Oriental y Vallès Occidental, con una extensión total de 3.558,3 km². Para la selección de estas comarcas, se ha realizado previamente un análisis de los datos de deslizamientos de tierra que ofrece la base de datos REIGCAT del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).

El área de estudio está ubicada principalmente en el sistema montañoso que forma la Cordillera Prelitoral Norte. Al estar definida por los límites comarcals, la zona incluye también partes del este de la Depresión Central y del sud de las Sierras Transversales y del Pre-Pirineo. Las zonas con presencia de suelos cohesivos homogéneos, los macizos rocosos fracturados y las litologías como las arcillas, arenas y gravas, son áreas problemáticas a que se produzcan deslizamientos de tierra, concretamente deslizamientos y flujos.

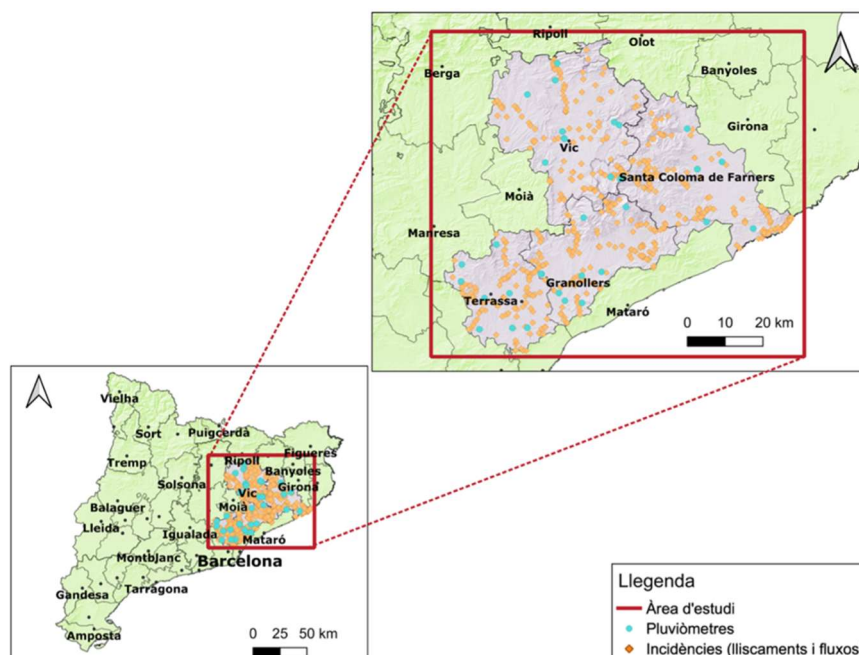


Figura 1. Mapa que muestra la situación geográfica del área de estudio (comarcas de color lila). Los puntos azules representan la localización de los 34 pluviómetros que se han utilizado en el estudio. Los rombos naranjas representan la localización de las incidencias (deslizamientos y flujos).

3.2. Clima de la zona

El clima de Cataluña es propiamente mediterráneo y presenta dos estaciones diferenciadas. La primera es fría y es presente en los meses más fríos del año. La segunda es cálida y tropical, predominando en verano. Por este hecho, el trimestre estival es seco y el resto del año es moderadamente húmedo. Las temperaturas medianas anuales en el área de estudio son de 16°C a 0°C. Por otro lado, la estación más lluviosa en el área de estudio es en otoño. En la zona de estudio las precipitaciones oscilan entre los 1.200 mm y 600 mm (Servei Meteorològic de Catalunya, 2020). La elevación del terreno oscila entre 1750 m y 0 m, siendo el macizo más alto el Montseny de 1706 m (Atles Climàtic Digital de Catalunya, 2004).

La zona de estudio seleccionada tiene un interés especial porqué, entre el domingo 19 y el jueves 23 de enero del año 2020, tuvo lugar el temporal Glòria que afectó a todo el territorio catalán. Desde el punto geológico, los procesos geomorfológicos que ocasionó fueron significativos en extensión y magnitud, y como consecuencias sus afectaciones (ICGC, 2020). Según el SMC, las estaciones automáticas XEMA y las manuales de la Xarxa d'Observatoris Meteorològics (XOM) registraron precipitaciones acumuladas en la zona de estudio de entre 100 mm y 430 mm en estas fechas. Se documentaron 352 movimientos de ladera distribuidos por toda Cataluña, con zonas de especial concentración como los alrededores del Montseny.

4. METODOLOGIA

La metodología que se ha seguido a lo largo de la investigación se ilustra de forma resumida en la Figura 2. Todos los algoritmos presentados están implementados en el lenguaje de programación R. Los datos de entrada están formados por: i) las estaciones meteorológicas; ii) los pluviómetros; iii) la base de datos REIGCAT.

En primer lugar, se ejecuta el código **Transformar** para transformar los archivos que requiere la herramienta CTRL-T. En segundo lugar, se ejecuta el algoritmo **CTRL-T** (Melillo et al., 2018). En tercer lugar, se ejecuta el código **Unificar episodios**, para que cada episodio esté representado una única vez por las características conjuntas de la lluvia y, por último, se ejecuta el código **Postproces** para visualizar los resultados en forma de gráficos y hacer una validación.

Para definir cuáles son los parámetros más significativos para proponer los umbrales de lluvia, se han generado dos tipos de análisis: 1) distribución de cada parámetro individualmente, separando lluvias desencadenantes de deslizamientos y no desencadenantes; y 2) correlaciones entre parejas de parámetros, de nuevo distinguiendo lluvias desencadenantes y no desencadenantes de deslizamientos. Para la definición de los umbrales de lluvia en la evaluación del peligro de los deslizamientos, se han utilizado las variables más significativas entre los episodios desencadenantes y no desencadenantes de deslizamientos. Los umbrales se han definido de forma visual y se han propuesto dos umbrales mínimos, que están definidos por una función lineal que se representa analíticamente. Para evaluar la precisión de los umbrales se ha separado la base de datos en dos submuestras. Una muestra del 85% de los datos elegidos de forma aleatoria (incluyendo lluvias desencadenantes y no desencadenantes), que se han utilizado para determinar los umbrales (Mlin) y una submuestra del 15% restante, utilizada para testarlos (Mtest).

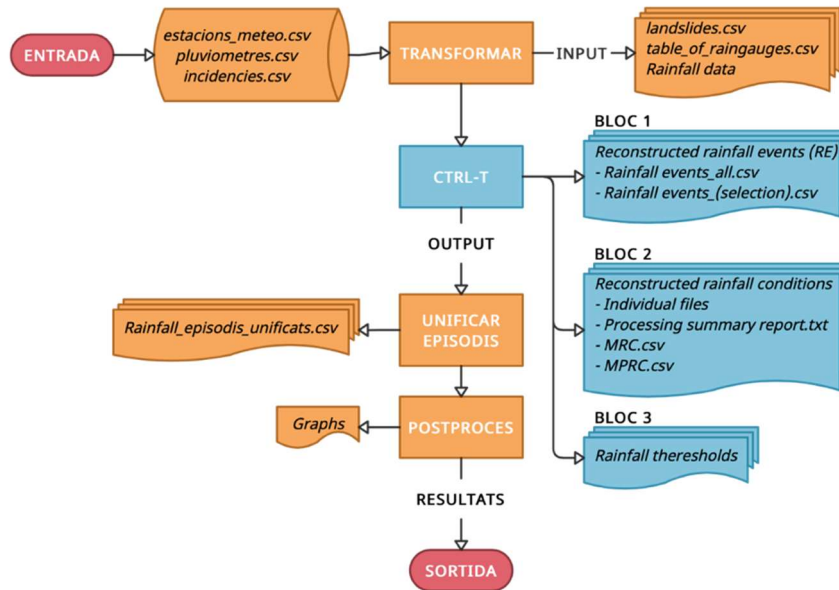


Figura 2. Marco lógico de la investigación. El color azul representa las acciones ya implementadas en la literatura existente y el color naranja representa las acciones adicionales realizadas en el estudio.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS

Los datos más antiguos que se han obtenido son del año 2009 hasta la actualidad. Teniendo en cuenta esta limitación y que en el año 2009 no hay ningún deslizamiento registrado, se ha concretado que el período analizado sea desde el año 2010 hasta el 2020. El Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) tiene un total de 233 estaciones de la XEMA que registran precipitaciones. El total de pluviómetros que se utilizan en la zona de estudio son 34.

La tipología de movimientos de tierra que se ha elegido para el estudio, son los deslizamientos y los flujos. En total, se han reconstruido 95 deslizamientos que se han desencadenado por la lluvia. Los datos de los deslizamientos se han obtenido del REIGCAT, una base de datos del ICGC de las incidencias provocadas por movimientos de tierra.

Área de estudio	Selva, Osona, Vallès Oriental Vallès Occidental
Autonomía	Cataluña
Estado	España
Extensión del área de estudio (km²)	3.558,3
Escala	Regional
Período del análisis	Enero 2010 - Diciembre 2020
Validación	15% de los datos
Tipos de deslizamientos	Deslizamientos y flujos
Número de incidencias	95
Número de episodios de lluvia	600
Escala temporal de la lluvia	1h
Fuente de los datos de precipitaciones	Pluviómetros de la XEMA
Número de pluviómetros	34

Tabla 1. Tabla resumen de las características generales del caso de estudio.

6. RESULTADOS

6.1. Análisis de las características de las lluvias

Las lluvias desencadenantes de deslizamientos tienen típicamente una duración media de 50-75h. Las lluvias que no han desencadenado deslizamientos son principalmente más cortas e inferiores a las 50h, aunque en algunos casos ha habido episodios de lluvia de hasta 3 días de duración que no han desencadenado deslizamientos (Figura 3a).

En referencia a la acumulación total de precipitación, las lluvias desencadenantes de deslizamientos tienen valores diversos, con bastantes episodios entre 300 y 425 mm. En cambio, las lluvias no desencadenantes tienen principalmente una acumulación inferior a los 100 mm (Figura 3b).

La precipitación acumulada máxima en 24h escoge únicamente el tramo de 24h más intenso del episodio. Teniendo en cuenta este parámetro, los valores de las lluvias desencadenantes son un poco menos dispersos que en la acumulación total, con un pico en alrededor de los 200 mm. La mayoría de las lluvias no desencadenantes tienen valores inferiores a los 75 mm (Figura 3c).

La intensidad media de las lluvias desencadenantes es mayoritariamente entre 2 y 10 mm/h, para las lluvias no desencadenantes la intensidad es principalmente inferior a 5 mm/h, aunque en algunos casos ha habido episodios de lluvias entre los 10-30 mm/h (Figura 3d).

La intensidad pico de las lluvias desencadenantes es típicamente alrededor de los 20 mm/h. En las lluvias no desencadenantes, tienen una intensidad pico inferior, pero con algún caso puntual entre los 70-80 mm/h (Figura 3e).

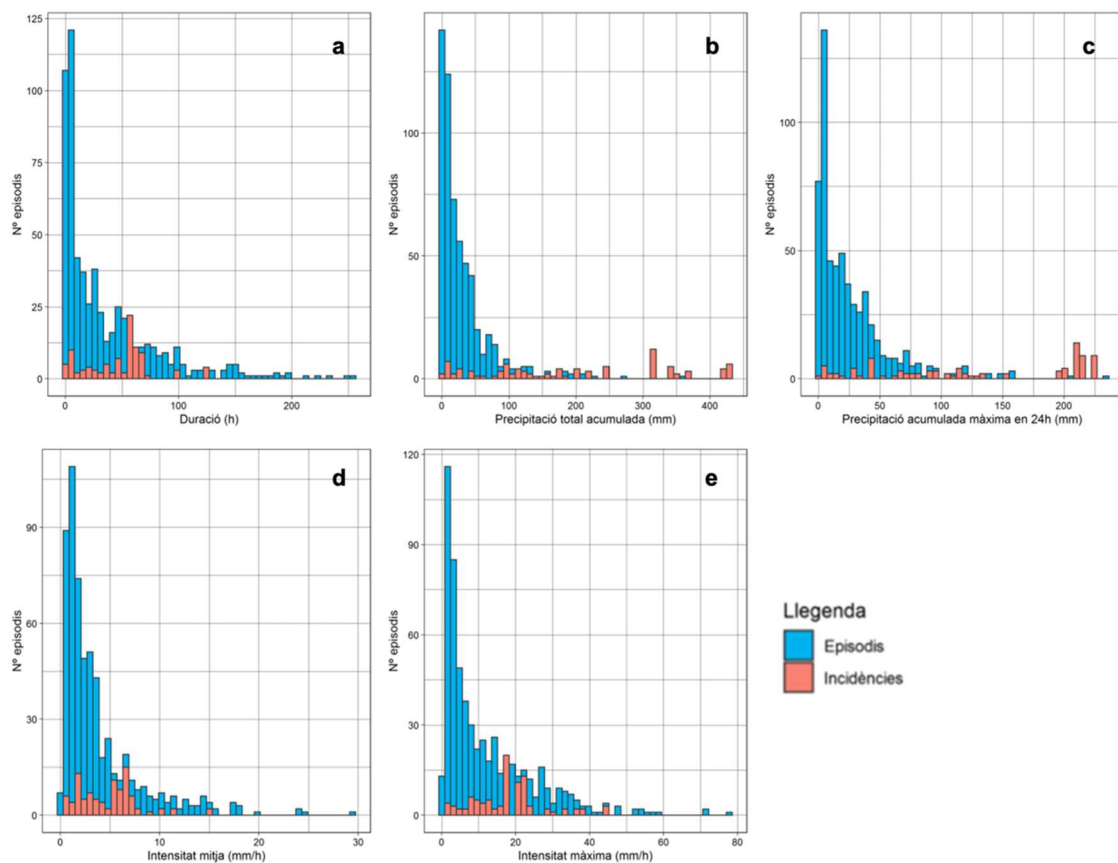


Figura 3. Histogramas de a) duración (h). b) precipitación total acumulada (mm). c) precipitación acumulada máxima en 24h (mm). d) intensidad media (mm/h). e) intensidad máxima (mm/h), de los episodios de las lluvias desencadenantes y no desencadenantes de los deslizamientos de la lluvia antecedente. Fuente de datos: XEMA e ICGC.

6.2. Correlaciones entre variables de las lluvias

Mediante el análisis de pares de parámetros se ha determinado cuales son los parámetros más relevantes para definir los umbrales. En los gráficos cada episodio se representa como un punto según sus valores.

Se puede observar un conjunto de teóricos episodios desencadenantes de deslizamientos con unos valores cercanos al origen de coordenadas (0,0), es decir, de duración y precipitación total y acumulada en 24h muy próximas a 0. En estos casos se ha considerado que los deslizamientos se han formado por otros procesos independientes de la lluvia. Es decir, un factor previo ha llevado al fenómeno a una situación límite, y posteriormente una lluvia mínima ha terminado de desencadenar los deslizamientos.

Con un análisis visual tanto de los histogramas (Figura 3) como de los gráficos de correlación entre variables (Figura 4), se observa que los parámetros que mejor permiten distinguir los episodios desencadenantes y los no desencadenantes de deslizamientos, son los gráficos que están representados por la acumulación máxima en 24h (E_{max24}) y la intensidad máxima (IP), en relación con la duración (D). En estos casos, se puede determinar de forma visual una zona de predominio de lluvias desencadenantes y una zona de lluvias no desencadenantes.

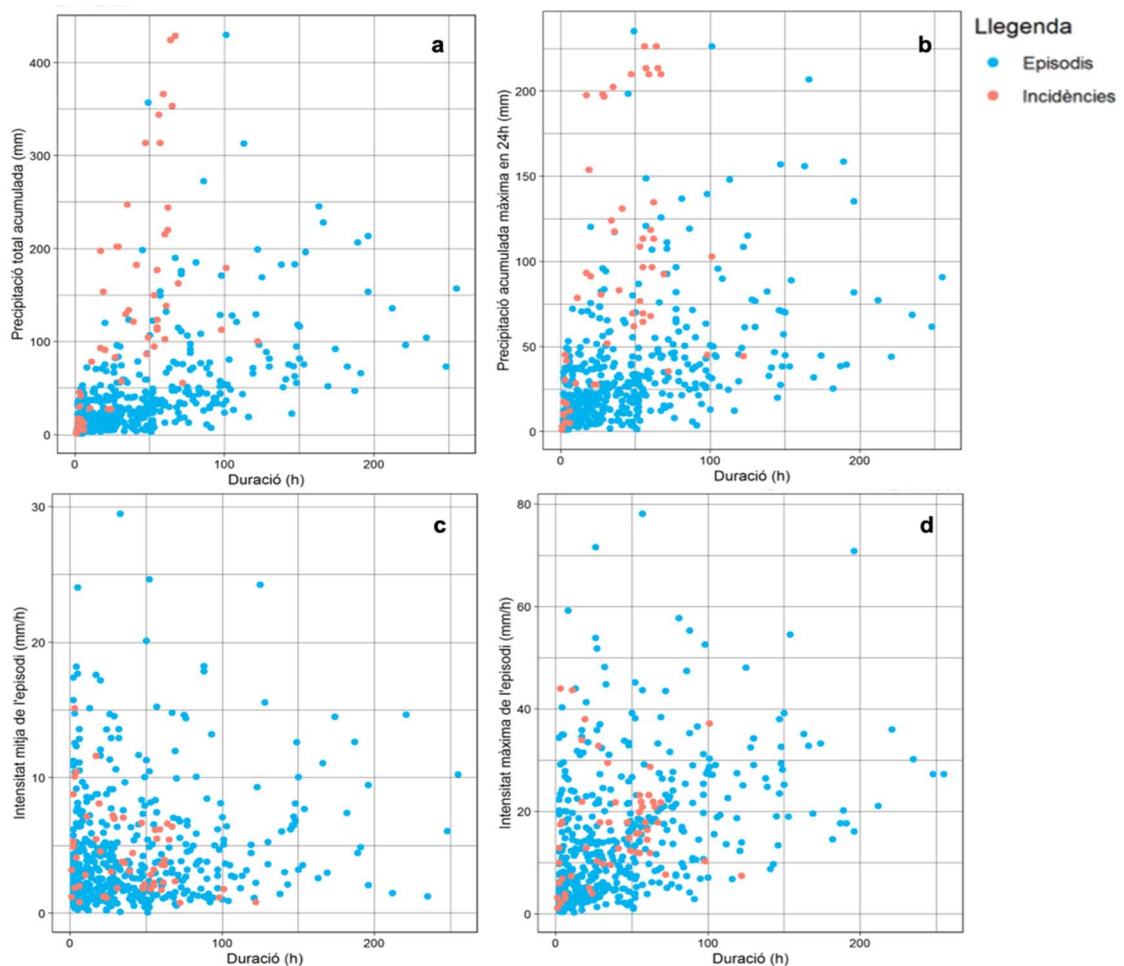


Figura 4. Distribución de los episodios de lluvia desencadenantes y no desencadenantes de deslizamientos en relación con la duración (h) y: a) la precipitación total acumulada (mm). b) la precipitación acumulada máxima en 24h (mm). c) la intensidad media del episodio (mm/h). d) la intensidad pico del episodio (mm/h). Fuente de datos: XEMA e ICGC.

6.3. Propuesta de umbrales de lluvias desencadenantes de deslizamientos

Para definir los umbrales en la evaluación del peligro de los deslizamientos, se utilizan las variables que se han valorado como las más significativas para discernir entre los episodios desencadenantes y no desencadenantes de deslizamientos (E_{max24} e IP). Este es el método estándar del análisis del peligro de deslizamientos, donde cada episodio está representado por un único punto en los diagramas E_{max24}-D e IP-D.

Para la definición de los episodios se han establecido dos criterios. El primero incluye la lluvia antecedente y la no desencadenante, donde los episodios están limitados por períodos secos de 48h o superiores. Melillo et al., (2015) utiliza este valor para los deslizamientos. El segundo criterio selecciona únicamente la lluvia desencadenante y los episodios están limitados por períodos secos a partir de una hora. Abancó et al., (2016) utilizan este valor para los *debris flows* en el Pirineo, Gaál et al., (2014) y Badoux et al., (2012) 2-3h para los Alpes Suizos.

Se han propuesto dos umbrales mínimos (Figura 5) según la lluvia antecedente (P=48h) y la lluvia desencadenante (P=1h), que están definidos por una función lineal que se representa analíticamente con las siguientes rectas (Tabla 2). Los umbrales se han definido de forma visual.

	Lluvia antecedente (P=48h)	Lluvia desencadenante (P=1h)
Ecuación del umbral	$E_{max24} = -0,42 \cdot D + 63$ (1)	$IP = -0,08 \cdot D + 12$ (2)

Tabla 2. Tabla que muestra la función de la recta del umbral E_{max24}-D (lluvia antecedente) y del umbral IP-D (lluvia desencadenante).

En la Figura 5, se representan en un diagrama E_{max24}-D todos los episodios de lluvia que el código ha detectado siguiendo la condición (P=48h) que incluiría la lluvia antecedente. La gráfica muestra que por encima del umbral ocurren un 80% de los deslizamientos (65 incidencias), desencadenadas por un 22% de los episodios de la lluvia antecedente (133 episodios). En cambio, por debajo del umbral se encuentran la gran mayoría de los episodios de la lluvia antecedente, el 78% (466 episodios) y se dejarían de detectar solo un 20% de los deslizamientos (16 incidencias).

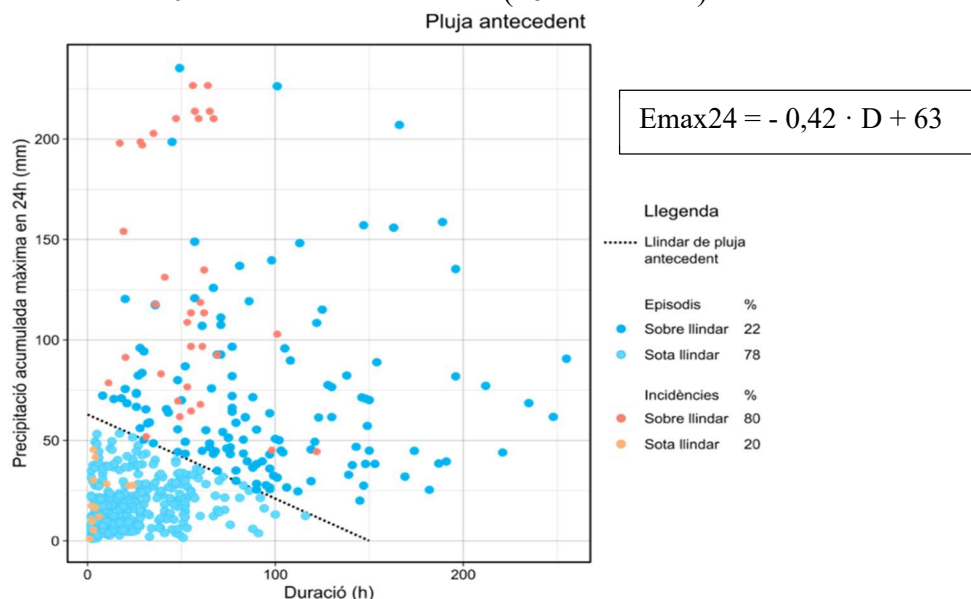


Figura 5. Gráfico que relaciona la precipitación máxima acumulada en 24h (mm) y la duración (h). Se representa el umbral mínimo propuesto según la lluvia antecedente (P=48h). Datos Mllin. Fuente de datos: XEMA e ICGC.

En la Figura 6 se representan en un diagrama IP-D los episodios de lluvia que el código ha detectado siguiendo la condición (P=1h) que incluiría la lluvia desencadenante. El gráfico muestra que por encima del umbral ocurren un 65% de los deslizamientos (53 incidencias), desencadenadas por solo un 23% de los episodios de la lluvia desencadenante (263 episodios). En cambio, por debajo del umbral se encuentran la gran mayoría de los episodios de la lluvia desencadenante, el 77% (336 episodios) y se dejarían de detectar un 35% de los deslizamientos (28 incidencias).

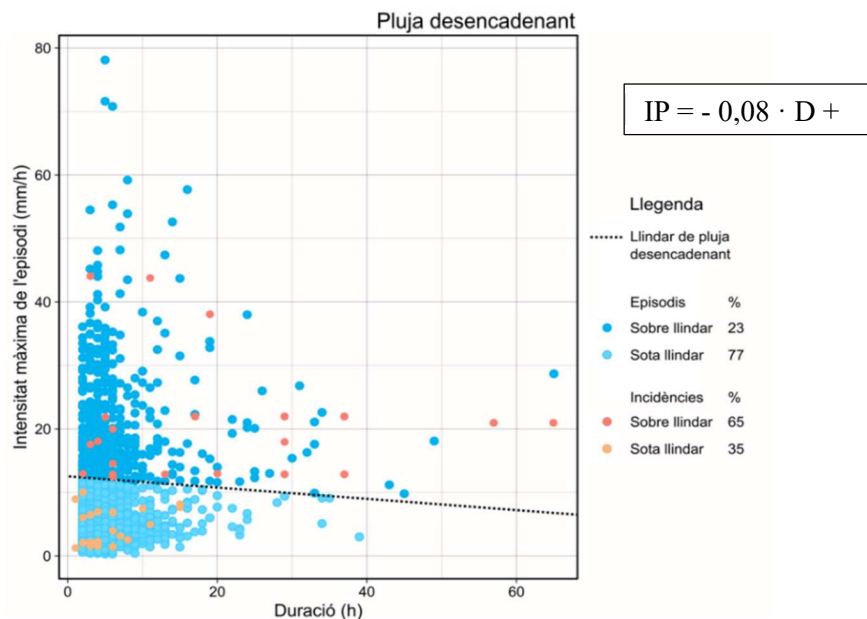


Figura 6. Gráfico que relaciona la intensidad máxima del episodio (mm/h) y la duración (h). Se representa el umbral mínimo propuesto según la lluvia antecedente (P=48h). Datos Mllin. Fuente de datos: XEMA e ICGC.

En la Figura 7 se representa el umbral en el diagrama Emax24-D, con la validación del 15% de los datos. Este gráfico muestra que por encima del umbral ocurren el 69% de los deslizamientos (9 incidencias), desencadenadas por el 27% de los episodios (24 episodios) y por debajo del umbral, ocurren el 31% de los deslizamientos (4 incidencias), desencadenadas por el 73% de los episodios (66 episodios). En la Figura 8 se representa el umbral en el diagrama IP-D, con la comprobación del 15% de los datos. Este gráfico muestra que por encima del umbral ocurren el 62% de los deslizamientos (8 incidencias), desencadenadas por el 22% de los episodios (59 episodios) y por debajo del umbral, ocurren el 38% de los deslizamientos (5 incidencias), desencadenadas por el 78% de los episodios (211 episodios).

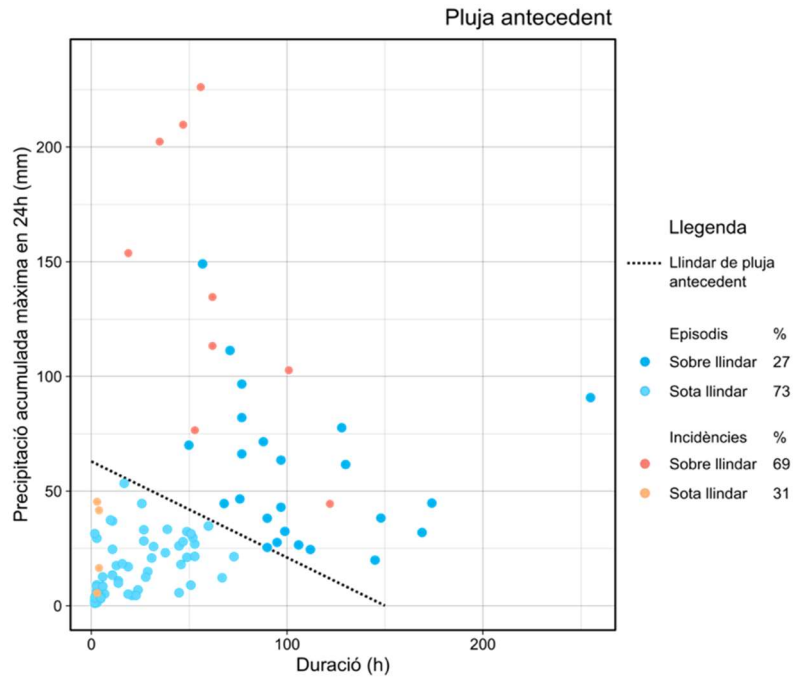


Figura 7. Gráfico que relaciona la precipitació acumulada en 24h (mm) y la duració (h). Se representa el umbral mínimo propuesto, según la lluvia antecedente (P=48h) con la validación del 15%. Datos Mtest. Fuente de datos: XEMA e ICGC.

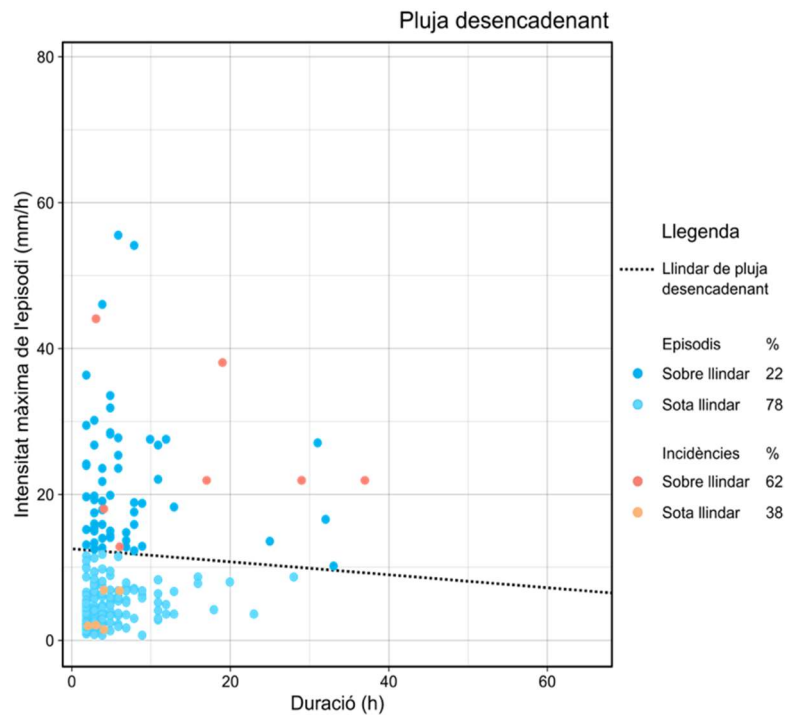


Figura 8. Gráfico que relaciona la intensidad máxima del episodio (mm/h) y la duración (h). Se representa el umbral mínimo propuesto según la lluvia desencadenante (P=1h) con la validación del 15%. Datos Mtest. Fuente de datos: XEMA e ICGC.

7. DISCUSIÓN

La definición de los umbrales de lluvia depende de diferentes variables que son características en cada área de estudio. En la literatura existente, no hay un estándar establecido para la definición de los umbrales de lluvia. Como consecuencia, cada autor define los episodios de lluvia según su propio criterio, teniendo en cuenta el clima de la zona.

En este estudio, se han propuesto dos umbrales de lluvia, uno para la lluvia antecedente y el otro para la lluvia desencadenante. Las variables más significativas para correlacionar los episodios de lluvia y los deslizamientos de tierra son la acumulación máxima en 24h (E_{max24}) y la intensidad máxima alcanzada en la hora pico del episodio (IP). En la literatura existente, normalmente las variables más comunes para la representación de los umbrales de lluvia son la acumulación total y la intensidad media. El resultado de la variable de la intensidad pico (IP), es similar a Cannon et al., (2008) que también utiliza la intensidad pico, mientras que autores como Brunetti et al., (2010) y Abancó et al., (2016), utilizan la intensidad media. La variable de la acumulación máxima en 24h (E_{max24}) está influenciada por la definición de los episodios de la lluvia y cada estudio define estos episodios según su criterio. Peruccacci et al., (2012), define un episodio de lluvia continuo para períodos secos de 48h i 96h (en la estación seca y húmeda, respectivamente).

Las variables elegidas son coherentes y muestran muy bien los resultados. Además, estas variables son interesantes porque no están influenciadas por la duración, a diferencia de las propuestas de las variables de la literatura existente, que están muy influenciadas por la duración. De esta forma, se reducen las incertidumbres que puede ocasionar el hecho de que aún no haya una definición estándar de los episodios de lluvia.

El temporal Glòria ha tenido una gran influencia en el aumento del número de registros de deslizamientos desencadenados por la lluvia. Con el temporal, se detectaron esas zonas que son propensas a sufrir problemas de deslizamientos en el caso que volviera a producirse un temporal de esta envergadura. En definitiva, ahora se conoce que la zona estudiada presenta peligro de deslizamientos por la lluvia y en el caso de superar unos valores del umbral que se deberían definir con más profundidad, se podría generar un aviso y alerta.

8. CONCLUSIONES

En este estudio se ha conseguido aplicar en el área de estudio el algoritmo que Melillo et al., (2018) ha puesto a la disposición de la comunidad científica para la reconstrucción de episodios de lluvia que han desencadenado deslizamientos. Para una adecuada aplicación de la herramienta, se han desarrollado tres algoritmos que se pueden modificar con más facilidad que el CTRL-T, el algoritmo Transformar, Unificar episodios y Postproces.

Las variables más significativas para definir los umbrales de lluvia son, la acumulación máxima en 24h (E_{max24}), que es la variable que mejor incluye la lluvia antecedente ($E_{max24} = -0,42 \cdot D + 63$) y la intensidad máxima alcanzada en la hora pico del episodio (IP), que es la variable que mejor incluye la lluvia desencadenante ($IP = -0,08 \cdot D + 12$). Ambos parámetros son los más significativos para correlacionar los episodios de lluvia y los deslizamientos además de no estar influenciados por posibles períodos de precipitaciones bajas dentro de un episodio intenso. Como resultado, se han reducido las incertidumbres que se podrían ocasionar al no existir una definición estándar de los episodios de lluvia.

9. REFERENCIAS

- Abancó, C., Hürlimann, M., Moya, J., & Berenguer, M. (2016). Critical rainfall conditions for the initiation of torrential flows. Results from the Rebaixader catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 541, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.019>.
- Ramos-Cañón, A. M., Trujillo-Vela, M. G., & Prada-Sarmiento, L. F. (2015). Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 61-8
- Atles Climàtic Digital de Catalunya, 2004. Última consulta: 11 de juny del 2021. <http://www.opengis.uab.cat/acdc/catala/presentacio.htm>.
- Badoux, A., Turowski, J. M., Mao, L., Mathys, N., & Rickenmann, D. (2012). Rainfall intensity-duration thresholds for bedload transport initiation in small Alpine watersheds. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(10), 3091–3108. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3091-2012>
- Brunetti MT, Peruccacci S, Rossi M, Luciani S, Valigi D, G. F. (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Nat Hazards Earth Syst*, 47(6–7), 633–635. [https://doi.org/10.1016/S1387-6473\(03\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S1387-6473(03)00110-6)
- Brunetti, M. T., Melillo, M., Gariano, S. L., Ciabatta, L., Brocca, L., Amarnath, G., & Peruccacci, S. (2021). Satellite rainfall products outperform ground observations for landslide forecasting in India. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–27. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-42>
- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Wilson, R. C., Bowers, J. C., & Laber, J. L. (2008). Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96(3–4), 250–269. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.019>
- Corominas i Dulcet, J. (2006). El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Cuaternario y Geomorfología: Revista de La Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española Para El Estudio Del Cuaternario*, 20(3), 89–113.
- Cremonini, R., & Tiranti, D. (2018). The Weather Radar Observations Applied to Shallow Landslides Prediction: A Case Study From North-Western Italy. *Frontiers in Earth Science*, 6(September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00134>
- Datos abiertos de Cataluña. Datos meteorológicos de la XEMA. <https://analisi.transparenciacatalunya.cat/Medi-Ambient/Dades-meteorol-giques-de-la-XEMA/nzvn-apee>.
- Datos abiertos de Cataluña. Metadatos estaciones meteorológicas automáticas. <https://analisi.transparenciacatalunya.cat/Medi-Ambient/Metadades-estacions-meteorol-giques-autom-tiques/yqwd-vj5e>.

- Gaál, L., Molnar, P., & Szolgay, J. (2014). Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1561–1573. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1561-2014>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- ICGC: El temporal Gloria (19-23/01/2020): els efectes dels processos geològics sobre el territori., 2020.
- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2015). An algorithm for the objective reconstruction of rainfall events responsible for landslides. *Landslides*, 12(2), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0471-3>
- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Gariano, S. L., Roccati, A., & Guzzetti, F. (2018). A tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. *Environmental Modelling and Software*, 105, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024>
- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., & Guzzetti, F. (2012). Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, 139–140, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.005>
- Servei Meteorològic de Catalunya. El clima de Catalunya, 2020. Última consulta: 10 de junio del 2021. <https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/el-clima-ahir/el-clima-de-catalunya/>.