

LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN ESPAÑA: HACIA UNA BASE DE DATOS CONJUNTA

Gerardo Herrera (1,2), Rosa María Mateos (1,2), Juan Carlos García-Davalillo (1,2), Virginia Alonso (1,2), Joaquín Mulas (1,2), Mario Hernández (1,2), Pere Buxó Pagespetit (1,3), Marta González (1,3), Jordi Pinyol (1,3), Jordi Marturià (1,3)

(1) Grupo de Expertos en Observación de la Tierra y Riesgos Geológicos (EOEG), EuroGeoEncuestas, Encuestas Geológicas de Europa.

(2) Laboratorio InSAR de Riesgos Geológicos (InSARlab), Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME); g.herrera@igme.es; rm.mateos@igme.es; jc.garcia@igme.es; m.hernandez@igme.es

(3) Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC); pere.buxo@icgc.cat ; marta.gonzalez@icgc.cat; jordi.pinyol@icgc.cat; jordi.marturia@icgc.cat

RESUMEN

A pesar de que los movimientos de ladera son uno de los peligros geológicos más extendidos en España, faltan instrumentos legales, guías metodológicas oficiales y datos reales sobre sus impactos económicos y sociales. Así mismo existen, en la actualidad, distintos inventarios de movimientos de ladera generados por diferentes organismos sin una aparente interrelación. En este trabajo, se analizan de manera conjunta las bases de datos de movimientos de ladera del Instituto Geológico y Minero de España y del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. En primer lugar, se analiza la distribución espacial de los distintos tipos de movimientos de ladera, y posteriormente, se analiza el grado de completitud de dichas bases de datos. Este trabajo pretende ser un primer paso para que otros organismos se unan y trabajen de manera conjunta en la armonización e integración de las bases de datos existentes de movimientos de ladera en España.

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera son uno de los peligros geológicos más extendidos en Europa en general, y en España en particular, causantes de impactos sociales y económicos significativos. En las últimas décadas del siglo XX, el impacto de los movimientos de ladera ha aumentado considerablemente por la rápida expansión de los asentamientos urbanos y la ocurrencia de eventos meteorológicos intensos. A pesar de que existen diferentes estudios que evalúan estos impactos en las últimas décadas (Haque *et al.*, 2016; Spizzichino *et al.*, 2010), dichos trabajos son incompletos por el carácter local de los movimientos de ladera, la fragmentación de las bases de datos existentes y las restricciones de acceso a las mismas.

Los movimientos de ladera se concentran principalmente en zonas montañosas y en acantilados costeros. A pesar de ello, también existen numerosos movimientos de ladera en zonas de baja pendiente, en las que los movimientos de ladera están fuertemente condicionados por litologías susceptibles y las condiciones hidrológicas erosivas de la zona (Crosta, 1998). Un ejemplo de ello es la ribera del Guadalquivir, donde los deslizamientos se desencadenan en zonas de baja pendiente ($<12^\circ$) por la elevada plasticidad y expansividad de las denominadas *Margas Azules del Guadalquivir* (Tsige *et al.*, 1994; Alonso *et al.*, 2010), produciendo múltiples daños en las zonas urbanas de la región. La mayoría de los movimientos de ladera se desencadenan fundamentalmente después de largos e intensos periodos de lluvias, pudiendo desencadenarse un gran número de deslizamientos en áreas extensas. Un ejemplo de esta situación se produjo en la isla de Mallorca (España) durante el período 2008-2010, cuando una combinación de precipitaciones persistentes y bajas temperaturas causaron un número inusual de roturas que generaron un gran impacto en la economía regional de la isla, basada principalmente en el turismo (Mateos *et al.*, 2012; Mateos *et al.*, 2013).

En un trabajo realizado por los Servicios Geológicos de Europa (Mateos *et al.* 2016, Poyiadji *et al.* 2017), se comprobó que el grado de integración en la ordenación y planificación del territorio de los peligros geológicos en general, y los movimientos de ladera en particular, es muy variable entre unos países y otros. Algunos países, como la República Checa, Estonia o Eslovenia, no incluyen los deslizamientos en su legislación, mientras que otros no exigen oficialmente mapas de peligros en su planificación urbana o carecen de metodologías oficiales para producir los mapas. Este hecho, unido a la fragmentación y restricciones de acceso a las bases de datos existentes en los distintos territorios dificultan la integración de datos y el desarrollo de estrategias comunes que reduzcan el riesgo por movimientos de ladera en Europa. En este trabajo se analizan de manera conjunta las bases de datos de movimientos de ladera del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y del Instituto Cartográfico y Geológico de

Cataluña (ICGC). Para ello se presenta en primer lugar la distribución espacial de los distintos tipos de movimientos de ladera registrados, y posteriormente, se analiza el grado de completitud de ambas bases de datos.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Las bases de datos (MOVES) del IGME y del ICGC, contienen información similar respecto a los movimientos de ladera registrados: elementos cartográficos, escala, tipología, tamaño (área y/o volumen), la historia, el factor desencadenante, el grado de actividad (activo, reactivado, e inactivo), la geología y los daños producidos. La tipología de ambas bases de datos sigue la clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996) en desprendimientos, deslizamientos, flujos, complejos y otros (Tabla 1).

	Desprendimientos	Deslizamientos	Flujos	Complejos	Otros	SUMA	% total
MOVES	2864	2529	3035	155	0	8583	78%
Cataluña	1114	1147	152	0	5	2418	22%
TOTAL	3978	3676	3187	155	5	11001	
% total	37%	33%	29%	1%	0%		

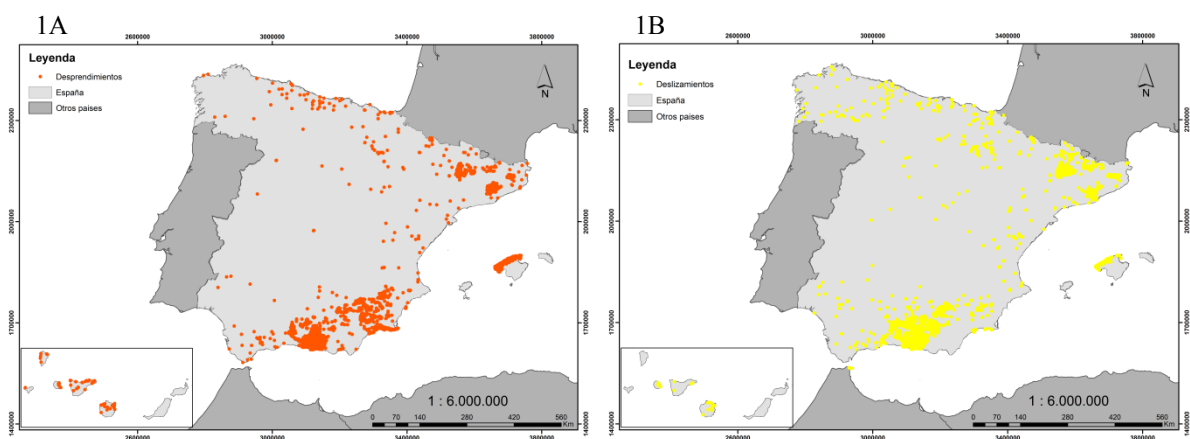
Tabla 1. Resumen de las bases de datos de los movimientos del terreno.

La base de datos MOVES, creada por el IGME en 2014 integra la base de datos histórica, los inventarios de movimientos de ladera elaborados en algunas regiones y registros de eventos recientes distribuidos por todo el territorio nacional. Además de deslizamientos, desprendimientos, flujos, etc., incluye movimientos gravitacionales verticales como subsidencia por extracción de agua, minería o disolución. Sin embargo, no incluye movimientos de origen tectónico, como los producidos por terremotos, o de origen volcánico. La base de datos se estructura en dos bloques: la descripción de las características propias intrínsecas, y relativamente invariables del movimiento, y la referida a la historia, es decir las diferentes reactivaciones producidas en cada movimiento. Mediante el proyecto MOVES, se ha generado una base de datos única a escala nacional siguiendo la normativa INSPIRE (2007/2/CE de 14 de marzo de 2007). La cartografía de nuevos registros, o la actualización de nuevos eventos, sigue procedimientos estandarizados que incluyen: la recopilación de documentos históricos, la interpretación de fotografía aérea y el trabajo de campo. En 2017, MOVES contaba con 8583 registros cartografiados a nivel nacional (Tabla 1). La mayoría de estos registros son de tipo flujos (35%), desprendimientos (33%), deslizamientos (30%), y un 2% de movimientos complejos.

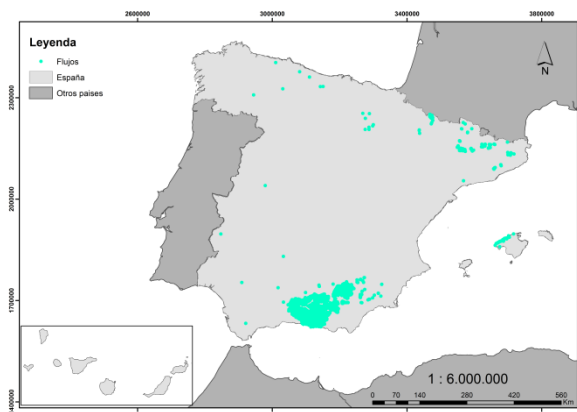
El Sistema de Información de Riesgos Geológicos (SIRG), en proceso de implementación,

integra las diferentes bases de datos de las que dispone actualmente el ICGC en materia de riesgos geológicos. El SIRG tiene como cuerpo central la base de datos de movimientos del terreno (LLISCAT) (González *et. al.*, 2017), pero se destacan la Base de datos del Mapa para la prevención de riesgos geológicos, la Base de datos de aludes y la Base de datos de información histórica, con información muy diversa y con diferentes escalas de trabajo, desde regionales a locales. Los objetivos del SIRG son la centralización, gestión, consulta y visualización de la información existente en materia de riesgos geológicos en el territorio catalán, con el propósito de ser una base de datos de referencia en el campo de los riesgos geológicos, que proporcione información de base para la mejora de las políticas de planificación y ordenación del territorio existentes, así como para abordar nuevas estrategias en la prevención, protección y corrección frente a los movimientos del terreno. Para realizar este análisis, se ha tenido en cuenta por una parte el inventario del Mapa para la prevención de riesgos geológicos (MPRG25M), que se realiza de forma sistemática para todo el territorio; y por otra, los 266 registros introducidos en LLISCAT en el momento del análisis. A partir estas dos fuentes de información, se dispone de 2418 registros cartografiados y clasificados en: deslizamientos (47,4%), desprendimientos (46,1%), flujos (6,3%) y otro (0,2%).

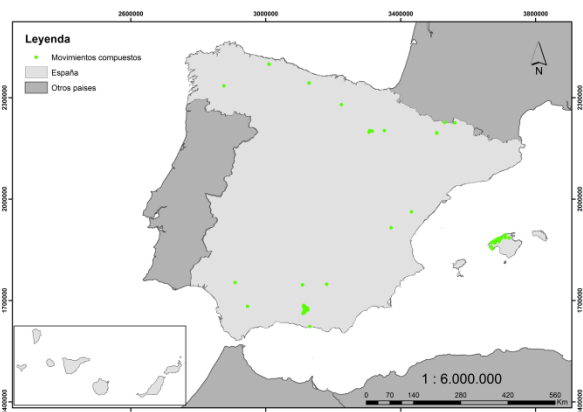
Se han analizado conjuntamente las bases de datos del IGME y el ICGC. Entre ambas bases de datos se cuenta con un total de 11.001 movimientos de ladera (Tabla 1), de los cuales la mayor parte de los registros son de tipo desprendimientos (37%), deslizamientos (33%), flujos (29%) y movimientos complejos (1%). La mayor concentración de registros se concentra en Granada, Murcia, Cataluña, y Mallorca, que es de donde se dispone de inventarios muy completos de movimientos de ladera regionales, mientras que en el resto del territorio su distribución es más dispersa (Figura 1).



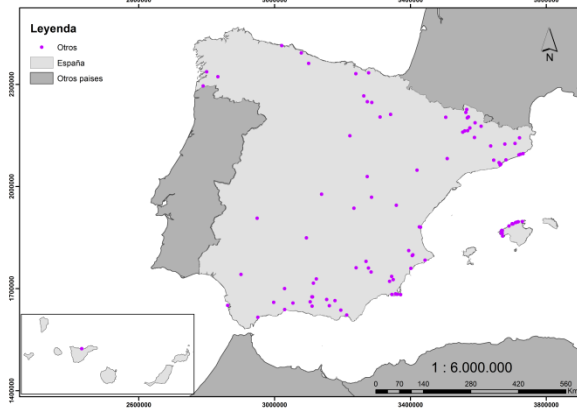
1C



1D



1E



1F

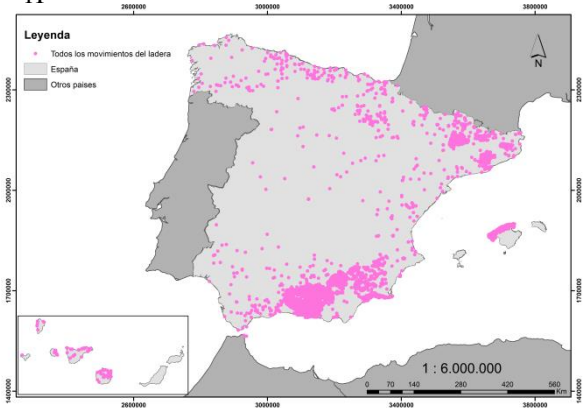


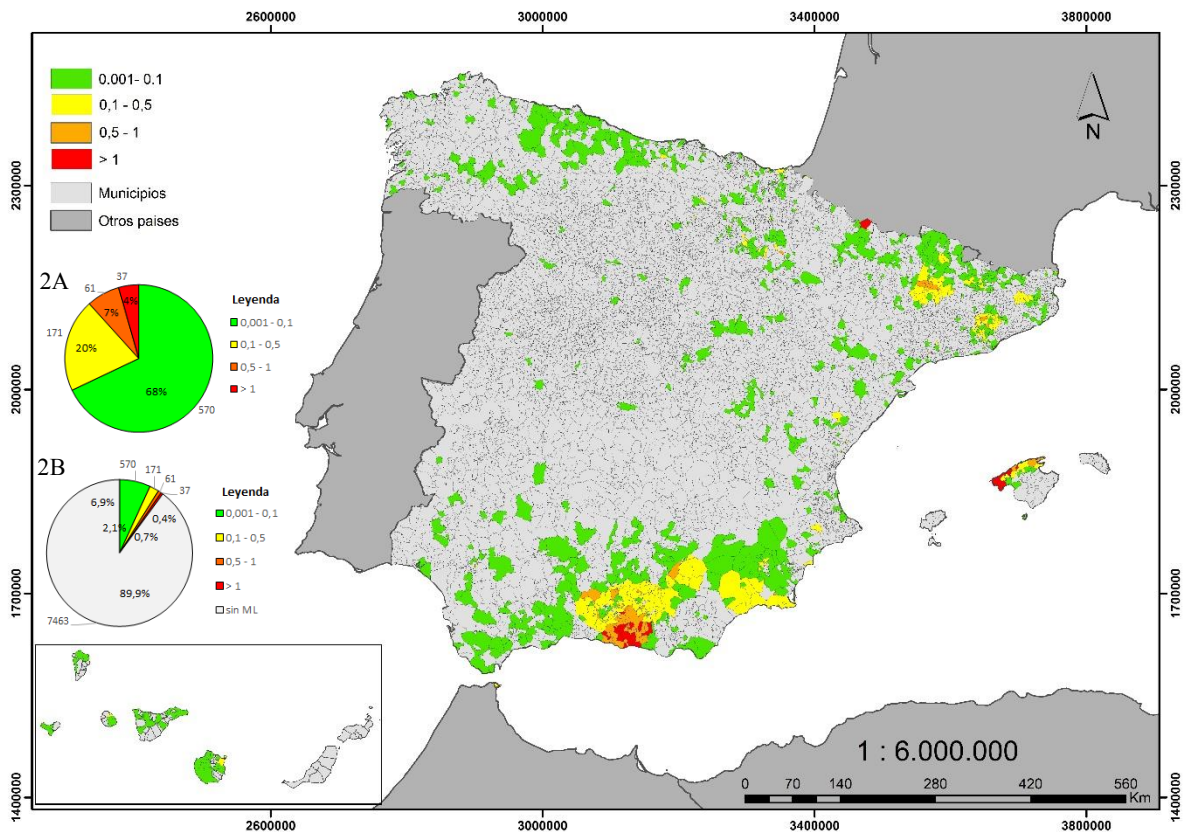
Figura 1. Mapas de los distintos tipos de movimientos de ladera: A, desprendimientos; B: deslizamientos; C: flujos; D: movimientos compuestos; E: otros; F: todos.

3. MAPA DE DENSIDAD DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

Se ha elaborado un mapa de densidad de los movimientos de ladera sin distinguir tipología, para lo cual se ha contabilizado el número de movimientos registrados para cada km^2 . Para ello se ha utilizado la capa de puntos que define la ubicación de cada movimiento de ladera y una malla de 1 km por 1km. Dado que el área de cada movimiento es variable, desde centenares de m^2 a algunos km^2 , el mapa de densidad propuesto no representa áreas afectadas por movimientos de ladera sino más bien, celdas de la malla donde se han cartografiado 1 o más movimientos de ladera. El mapa de densidad resultante consta de 6142 km^2 en los que ambos Servicios Geológicos han cartografiado movimientos de ladera (ML), de los cuales el 92,5% cuenta con 1-3 ML/ km^2 , el 7% entre 4-10 ML y el 0,5% entre 11-22 ML/ km^2 . Esto quiere decir que, según los datos disponibles, en estas bases de datos tan solo se han cartografiado movimientos de ladera en el 1.2% del territorio.

Posteriormente, se ha realizado un mapa de densidad de los movimientos de ladera por

municipio. Para ello se ha calculado la densidad media de ML/ km² teniendo en cuenta la superficie municipal (Figura 2). En este mapa, se distinguen cinco categorías: municipios sin registros, municipios con una densidad media entre 0,001–0,1 ML/km², entre 0,1-0,5 ML/km², entre 0,5-1 ML/km², y con una densidad mayor a 1 ML/km². De los 8302 municipios de España, tan solo en el 10% (839) se ha registrado al menos 1 movimiento de ladera en ambas bases de datos. En la Figura 2A se observa que, en la mayoría de ellos (68%), la densidad media por municipio es inferior a 0,1 ML/km², y tan solo en 37 municipios el número de movimientos de ladera registrados es igual o mayor que el área de cada municipio (densidad media superior a 1 ML/km²). Los municipios con mayor densidad de movimientos del terreno se ubican en Granada, Mallorca y Pirineos. El gráfico 2B, tiene en cuenta el total de municipios existentes en España, de los que el 90% no tiene registros de ML.



4. COMPARACIÓN CON EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD ELSUS 1000 V1

En esta sección se compara el mapa de densidad de ML con el mapa europeo de susceptibilidad a los movimientos de ladera (ELSUS v1) propuesto por Günther et al. (2014). El objetivo de esta comparación es doble: (1) por un lado proporcionar una primera validación cuantitativa del mapa y (2) proporcionar una primera estimación de la completitud de las bases de datos analizadas. El mapa ELSUS v1 es el resultado de un análisis espacial multi-criterio de la susceptibilidad a los movimientos de ladera que tiene en cuenta la variabilidad fisiográfica y climática de Europa y un inventario limitado de movimientos de ladera. Su resolución es igual a la del mapa de densidad propuesto (1 km x 1km). Para comparar el mapa de densidad con el ELSUS v1, este último se ha reclasificado en dos clases: baja a muy baja susceptibilidad (se hace referencia en adelante como no susceptible); y clases de susceptibilidad de moderada a muy alta (susceptibles). La comparación se ha realizado mediante una matriz de co-fusión de la que se obtienen cinco resultados posibles: TP (*True Positive*), áreas susceptibles que coinciden con registros de movimientos de ladera; FN (*False Negative*), áreas no susceptibles que coinciden con registros de movimientos de ladera; TN (*True Negative*), áreas no son susceptibles que no coinciden con registros de movimientos de ladera; FP (*False Positive*), áreas susceptibles que no coinciden con registros de movimientos de ladera; NA (*Not Available*), áreas sin datos ELSUS v1 donde existen registros de movimientos de ladera. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura 3, que resulta de la comparación celda a celda del mapa de densidad con el mapa reclasificado ELSUS v1.

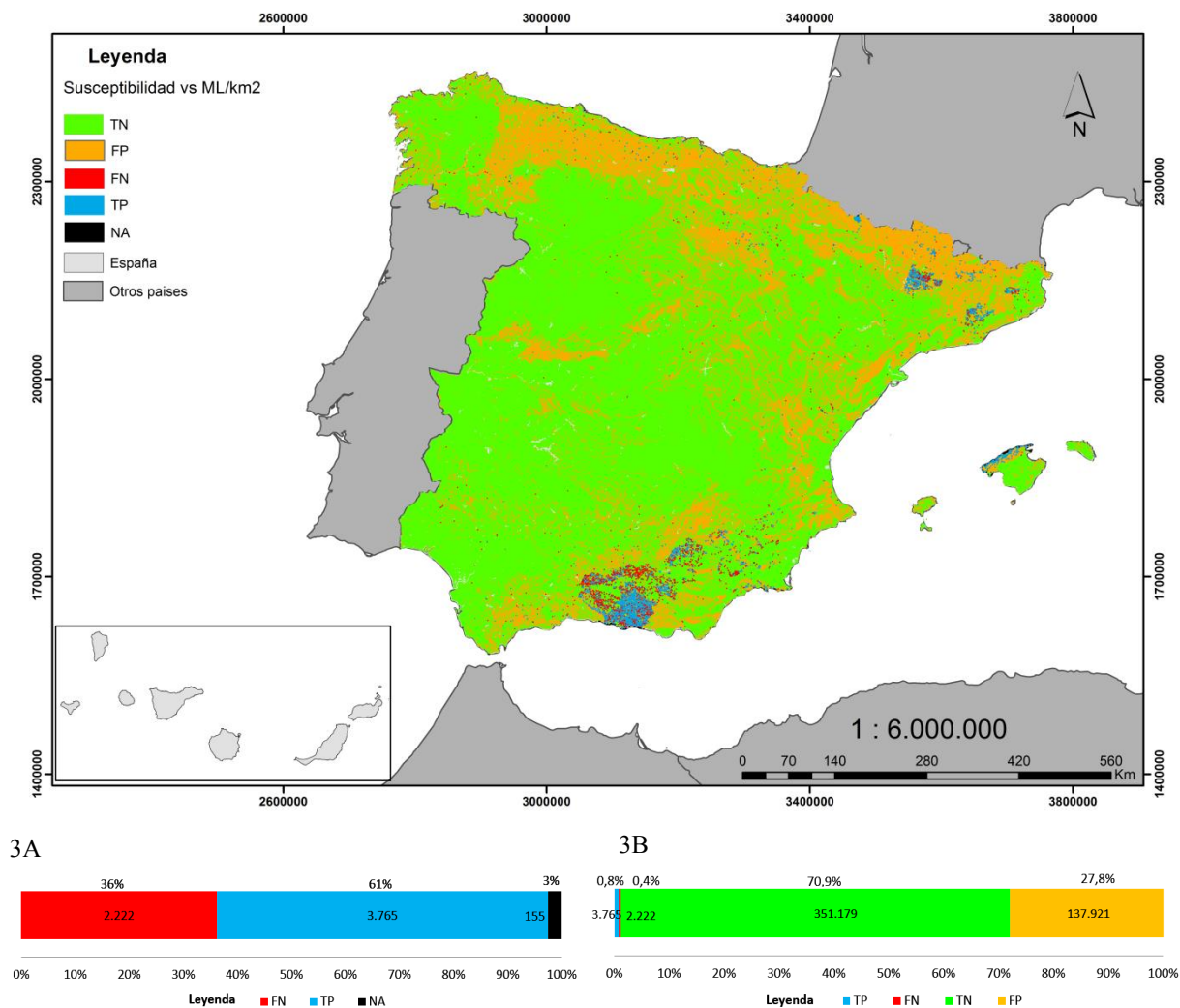


Figura 3 Mapa comparativo densidad de ML por kilómetro cuadrado con el ELSUS, y gráfico 3A y 3B.

En primer lugar hemos analizado únicamente los 6142 km² donde existen registros de movimientos de ladera. En la Fig. 3a se comprueba que el éxito de la comparación (TP) es de un 61%, el error es de un 36% (FN), y la comparación no es posible en el 3% (NA). Esto quiere decir que hay áreas con registros de movimientos de ladera que suman 2222 km², donde la estimación de ELSUS v1 es “no susceptible”. Si se considera el conjunto de los datos de ELSUS v1 para todo el territorio español, vemos (Fig. 3b) que se incluye en la comparación las otras dos categorías restantes: TN que con 351179 km² representa el 70,9% del territorio, y FP que 137921 km² datos representa el 27,8%. En este caso, el acierto de la comparación sería del 71.7% (TN + TP) y el error del 28.3% (FN + FP). El mapa ELSUS v1 subestima zonas de

España donde se producen movimientos de ladera en zonas con poca pendiente (<12°) fuertemente condicionados por la litología, como es el caso de la Cuenca del Guadalquivir.

En base a estos resultados, se ha realizado un análisis de la completitud de la base de datos analizados. Eeckhaut y Hervás (2012) estimaron de manera cualitativa la completitud de los inventarios existentes en Europa, fijándola por debajo del 50%. Con el fin de proporcionar una aproximación cuantitativa de la completitud de las bases de datos analizadas en este trabajo, calculamos la relación entre las áreas cartografiadas y las áreas susceptibles establecidas por ELSUS v1. La categoría FP, áreas susceptibles que no coinciden con registros de movimientos de ladera, puede ser explicada por distintos motivos: (1) una sobre-estimación de ELSUS v1; (2) la existencia de movimientos de ladera no cartografiados o no incluidos en las bases de datos analizadas; (3) la ocurrencia de movimientos de ladera en el futuro. Asumiendo estas posibilidades, calculamos la completitud de las bases de datos analizadas con la siguiente ecuación:

$$Completitud = (TP + FN + NA) / (TP + FP + FN + NA) \quad (1)$$

De acuerdo con esta relación, la completitud de las bases de datos de movimientos de ladera del IGME y del ICGC sería de un 4 %, es decir existen 137921 km² de zonas susceptibles a los movimientos de ladera potencialmente no cartografiadas o incluidas en estas bases de datos. A pesar de que también puede ser el resultado de una sobreestimación de ELSUS v1, constituye una primera aproximación a la completitud de dichas bases de datos.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza de manera conjunta las bases de datos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC). Se comprueba que ambas bases de datos (BBDD) contienen información similar en cuanto a su representación cartográfica y la caracterización de los movimientos de ladera se refiere. De esta manera, ambas BBDD contienen información similar sobre los elementos cartográficos, la escala, la tipología, el tamaño (área y/o volumen), la historia, el factor desencadenante, el grado de actividad (activo, reactivado, e inactivo), la geología y los daños producidos.

Ambas BBDD cuentan con un total de 11001 movimientos de ladera de los que el 37% son desprendimientos, el 33% de deslizamientos, el 29% de flujos y el 1% de movimientos complejos (Tabla 1; Figura 1). La combinación de ambas BBDD ha permitido elaborar un mapa de densidad que consta de 6142 km² donde se han cartografiado 1 o más movimientos de ladera (ML) por km², lo que supone el 1.2% de España. El análisis por municipios revela que de los

8302 municipios de España, tan solo en el 10% (839) se ha registrado al menos 1 movimiento de ladera en ambas bases de datos, siendo la densidad media de movimientos de ladera por municipio superior a 1 por km² en 37 municipios. La mayor densidad de movimientos de ladera cartografiados se encuentra en regiones donde se han realizado cartografías regionales específicas de deslizamientos, como es el caso de Granada, Murcia, Mallorca, Cataluña y algunas zonas del Pirineo Oscense.

La comparación del mapa de densidad de movimientos de ladera con el mapa europeo de susceptibilidad a los movimientos de ladera (ELSUS v1), revela un éxito del 71% en la comparación, y un error del 28% para todo el territorio. El mapa ELSUS v1 subestima zonas de España donde se producen movimientos de ladera en zonas con poca pendiente (<12°) fuertemente condicionados por la litología, como es el caso de la Cuenca del Guadalquivir. A partir de esta comparación se ha propuesto un método ~~propuesto~~ para evaluar la completitud de las bases de datos analizadas que se basa en la relación entre áreas cartografiadas y áreas susceptibles establecidas por ELSUS v1. De acuerdo con esta relación, la completitud de las bases de datos de movimientos de ladera IGME y el ICGC sería de un 4 %, es decir existen 137921 km² de zonas susceptibles a los movimientos de ladera potencialmente no cartografiadas o incluidas en estas bases de datos. A pesar de que también puede ser el resultado de una sobreestimación de ELSUS v1, constituye una primera aproximación a la completitud de dichas bases de datos. La completitud analizada en 17 países de Europa por Herrera et al. (2017) tiene un valor medio del 17% superando en algunos casos el 50%. Esto indica que el valor obtenido para España es bajo, y requiere que todas las instituciones que trabajan en movimientos de ladera en España trabajen de manera conjunta por la integración y armonización de las bases de datos disponibles.

7. REFERENCIAS

- Alonso, E., Pinyol, N.M., Puzrin, A.M. (2010). Earth Dam Sliding Failure: Aznalcóllar Dam. Spain. Geomechanics of Failures. Advanced Topics. Springer. 129-167.
- Crosta, G. (1998). Rationalization of rainfall threshold: an aid to landslide hazard evaluation. *Environ Geol*, 35:131–145.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247). Van Den Eeckhaut, M., & Hervás, J. (2012). State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*, 139, 545-558.

- González, M., Pinyol, J., Ramisa, J., Querol, N., Marturià, J. (2017). La base de datos de movimientos del terreno de Cataluña (LLISCAT): una herramienta para la gestión de los riesgos geológicos. Proceedings del IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Santander, Junio 2017.
- Günther, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J. P., Reichenbach, P., & Hervás, J. (2014). Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology*, 224, 69-85.
- Herrera, G., Mateos, R.M., García-Davalillo, J.C., Grandjean, G., Poyiadji, E., Maftai, R., Filipciuc, T-C., Auflic, M.J., Jez, J., Podolszki, L., Trigila, A., Iadanza, C., Raetzo, H., Kociu, A., Przylucka, M., Kulak, M., Sheehy, M., Pellicer, X.M., McKeown, C., Ryan, G., Kopackova, V., Frei, M., Kuhn, D., Hermanns, R.L., Koulermou, N., Smith, C.A., Engdahl, M., Pagespetit, P.B., Gonzalez, M., Dashwood, C., Reeves, H., Cigna, F., Liscák, P., Mikulénas, V., Demir, V., Faha, M., Quental, L., Sandic, C., Fusi, B., Jensen, O.A. (2017). Landslide databases in the Geological Surveys of Europe. 1- 25. Submitted to *Landslides journal*.
- Haque U., Blum P., da Silva P.F., Andersen P., Pilz J., Chalov S.R., Malet J.P., Auflič M.J., Andres N., Poyiadji E., Lamas P.C., Zhang W., Pesevski I., Pétursson H.G., Kurt T., Dobrev N., García-Davalillo J.C., Halkia M., Ferri S., Gaprindashvili G., Engström J., Keellings D. (2016) Fatal landslides in Europe. *Landslides* 13: 1545-1554.
- INSPIRE “Infrastructure for Spatial Information in Europe” (2007/2/CE de 14 de marzo de 2007), Guía Técnica de zonas de riesgos naturales (<http://inspire.ec.europa.eu/data-specifications/2892>)
- Mateos RM, García-Moreno I, Azañón JM (2012) Freeze-thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: the case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). *Landslides* (2012), 9: 417-432.
- Mateos RM, García-Moreno I, Herrera G, Mulas J (2013 a) Damage caused by recent mass-movements in Majorca (Spain), a region with a high risk due to tourism. *Landslide Science and Practice*. Claudio Margottini, Paolo Canuti and Kyoji Sassa (Editors). Volume 7: Social and Economic Impact and Policies. 105-113.
- Poyiadji, E., Kontogianni, V., & Nikolaou, N. (2017). Integration of Geohazards in Urban Planning and Management. In *Advanced Engineering Forum*, ISSN: 2234-991X, 21, 557-563. Doi:10.4028/www.scientific.net/AEF.21.557
- Tsige, M., González de Vallejo, L., Doval, M., Barba, C., (1994). Microfabric of Guadalquivir “Blue Marls” and its engineering geological significance. In: *Proceedings 7th International IAEG Congress*. Vol. 4: 45-51.