

Cartografía de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca media del río Beiro, Granada

Landslide-Susceptibility Mapping in the Beiro River Middle Basin, Granada, Spain

Isabel Bandera Viñolo¹, Jorge David Jiménez Perálvarez^{2*}

Resumen

En el presente trabajo se evaluó la susceptibilidad del terreno a generar movimientos de ladera mediante un análisis estadístico bivariable entre la frecuencia de ocurrencia espacial de los movimientos de ladera y los factores que los condicionan. Se elaboró un inventario que puso de manifiesto que al menos el 10,5 % de la zona está afectada por movimientos y que estos tienen lugar principalmente en los conglomerados y arenas de la formación Alhambra a alturas inferiores a 800 m cuando la pendiente está comprendida entre 10 y 25°. Para el análisis de la susceptibilidad se consideró la litología del terreno, la pendiente, la elevación y la orientación de las laderas como factores que más contribuyen a la inestabilidad. La susceptibilidad general de la zona a los movimientos de ladera es predominantemente baja a moderada, sin embargo, la zona presenta un 25,9 % de su superficie con una susceptibilidad alta o muy alta ($P \geq 25$ %). La precisión del mapa de susceptibilidad obtenido se validó mediante el grado de ajuste registrando una precisión relativa del 87 %.

Palabras clave: movimiento de ladera, deslizamiento, susceptibilidad, estabilidad de laderas, río Beiro-Granada.

Abstract

Landslide-susceptibility was assessed in the river Beiro middle basin, close to Granada, by means of a bivariate statistical method based on cross-tabulation between stability determining factors and landslides. The assessment of landslide susceptibility was based on the spatial probability of landslide occurrence. With this aim, a database of 70 landslides consisting of 29 slides, 26 debris flows and 15 falls was developed. Landslide inventory showed that, at least, 10.5 % of the study zone is covered by landslides, and these mainly occur in the conglomerate and sands of Alhambra formation, at elevations lower than 800 meters, in slopes between 10 and 25 degrees, and south-western slopes. The mentioned features are found close to channel-slope where elevation is lower and slope higher due to river over-excavation. Inventoried landslides are mainly shallow slides whose rupture zone fit to the surface between weathered and not-weathered soil. In any case, deep-seated slides were also to be recognized. Lithology, slope angle and slope aspect were taken in consideration as determinant factors for landslide susceptibility. The results reveal that landslide susceptibility in the area is mainly low to moderate, since 74.1 % of zone show landslide likelihood lower than 15 %. Nevertheless, 16.2 % and 9.7 % of the area show high and very high landslide susceptibility, respectively, intersecting with urbanized districts where detailed studies and preventive plans would be justified to avoid damage, for example, in extraordinary rainfall periods. Quality of the landslide susceptibility map drawn to predict landslides was validated by means of the degree-of-fit method. It was found that the association between the landslide susceptibility classes and landslides reached a relative precision of 87 % for the zones of high and very high susceptibility.

Keywords: landslide-susceptibility, bivariate statistical analysis, landslide determinant factors, slope stability, river Beiro Basin-Granada.

1. INTRODUCCIÓN

El impacto de los movimientos de ladera en el marco socio-económico es elevado al ser responsables de la pérdida de bienes, servicios y en ocasiones, pérdidas en términos de vidas (Haque *et al.*, 2016). El nivel de daño se puede reducir cuando el fenómeno está identificado en el espacio y en el tiempo, especialmente para el caso de los movimientos de ladera, ya que son fenómenos naturales más predecibles y controlables

que otros análogos de carácter catastrófico como terremotos, erupciones volcánicas, etc. (Jiménez-Perálvarez, 2018a).

Una de las principales medidas para reducir el nivel de pérdidas producidas por los movimientos de ladera es la prevención mediante cartografías previsoras (e.g. Corominas y Moya, 2008; Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2011; Guzzetti *et al.*, 2012). El desarrollo de cartografías básicas previsoras ha sido ampliamente tratado en la bibliografía (e.g. Irigaray *et al.*, 2007; Fell *et al.*, 2008; Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2009; 2011; 2017) y muchas regiones están equipadas con mapas inventario, a veces de susceptibilidad, a gran escala (Van Den Eeckhaut y Hervás, 2012) si bien no es frecuente la existencia de mapas de detalle que permiten una mejor política de control sobre el uso y ordenación del territorio (Glade *et al.*, 2005; Jiménez-Perálvarez, 2018b).

En general, la susceptibilidad a los movimientos de ladera se puede evaluar por dos métodos principales:

* Autor de contacto: jorgejp@ugr.es

¹ Graduada en Geología. Departamento de Ingeniería Civil, ETS de ICCP, Universidad de Granada.

² Doctor en Geología. Departamento de Ingeniería Civil, ETS de ICCP, Universidad de Granada.

aquellos basados en modelos según técnicas fundamentadas en leyes físicas y mecánicas de equilibrio de fuerzas y aquellos basados en técnicas estadísticas fundamentadas en el principio del actualismo donde los sistemas de información geográfica (SIG) son de gran utilidad (Van Westen *et al.*, 2006; Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2009). En el análisis SIG, las diferentes metodologías se pueden diferenciar en aproximaciones empíricas (heurísticas), modelos físicos y aproximaciones estadísticas tanto multivariantes como bivariantes que permiten una mejor comprensión de la relaciones entre los movimientos de ladera y los factores que los condicionan (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2009).

En este trabajo, la zonación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera se evaluó según una aproximación estadística bivalente (probabilidad condicional) que se basa en el análisis cruzado entre factores determinantes (condicionantes) de la estabilidad y la probabilidad de ocurrencia espacial de los movimientos de ladera (Jiménez-Perálvarez, 2018a). Esta metodología implementada en un SIG se ha llevado a cabo con valiosos resultados en las Zonas Internas y Externas de la Cordillera Bética (Irigaray *et al.*, 2007; Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2011; Costanzo *et al.*, 2012).

Para el caso de estudio se seleccionó una zona en la cuenca media del río Beiro (Granada) donde se evidencia una alta incidencia de los movimientos de ladera. En este sentido, ya el mapa geológico de la zona de finales de los años 80, (IGME, 1988) puso de manifiesto en su memoria la incidencia de los movimientos de ladera en la zona de estudio destacándolos como una unidad dentro del sistema de vertientes (figura 1). Trabajos posteriores, señalaron la litología, la pendiente y la orientación de las laderas como factores determinantes de la estabilidad en la zona (Costanzo *et al.*, 2012; Costanzo, 2012).

De esta forma, el objetivo principal del trabajo será la cartografía de la predisposición del terreno a generar movimientos de ladera en función de sus características principalmente geológicas, geotécnicas y geométricas. Para lograr dicho objetivo general será necesario alcanzar una serie de objetivos específicos como son la elaboración de un inventario de movimientos de ladera de la zona de

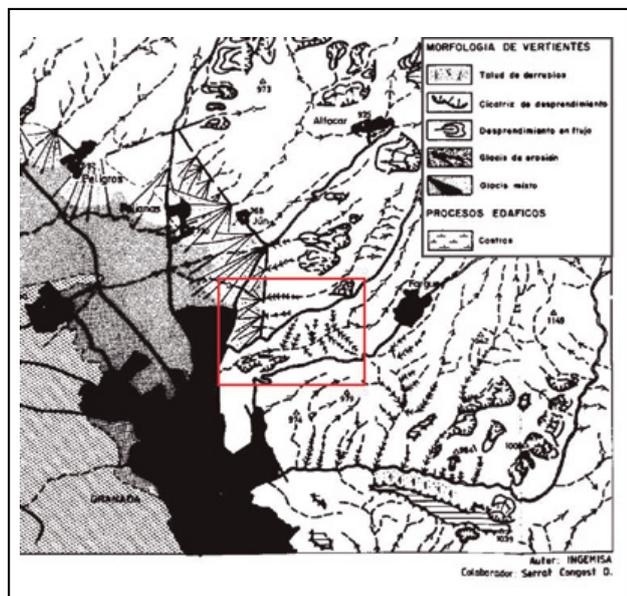


Figura 1. Extracto del mapa geomorfológico de la región (IGME, 1988); encuadrada en rojo, la zona de estudio.

estudio; la selección de los factores determinantes o condicionantes de la estabilidad a partir de mapas temáticos y del modelo digital de elevaciones (MDE) y, finalmente, el análisis y validación de la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera mediante un sistema de información geográfica (SIG). En otras palabras, la capacidad del mapa obtenido para predecir la generación de movimientos de ladera.

Es de esperar, por tanto, que mediante la aplicación de una metodología contrastada los resultados de esta investigación muestren información (espacial) sobre predisposición del terreno a la generación de movimientos de ladera en la zona de estudio; siendo el nivel de detalle uno de los principales valores de este trabajo. Por otra parte, la expresión de los resultados en forma de mapa se presenta como documento de consulta para los planes de ordenación y uso del territorio, más allá de un interés ligado a eventos catastróficos puntuales u obras civiles específicas. En este sentido, el mapa de susceptibilidad señala las zonas en las que existe una mayor o menor probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera, de utilidad como medida preventiva frente a los efectos negativos de los que este fenómeno natural, a veces inducido, es responsable.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO

Para el caso de estudio se seleccionó una zona al norte de la ciudad de Granada coincidente con la cuenca media del río Beiro (figura 2) donde, como se ha comentado con anterioridad, se manifiesta una alta incidencia de los movimientos de ladera. La zona presenta un área aproximada de 3,16 km² y se localiza en las coordenadas geográficas 37°12'N - 3°35'W (coordenadas del centro de la zona). Se encuentra comunicada por las carreteras GR-3102 y A-4002 y se emplaza prácticamente en su totalidad en el municipio de Granada, quedando íntegramente comprendida en la hoja topográfica 1:50.000 (serie L) número 1009, Granada (BCA10, 2016) (Hoja 1:10.000 número 1009-4-4). Además de las citadas vías de comunicación y de edificios de viviendas, por la zona discurre el trazado de la histórica acequia de Aynadamar (bien de interés cultural) y se emplazan otras infraestructuras relevantes como una subestación eléctrica que abastece gran parte de la ciudad. La presencia de elementos en riesgo le confiere importancia a este tipo de trabajos.

El área presenta una geomorfología típica de glacia o pedillanura de pendiente suave abruptamente interrumpida por fuertes pendientes consecuencia del encajamiento de los cauces, en cuyas vertientes se concentran la mayor parte de los movimientos de ladera (ver figura 10). Desde el punto de vista geológico la zona de estudio se encuentra en la Depresión de Granada, que forma parte de las cuencas neógenas intramontañosas de la Cordillera Bética y se caracteriza por facies detríticas de relleno (Braga *et al.*, 2003). De esta forma, el área está constituida principal y casi exclusivamente por materiales plio-cuaternarios representados por conglomerados y arenas de la "Formación Alhambra", que comprenden el 87 % de la zona y materiales miocenos (turiolenses) representados por limos micáceos, arenas y gravas de la "Formación Cenes-Jun" que abarcan el 12 % de la zona. Estos materiales están limitados en la parte septentrional del

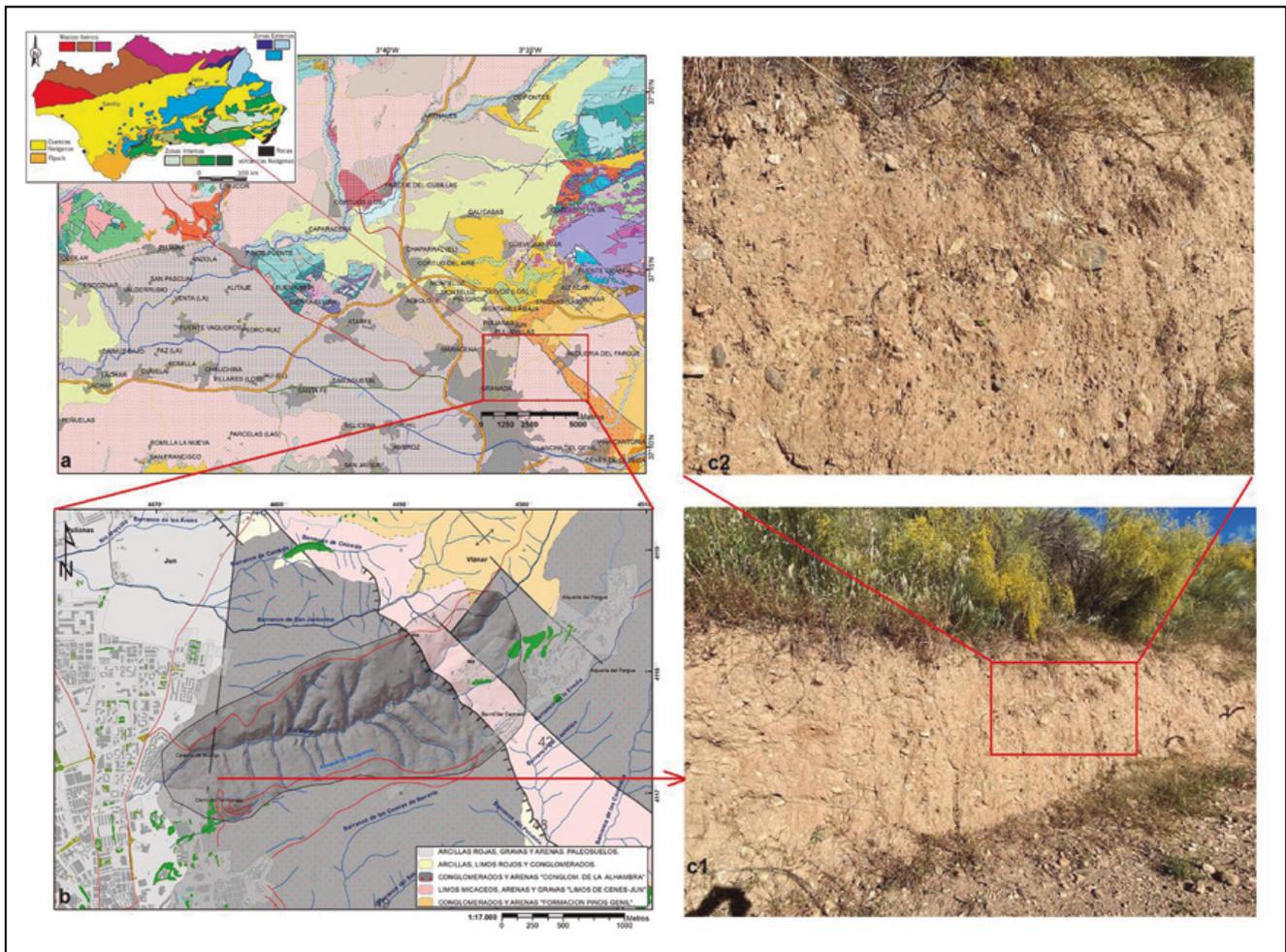


Figura 2. Localización geológica y geográfica de la zona de estudio (Elaboración propia, fuente de datos: Villalobos y Pérez, 2012; BCA10, 2016; GEODE, 2017; InfOGME, 2020). **a)** Contexto regional; **b)** Contexto local; **c1** y **c2)** Detalle de la formación Alhambra en la zona de estudio.

área por conglomerados y arenas turolenses basales de la “Formación Pinos Genil”, sin que lleguen a aflorar en la misma; mientras que en el extremo meridional de la zona afloran testimonialmente (representan el 1 % del área) depósitos aluviales cuaternarios constituidos por arcillas rojas, gravas y arenas (figura 2) (IGME, 1988; GEODE, 2017).

Por tanto, la zona de estudio está constituida fundamentalmente por la formación Alhambra, que en el área aflora como un conglomerado heterométrico de cantos redondeados centimétricos a decimétricos de esquistos y cuarcitas embebidos en una matriz areno-arcillosa predominante de tonalidad rojiza (figura 2c); representando las facies más distales del abanico aluvial. Esta matriz areno-arcillosa constituye la mayor parte del conjunto y le confiere el comportamiento geomecánico al material.

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

La evaluación del riesgo empieza por la identificación del proceso que lo genera y la definición de su área de influencia, ya que la mayoría de movimientos de ladera que se han registrado en el pasado no alcanzaron la estabilidad total (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2017). De esta forma, el trabajo se ha desarrollado en las siguientes etapas: (1) elaboración y digitalización del inventario de movimientos de ladera, (2) confección y análisis de los factores determinantes, (3) análisis de la susceptibilidad y (4) validación de los mapas de susceptibilidad obtenidos.

3.1. Inventario de movimientos de ladera

El inventario de movimientos de ladera es el mapa más importante para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a los mismos. Es el dato de partida y referencia en cualquier proyecto de movimientos de ladera, especialmente cuando se adopta una aproximación empírica de probabilidad estadística, como es el caso de estudio. De la precisión y exactitud del inventario depende la fiabilidad del análisis (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2011). Para el caso de estudio, a partir de una fase de interpretación sobre la ortofotografía de Andalucía con resolución de 0,5 metros píxel (PNOA, 2016) y el apoyo de GoogleEarth™ (Google, 2020) se cartografió en gabinete un inventario de movimientos de ladera preliminar (figura 3a). Con posterioridad se cotejó y completó el inventario mediante itinerarios de campo a la vez que se registraron datos sobre litología, tipología, mecanismo de rotura, dimensiones, etc. Como quiera que para el procesado mediante SIG los datos deben estar en un formato adecuado, finalmente se digitalizaron los movimientos de ladera generando una base de datos geoespacial a escala 1:10.000 mediante el apoyo del paquete SIG ArcGIS (ESRI, 2012) (figura 3b). De esta forma, la base de datos definitiva de movimientos de ladera recoge información geo-espacial (cartografía de movimientos de ladera) y sus principales características (litología, tipología, dimensiones, etc.).

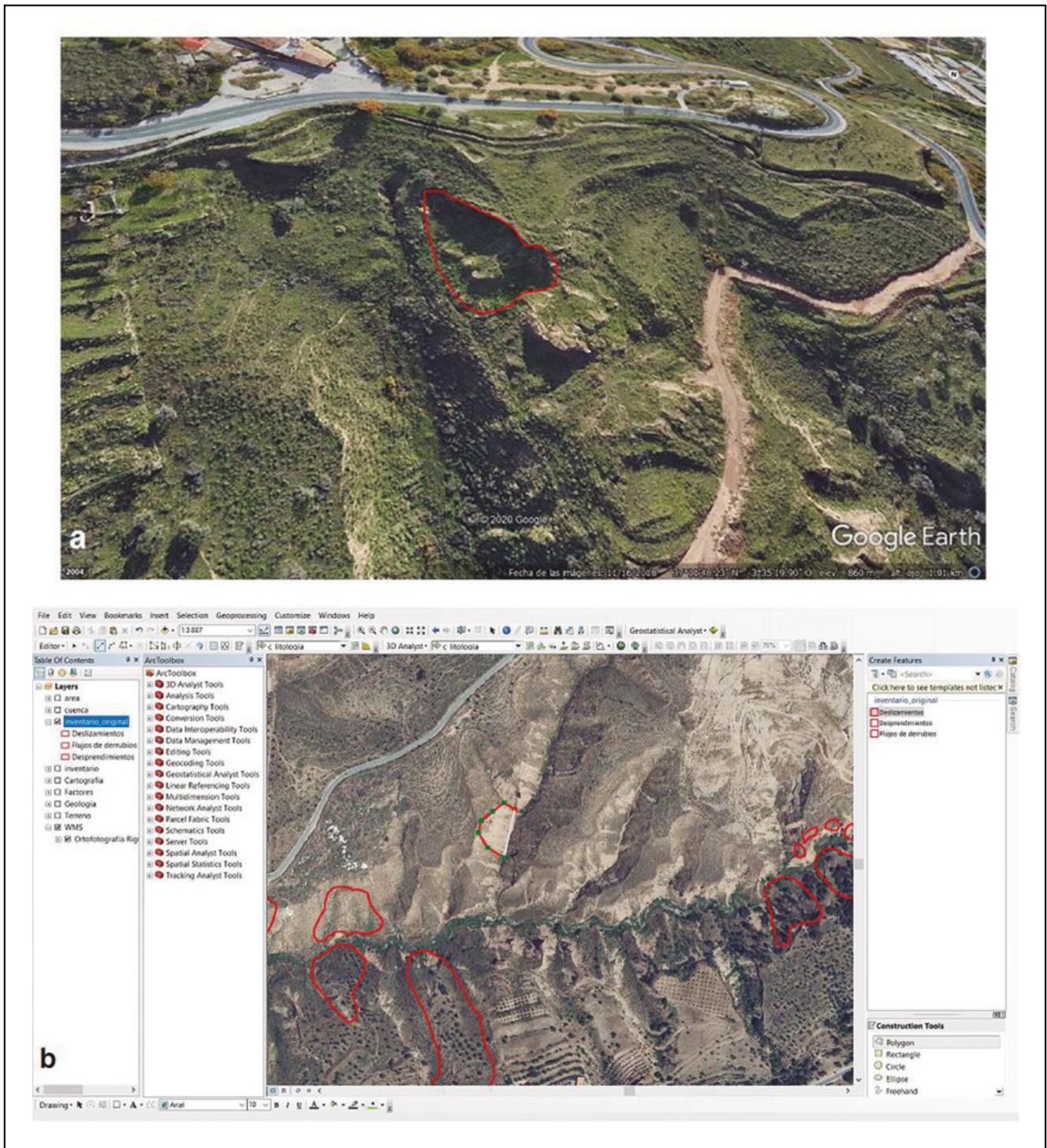


Figura 3. Elaboración del inventario de movimientos de ladera. **a)** Cartografía preliminar sobre GoogleEarth™; **b)** Digitalización de los movimientos en ArcGIS.

3.2. Factores determinantes de la estabilidad

Los factores condicionantes o determinantes de la estabilidad, cuya presencia, ausencia o forma en la que se presentan condicionan la estabilidad sin que el movimiento en sentido estricto se inicie (equilibrio límite), determinan la presencia espacial de los movimientos de ladera y están controlados tanto por la naturaleza del terreno (litología, textura, estructura, discontinuidades, etc.) como por la morfología de la ladera (pendiente, rugosidad, exposición, altitud, curvatura, etc.) (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2011; Costanzo *et al.*, 2012).

Para el procesado mediante SIG, las características del terreno (naturaleza del terreno y morfología de la ladera)

se expresaron en forma de modelos digitales del terreno (MDT) en formato ráster (tamaño de píxel de 5 m) que representan los factores que pueden determinar la estabilidad. Los factores que controlan el comportamiento mecánico de la ladera y la naturaleza del terreno como por ejemplo la litología, discontinuidades, fallas, contactos, etc., se generan a partir de los correspondientes mapas temáticos, por lo que los datos para su elaboración se obtienen de las agencias que facilitan dicha información, en este caso del Instituto Geológico y Minero de España IGME (GEODE, 2017). Los factores morfométricos tales como pendiente, curvatura, orientación de la ladera, etc. que describen la morfología de la ladera se calculan a partir

del modelo digital de elevaciones MDE, es decir, son mapas derivados del MDE. En este caso el MDE de la zona de estudio se generó con una precisión de 5 m (tamaño de píxel) a partir de los datos a escala 1:10.000 de la Base Cartográfica de Andalucía 1:10.000 (BCA10, 2016) (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía). Tanto las variables espaciales (factores) cualitativas nominales (por ejemplo el mapa litológico) como las cuantitativas (por ejemplo el mapa de pendientes) se dividieron en clases para el análisis estadístico de correlación que se lleva a cabo. El método de clasificación empleado, donde procedía, (variables cuantitativas) fue el de roturas naturales, (Natural Breaks) (ESRI, 2012) basado en las diferencias entre pares de datos para establecer los valores límites entre clases y posteriormente redondeando al entero más próximo para su representación efectiva en forma de mapa (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2017).

Para identificar los factores que determinan la distribución espacial de los movimientos de ladera se analiza el grado de asociación espacial entre los factores determinantes y la zona de rotura de los mismos, mediante un contraste de hipótesis según las tablas de contingencia resultantes del análisis cruzado entre estas dos variables (factores determinantes y movimientos de ladera). Como quiera que en la zona de estudio los factores determinantes fueron analizados con anterioridad, la selección de los mismos se basó en los trabajos de Costanzo (2012) y Costanzo *et al* (2012). De esta forma, para el análisis de la susceptibilidad en la zona se emplearon 4 factores determinantes como los mejor correlacionables con el inventario: 3 derivados del MDE (pendiente, altitud y orientación de la ladera) y otro temático (litología). En cualquier caso, pendiente y litología son los factores más considerados y prácticamente recurrentes en la bibliografía (e.g. Glade *et al.*, 2005; Van Westen *et al.*, 2006; Corominas y Moya, 2008)

3.2.1. Factores relacionados con el MDE

El modelo digital de elevaciones es una superficie ráster casi continua que ofrece información acerca de la coordenada z (altitud) en cualquier punto de esa superficie. A partir del MDE se obtienen las características morfológicas y morfométricas del terreno como lo son la pendiente, exposición, iluminación, curvatura, etc. Como se ha comentado con anterioridad, para el presente trabajo se obtuvo un MDE de la zona de estudio con una resolución de 5 m (tamaño de píxel de 5x5 m) a partir de los datos a escala 1:10.000 de la Base Cartográfica de Andalucía 1:10.000 (BCA10, 2016) y de las herramientas de geoprocésamiento espacial y 3D del software ArcGIS 10 (ESRI, 2012).

- **Altitud:** la altitud (o elevación) se puede considerar un factor determinante no independiente al estar relacionado con otros factores que en determinados casos pueden resultar más difíciles de medir como por ejemplo la temperatura o la precipitación media. El mapa de alturas, altitud o elevaciones (ver figura 11 y tabla 2) consiste en una reclasificación del MDE, que es una superficie ráster continua y se transforma en discreta mediante la reclasificación. Según la distribución de alturas del área de estudio,

se dividió el MDE en 4 clases con intervalos aproximados de 50 metros, comprendidos entre la altura mínima de la zona de estudio (730 m) y la máxima (950 m). El mapa de elevaciones quedó definido, por tanto, por las siguientes clases de altura:

Clase 1:	comprendida entre 730 y 800 metros
Clase 2:	comprendida entre 800 y 850 metros
Clase 3:	comprendida entre 850 y 900 metros
Clase 4:	comprendida entre 900 y 950 metros

- **Pendiente:** la pendiente es el gradiente de inclinación de la línea de máxima pendiente tangente al terreno en un punto respecto a la horizontal. Se suele expresar en porcentaje o en grados sexagesimales. Para el presente trabajo se dividió la zona de estudio en 5 clases de pendiente con intervalos definidos de forma estadística mediante el método de “Natural Breaks” ajustándolo al número entero más próximo, de tal forma que el mapa de pendientes (ver figura 11 y tabla 2) quedó definido por las siguientes clases de pendiente:

Clase 1:	pendiente suave	comprendida entre 0 y 5 grados
Clase 2:	pendiente moderada	comprendida entre 5 y 15 grados
Clase 3:	pendiente fuerte	comprendida entre 15 y 25 grados
Clase 4:	pendiente muy fuerte	comprendida entre 25 y 35 grados
Clase 5:	pendiente sub-vertical	comprendida entre 35 y 90 grados

- **Orientación:** la orientación o exposición es el ángulo que forma la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al norte geográfico, medido en sentido de las agujas del reloj. La relación de la orientación con los movimientos de ladera es indirecta, de igual forma que la altitud, ya que las condiciones de umbría y solana determinan por ejemplo la humedad superficial del terreno. El mapa de exposición (ver figura 11 y tabla 2) se dividió en las siguientes 5 clases:

Clase 1:	superficie plana	azimut entre -1 y 0 grados
Clase 2:	orientación Norte	azimut entre 315 y 45 grados
Clase 3:	orientación Este	azimut entre 45 y 135 grados
Clase 4:	orientación Sur	azimut entre 135 y 225 grados
Clase 5:	orientación Oeste	azimut entre 225 y 315 grados

3.2.2. Factores temáticos (no relacionados con el MDE)

Otros factores que influyen sobre la estabilidad son aquellos que determinan la respuesta geomecánica del terreno y que no derivan del MDE. En este caso, el mapa temático de referencia, utilizado para el análisis, es el mapa litológico.

- **Litología:** el mapa litológico se confeccionó a partir del mapa geológico digital continuo de España 1:50.000 (GEODE, 2017) (ver figura 2). Para la elaboración del mapa litológico es recomendable agrupar las litologías en complejos litológicos según

afinidades cualitativas de resistencia a la rotura de los materiales (fundamentalmente cohesión y ángulo de rozamiento interno) que en definitiva condicionan en última instancia la estabilidad (UNESCO, 1976). En este caso, dado que en la zona de estudio únicamente afloran tres (3) litologías, cada una con comportamiento geomecánico propio, el mapa litológico (ver figura 11 y tabla 2) coincide con el mapa geológico, de tal forma que se diferenciaron los siguientes complejos litológicos:

Unidad 1:	limos micáceos, arenas y gravas,	corresponde a la formación Cenes-Jun
Unidad 2:	conglomerados y arenas,	corresponde a la formación Alhambra
Unidad 3:	arcillas rojas, gravas y arenas,	corresponde a material aluvial

3.3. Evaluación de la susceptibilidad a los de movimientos de ladera

La zonación de la susceptibilidad se basó en el análisis cruzado entre los factores determinantes de la estabilidad y la ocurrencia espacial de movimientos de ladera, a partir de un análisis estadístico bivalente (análisis condicional). Inicialmente se establecieron todas las posibles combinaciones entre las clases de factores determinantes de forma que cada combinación de clases de altitud, pendiente, orientación y litología representa una UCU (Unique Condition Unit). Cada UCU equivale a la unidad de cartografía básica para las cuales el modelo proporciona un valor de susceptibilidad (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2017; Jiménez-Perálvarez, 2018a; 2018b).

La probabilidad que una UCU concreta esté afectada por movimientos de ladera (ML), según el teorema de Bayes sobre análisis condicional ($P[ML|UCU]$), viene

determinada por la relación entre la probabilidad que ocurran los dos eventos simultáneamente ($P[ML \cap UCU]$) y la probabilidad de ocurrencia del evento condicionado ($P[UCU]$). La susceptibilidad a los movimientos de ladera se expresa como su probabilidad espacial de ocurrencia, esto es, la probabilidad que un punto situado en el espacio esté afectado por movimientos de ladera. Al trabajar con datos espaciales las frecuencias de ocurrencia de un evento se cuantifican preferentemente en términos espaciales, es decir áreas en lugar de número de casos.

Las validaciones de este tipo de análisis estadísticos espaciales devuelven mejores resultados considerando la frecuencia de ocurrencia de un evento, en este caso movimientos de ladera, en términos espaciales (unidades de longitud al cuadrado; extensión o área de los movimientos) que en número bruto de movimientos (número de casos); dado que, por ejemplo, un gran deslizamiento profundo puede afectar a más terreno que varios deslizamientos pequeños y superficiales. En otras palabras, este tipo de análisis considera más susceptible a los movimientos de ladera una zona que, por ejemplo, tenga un 10 % de su extensión afectada aunque sea por un solo movimiento de ladera, que otra equivalente que tenga un 5 % de su extensión afectada por varios movimientos. De esta forma la probabilidad $P[ML|UCU]$ se puede calcular mediante la siguiente expresión [ecuación 1]:

$$P[ML | UCU] = \frac{P[ML \cap UCU]}{P[UCU]} = \frac{\text{Área}[ML \cap UCU]}{\text{Área}[UCU]} \quad [1]$$

En consecuencia, la probabilidad espacial de ocurrencia de movimientos de ladera en cada UCU varía entre 0 y 1, donde 1 representa que toda el área ocupada por esa combinación de clases de factores, esto es el área de la UCU, está afectada por movimientos, es decir $P[ML|UCU] = 1$; y 0 significa que no hay evidencias de movimientos en esa UCU, o lo que es lo mismo $P[ML|UCU] = 0$

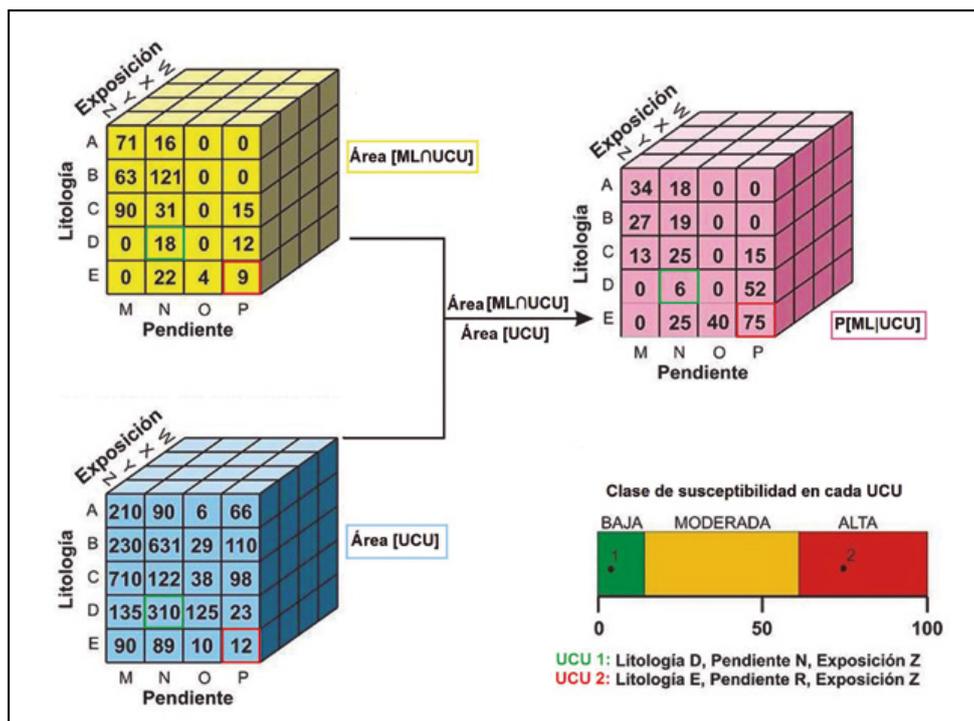


Figura 4. Evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG (modificado de Irigaray *et al.*, 2007).

(figura 4) (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2017; Jiménez-Perálvarez, 2018a; 2018b).

Finalmente, aunque el mapa de susceptibilidad expresa la probabilidad de ocurrencia espacial de los movimientos de ladera, el mapa resultante se zonificó según 4 descriptores (clases cualitativas de susceptibilidad) basadas en dicha probabilidad (Fell *et al.*, 2008). Cada clase de susceptibilidad, de baja a muy alta, se clasificó de manera supervisada según el método estadístico de “Natural Breaks” redondeando al número entero más próximo para su representación en forma de mapa (Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2009; 2011).

3.4. Validación de los mapas de susceptibilidad

La capacidad del mapa de susceptibilidad para predecir la ocurrencia de movimientos de ladera se estimó mediante técnicas de correlación espacial y medidas del grado de ajuste [ecuación 2] entre un conjunto de datos determinados (movimientos de ladera en este caso) y el correspondiente mapa (Chung y Fabbri, 2003; Irigaray *et al.*, 2007; Jiménez-Perálvarez *et al.*, 2009; 2011). Consecuentemente, la asociación entre el inventario y el mapa de susceptibilidad se calculó mediante el grado de ajuste (GA) según la siguiente expresión:

$$GA_i = \frac{(m_i/s_i)}{\Sigma(m_i/s_i)} \quad [2]$$

donde m_i es el área ocupada por movimientos de ladera en la clase de susceptibilidad i , y s_i es el área de la clase de susceptibilidad i .

El grado de ajuste para cada clase de susceptibilidad representa el % de movimientos de ladera en esa clase (en términos espaciales, es decir el área ocupada por movimientos de ladera). La eficiencia del modelo será validada cuando el grado de ajuste más bajo aparezca en las clases de susceptibilidad igualmente bajas (error relativo), y el más alto en las clases de susceptibilidad alta y muy alta (precisión relativa).

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este trabajo se muestran a continuación cronológicamente según la metodología descrita.

4.1. Inventario de movimientos de ladera

El inventario realizado en este trabajo evidenció la presencia en la zona de estudio de 70 movimientos de ladera compuesto según los términos y clasificaciones internacionalmente aceptadas (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Hungr *et al.*, 2014) por 29 deslizamientos, 26 flujos de derrubios y 15 desprendimientos (figura 5). La zona de influencia (zona de rotura más acumulación) del total de los movimientos inventariados ocupa una superficie de 33 ha, por lo que al menos el 10,5 % de la zona de estudio (3,16 km²) esta afectada por movimientos de ladera (ver tabla 1 y figura 9). Igualmente se pudo constatar que los movimientos de ladera tienen lugar principalmente en los conglomerados y arenas de la Formación Alhambra (como por otra parte es de esperar ya que es la litología predominante en la zona de estudio) a alturas inferiores a 800 m, cuando la pendiente está comprendida entre 15 y 25° y está orientada al suroeste.

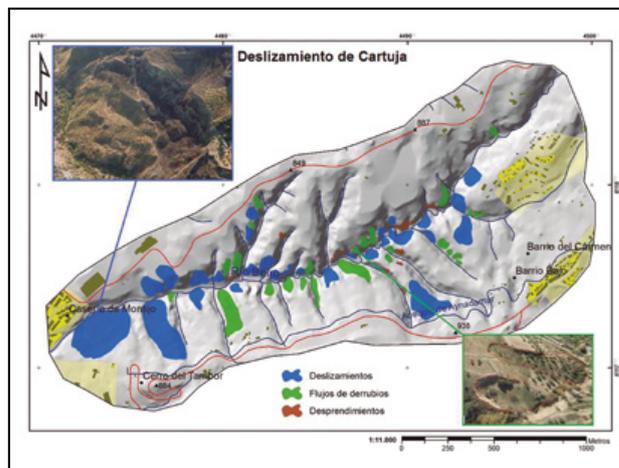


Figura 5. Inventario de movimientos de ladera en la zona de estudio.

Los deslizamientos son el tipo de movimientos de ladera predominantes en la zona de estudio, tanto por número de movimientos como por superficie afectada por los mismos. Representan el 41,4 % del número total de movimientos de ladera inventariados y el 74,1 % de la superficie movilizada, de forma que el 7,8 % del área de estudio está afectada por deslizamientos (ver tabla 1 y figura 9). Se puede deducir que son movimientos que implican a gran extensión de terreno en comparación con las demás tipologías. De hecho, al margen de los grandes deslizamientos profundos, (hay inventariados 4 deslizamientos de más de 1 ha de extensión) presentan una extensión media de 0,4 ha y están comprendidos entre 1 ha y 600 m². La gran mayoría son deslizamientos traslacionales superficiales del subtipo “debris slide” (figura 6a) lo que traducido sería “deslizamiento de derrubios” si bien es recomendable, por frecuente, el uso del término en inglés. Es decir, son movimientos de ladera donde hay una superficie de rotura bien definida pero la masa deslizada no se desplaza en bloque con apenas deformación interna si no que, debido a la falta de cohesión de los materiales en los que se produce, estos se desmoronan y deslizan en forma de derrubios, dada su granulometría. La superficie de rotura suele coincidir con el contacto entre el material “sano” no meteorizado y la parte superficial alterada (que es la que se moviliza, desplaza y acumula en forma de derrubios). Esto no ocurre, sin embargo, en los grandes deslizamientos profundos (más de 10 m de profundidad) como es el caso del deslizamiento de Cartuja (figura 6b), donde las grandes dimensiones del deslizamiento y el volumen de material implicado (más de 10 m de profundidad y más 6 ha de superficie) implica que la masa deslizada mantenga cierta coherencia y deslice en bloque de forma escalonada generando numerosos escarpes secundarios así como las típicas morfologías de un deslizamiento idealizado (escarpes laterales, grietas de tracción, etc.). Todos los deslizamientos se han descrito en los conglomerados y arenas de la Formación Alhambra, si bien no se puede concluir que estos materiales sean más propensos a la generación de deslizamientos ya que es la litología predominante, por mucho, en el área de estudio (ver apartado 2: Contexto geológico y geográfico). Se comprueba que los deslizamientos tienen lugar principalmente en pendientes comprendidas entre 15 y 25°, cuando la orientación de ladera es oeste y la altura está comprendida entre 730 y 800 metros.

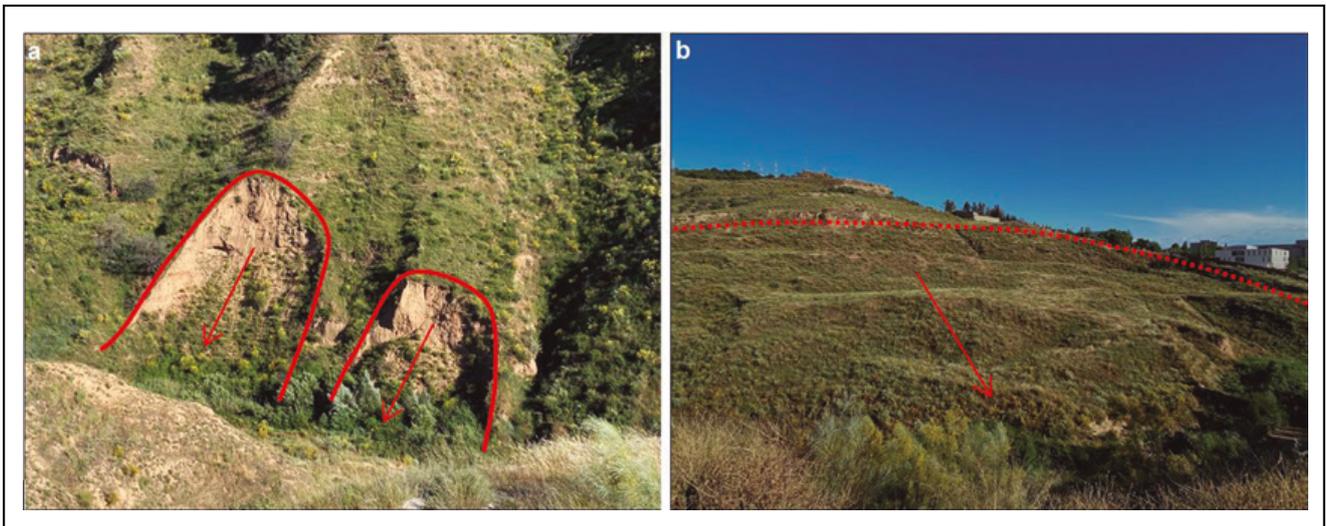


Figura 6. Deslizamientos en la zona de estudio. **a)** Debris slides superficiales en conglomerados y arenas de la Formación Alhambra sobre el cauce del río Beiro; **b)** Deslizamiento de Cartuja, vista de campo (los grandes deslizamientos se muestran más evidentes en vista aérea o satelital ver vista aérea en figura 5).

Los flujos de derrubios son el segundo tipo de movimientos de ladera en orden de importancia en la zona de estudio. Constituyen el 37,1 % del número total de movimientos de ladera inventariados y el 23,8 % de la superficie movilizada; el 2,5 % del área de estudio está afectada por flujos de derrubios (ver tabla 1 y figura 9). Se deduce por tanto, que son movimientos de ladera que implican menos extensión de terreno (por movimiento) en comparación con los deslizamientos. Exceptuando 2 grandes flujos que incluso se podrían considerar movimientos complejos, la extensión de los flujos varía entre 378 m² y 0,46 ha, con un valor medio de 0,2 ha. Los flujos de derrubios de la zona son movimientos superficiales (menos de 2 metros de profundidad) que se originan según una superficie de rotura (o área fuente) de forma semicircular en cabecera (coincidiendo con el contacto entre suelo meteorizado y suelo no alterado) y que evolucionan pendiente abajo a través del canal de erosión mediante el desplazamiento relativamente rápido de una masa movilizada incoherente de derrubios, resultando en su típica morfología longitudinal (figura 7). Según los resultados obtenidos, los flujos de derrubios se desarrollan en pendientes superiores a 35°. Los flujos de derrubios del área tienen lugar principalmente en conglomerados y arenas de la Formación Alhambra como es de esperar, pero también el único movimiento descrito en arenas y gravas de la Formación Cenés-Jun corresponde a un flujo de derrubios (aunque evidentemente no es una muestra representativa para extraer conclusiones respecto a la susceptibilidad a los



Figura 7. Flujo de derrubios superficial en conglomerados y arenas de la Formación Alhambra, sobre el cauce del río Beiro en la zona de estudio.

flujos de este material). Los flujos de la zona se generan preferentemente en orientaciones sur y alturas comprendidas entre 800 y 850 metros.

Los últimos movimientos en orden de relevancia, por número y extensión y no por su potencial peligrosidad y riesgo, son los desprendimientos. El 21,5 % del número total de movimientos de ladera inventariados en la zona son desprendimientos, aunque representan el 2,1 % de la superficie movilizada de forma que tan solo el 0,22 % del área de estudio está afectada por desprendimientos (ver tabla 1 y figura 9). Por lo general, los desprendimientos generan depósitos de poca extensión, en la zona de estudio su extensión varía entre 215 y 877 m², con una extensión media de 474 m² (considerando el frente de desprendimiento y la zona de acumulación). Los desprendimientos detectados, análogamente a los deslizamientos y flujos de derrubios, se han descrito como es esperable en los conglomerados y arenas de la Formación Alhambra como ya se comentó con anterioridad. Sin embargo, dada la naturaleza del mecanismo de rotura y contrariamente a los flujos de derrubios y deslizamientos, los desprendimientos se producen, sobre todo, en aquellas zonas donde el material está menos meteorizado. En este caso los desprendimientos se desarrollan sobre suelos sobreconsolidados con un comportamiento geomecánico asimilable a rocas poco resistentes. De esta forma, los desprendimientos se generan aprovechando zonas de debilidad del material como grietas, diaclasas o cualquier otro tipo de discontinuidad del terreno, a favor de pendientes pronunciadas producidas normalmente por la sobre-excavación del cauce (figura 8). Los desprendimientos



Figura 8. Desprendimiento de pequeñas dimensiones en conglomerados y arenas de la Formación Alhambra, sobre uno de los arroyos vertientes al cauce del río Beiro en la zona de estudio.

Tabla 1. Distribución de movimientos de ladera en la zona de estudio

Tipología	n_i	$n_i/\sum n_i$ (%)	Máximo Sm_i (ha)	Mínimo Sm_i (m ²)	Media Sm_i (ha)	Superficie afectada por movimientos de ladera		
						Total Sm_i (ha)	Sm_i/Sm (%)	Sm_i/A (%)
Deslizamientos	29	41,4	6,2	603	0,85	24,7	74,1	7,80
Flujos de derrubios	26	37,1	1,9	378	0,30	7,92	23,8	2,50
Desprendimientos	15	21,5	0,1	214	0,05	0,71	2,1	0,22
INVENTARIO (Sm)	70	100,0	6,2	603	0,48	33,31	100,0	10,52
						<i>Superficie sin Movilizar</i>	283,0	89,5
						Superficie Total (A)	316,32	100,0

n_i Número de movimientos por tipología

Sm_i Superficie movilizada por tipología de movimiento

Sm Superficie total movilizada ($=\sum Sm_i$) = 33,311 ha

A Superficie total de la zona de estudio = 316,318 ha

tienen lugar principalmente en pendientes superiores a 35°, cuando la orientación de ladera es sur y la altura está comprendida entre 800 y 850 metros.

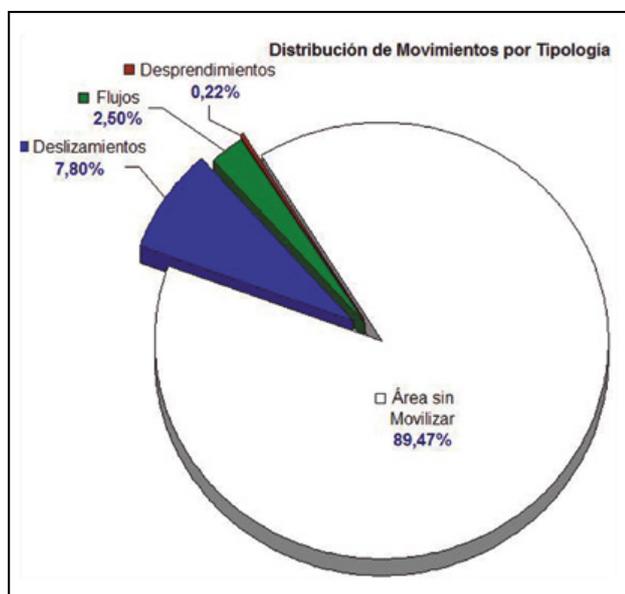


Figura 9. Distribución de los movimientos de ladera en la zona de estudio; superficie afectada por movimientos de ladera (o superficie movilizada) respecto al área total de la zona de estudio, mostrada por tipo de movimiento.

4.2. Factores determinantes de la estabilidad

El intervalo de altura más representado en la zona de estudio es el comprendido entre 850 y 900 m, que representa casi el 40 % de la superficie total del área (ver figura 11a), siendo 847 m la altura media de la zona. Sin embargo, como es previsible, la mayor parte de movimientos de ladera se concentran en altitudes menores, ya que los movimientos se suelen generar en las inmediaciones del cauce (el cual representa las cotas menores de la zona) donde las pendientes son mayores según la geomorfología típica del área. De esta forma, el 50 % de la superficie movilizada se concentra entre 730 y 800 m, hasta el punto de que el 28 % de esa clase de altura está afectada por movimientos de ladera.

La mayor parte de la zona de estudio (el 31,5 %) tiene una pendiente comprendida entre 5 y 15°, porcentaje que asciende hasta el 62 % si se considera la

pendiente comprendida entre 5 y 25°, (ver figura 11b). La pendiente media de la zona es 17 grados. Se puede comprobar que gran parte de la zona de estudio no presenta fuertes pendientes, ya que, como se ha comentado con anterioridad, se trata de una zona pediplanizada donde las pendientes fuertes (de hasta 66°) se ciñen al entorno del cauce principal que presenta un fuerte encajamiento. La mayor parte de los movimientos se generan cuando la pendiente es superior a 15°, habiendo una mayor concentración, en pendientes comprendidas entre 15 y 25° donde el 27,5 % de esa clase se encuentra movilizada.

El área presenta un 25,5 % de superficie plana, lo que supone un porcentaje anormalmente alto para una zona donde se manifiesta una alta incidencia de movimientos de ladera. Esto es debido a que las características geomorfológicas de la zona no corresponden a la de una zona típicamente montañosa sino a una pedillanura donde posteriormente se han encajado los cauces (figura 10). En cualquier caso la **orientación** de las laderas predominante es oeste, seguida de la sur (figura 11c), siendo N212E (suroeste) la orientación media. En cuanto a la **litología** de la zona, como se ha comentado con anterioridad en el apartado 2. Contexto geológico y geográfico, donde se puede consultar una descripción más detallada de la misma, se comprueba que el mapa litológico (figura 11d) está compuesto casi exclusivamente (~87 %) por conglomerados y arenas donde como es de esperar se concentran la práctica totalidad de los movimientos de ladera; y en menor medida por otro complejo de arenas y gravas (~12 %).

4.3. Evaluación de la susceptibilidad a los de movimientos de ladera

La susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera se muestra en 4 niveles según su probabilidad espacial de ocurrencia (figura 12 y tabla 3). Los valores límites entre las diferentes clases (niveles) de susceptibilidad se establecieron según las diferencias entre pares de datos por el método de “Natural Breaks”, y posteriormente redondeando al entero más próximo para una mejor representación de los resultados. De esta forma, en función de la probabilidad espacial de ocurrencia de los movimientos, se distinguieron las siguientes clases de susceptibilidad:

Susceptibilidad baja	Probabilidad espacial de ocurrencia $P \leq 5\%$
Susceptibilidad moderada	Probabilidad espacial de ocurrencia $5\% \leq P \leq 15\%$
Susceptibilidad alta	Probabilidad espacial de ocurrencia $15\% \leq P \leq 25\%$
Susceptibilidad muy alta	Probabilidad espacial de ocurrencia $P \geq 25\%$



Figura 10. Visión general de la zona de estudio donde se aprecia el encajamiento del río Beiro y las fuertes pendientes de sus vertientes, en contraste con la superficie plana de pendiente suave del glacis.

La susceptibilidad general de la zona a los movimientos de ladera es predominantemente baja ya que la clase de susceptibilidad baja ocupa el 46,4 % del área, que aumenta hasta el 74,1 % si consideramos las clases bajas de susceptibilidad (baja y moderada). Por tanto, el 25,9 % de la zona se encuentra en las clases altas de susceptibilidad, (alta y muy alta) reservándose 9,7 % para la clase muy alta.

Las zonas de mayor susceptibilidad coinciden con las inmediaciones del cauce del río Beiro, mientras que las zonas de cotas más altas son las menos propensas a la generación de movimientos. Como quiera que estas zonas elevadas de pendientes suaves son las más urbanizadas, hay muchas infraestructuras emplazadas en zonas poco susceptibles como por ejemplo viviendas de la barriada El Fargue, la carretera A-4002 o la propia acequia de Aynadamar. Sin embargo, las zonas donde se emplazan parte de las viviendas del Caserío de Montijo y parte de la carretera GR-3102 hacia Alfacar, si que se encuentran en las inmediaciones de las zonas con una probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera más alta.

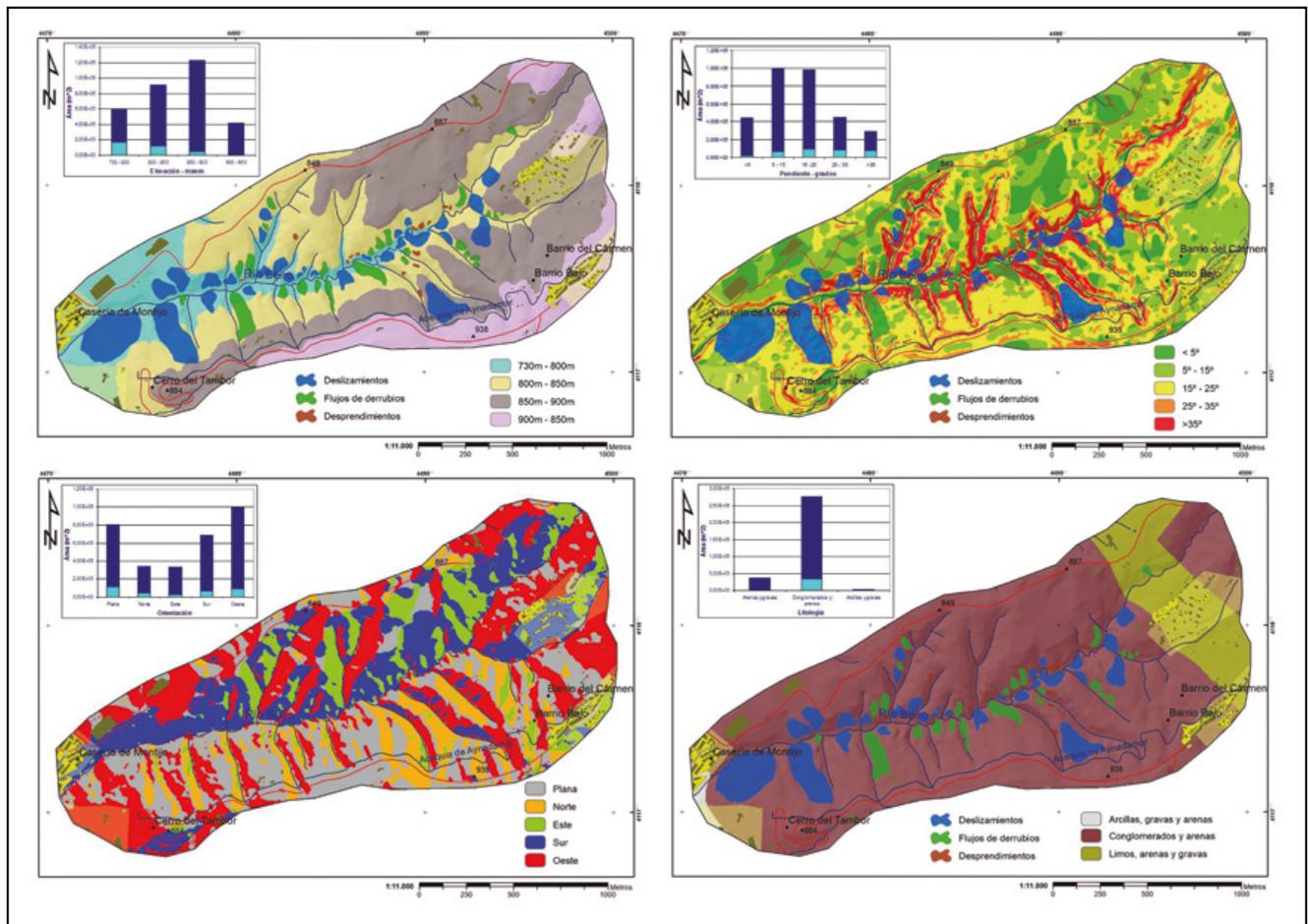


Figura 11. Factores determinantes de la zona de estudio. **a)** Mapa de elevaciones; **b)** Mapa de pendientes; **c)** Mapa de orientaciones; **d)** Mapa de complejos litológicos. El histograma de cada mapa muestra la distribución areal de clases de cada factor donde, en azul claro, se resalta la fracción afectada por movimientos de ladera en cada clase.

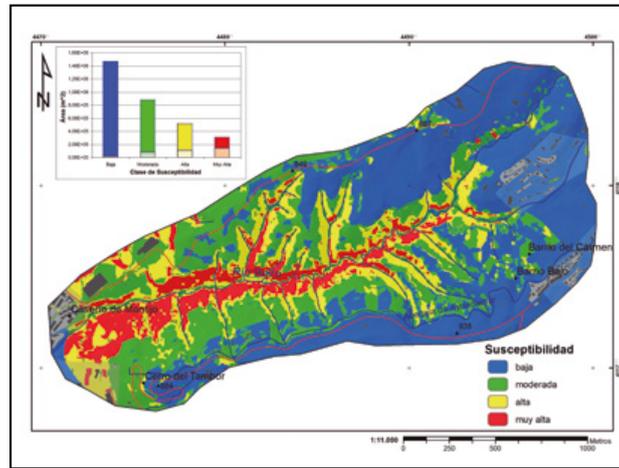


Figura 12. Mapa de susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera en la zona de estudio. El histograma muestra la distribución areal de las clases de susceptibilidad donde, en tonalidad clara, se resalta la fracción afectada por movimientos.

Tabla 2. Distribución areal de las clases de los factores determinantes en la zona de estudio y distribución de movimientos de ladera en cada clase

	Área			Movilizado		% respecto a	% respecto a
	m ²	%	% acum.	m ²	%	superf. mov.	superf. total
Altitud (msnm)							
730 - 800	594900	18,81%	18,81%	168600	5,33%	50,67%	28,34%
800 - 850	913800	28,89%	47,70%	121100	3,83%	36,39%	13,25%
850 - 900	1234075	39,02%	86,72%	43050	1,36%	12,94%	3,49%
900 - 950	420075	13,28%	100,00%	0	0,00%	0,00%	0,00%
Total	3162850	100,00%		332750	10,52%	100,00%	10,52%
Litología							
Arenas y gravas	373450	11,81%	11,81%	1950	0,06%	0,59%	0,52%
Conglomerados y arenas	2766575	87,47%	99,28%	330800	10,46%	99,41%	11,96%
Arcillas y gravas	22825	0,72%	100,00%	0	0,00%	0,00%	0,00%
Total	3162850	100,00%		332750	10,52%	100,00%	10,52%
Orientación							
Plana	804750	25,44%	25,44%	112175	3,55%	33,71%	13,94%
Norte	340350	10,76%	36,20%	42800	1,35%	12,86%	12,58%
Este	335050	10,59%	46,80%	24450	0,77%	7,35%	7,30%
Sur	686725	21,71%	68,51%	64025	2,02%	19,24%	9,32%
Oeste	995975	31,49%	100,00%	89300	2,82%	26,84%	8,97%
Total	3162850	100,00%		332750	10,52%	100,00%	10,52%
Pendiente (grados)							
< 5	445225	14,08%	14,08%	15350	0,49%	4,61%	3,45%
5 - 15	995350	31,47%	45,55%	65900	2,08%	19,80%	6,62%
15 - 25	980075	30,99%	76,53%	91650	2,90%	27,54%	9,35%
25 - 35	451500	14,28%	90,81%	84200	2,66%	25,30%	18,65%
> 35	290700	9,19%	100,00%	75650	2,39%	22,73%	26,02%
Total	3162850	100,00%		332750	10,52%	100,00%	10,52%

4.4. Validación de los mapas de susceptibilidad

La calidad del mapa de susceptibilidad se evaluó mediante una calibración interna ya que a tal efecto se empleó el inventario utilizado para el análisis. La tabla 3 muestra el porcentaje afectado por movimientos en cada clase de susceptibilidad (cociente m_i/t_i en la expresión del grado de ajuste, ver apartado 3.4 Validación de los mapas de susceptibilidad). Si este cociente se divide por la sumatoria de cocientes para todas las clases de susceptibilidad, se obtiene el grado de ajuste para cada clase (figura 13).

El grado de ajuste para las clases altas de susceptibilidad (alta y muy alta) alcanza el 87 %, mientras que para la baja (error relativo), que representa el 46 % de la zona de estudio, apenas llega al 1 %. Por tanto, la asociación entre las clases de susceptibilidad y los movimientos de ladera garantizan la validez y capacidad de predicción de movimientos del mapa.

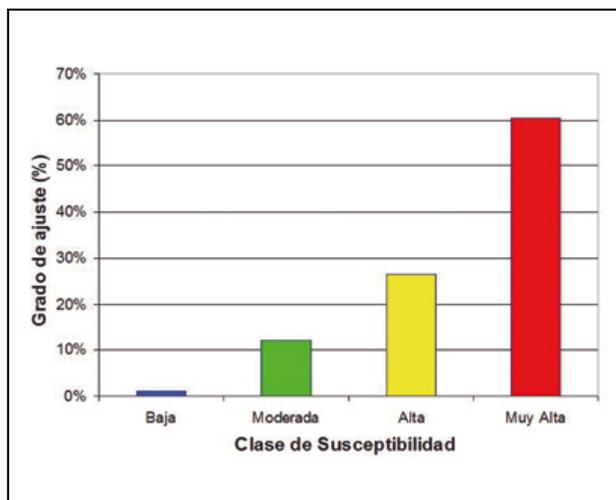


Figura 13. Grado de ajuste. Distribución relativa de los movimientos de ladera en las diferentes clases de susceptibilidad.

Tabla 3. Distribución areal de las clases de susceptibilidad y movimientos de ladera por clase

Nivel de Susceptibilidad	Distribución areal					
	m ²	km ²	%	% acumulado	% movilizado	Grado de ajuste
Baja	1466925	1,47	46,38	46,38%	0,80%	1,06%
Moderada	876600	0,88	27,72%	74,10%	9,03%	11,98%
Alta	512575	0,51	16,21%	90,30%	19,99%	26,51%
Muy alta	306750	0,32	9,70%	100,00%	45,57%	60,44%
Total	3162850	3,16	100,0%	--	10,54%	--

5. DISCUSIÓN

La evaluación de la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera realizada en este trabajo se basa en un escenario donde se asume que estos ocurren bajo las mismas condiciones geomorfológicas y climáticas que en el pasado. Los resultados invitar a discutir un par de aspectos.

El análisis de los factores determinantes plantea cierto grado de incertidumbre. En cuanto a litología, los conglomerados y arenas de la formación Alhambra cubren la mayor parte de la zona de estudio, por lo que el hecho que la práctica totalidad de los movimientos de ladera tengan lugar en esta litología no se puede interpretar como que ésta es más propensa a la generación de movimientos que las demás litologías que afloran en mucha menor medida en el área. No tanto por la presencia masiva de la primera si no, más bien, por la ausencia de éstas últimas. En lo referente a la orientación de las laderas y la presencia de superficie plana de pendiente suave en gran parte de la zona estudio, se comprueba que se han descrito movimientos de ladera en pendientes quizás demasiado bajas como para generar movimientos.

Éste sea, quizás, uno de los aspectos más importantes a analizar en detalle en trabajos posteriores. En cualquier caso se interpreta como debido a varios factores basados tanto en la propia dinámica de los movimientos de ladera como en las limitaciones del modelo, a saber: aunque el factor condicionante para que se genere un movimientos puede ser una orientación de la ladera y/o una pendiente determinada, el escarpe principal de movimiento remonta una distancia, (delimitando la masa que se moviliza) de

forma que esa distancia que remonta se encuentra en una superficie de pendiente suave diferente a la que condicionó su presencia; incluso la propia masa deslizada puede tener una superficie plana, limitándose la pendiente más elevada a los escarpes del deslizamiento.

Por otra parte se comprueba que, dependiendo del contexto morfológico, el modelo interpreta superficies planas en determinados puntos donde la pendiente puede alcanzar casi 15°. Esta observación conecta con el hecho que, aunque el grado de ajuste entre las clases de susceptibilidad y los movimientos de ladera es muy alto, hay un porcentaje en las clases de susceptibilidad baja y moderada. Este error relativo es debido al error acumulado en la técnica (Irigaray *et al.*, 2007) que tiene su origen principalmente en los factores determinantes y, a veces, en problemas de ajuste en la georreferenciación (los movimientos de ladera se cartografían sobre una base de ortofografía aérea que no siempre coincide con aquella usada para generar el MDE). Se explica en parte, por tanto, por la limitación del MDE y sus mapas derivados para expresar fielmente la forma del terreno y fundamentalmente también por problemas de escala. Por ejemplo, la escala del mapa geológico (1:50.000) es mayor que la escala base de trabajo (1:10.000) y, por consiguiente, el error en el trazado de un contacto puede asignar errores litológicos a los movimientos.

Estos aspectos comentados se consideran en cierta medida puntos débiles del trabajo ya que incorporan cierto grado de incertidumbre que se puede reducir, por ejemplo, ampliando la zona de estudio. Por tanto se podrían considerar, también, como futuras líneas de investigación o puntos de partida para trabajos posteriores. En

cualquier caso estas observaciones no menoscaban la calidad de los resultados como se demuestra mediante la validación del mapa de susceptibilidad obtenida por el grado de ajuste.

6. CONCLUSIONES

La zona seleccionada para el caso de estudio en la cuenca media del río Beiro presenta una superficie 3,16 km² de los cuales el 10,5 % están afectados por movimientos de ladera; distribuidos estos últimos entre 29 deslizamientos, (7,8 %) 26 flujos de derrubios (2,5 %) y 15 desprendimientos (0,2 %). El área está constituida casi exclusivamente (~87 %) por conglomerados y arenas de la formación Alhambra, que aflora como un conglomerado heterométrico de cantos redondeados centimétricos a decimétricos de esquistos y cuarcitas embebidos en una matriz areno-arcillosa predominante de tonalidad rojiza.

Las características morfométricas de la zona derivan de su geomorfología caracterizada por un glacis o pedillanura (25,5 % de superficie plana) de pendiente suave abruptamente interrumpida por fuertes pendientes, consecuencia del encajamiento de los cauces, donde se concentran la mayor parte de los movimientos de ladera. De esta forma, la mayor parte de la zona está comprendida entre una altura de 850 y 900 m, (aunque la altura media es de 847 m) presenta pendientes entre 5 y 25°, con una pendiente media de 17° y sus laderas están orientadas preferentemente al oeste, siendo N212E (suroeste) la orientación media.

Los movimientos de ladera de la zona de estudio son principalmente movimientos superficiales, mayormente deslizamientos, que se generan preferentemente entre 730 y 800 m, cuando la pendiente está comprendida entre 15 y 25° y en laderas orientadas al suroeste. Esta superficie de rotura superficial suele coincidir con el contacto entre suelo meteorizado y suelo no alterado. De cualquier modo, en la zona también es susceptible a deslizamientos profundos como el deslizamiento de Cartuja. Los movimientos de ladera tienen lugar principalmente en los conglomerados y arenas de la formación Alhambra, si bien este último aspecto es hasta cierto punto esperable y, por consiguiente, no muy concluyente, ya que se trata de la litología predominante en la zona de estudio.

La susceptibilidad general de la zona a los movimientos de ladera, obtenida tras el análisis cruzado entre los factores condicionantes de la estabilidad y la frecuencia de ocurrencia espacial de los movimientos, es predominantemente baja a moderada (74,1 % de la zona en sus respectivas clases de susceptibilidad $P \leq 15$ %). Estos resultados son indicativos de que el mapa obtenido no es conservativo, si no que delimita las zonas de máxima susceptibilidad en áreas reducidas. Sin embargo, la zona presenta un 16,2 % de su superficie con una susceptibilidad alta, y un 9,7 % muy alta (probabilidad de ocurrencia ≥ 25 %) coincidiendo con sectores se emplazan parte de las viviendas del Caserío de Montijo y parte de la carretera GR-3102 hacia Alfacar. Estas circunstancias justificarían el estudio detallado y control del riesgo por movimientos de ladera como medida preventiva frente a los efectos negativos que puedan causar los movimientos de ladera en episodios de lluvias extraordinarias o terremotos que activaran nuevos movimientos o reactivaran parcialmente algunos de los existentes.

Estas conclusiones se basan en la validez de resultados obtenidos según se desprende de calibración del mapa de susceptibilidad realizada mediante el grado de ajuste. La asociación entre las clases de susceptibilidad y los movimientos de ladera, (precisión relativa del 87 %) confirman el rendimiento predictivo de los cuatro descriptores de susceptibilidad y garantizan tanto la fiabilidad del análisis como la validez de mapa y su capacidad de predecir la distribución espacial de los movimientos de ladera.

7. REFERENCIAS

- BCA10 (2016). *Base Cartográfica de Andalucía 1:10.000*, 2016. Hoja 1009, Granada. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA). Sevilla: IECA.
- Braga, J.C., Martín, J.M., y Quesada, C. (2003). Patterns and average rates of late Neogene–Recent uplift of the Betic Cordillera, SE Spain. *Geomorphology*, 50(1): pp. 3-26.
- Chung, C.-J.F., y Fabbri, A.G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30: pp. 451-472.
- Corominas, J., y Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102(3-4): pp. 193-213.
- Costanzo, D. (2012). *Statistical models for landslide susceptibility assessment: methodological issues and guidelines for Mediterranean context*. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad de Palermo; Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada.
- Costanzo, D., Rotigliano, E., Irigaray, C., Jiménez-Perálvarez, J.D., y Chacón, J. (2012). Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the GIS Matrix Method: application to the river Beiro basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: pp. 327-340.
- Cruden, D.M., y Varnes, D.J. (1996). Landslides types and processes. En Turner, A.K., y Schuster, R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academic Press Sp-Rep 247 (pp. 35-76). Washington, DC: National Academy of Sciences.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2012). *ArcGIS 10.X*. License Type: ArcInfo. Redlands (CA/USA): ESRI Inc.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., et al. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology* 102 (3-4): pp. 85-98.
- GEODE (2017). Roldán, F.J., Rodríguez-Fernández, J., Villalobos, M., et al. *Mapa Geológico Digital continuo E. 1:50.000, Zonas: Subbético, Cuenca del Guadalquivir y Campo de Gibraltar*. En GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME). <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z2600>. Consultado el 18 de mayo de 2020.
- Glade, T., Anderson, M.G., y Crozier, M.J. (eds.) (2005). *Landslide hazard and risk*. Chichester (UK): John Wiley & Sons.
- Google, LLC (2020). *Google Earth™* <https://earth.google.com/web/>. Consultado el 18 de mayo de 2020.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., et al. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Review*, 112(1-2): pp. 42-66.

Haque, U., Blum, P., y da Silva, P.F., *et al.* (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslides*, 13: pp. 1545-1554.

Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11: pp. 167-194.

InfoIGME (2020). *Visor cartográfico del IGME – InfoIGME*. <http://info.igme.es/visorweb/>. Consultado el 18 de mayo de 2020.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1988). *Mapa Geológico de España MAGNA, Hoja 1009 – Granada* (Lupiani, E., y Soria, J.M.). Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 75p., 1 Mapa escala 1:50.000

Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., y Chacón, J. (2007). Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*, 41(1): pp. 61-79.

Jiménez-Perálvarez, J.D. (2018a). Evaluación del riesgo por deslizamientos en la vertiente meridional de Sierra Nevada. En Titos, M., Luque, T., Navarro, J.M. (eds.), *I Congreso Internacional de las Montañas*. Granada, Vol 1: pp. 37-55.

Jiménez-Perálvarez, J.D. (2018b). Landslide-risk mapping in a developing hilly area with limited information on landslide occurrence. *Landslides*, 15: pp. 741-752.

Jiménez-Perálvarez, J.D., El Hamdouni, R., Palenzuela, J.A., Irigaray, C., y Chacón, J. (2017). Landslide-hazard mapping through multi-technique activity assessment: an example from the Betic Cordillera (southern Spain). *Landslides*, 14: pp. 1975-1991.

Jiménez-Perálvarez, J.D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., y Chacón, J. (2009). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. *Natural Hazards*, 50(3): pp. 571-590.

Jiménez-Perálvarez, J.D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., y Chacón, J. (2011). Landslide-susceptibility mapping in a semi-arid mountain environment: an example from the southern slopes of Sierra Nevada (Granada, Spain). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(2): pp. 265-277.

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (2016). Ortofotografía en color/bn de Andalucía del año 2016 con resolución de 0.5 metros pixel zona Norte y 0.25 metros pixel zona Sur (litoral); Ortofotografía *Digital de Andalucía 2016*. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA). Sevilla: IECA.

UNESCO (1976). Guide pour la preparation des cartes géotechniques (*Engineering geological map. A guide to their preparation*). Paris: Les Presses de l'Unesco.

Van Den Eeckhaut, M., y Hervás, J. (2012). State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*, Vols. 139/140: pp. 545-558.

Van Westen, C.J., Van Asch, T.W., y Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2): pp. 167-184.

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. En Schuster R.L., y Krizek R.J. (eds.), *Landslides: Analysis and Control*. National Research Council Sp-Rep 176 (pp. 11-33). Washington, DC: National Academy of Sciences.

Villalobos, M., y Pérez, A.B. (2012). *Geodiversidad y patrimonio geológico de Andalucía*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente.