



Universidad de Almería

Facultad de Ciencias Experimentales



TRABAJO DE FIN DE GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Modalidad de investigación

Raúl Segura Tejada

Control topográfico de los movimientos en masa en sistemas áridos acarcavados. Generación de mapas de vulnerabilidad a partir de imágenes de alta resolución espacial.

Topographic control of landslides in semiarid badland systems. Creation of landslide susceptibility maps based on high resolution images.



Yolanda Cantón Castilla
Emilio Rodríguez-Caballero

Septiembre 2019

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis directores de Trabajo de Fin de Grado, Yolanda Cantón, y especialmente, a Emilio Rodríguez-Caballero, por toda la ayuda prestada y la dedicación demostrada, además de toda la paciencia de la que han hecho gala en más de una ocasión. Me considero muy afortunado por haber trabajado con ellos este año.

Por otro lado, también cuenta con toda mi gratitud el profesorado del Grado en Ciencias Ambientales por el que he tenido la suerte de ser formado. Puedo decir de primera mano que su dedicación con el alumnado es ejemplar.

Finalmente, gracias a las amigas que he tenido la suerte de encontrar en el grado, con las que he pasado momentos fantásticos y con las que se que siempre podré contar. Y gracias, Montse, por todo lo que me has apoyado y ayudado cada día desde que nos conocemos.

Índice

1. Introducción y objetivos.....	5
2. Material y Métodos	7
2.1 Zona de estudio.....	7
2.2 Obtención de imágenes y referencias espaciales	8
2.3 Procesamiento de imágenes.....	9
2.4 Atributos topográficos	10
2.5 Análisis estadístico	11
2.6 Modelización y elaboración del mapa de sensibilidad	12
3. Resultados	13
3.1 Análisis de los atributos topográficos.....	13
3.2 Relación entre la ocurrencia de movimientos en masa y los atributos topográficos .	17
3.3 Modelización del riesgo de ocurrencia de movimientos en masa	18
4. Discusión.....	19
5. Conclusiones	22
6. Bibliografía.....	23
Anexo I: Material Suplementario trabajo fin de grado:	27

Resumen

Los movimientos en masa son procesos geológicos que consisten en el movimiento de suelo, roca, tierra, escombros o detritos a favor de la pendiente, que a menudo causan perjuicios a la sociedad y a los ecosistemas. La mayoría de los movimientos en masa ocurre durante eventos de lluvia de gran magnitud o intensidad y se sabe que están controlados por la topografía, el suelo o la vegetación, aunque la mayoría de los trabajos previos que evalúan los factores que controlan la ocurrencia de movimientos en masa corresponden con trabajos en zonas húmedas. Sin embargo, se sabe poco de los factores que controlan los movimientos en masa en ambientes áridos y semiáridos. El objetivo de este trabajo es identificar y modelizar, por medio de técnicas de teledetección, la ocurrencia de movimientos en una zona de badlands con clima semiárido situada en el SE de la península ibérica. Nuestros resultados demuestran que la ocurrencia de movimientos en masa está controlada por variables topográficas como la elevación, la orientación y la pendiente de las laderas; y por la presencia y densidad de la vegetación, que retiene agua en superficie llegando a saturarse durante eventos de gran magnitud y escasa intensidad. A partir de estas variables, obtenidas mediante técnicas geománticas, y utilizando modelos estadísticos multivariantes no paramétricos fuimos capaces de predecir de forma bastante precisa la ocurrencia de movimientos en masa y generar mapas de susceptibilidad que pueden utilizarse como puede utilizarse como herramientas de prevención a un coste bajo.

Palabras clave: Movimientos en masa, drone, topografía, vulnerabilidad, teledetección

Abstract

Landslides are geological processes that consist in the mobilization of shallow ground, rocks, debris and mud-flows downslope, with disastrous effects downslope. Most landslides are triggered by heavy rain events, but several studies revealed that other factors such as topography, soil properties and vegetation also play a key role. Most these studies were focus in wet areas, and there is little information about the main factors controlling landslide formation in arid and semi-arid environments. The aim of this work is to identify the incidence of landslides in a semiarid badlands system at the SE of Iberian Peninsula, and to develop a predictive model of landslide occurrence within this site. Our results prove that landslides are controlled by topographic variables such as elevation, slope gradient and aspect. Vegetation cover also play a key role. During rainfall events of high magnitude and low intensity, vegetation tram and retain water in the soil's surface until saturation, which favor landslide formation. Based on Digital elevation models and vegetation cover maps obtained by geomantic techniques, we developed a non-parametric multivariable model that accurately predict landslide occurrence and provide landslide susceptibility maps that may be used as low cost tools for anticipate these processes.

Key words: Landslides, drone, topography, susceptibility, remote sensing

1. Introducción y objetivos

Los movimientos en masa son desastres naturales que consisten en el movimiento de suelo, roca, tierra, escombros o detritos a favor de la pendiente, en ocasiones a gran velocidad, a lo largo de grandes extensiones de terreno y/o de forma muy abrupta (Forbes et al., 2011). Diferentes agentes como el deshielo, cambios abruptos de temperatura, terremotos, actividad volcánica o un mal uso del terreno pueden desencadenar estos procesos, pero la mayoría de los movimientos en masa ocurre en zonas con relieve escarpado durante eventos de lluvia de gran magnitud o intensidad (Iverson, 2000;). Por lo tanto, se trata de uno de los riesgos geológicos más comunes en ambientes húmedos montañosos, ya que mueven grandes cantidades de suelo, produciendo pérdidas de fertilidad y acelerando los procesos de erosión y deforestación (Dou et al., 2015a, 2015b; Koseki et al., 2006; Van Eynde et al., 2017). Además, en el caso de los movimientos en masa inducidos por episodios de lluvias, existe el riesgo adicional de que se generen coladas de barro (flujos de lodos, barros y rocas que se desplazan a gran velocidad) que viajan pendiente abajo, pudiendo mezclarse en cauces con otras aguas y sedimentos. Por lo que, con frecuencia, aunque ocurran en zonas remotas, ocasionan daños a las infraestructuras y ecosistemas situados aguas abajo.

Como hemos descrito anteriormente, el principal agente desencadenante de los movimientos en masa son la ocurrencia de lluvias intensas o de gran magnitud (Khan et al., 2012; Saito and Matsuyama, 2012; Oku et al., 2014). La lluvia interacciona con otra serie de factores como la cubierta vegetal, la posición topográfica, la composición mineralógica del suelo, sus características estructurales y texturales (Iverson, 2000; Yin, 2010; CAO, 2011), y su contenido en agua condicionando la ocurrencia de estos procesos. Por ejemplo, en muchos casos, los movimientos en masa están asociados a la presencia en el suelo de *arcillas expansivas*, cuyos minerales del grupo de las esmectitas absorben el agua, aumentan de volumen y peso, con lo que pierden su estabilidad dando lugar al deslizamiento de las capas superficiales de material (Pierson et al., 1992; Miao et al., 1999; Yin, 2010; CAO, 2011). Otra variable ambiental que afecta a la estabilidad de las laderas frente a los movimientos en masa inducidos por la lluvia es la vegetación. La vegetación, sobre todo los árboles y arbustos de raíz profunda, aumenta la resistencia de las capas superficiales del suelo a la vez que mejoran el drenaje hacia capas más profundas y aumentan la evapotranspiración, reduciendo la probabilidad de deslizamientos (Forbes et al., 2011). Sin embargo, en ciertas condiciones es posible que la propia vegetación pueda propiciar la ocurrencia de movimientos en masa si esta no tiene el porte suficiente para aportar estabilidad al suelo y retenerlo (Forbes et al., 2011). Finalmente, es preciso destacar el efecto de la topografía en los movimientos en masa superficiales (Fernandes et al. 2004; Meisina and Scarabelli 2007; Gao and Maro 2010). Por norma general, es necesaria una pendiente mínima de 15 ° para que, en respuesta a un episodio de lluvia, se produzcan movimientos en masa. A partir de 45°, por el contrario, su frecuencia disminuye debido a que el espesor del suelo es muy limitado, aunque, existen casos en los que, como consecuencia de la interacción con otros factores, aparecen movimientos en masa en zonas de menor o mayor pendiente. Este es el caso de las zonas de acumulación de agua, donde con frecuencia se satura el suelo debido al aporte extra de agua de escorrentía (Forbes et al., 2011).

La mayoría de los trabajos previos que evalúan los factores que controlan la ocurrencia de movimientos en masa están contextualizados en zonas húmedas, donde estos procesos son muy comunes por la abundancia de precipitaciones (Dou et al., 2019; Chen et al., 2019). Sin embargo, se sabe poco de los factores que controlan los movimientos en masa en ambientes áridos y semiáridos, y apenas conoce el papel que tienen los movimientos en masa en el balance global de sedimentos de cuencas de dichas regiones, ni de sus impactos aguas abajo, a pesar de que está demostrado que los suelos poco profundos, que con frecuencia caracterizan estas zonas, pueden llegar a saturarse durante lluvias de gran magnitud, creando importantes coladas de barro y movimientos en masa (Jovanovski et al., 2013). A pesar de que son, principalmente, procesos geomorfológicos naturales, constituyen formas severas de alteración que pueden reducir la productividad de los ecosistemas de ladera muy rápidamente, y que requieren periodos de tiempo muy largos para su restauración en regiones áridas. Tras los movimientos en masa, aparecen claros caracterizados por una erosión persistente, baja fertilidad y sin disponibilidad de propágulos vegetales, lo que dificulta la recolonización vegetal, especialmente bajo estrés hídrico (Hu et al., 2018)

Si tenemos en cuenta las proyecciones climáticas más recientes (IPCC, 2014), se espera un aumento en la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación extremos en la mayoría de las zonas áridas y semiáridas. Esto, unido a los serios problemas de degradación y a la pérdida de cobertura vegetal que están experimentando estas zonas como consecuencia del cambio global acentúa el problema de los movimientos en masa. Además, este problema no solo afecta a las laderas naturales, sino que es especialmente importante en lugares alterados por la acción humana como los taludes de carreteras o canteras. Por lo que será necesario aplicar medidas de adaptación que nos ayuden a reducir la vulnerabilidad de estas zonas y su población frente al aumento de ocurrencia de movimientos en masa, ya sea por un cambio en el régimen de precipitaciones o por un mal uso del terreno. Las principales herramientas para evitar los daños que pueden provocar los movimientos en masa son los mapas de susceptibilidad, los cuales aportan información espacial de carácter probabilístico de la futura aparición de movimientos en masa (Chen et al., 2016; Veronesi and Hurni, 2014; Youssef et al., 2015). La creación/generación de estos mapas se ha abordado en la última década a través de distintos métodos estadísticos, los cuales difieren en su capacidad para correlacionar los factores que controlan el proceso y la ocurrencia de los movimientos en masa. Para todos estos métodos resulta imprescindible comprender los factores que los propician. Asimismo, para predecir la vulnerabilidad a los movimientos en masa es crucial disponer de técnicas de vigilancia y observación de dichos movimientos, de las laderas vulnerables a sufrirlos, y de los posibles cambios en los factores que los desencadenan. Estas técnicas se pueden agrupar en dos tipos: Técnicas “*ground-control*” o sensores in situ, las cuales se basan en la instalación de equipos de toma de datos en la zona de interés sobre la posición y movimiento de los movimientos en masa a lo largo del tiempo; y “*remote-control*” o sensores remotos. Estos últimos, son equipos de teledetección que permiten tomar datos sin necesidad de entrar en contacto con el objeto de estudio, ya sea desde soportes en suelo, transportados por el aire o en satélites (Rossi et al., 2016). Entre estos medios de teledetección, en los últimos años ha adquirido relevancia el estudio de estos procesos geológicos mediante UAV (del inglés Vehículos Aéreos No Tripulados, conocidos comúnmente como drones) (Rossi et al., 2016;

Farina et al, 2017;). En comparación con los métodos de teledetección tradicionales, como el uso de sensores instalados en aeronaves y satélite, los UAV estos son fáciles de manejar, y permiten obtener datos de alta resolución temporal y espacialmente continuos a un coste relativamente bajo, lo cual representa una gran ventaja.

El objetivo de este trabajo es identificar, por medio de técnicas de teledetección o “remote-control”, los atributos del terreno que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa y, crear a partir de los mismos mapas de susceptibilidad o vulnerabilidad frente a estos procesos. Para ello, utilizaremos las imágenes adquiridas con un drone tras una lluvia en la que se observaron numerosos movimientos en masa en el área experimental de El Cautivo. Esta estación experimental se localiza sobre una zona acarcavada que forma parte del sistema de badlands situado en el desierto de Tabernas (Almería). Los sistemas de badlands presenta condiciones ideales para el estudio de los movimientos en masa y de otros procesos geomorfológicos. Mientras que en otros ambientes los procesos geológicos y geomorfológicos ocurren en escalas espaciotemporales amplias, en los badlands los cambios en la topografía son muy rápidos y frecuentes (Alexander et al., 2008) debido a los intensos procesos hidrogeológicos, y se producen a una escala espacial que permite su medida, convirtiéndolos en laboratorios geomorfológicos naturales ideales (Cantón et al., 2018; Calvo-Cases et al., 2014). Además, en el área de estudio seleccionada se están estudiado los diferentes procesos de erosión hídrica desde hace más de 20 años.

2. Material y Métodos

2.1 Zona de estudio

Este trabajo se ha realizado en el área experimental El Cautivo, situada en el Desierto de Tabernas en la provincia de Almería, concretamente en las proximidades del Barranco del Cautivo y la Rambla de Tabernas, y justo en el límite del municipio de Tabernas con el de Rioja (N37° 00' 37'', W2°26'30'', con una altitud media de 253.9 metros; Figura 1). Se trata de un sistema de badlands, desarrollado sobre margas yesíferas (Canton et al., 2001). Es un paisaje acarcavado debido a los intensos procesos erosivos que tienen lugar, los cuales son objeto de estudio de varios grupos de investigación durante las últimas 3 décadas (Calvo-Cases et al., 2014; Solé-Benet, 2008). El clima es termomediterráneo semiárido. La temperatura media es de 17.9°C, con un rango diario que varía entre 9.6 °C y 11.6 °C. La precipitación anual media es de 235 mm y se concentra en los meses de invierno, entre el 30 y el 55% del total anual ocurren en esta estación (Cantón, 1999). Predominan los suelos poco desarrollados como Leptosoles, Regosoles y Gypsisoles (Cantón et al., 2003).

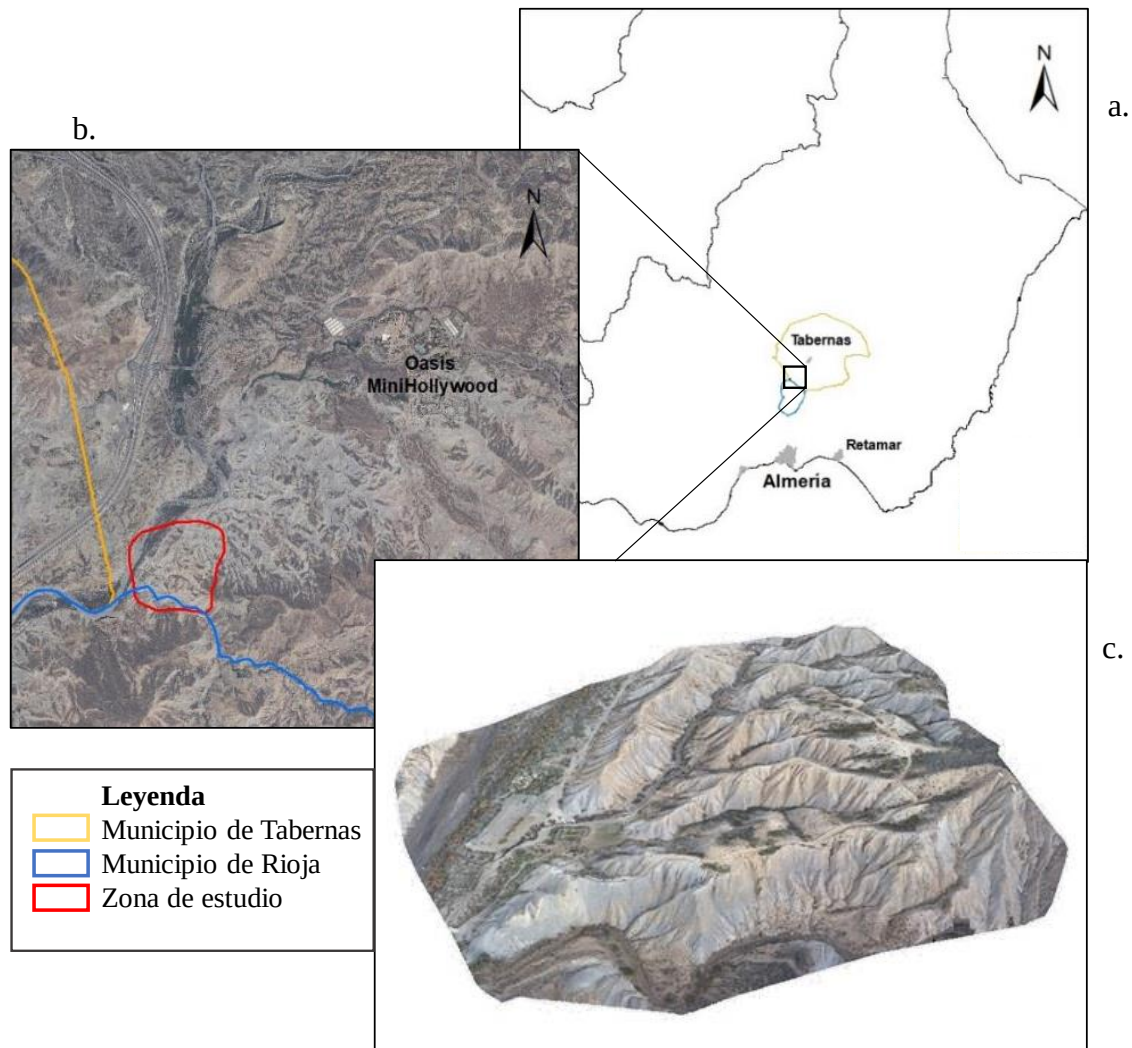


Figura 1. Localización de la zona de estudio en la provincia de Almería (a), situación de la zona en el ámbito regional de Tabernas (b) y detalle de la zona de estudio en relieve (c).

Este paisaje se caracteriza por una cubierta vegetal escasa y de bajo porte, dominada por un matorral mediterráneo y espartal (*Stipa tenacissima*, *Genista umbellata*, *Launaea lanífera*, *Launaea arborescens*, *Artemisia barrelieri* y *Rhamnus lycioides*), generalmente xerófitos y en muchos casos halófilos, en las zonas de mayor estabilidad, y en herbáceas anuales o colonizadoras (*Stipa campensis*, *Plantago ovata*, *Moricandia foetida* o *Limonium echioides*) (Lázaro y Puigdefábregas, 1994). También son relevantes las costras biológicas del suelo o biocostras, principalmente las biocostras dominadas por macrolíquenes de color claro como *Squamarina lentigera* (Web.) Poelt, *Squamarina cartilaginea* (With.) P. James, *Diploschistes diacapsis* (Ach.), Lumbsch y *Diploschistes ocellatus* (Vill.) Norman, (Lázaro *et al.*, 2008) y las biocostras dominadas por cianobacterias y que incluyen algunas especies de cianolíquenes pequeños y oscuros, como *Collema cristatum* (L.) (Lázaro *et al.*, 2008).

2.2 Obtención de imágenes y referencias espaciales

Para la toma de fotografías aéreas de la zona de estudio se realizó un vuelo con un drone modelo Phantom 4 Professional de DJI a una altura de 60 metros, usando una cámara/sensor óptico RGB de resolución 4k. Se tomaron un total de 146 imágenes. El vuelo se realizó el

26/01/2017 (Figura 2), tras tres eventos de lluvia consecutivos de 13, 61 y 25 mm que produjeron un elevado número de movimientos en masa que se observaron en campo.

Posteriormente, se tomaron 37 puntos de control para la georreferenciación de las imágenes, utilizando un GPS diferencial Leyca Zeno 20 (Leyca geosystems) con una precisión de ± 1 cm. Para la medición de los puntos de control elegimos elementos y estructuras fácilmente reconocibles dentro de la zona experimental de El Cautivo, como depósitos de recogida de escorrentía, paneles fotovoltaicos, pluviómetros, etc. (Figura Suplementaria 1).

2.3 Procesamiento de imágenes

A partir de los mosaicos formados por las 146 imágenes adquiridas durante el vuelo con el dron se generó un modelo digital del terreno de 0.10 m de resolución y una ortofoto de 0.16 m de tamaño de píxel, utilizando el software de fotogrametría (Pix4Dmapper). Este programa localiza puntos comunes en diferentes fotogramas (Groud Control Points o GPD) y forma un mosaico que utiliza posteriormente para elaborar los modelos digitales del terreno por fotogrametría. La nube de puntos formada tiene relaciones espaciales arbitrarias. Para georreferenciarlas utilizamos los puntos de control tomados en campo con el GPS. Para ello se eligió el Sistema de Referencia WGS84 proyección UTM zona 30N.

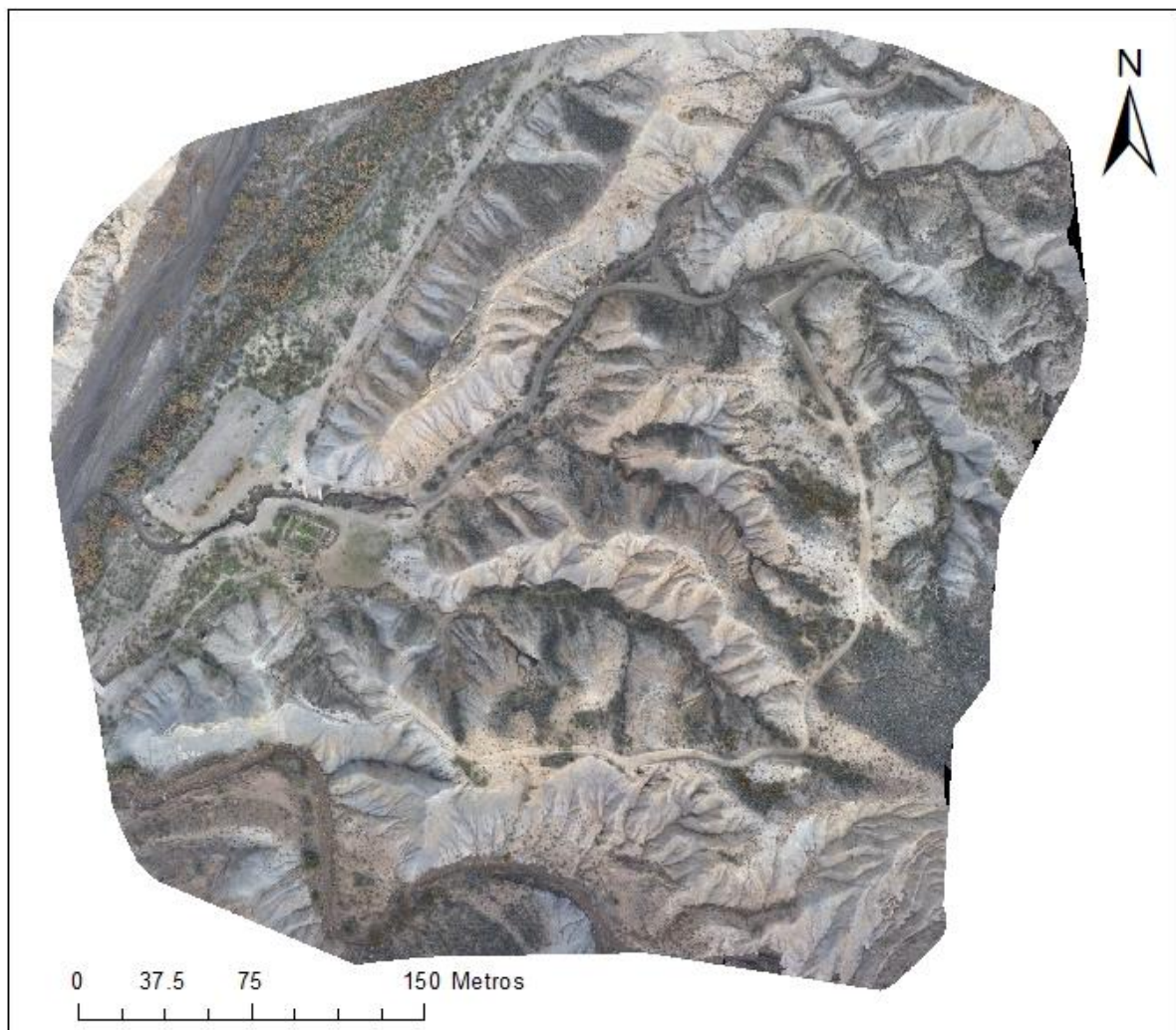


Figura 2. Ortoimagen de El Cautivo, desierto de Tabernas, formada a partir de las fotografías tomadas en 2017.

Usando la ortoimagen formada a partir de las fotografías obtenidas con el dron (ortoimagen 2017, Figura 2), se realizó un inventario de los movimientos en masa ocurridos durante el evento de lluvias (Figura suplementaria 3, 3a y 3b) observados en la zona de estudio. Para esto se comparó la ortoimagen de 2017 con una ortoimagen multiespectral, con una resolución de 0.1 m x 0.1 m, tomada en septiembre de 2011 (Figura Suplementaria 2), previa a la formación de los movimientos en masa (ver Rodríguez-Caballero et al., 2015 para más detalle) llegando a identificar 30 movimientos en masa en la zona de estudio. Finalmente se visitaron las zonas identificadas para validar nuestras observaciones.

2.4 Atributos topográficos

A partir del MDE de alta resolución generado se calcularon una serie de atributos topográficos que controlan a la ocurrencia de movimientos en masa (Zhang, 2012). Los atributos topográficos calculados pueden clasificarse en: atributos topográficos primarios y secundarios (Moore et al. 1991). Los atributos topográficos primarios son aquellos que definen estrictamente la morfología y se calculan a partir del MDE, como la elevación, la pendiente, la orientación y la curvatura (curvatura de plano y la curvatura de perfil). Mientras que los atributos topográficos secundarios se calculan como la combinación de varios atributos primarios y describen cómo varían en el espacio diversos procesos como la redistribución de agua y la erosión. Concretamente se calcularon dos atributos secundarios:

- Índice topográfico de humedad (TWI de sus siglas en inglés “Topographic Wetness Index”; Beven y Kirkby, 1979), el cual describe los efectos de la topografía en las áreas fuente de escorrentía cuando se sobrepasa la capacidad de infiltración y almacenamiento del suelo (ecuación 1).

$$TWI = Ln \frac{a}{\tan b} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde TWI representa el índice topográfico de humedad, a es el área de drenaje (m^2/m) y b es la pendiente en radianes.

- Índice de transporte potencial de sedimentos, (LSF de sus siglas en inglés “Length Slope Factor”; Moore y Burch, 1985). Este índice describe los efectos que tiene la topografía en la capacidad de los procesos de transporte de sedimentos (ecuación 2).

$$LSF = (1 + n) * \left(\frac{a}{22.13}\right)^n * \left(\frac{\sin b}{0.0896}\right)^m \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde LSF representa el índice de transporte potencial de sedimentos, a es el área de drenaje (m^2/m) y b es la pendiente en radianes. n y m son dos constantes que obtienen valores de 0.4 y 1.3, respectivamente (Moore y Burch, 1985).

Además, se calculó la fracción de cobertura de vegetación en cada pixel antes del evento de lluvia que generó los movimientos en masa. Para ello se utilizó la ortoimagen de 10 x 10 cm de tamaño de pixel obtenida durante septiembre de 2011. Sobre la imagen se identificaron 378 puntos de entrenamiento (162 correspondientes a zonas de vegetación y 216 correspondientes a zonas de suelo desnudo) que se utilizaron para realizar una clasificación

supervisada con el algoritmo “Clasificación de máxima verosimilitud”. A partir del mapa de vegetación se calculó la densidad de vegetación en una ventana móvil de 1 x 1 m (10 x 10 píxeles de la imagen), como la fracción de la ventana clasificada como vegetación. El análisis SIG se realizó en Arc-Gis 10.3.1 (Environmental Systems Research Institute, Inc., “ESRI”, California, Estados Unidos de América).

Aunque la litología ha demostrado ser un factor importante en el control de los movimientos en masa, esta no se ha evaluado como atributo que afecte a la ocurrencia de movimientos en masa debido a la homogeneidad litológica en todo el ámbito de la zona de estudio. Lo mismo ocurre con la componente edáfica, ya que el suelo en este entorno es escaso y poco formado, y no existe una variabilidad significativa que pueda afectar a la vulnerabilidad (Canton et al., 2004).

2.5 Análisis estadístico

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de los diferentes atributos topográficos, la cobertura de vegetación en las zonas donde se identificaron movimientos en masa y en las que no y se realizaron gráficos “caja y bigote” o “box plot” (de su nombre en inglés “box-and-whiskers plot”).

Para analizar el efecto de las diferentes variables topográficas sobre la ocurrencia de movimientos en masa, investigamos la abundancia de movimientos en masa a través del gradiente de cada variable topográfica mediante tablas de contingencia que permitieron contrastar las áreas donde ocurrieron o se identificaron movimientos en masa con las áreas donde no, a través del rango de una variable topográfica (Cantón et al., 2004). El mismo procedimiento se aplicó para analizar la influencia de la cobertura vegetal. Para ello, las variables elevación, pendiente, cobertura vegetal, TWI y LSF se dividieron en 5 clases, utilizando los cortes de ruptura naturales que se observaron al construir los histogramas de cada variable, y en cada clase se calcularon la frecuencia de movimientos en masa y la frecuencia de píxeles donde no se detectaron movimientos en masa. En el caso de la orientación, se establecen 5 clases según su grado de exposición a la insolación, siguiendo la metodología descrita por Parker, (1982): clase 1, insolación mínima entre 343° y 62°; clase 2, insolación baja entre 63° y 116°, y de 298° a 342°; clase 3, insolación alta de 117° a 152° y de 253° a 297°; clase 4, insolación muy alta, de 153° a 252°; y clase 5, no descrita por Parker, sin orientación o llana, de insolación máxima. Las variables curvatura en perfil y curvatura en plano se reclasificaron en: i) convexa (curvatura positiva), ii) cóncava (curvatura negativa) y iii) áreas sin curvatura.

Una vez clasificadas las diferentes variables, se realiza una prueba χ^2 de Pearson con los datos de las tablas con la que se comprobará la correlación entre los atributos y la presencia o no de *movimientos en masa*. Se estudian las distribuciones y las desviaciones observadas respecto a las esperadas, así como su grado de contribución a la χ^2 total.

Para la interpretación de la prueba, la χ^2 total de cada atributo, esta se desglosa en la χ^2 de la regresión lineal y la χ^2 de la varianza residual. La primera determina la significación del

incremento en la tasa de cambio lineal en la frecuencia de movimientos en masa a través del gradiente topográfico, de modo que nos indicará si al desplazarnos a lo largo del gradiente (ya sea aumentando o disminuyendo) aumenta la superficie afectada por movimientos en masa. En el caso de la segunda (χ^2 de la varianza residual), prueba la significación de la desviación de la regresión (varianza residual o no explicada), es decir, la significación de los puntos que no se ajustan a la regresión.

La combinación de ambas pruebas sirve para poner de manifiesto si existe una tendencia de ocurrencia de movimientos en masa de acuerdo a un gradiente topográfico, pudiendo esta ser lineal o no lineal. En el caso de que la χ^2 de la regresión sea significativa, existe una tendencia. Si, además, la χ^2 de la varianza residual no es significativa, la tendencia es lineal, mientras que en caso contrario la tendencia es no lineal.

Finalmente calculamos, la pendiente de la tendencia (b), que define la dirección y magnitud del cambio en la frecuencia de movimientos en masa con el cambio de una determinada variable. Los valores positivos indican que al aumentar los valores de la variable aumenta también la frecuencia de movimientos, mientras que valores negativos indican que disminuye la frecuencia de movimientos en masa al aumentar la variable.

2.6 Modelización y elaboración del mapa de sensibilidad

Para modelizar la susceptibilidad del área de estudio a sufrir movimientos en masa, aplicamos un modelo multivariante no paramétrico de bosques aleatorios (RF de su definición en inglés "random forest"). Los modelos RF (Breiman 2001) son modelos predictivos multivariante que usan la técnica de Bagging para combinar diferentes árboles predictores. Para ello, selecciona muestras al azar y crea diferentes conjuntos o *sets* de datos a través de un proceso de remuestreo "bootstrap". Cada *set* de datos se utiliza para generar un árbol de decisión que crece siguiendo un proceso de clasificación o de árbol de regresión (según el objetivo final del RF) que incluye un subconjunto de variables aleatorio. Para ello, se calcula el error en cada paso consecutivo de crecimiento del árbol, a partir de las muestras que se han dejado fuera en el proceso de bootstrap. Esto da lugar a numerosos árboles que forman el bosque (1 para cada iteración bootstrap). El resultado final se obtiene usando el "voto mayoritario", es decir asume que el resultado más común entre todos los árboles que forman el bosque (cada uno de ellos entrenado con un subconjunto de datos diferente y con diferentes variables exploratorias) es el mejor resultado. Estos modelos han demostrado una gran capacidad para predecir relaciones no lineales complejas que incluyen interacciones entre diversas variables (Breiman 2001; Cutler et al. 2007) y han dado muy buenos resultados en la elaboración de mapas de riesgo de movimientos en masa (Park y Kim 2019).

Para entrenar el modelo, primero seleccionamos 16 movimientos en masa (a los que corresponde 61893 píxeles o celdas) de la base de datos original, la cual está formada por los 31 movimientos en masa identificados (97314 celdas) en el área de estudio, como base de datos de entrenamiento. A partir mapas de las diferentes variables topográficas (altitud, orientación, pendiente, curvatura en plano y de perfil, LSF, TWI) y de la cobertura de vegetación entrenamos el modelo utilizando como datos de presencia la base de datos de

entrenamiento y 10000 puntos aleatorios escogidos de toda la zona de estudio como pseudo-ausencias. Esto se hizo así porque no disponemos de datos de ausencia de movimientos en masa, ya que no podemos asegurar que durante otros eventos de lluvia no hayan ocurrido movimientos en masa en las zonas no identificadas tras este evento.

Una vez entrenado el modelo lo validamos utilizando el resto de movimientos en masa identificados (15 movimientos con un total de 35421 píxeles). Para ello calculamos la curva ROC (de sus siglas en inglés “The receiver operating characteristic”). La curva ROC es un método muy común para evaluar la calidad de los modelos probabilísticos que consiste en representar de forma conjunta la tasa de acierto del modelo o sensibilidad en el eje x y la especificidad o tasa de falsos positivos en el eje y. A partir de la curva ROC, calculamos el área bajo la curva ROC (AUC de sus siglas en inglés “área under de curve”), que es un indicador cuantitativo de la precisión del modelo. Valores de AUC cercanos a 1 indican un buen ajuste, valores igual a 0.5 indica una respuesta aleatoria y valores por debajo de 0.5 indican que nuestro modelo se comporta peor que un modelo completamente aleatorio (i.e. modelos mal diseñados, mala elección de las variables o errores en los puntos de entrenamiento o validación). Finalmente extraemos la importancia relativa de cada variable repitiendo el modelo pero extrayendo cada una de las variables y calculando la diferencia en el valor de AUC final para el modelo que incluye todas las variables y el modelo que excluye cada variable.

3. Resultados

3.1 Análisis de los atributos topográficos

Como se observa en la figura 3a, la zona de estudio se encuentra entre 232.3 m.s.n.m en la zona más baja (rambla y los barrancos próximos), y 305 m.s.n.m en los puntos más altos; con una altitud promedio de 254 m.s.n.m. El máximo de pendiente es 82.6°, aunque la mayor parte de la zona de estudio presento valores entre 12° y 38° de inclinación. La vegetación es escasa (la cubierta vegetal en promedio para toda el área de estudio es de 23.95%, y el 60% de la zona de estudio tiene menos de un 10% de cobertura) y se concentra mayoritariamente en la rambla, seguido de los pies de monte y partes medias de las laderas de umbría (N y NW).

El proceso de fotointerpretación y posterior validación en campo permitió identificar un total 30 movimientos en masa con una superficie total de 973.11 m² de un total de 15.2 hectáreas (0.64% del total de la zona de estudio) (Figura Suplementaria 3). La mayor parte de los movimientos en masa identificados ocurrieron principalmente en áreas con una elevación entre 241 m y 274 m (rango intercuartil, con un 50% entre 251 m y 259 m) (Figura 3a) y con valores de pendiente entre 35-45° (Figura 3b). Los valores de cobertura de vegetación, por el contrario, fueron muy variables. Un 32% de los movimientos en masa ocurren en zonas con una cobertura de vegetación superior al 85%, mientras que otro 32% ocurre en zonas con menos de un 10% de densidad de vegetación (figura 3c).

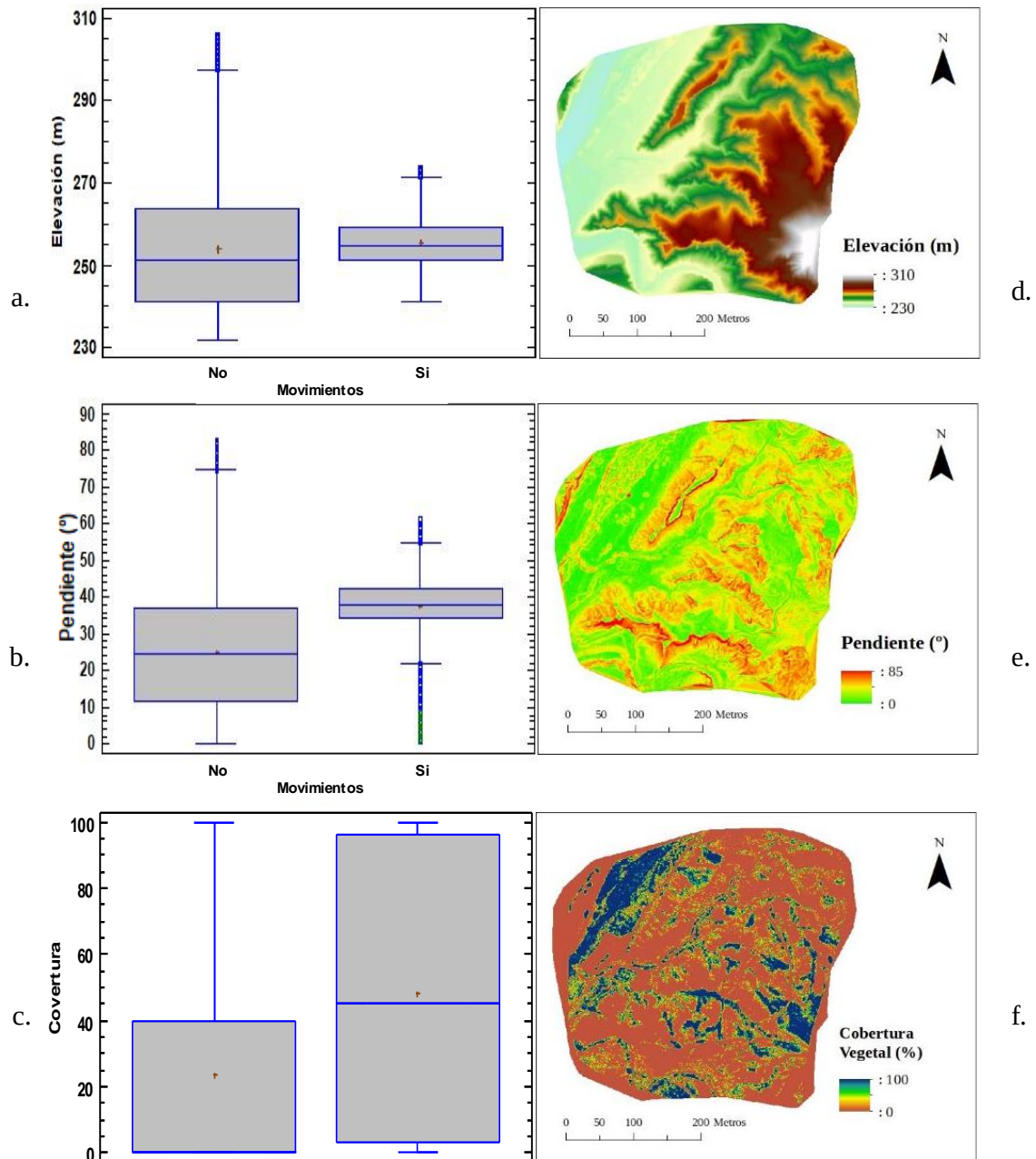


Figura 3. Box plots que representan los valores de la mediana (Línea horizontal), el promedio (+), percentiles 25 y 75 (Principio y final de la caja respectivamente) y los límites superior e inferior (barras; $1.5 \cdot \text{RIC}$; rango inter cuartil) de las variables elevación (a), pendiente (b) y cobertura vegetal (c) para las zonas donde se identificaron movimientos en masa (si) y para el resto de la zona de estudio (no). Las figuras d, e y f representan la distribución espacial de la elevación, pendiente y cobertura vegetal en la zona de estudio. Los valores exteriores a los límites de las barras se consideran atípicos, y en el caso de alcanzar 3 veces el RIC se considera extremadamente atípico, y están representados por puntos azules y puntos verdes respectivamente.

La zona de estudio se caracteriza por presentar orientaciones muy contrastadas, apareciendo laderas con orientaciones N, N-W, S y S-E en proporciones similares y pocas zonas llanas. Sin embargo, como se observa en la figura 4a, la mayoría de los movimientos en masa identificados durante el proceso de fotointerpretación (94.5% del total de movimientos) ocurrieron en las laderas de menor exposición a la insolación, 56.8% en las laderas orientadas al Norte y 37.7% en las laderas con orientación Noroeste-Este, las cuales representan un 22.3% y 28.4% del total de la zona de estudio, respectivamente.

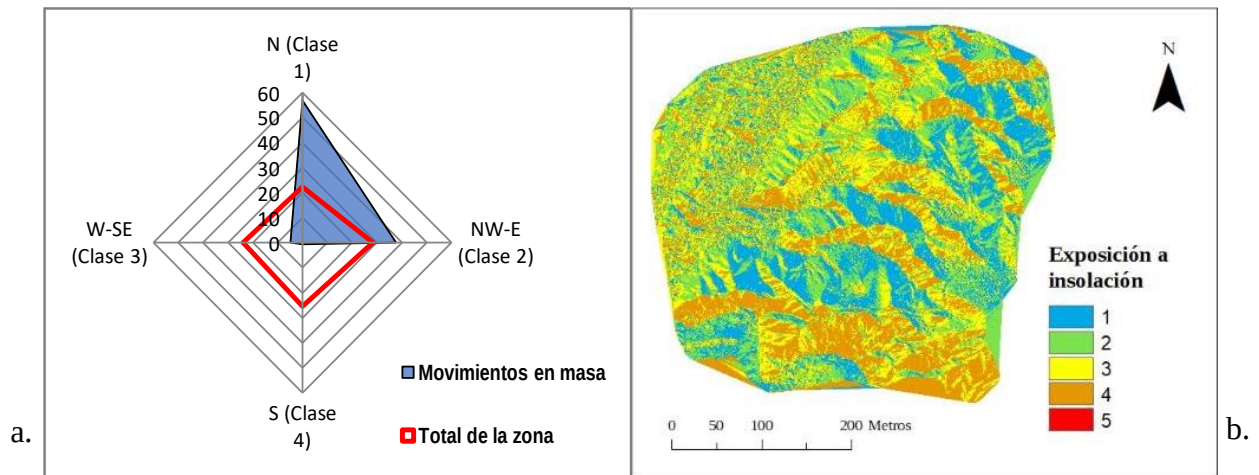


Figura 4. Distribución relativa de los valores de orientación en la zona de estudio (Rojo) y de los movimientos en masa identificados durante el proceso de fotointerpretación (Azul) (a) y distribución espacial de las clases de orientación en la zona (b) (descritas por Parker, 1982), con clase 1 de menor insolación hasta clase 5 de mayor insolación.

Quando se analizan los valores de curvatura (en plano y de perfil), también se observan algunas diferencias entre las zonas donde se observaron los movimientos en masa y las que no (Figura 5a). En el caso de la curvatura de plano, el rango de valores para las zonas donde se observaron movimientos en masa oscila entre -2.96 y 17.5. Sin embargo, aproximadamente el 99% de los datos se concentra en el intervalo (-0.8 y 0.1). Dentro de este rango, un 42.2% de los pixeles donde se identificaron movimientos en masa corresponden con zonas de moderadamente cóncavas (-0.4,0) mientras que el 38.9% corresponde con zonas moderadamente convexas (0,0.4) (Figura 5a). Los valores de curvatura de perfil en las zonas donde se identificaron movimientos en masa oscilaron entre -0.62 y 0.62. En este caso, el grueso de los datos se haya en el intervalo de -0.24 a 0.24, que representa el 97% del total de movimientos en masa identificados. Los intervalos (-0.16, -0.08) y (-0.08, 0) representan el 9.6% y 38.8% respectivamente, mientras que sus respectivos positivos contienen el 9.5% y el 35.7% del total de datos (Figura 5b).

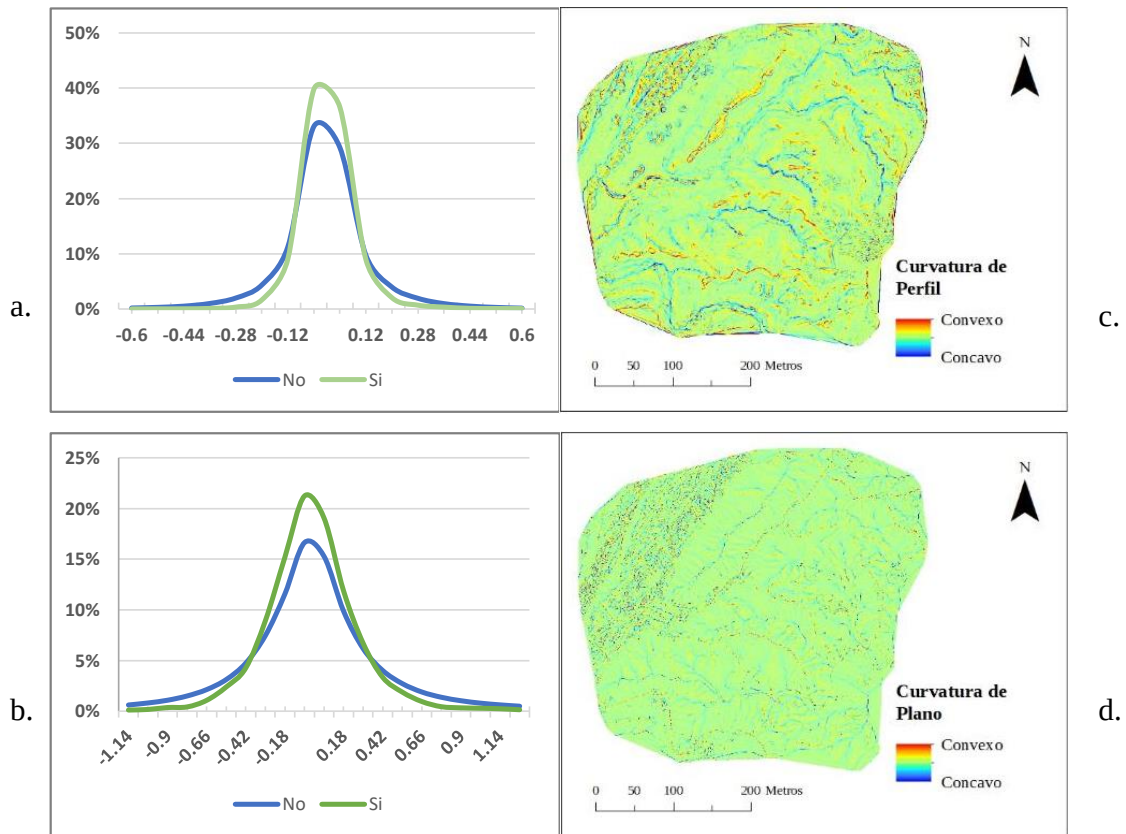


Figura 5. Distribución de frecuencia de los valores de curvatura de perfil (a) y curvatura de plano (b) para las zonas donde no (No) y las zonas donde sí (Si) se identificaron movimientos en masa. Las figuras c y d representan la distribución espacial de la curvatura de perfil y curvatura de plano respectivamente.

Cuando analizamos los atributos topográficos secundarios observamos que también existen algunas diferencias entre las zonas donde se identificaron movimientos en masa y el resto de áreas (Figura 6). La mayoría de los movimientos en masa ocurren en zonas con valores de TWI entre -0.83 y 1.34 (con un valor promedio de 0.47), mientras que el resto de zonas no afectadas presentan un valor promedio de 1.1, que oscila entre -0.2 y 2.12 (Figura 6a). En este atributo, como se puede apreciar, no existe una gran diferencia entre los dos casos. En el caso del índice LSF, observamos un patrón diferente y una diferencia mayor entre las zonas de movimientos y el resto. La mayoría de las zonas donde se identificaron movimientos en masa presentaron valores entre 12.5 y 44, con una media de 38.93, mientras que el resto de zonas sin movimientos presentaron valores mucho menores, con un promedio de 16.98 y alta frecuencia de valores entre 2.75 y 20.

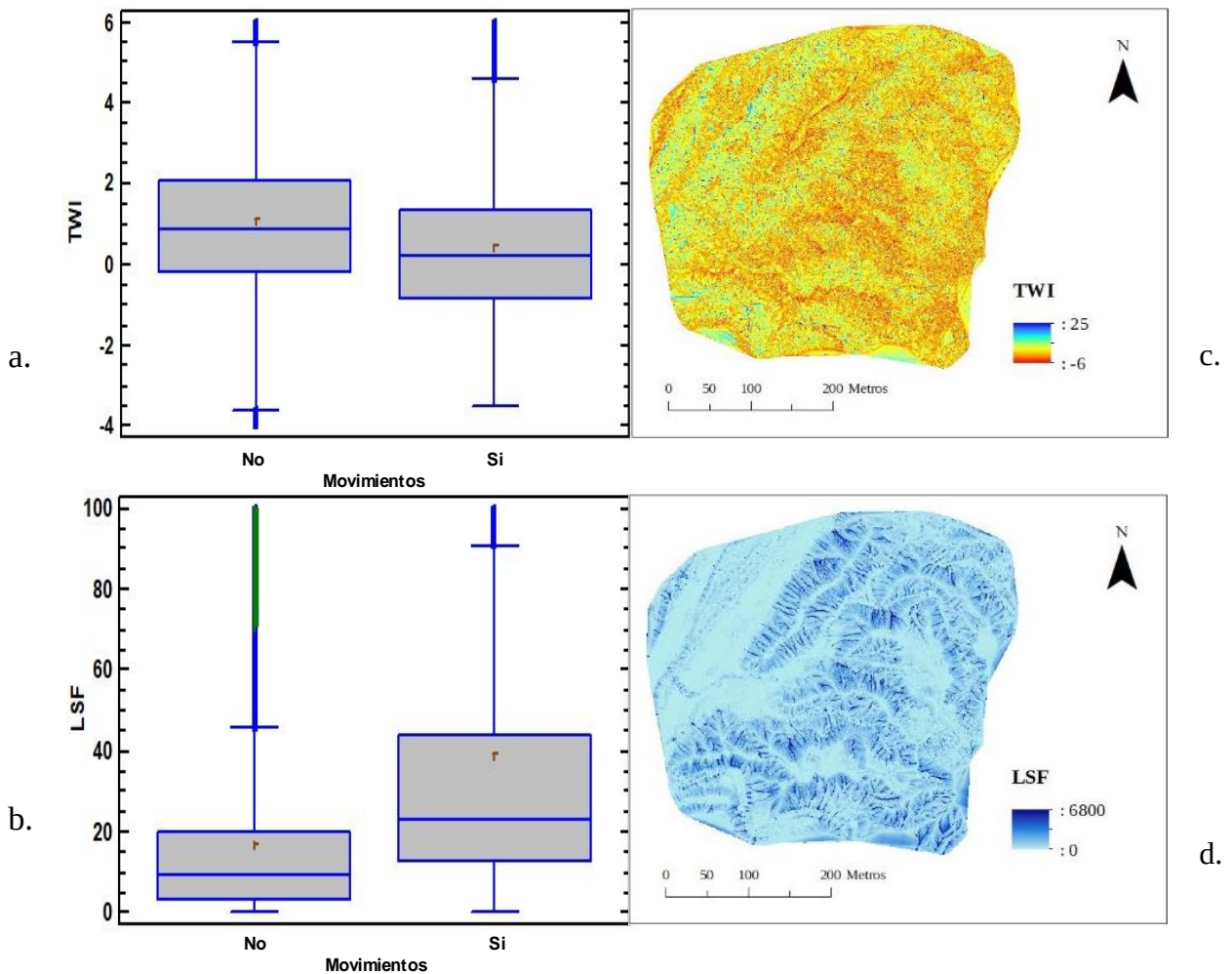


Figura 6. Box plots que representan los valores de la mediana (Línea horizontal), el promedio (+), percentiles 25 y 75 (Principio y final de la caja respectivamente) y los límites superior e inferior (barras; 1.5rango inter cuartil; RIC) de las variables: Topographic wetnes index (TWI; a), y Slope lenght factor (LSF; b) para las zonas donde se identificaron movimientos en masa (si) y para el resto de la zona de estudio (no). Las figuras c, y d representan la distribución espacial de la elevación, pendiente y cobertura vegetal en la zona de estudio. Los valores exteriores a los límites de las barras se consideran atípicos, y en el caso de alcanzar 3 veces el RIC se considera extremadamente atípicos, y están representados por puntos azules y puntos verdes respectivamente.

3.2 Relación entre la ocurrencia de movimientos en masa y los atributos topográficos

En general, los resultados del test χ^2 de Pearson son significativos para todos los atributos del terreno estudiados. Esto indica que la ocurrencia de movimientos en masa está afectada por las diferentes variables topográficas analizadas en este trabajo, de manera que existe una tendencia de cambio (aumento o disminución) de la frecuencia de movimientos en masa a medida que nos desplazamos a lo largo del gradiente de la variable, pero esta tendencia solo es lineal para la orientación (la χ^2 de la varianza residual no es significativa) (Tabla 1). En este caso al aumentar la insolación disminuye linealmente la frecuencia de movimientos en masa. Los valores de la pendiente de las regresiones, muestran que la ocurrencia de movimientos en masa aumenta a la vez que aumenta la *elevación, pendiente, cubierta vegetal, índice LSF*. Por otro lado, la frecuencia de movimientos en masa disminuye al aumentar los atributos de la *clase de orientación, TWI*. Para el caso de la curvatura de plano y perfil vemos que la pendiente de muestra valores, a pesar de que la pendiente de la tendencia muestra valores positivos y negativos, respectivamente, si analizamos su distribución de frecuencias (Figura

5) vemos que las dos variables siguen una tendencia gaussiana con mayor frecuencia al disminuir la curvatura del terreno, ya sea cóncava o convexa.

Tabla 1. Resultados de la prueba χ^2 de Pearson para las distintas variables

	χ^2 Regresión	χ^2 Residual	χ^2 Total	Pendiente
Elevación	3274*	63739*	67013*	0.0009
Pendiente	66710*	51849*	118559*	0.0042
Orientación	105342*	-11444	93898*	-0.0054
Vegetación	23485*	13260*	36745*	0.0026
TWI	11748*	1675*	13423*	-0.0021
LSF	20071*	32307*	52378*	0.0116
Curvatura de plano	29.8*	5881*	5911*	-0.0001
Curvatura de perfil	263.5*	3947*	4210*	0.0004

* Valores significativos al ser superiores al χ^2 de los grados de libertad (para χ^2 de la regresión 6.63, χ^2 de la desviación 11.34 y para χ^2 total 13.27)

3.3 Modelización del riesgo de ocurrencia de movimientos en masa

El análisis de la curva ROC obtenida a partir de la base de datos de validación demuestra que el modelo presenta un buen ajuste, con un índice AUC = 0.986 (Figura 7a). Según la figura 7b, las variables que aportan más información para predecir la ocurrencia de movimientos en masa (mayor reducción de AUC cuando se excluyen del modelo) fueron la altura, la orientación, la cobertura de vegetación y la pendiente, respectivamente. La curvatura y el TWI, por el contrario, fueron las variables que ejercieron un efecto menor.

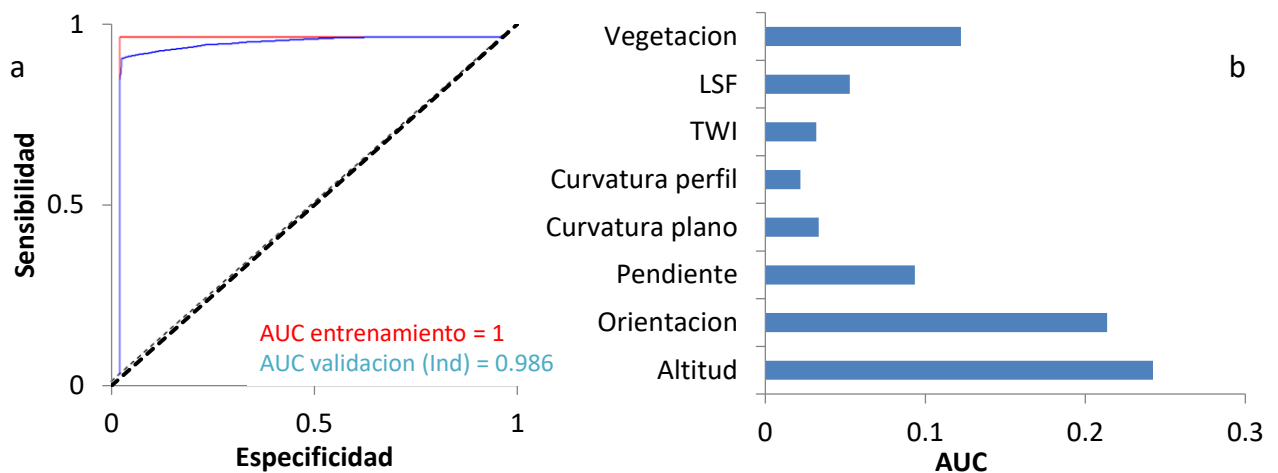


Figura 7. Gráfica de la curva ROC (Receiver operating characteristics curve) resultante del entrenamiento y validación del modelo Random Forest (a) e importancia relativa de cada una de las variables en el resultado final del modelo (b).

La figura 8 muestra el resultado de la aplicación del modelo RF a toda la zona de estudio y representa el riesgo de ocurrencia de movimientos en masa tras la lluvia (0 = sin riesgo; 1 = riesgo elevado). La distribución espacial de las zonas con riesgo de sufrir movimientos en masa muestra un patrón similar al observado cuando analizamos los valores de los diferentes

índices topográficos en los movimientos en masa identificados por fotointerpretación. Las zonas con mayor riesgo de sufrir movimientos en masa son las laderas orientadas al norte con valores de altitud intermedios, elevada pendiente y con cobertura vegetal. En las laderas con orientación sur, el riesgo es menor. En las zonas llanas los valores de riesgo son cercanos a 0.

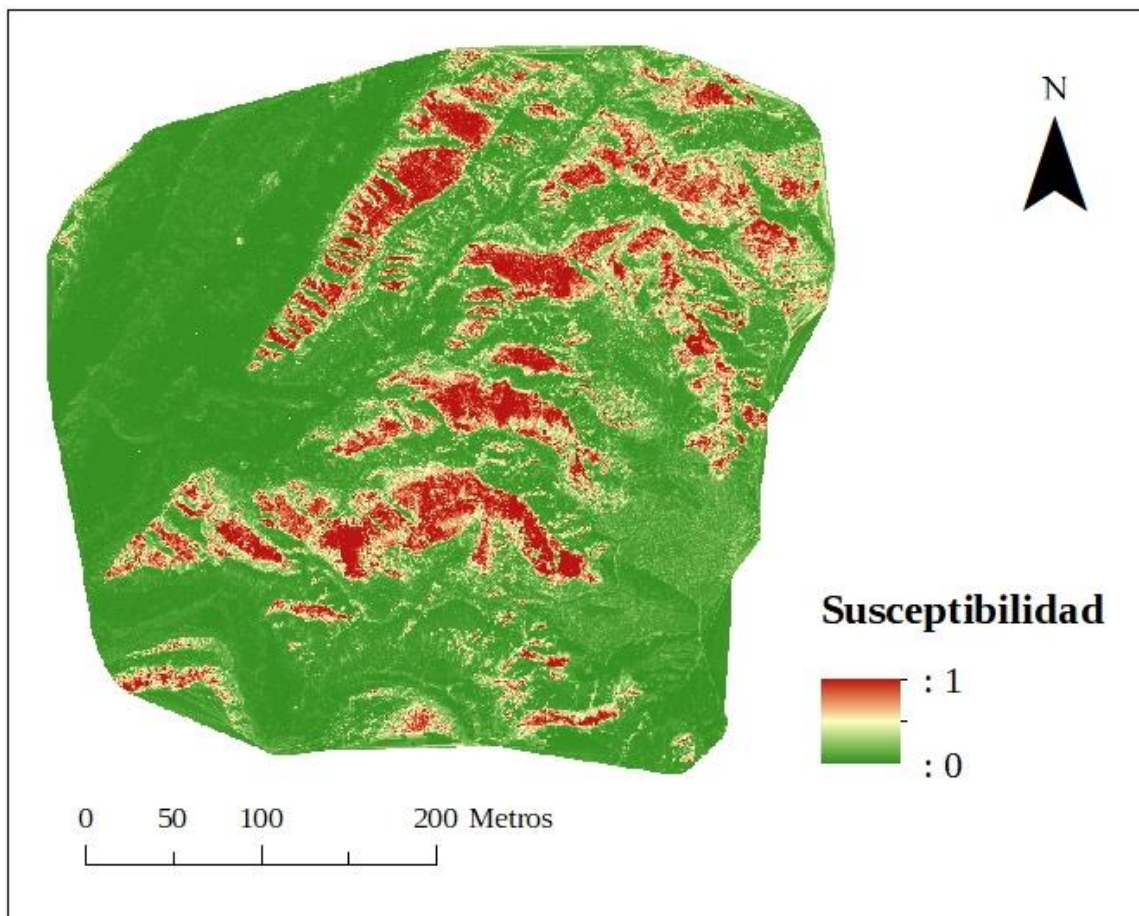


Figura 8. Mapa de susceptibilidad o riesgo de ocurrencia de movimientos en masa generado a partir del modelo random forest. Valores cercanos a 1 indican un elevado riesgo de ocurrencia de movimientos en masa mientras que valores de 0 o cercanos indican bajo riesgo .

4. Discusión

La importancia de la topografía en la ocurrencia de movimientos en masa y su uso para la prevención de estos ha sido objeto de estudio en muchos trabajos de investigación (Fernandes et al. 2004; Meisina and Scarabelli 2007; Gao and Maro, 2010; Zhang et al., 2012). La elevación de la ladera, su pendiente, orientación, curvatura, área de contribución entre otros han demostrado tener gran influencia sobre este proceso (Fernandes et al. 2004; Meisina and Scarabelli 2007; Gao and Maro 2010; Zhang et al., 2012), aunque la mayoría de los estudios se centran en zonas húmedas. Nuestros resultados ponen en evidencia que, aunque poco estudiado, se trata de un proceso importante también en ambientes áridos y semiáridos. Por ejemplo, pese a la poca frecuencia de precipitaciones en los badlands del desierto de tabernas, la topografía y distribución espacial de las diferentes cubiertas (Rodríguez-Caballero et al., 2019) o el pobre desarrollo del suelo (Canton et al., 2003); determinados eventos de precipitación, como lluvias prolongadas de gran magnitud e intensidades bajas o moderadas, configuran unas condiciones que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa.

Este trabajo se inicia porque en diciembre de 2017, tras una serie de lluvias de magnitud importante y larga duración, pero no muy intensas, observamos en campo un gran número de movimientos en masa que movilizaron cantidades de sedimento considerables. Se produjeron tres eventos de lluvia de 13, 61 y 25 mm ocurridos entre el 16 y 18 de Diciembre de 2016, y tras estos eventos se identificaron un total de 30 movimientos en masa (figura suplementaria 3), aunque es posible que el total de eventos fuera mayor, y que no hayamos podido identificar todos los movimientos en masa ocurridos, en especial los pequeños movimientos en masa que con frecuencia se producen en las laderas de marga y que son difíciles de detectar porque suelen ser de unos pocos kilogramos y, a menudo, en el transcurso de la misma lluvia que los ocasionó, el material movilizado es transportado a los cauces y las cicatrices de la ladera se borran.

El estudio de los factores que controlaron la ocurrencia de estos movimientos demuestra que los atributos que mayor influencia han tenido en la incidencia de movimientos en masa en la zona del Cautivo han sido la elevación, la orientación o exposición a la insolación, la pendiente y la vegetación (Tabla 1; Figura 7b). Estos resultados coinciden con los observados en trabajos previos que relacionan los movimientos en masa y otros tipos de deslizamientos de laderas con atributos topográficos como la pendiente y su orientación (Zhang, 2012).

Otros atributos que han sido previamente identificados como factores que afectan, ya sea de forma directa o indirecta, a la ocurrencia de movimientos en masa: son el LSF y TWI (Park y Kim, 2019). Sin embargo, nosotros no observamos que estos atributos tengan un efecto muy importante en la ocurrencia de movimientos en masa, ni a través del análisis de gradientes (Tabla 1), ni en el modelo RF (Figura 7b). En el caso del índice TWI, esto ocurre porque se trata de un índice desarrollado para zonas húmedas (Beven y Kirkby, 1979), que permite identificar las áreas donde se almacena los flujos de agua subsuperficiales, y corresponden a zonas con áreas de contribución extensas y con poca pendiente, esto último poco compatible con el desencadenamiento de movimientos en masa, de ahí que la baja relación con esta variable. En el caso del índice LSF, está más relacionado con procesos de erosión por escorrentía en zonas de concentración de flujo como regueros y cárcavas, que coincide con localizaciones en las que el espesor del suelo está limitado por los procesos de erosión y también su capacidad para retener agua y existe poco material disponible, con lo que se reduce la probabilidad de aparición de movimientos en masa.

Como resultado de la interacción de todos estos factores, podemos ver que la mayor parte de los movimientos en masa identificados durante las lluvias de diciembre de 2016, ocurrieron en la parte media de las laderas con menor insolación (orientación Norte y Noreste), donde hay una elevada cobertura de vegetación y baja evapotranspiración (Rodríguez-Caballero et al., 2019). Estos resultados son contrarios a lo descrito por Zhang (2012), quien observo una mayor ocurrencia de movimientos en masa en las laderas de mayor insolación, donde las condiciones de sequía favorecen la infiltración, ocasionando la pérdida de estabilidad del suelo. En nuestra zona de estudio, por el contrario, las zonas de mayor capacidad de infiltración son los parches vegetados que predominan en las orientaciones con menor

insolación (Rodríguez-Caballero et al., 2019). Según la dinámica ecohidrológica la zona, durante la mayoría de los eventos de lluvia, la escorrentía generada en las partes altas de las laderas, que se encuentran cubiertas por líquenes poco permeables (Rodríguez-Caballero et al., 2014) se redistribuye aguas abajo hacia la vegetación (Rodríguez-Caballero et al., 2014b), donde se re-infiltra. Este aporte extra de agua ayuda a mantener una cobertura vegetal mayor de la que cabría esperar según el régimen de precipitaciones de la zona (Rodríguez-Caballero et al., 2018) pero pudo actuar de forma negativa durante los eventos de lluvia estudiados, saturando el suelo bajo las plantas y haciendo que se produjeran los movimientos en masa. Hay que destacar que en esta parte de las laderas el suelo presenta un espesor entre 30 y 50 cm (Canton et al., 2003). Justo debajo del suelo hay un regolito poco meteorizado con poca capacidad de retención de agua y poca infiltración, por lo que el agua se acumularía en los primeros 30-50cm de suelo hasta producir su saturación. La acumulación de agua en los horizontes superficiales aumenta su peso y su plasticidad, y provoca el deslizamiento de este sobre el regolito. Además, la vegetación que domina en esta parte de las laderas son principalmente espartales y arbustos con sistemas radiculares poco profundos, y por tanto poco eficientes para anclarse en el regolito subyacente y evitar así los movimientos en masa.

En el caso de la ocurrencia de movimientos en masa en las laderas orientadas al sur, con escasa vegetación, hay que destacar que fueron movimientos de menor volumen, en los que se desplazó el material más meteorizado que consiste en una capa de unos pocos centímetros de espesor (1-2cm) sobre el regolito y aparece cubierto por una costra estructural (Canton et al., 2001a). La escasez de precipitaciones de cierta magnitud en la zona de estudio limita los ciclos de humectación-deseccación de la marga a los milímetros superficiales (Cantón et al., 2001b), lo que provoca que el material meteorizado disponible para ser desplazado por los movimientos en masa sea escaso y por ende los movimientos en masa. El proceso que iniciaría la formación de estos movimientos puede ser un proceso similar al observado bajo la vegetación. La capa de material meteorizado superficial presenta una mayor capacidad de retención de agua que el regolito subyacente, que solo tiene macroporos incapaces de retener el agua y con poca capacidad de succión. Esto impide el flujo vertical de agua desde la capa de 1-2cm superficial más meteorizada a capas más profundas y hace que se acumule el agua en los primeros centímetros de suelo (el frente de humectación rara vez supera el 1 cm de espesor; Canton et al., 2001). Cuando existe suficiente cantidad de material meteorizado y la costra estructural tiene cierto espesor para acumular bastante agua, aumenta su peso y se produce el deslizamiento de este material meteorizado y saturado sobre el regolito.

A partir de estas variables, todas ellas obtenidas durante un vuelo con un dron de bajo coste, es posible elaborar mapas de riesgo de ocurrencia de movimientos en masa con un ajuste similar al obtenido en otros trabajos en los que se combinan fuentes de información mas costosas (Park y Kim, 2019; Dou et al., 2019). Además este modelo, no sólo son representativo de los sistemas de badlands semiáridos, si no que podrían aplicarse a numerosas zonas alteradas o recientemente restauradas, como canteras o escombreras de minería, taludes de carreteras, etc; que presenten propiedades edáficas y topográficas similares. En estas zonas, a menudo cercanas a zonas habitadas y transitadas por el hombre, el impacto de los movimientos en masa podría ser catastrófico, por lo que es crucial disponer de

herramientas que permitan identificar las zonas vulnerables para poder adoptar medidas de prevención. Disponer de mapas de riesgos como el elaborado en este trabajo constituye un recurso clave para la diseñar estrategias de manejo y prevención.

5. Conclusiones

La metodología usada para la obtención de las imágenes por medio de drones y su uso para la creación del MDE de muy alta resolución, demuestra ser una herramienta muy útil para el monitoreo y la prevención de los movimientos en masa. Ventajas como la elevada resolución espacial que provee, la relativa sencillez en el manejo de los drones o el reducido precio de estos los convierten en una técnica muy eficaz para esta tarea.

Por otro lado, los resultados obtenidos sobre la relación entre los atributos topográficos y los movimientos en masa superficiales demuestran que la ocurrencia de movimientos en masa en los badlands de Tabernas está controlada por factores topográficos como la elevación, la pendiente y la orientación. La cubierta vegetal es otro factor clave, que a diferencia de lo que se observa en la mayoría de las zonas húmedas, actúa favoreciendo la ocurrencia de movimientos en masa.

El uso de estas variables obtenidas a partir de técnicas geománticas, junto con la aplicación de modelos estadísticos multivariantes no paramétricos predicen de forma bastante precisa la ocurrencia de movimientos en masa y puede utilizarse como técnica de prevención a un coste bajo.

6. Bibliografía

- Alexander, R. W., Calvo-Cases, A., Arnau, E., Lazaro, R., Mather, A. E., (2008). *Erosion and stabilisation sequences in relation to base level changes in the El Cautivo badlands, SE Spain*. *Geomorphology* 100 (s 1–2): pp 83–90
- Breiman, L., (2001). *Random forests*. *Mach Learn* 45: pp 5–32
- Cantón, Y., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., Le Bouteiller, C., Sole-Benet, A., Calvo-Cases, A., (2018). *Runoff Generation in Badlands*. En: Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, F., Kuhn, N. (Eds.), *Badlands dynamics in the context of global change*. Elsevier, Amsterdam: pp. 155-190.
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., Lázaro, R., (2003). *Soil-geomorphology relations in gypsiferous materials of the tabernas desert (Almería, Spain)*. *Geoderma* 115, pp 193–222.
- Cantón, Y., Domingo, F., Solé-Benet, A., Puigdefábregas, J., (2001a). *Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain*. *Journal of Hydrology*, 252: pp 65-84.
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., Queralt, I., Pini, R., (2001b). *Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment in SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches*. *Catena* 44: pp 111-132.
- Cantón Castilla, Y., (1999), *Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisaje de cárcavas* (Tesis Doctoral). Universidad de Almería. Almería.
- Calvo-Cases, A., Harvey, A.M., Alexander, R. W., Cantón, Y., Lazaro, R., Solé-Benet, A., Puigdefabregas, J., (2014). *Badlands in the Tabernas Basin, Betic Chain*. En: F Gutierrez, M Gutierrez (Eds) *Landscape and landforms of Spain*. Springer Verlag: pp. 197-211
- CAO, X.S., (2011). *Anti-slide piles reinforcement of expansive soil landslides*. Civil and trasporatation college of Hohai University, Nanjing, Jiangsu, China.
- Chen, W., Li, W., Hou, E., Li, X., (2016). *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China*. *Environ. Earth Sci.* 75, 3951. Consultado el 17 de junio de 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4795-7>
- Chen, C. W., Tung, Y. S., Liou, J. J., Li, H.C., Cheng, C.T., Y. Chen, M., Oguchi. T., (2019). *Assessing landslide characteristics in a changing climate in northern Taiwan*. *Catena* 175, pp 263–277. Consultado el 3 de mayo de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.023>
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, Junta de Andalucía (2016). *Anexo IX: Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de los Parajes Naturales Sierra Alhambilla (ES0000045) y Desierto de Tabernas (ES0000047)*. En: *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía Número 245 - viernes, 23 de diciembre de 2016*. Consultado el 22 de abril de 2019. https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/245/BOJA16-245-00122-21925-04_00104550.pdf
- Cutler, D.R., Edwards, T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J., Lawler, J.J., (2007). *Random forests for classification in ecology*. *Ecology* 88: pp 2783–2792
- Dou, J., Yunus, A. P., Tien Bui, D., Merghadi, A., Meheub Sahana, Zhongfan Zhu, Chi-Wen Chen, Khabat Khosravi, Yong Yang, Binh Thai Pham, (2019) *Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall-induced*

- landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan*. Science of the Total Environment 662, pp 332–346 Consultado el 6 de julio de 2019 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.221>
- Dou, J., Chang, K.T., Chen, S., Yunus, A.P., Liu, J.K., Xia, H., Zhu, Z., (2015a). *Automatic casebased reasoning approach for landslide detection: integration of object-oriented image analysis and a genetic algorithm*. Remote Sens. 7, pp 4318–4342. Consultado el 5 de mayo de 2019. <https://doi.org/10.3390/rs70404318>
- Dou, J., Li, X., Yunus, A.P., Paudel, U., (2015b). *Automatic detection of sinkhole collapses at finer resolutions using a multi-component remote sensing approach*. Nat. Hazards. Consultado el 13 de mayo de 2019. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1756-0>
- Fernandes N.F., Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R., Greenberg H., (2004). *Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling*. Catena 55: pp 163-181.
- Forbes F., Broadhead J., Bischetti G.B., Brardinoni F., Dykes A., Gray D., Imaizumi F., Kuriakose S.L., ... and Wu T.H.; (2011). *Forests and landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia*. Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok 2011. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. ISBN 978-92-5-106994-3.
- G. Rossi, M., Nocentini, L., Lombardi, P., Vannocci, L., Tanteri, G., Dotta, G., Biccocchi, G., Scaduto, ... and N. Casagli (2016). *Integration of multicopter drone measurements and ground-based data for landslide monitoring*. Department of Earth Sciences, University of Florence, Florence, Italy. En Aversa et al. (Eds), *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. (pp. 1745-1750) Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy. ISBN 978-1-138-02988-0
- Gao J., Maro J., (2010). *Topographic controls on evolution of shallow landslides in pastoral Wairarapa, New Zealand, 1979-2003*. Geomorphology 114: 373-381.
- IPCC, (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. En: *Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Consultado el 28 de junio de 2019. https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- Iverson, R.M., (2000). *Landslide triggering by rain infiltration*. Water Resources Research 36, n° 7. Pp 1897-1910
- Jovanovski, M., Milevski, I., Papic´, J.B., Peševski, I., and Markoski B., (2013). *Chapter 17. Landslides in the Republic of Macedonia Triggered by Extreme Events in 2010*. En Denes Loczy (Ed.), *Geomorphological Impacts of Extreme Weather. Case Studies from Central and Eastern Europe*. (Pp 265-280). Springer, Dordrecht. ISBN 978-94-007-6300-5
- Khan, Y.A., Lateh, H., Baten, M.A., Kamil, A.A., (2012). *Critical antecedent rainfall conditions for shallow landslides in Chittagong City of Bangladesh*. Environ. Earth Sci. 67, pp 97–106.
- Koseki, J., Tsutsumi, Y., Kiyota, T., Sasaki, T., Wada, N., Hida, J., Endo, M., (2006). *Damage to earth structures for national highways by the 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake*. Soils Found. <https://doi.org/10.3208/Sandf.46.739>.
- Lázaro, R. y Puigdefábregas, J. (1994). *Distribución de la vegetación terófitica en relación con la geomorfología en áreas acarcavadas cerca de Tabernas, Almería*. En *Monografías de Flora y Vegetación Béticas*.
- Lázaro Suau, R., (1995). *Relaciones entre vegetación y geomorfología en el área acarcavada del Desierto de Tabernas*. Tesis Doctoral.

- Meisina C, Scarabelli S (2007) *A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils*. *Geomorphology* 87: pp 207-223.
- Miao L.C. and Zhong X.C and Yin Z.Z., (1999). *The Relationship Between Strength and Water Content of Expansive Soil*. *Chinese Rock and Soil Mechanics*, 20(2): pp 71-75.
- Moore, I. D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R. (1991), *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. *Hydrol. Process.*, 5: pp 3-30. doi:[10.1002/hyp.3360050103](https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103)
- Oku, Y., Yoshino, J., Takemi, T., Ishikawa, H., (2014). *Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of Typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 2699–2709.
- Park, S., Kim, J., (2019). *Landslide Susceptibility Mapping Based on Random Forest and Boosted Regression Tree Models, and a Comparison of Their Performance*. *Applied Sciences* 9(5): 942
- Parker, A.J. (1982). *The topographic relative moisture index: an approach to soil moisture assessment in mountain terrain*. *Phys Geogr*, 3, pp 160-168.
- Pierson, T.C., Iverson, R.M., Ellen, S.D., (1992). *Spatial and temporal distribution of shallow landsliding during intense rainfall, Southeast Oahu, Hawaii*. *Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand*, 2: pp 1393-1398
- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Jetten, V. (2015). *Biological soil crust effects must be included to accurately model infiltration and erosion in arid and semiarid systems*. *Geomorphology* 241, pp 331–342
- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Lazaro, R., Solé-Benet, A. (2014). *Cross-scale interactions between surface components and rainfall properties. Non-linearities in the hydrological and erosive behavior of semiarid catchments*. *Journal of Hydrology* 517, pp 815–825.
- Saito, H., Matsuyama, H., (2012). *Catastrophic landslide disasters triggered by recordbreaking rainfall in Japan: their accurate detection with normalized soil water index*. *SOLA* 8, pp 81–84.
- Shu Hu, Juying Ji, García-Fayos, P., Meng Kou, Yixian Chen & Wanzhong Wang (2018). *Telling a different story: plant recolonization after landslides under a semi-arid climate*. *Plant Soil* 426,163–178
- Solé Benet, A., Cantón, Y., Lázaro, R., del Barrio, G., Puigdefábregas, J., Vidal, S. (2008). *Estación Experimental "El Cautivo" (Desierto de Tabernas, Almería). Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería. Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Almería*. En: Ministerio de Medio Ambiente (Ed). *La Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Desertificación (RESEL). Actividades y Resultados 1995-2004*. Dirección General para la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid
- Van Eynde, E., Dondeyne, S., Isabirye, M., Deckers, J., Poesen, J., (2017). *Impact of landslides on soil characteristics: implications for estimating their age*. *Catena* <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.003>.
- Veronesi, F., Hurni, L., (2014). *Random forest with semantic tie points for classifying landforms and creating rigorous shaded relief representations*. *Geomorphology* 224, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.020>.
- Yin Z.Z., Wei J., Yuan J. P., CAO X.S., (2010). *Landslide and Improve of Expansive Soils Slope*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 41(1):1-6.

- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S., Al-Katheeri, M.M., (2015). *Landslide susceptibility mapping using the random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia*. *Landslides* <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1>.
- Zhang, F., Chen, W., Liu, G., Liang, S., Kang, C., He, F., (2012). *Relationships between landslide types and topographic attributes in a loess catchment, China*. *Journal of Mountain Science*. Volumen 9, pag: 742. <https://doi.org/10.1007/s11629-012-2377-7>

**Anexo I: Material Suplementario trabajo fin de grado:
Relación entre los atributos topográficos y la ocurrencia de movimientos en masas.
Generación de mapas de vulnerabilidad a partir de modelos digitales de elevaciones
imágenes de alta resolución.**

Este documento contiene:

Figuras suplementarias (1-3):

Figura suplementaria 1. Localización de los puntos de control utilizados para la georreferenciación

Figura suplementaria 2. Ortoimagen de la zona de estudio (2017)

Figura suplementaria 3. Movimientos en masa inventariados en la zona de estudio.

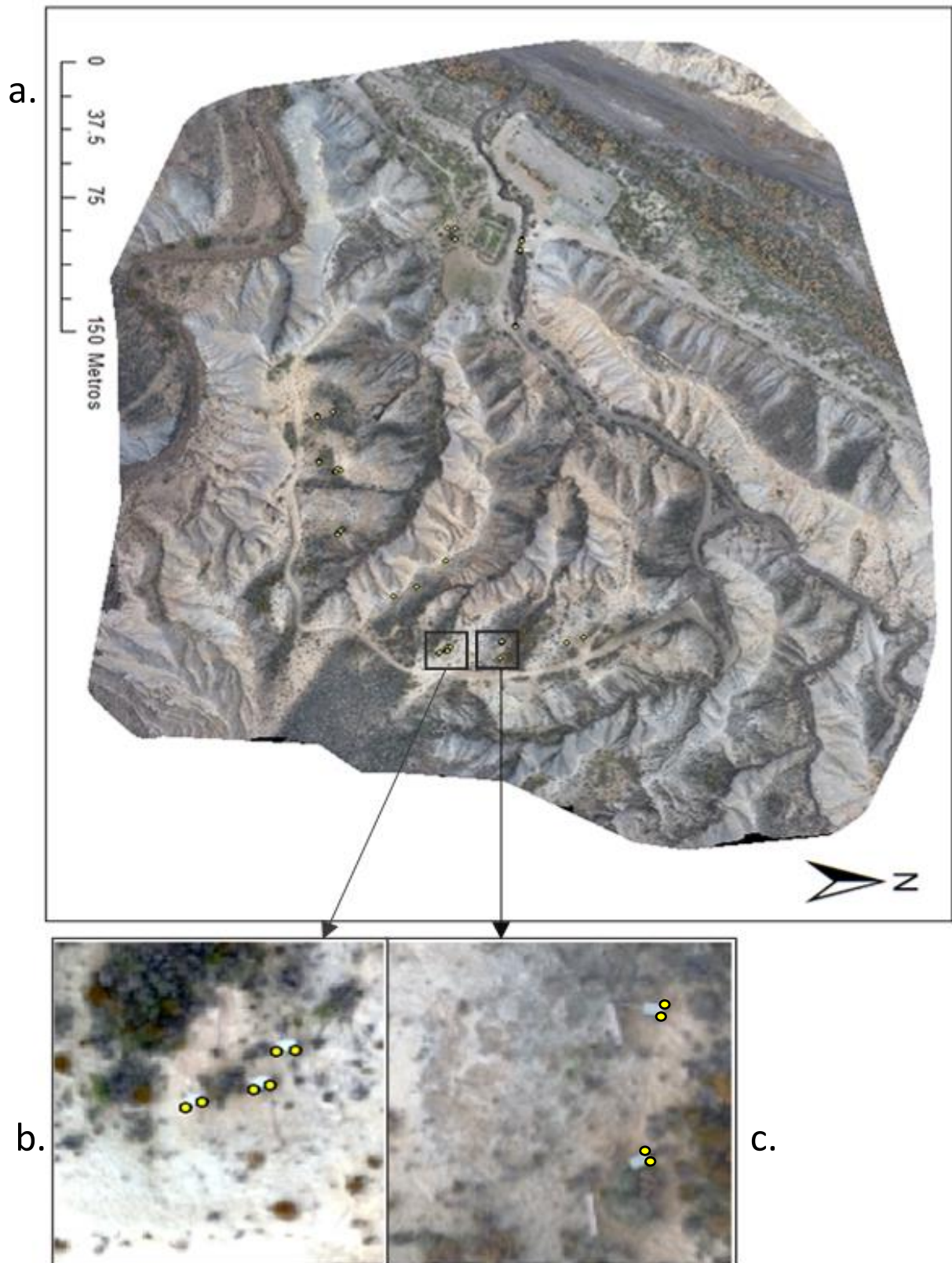


Figura suplementaria 1. Localización de los puntos de control para la georeferenciación. Coordenadas tomadas como puntos de referencia, en amarillo, para la georeferenciación de las imágenes y del Modelo Digital de Elevaciones (a), detalle de algunos puntos tomados usando las estructuras de la estación experimental (b) y (c).



Figura suplementaria 2. Ortoimagen de la zona de estudio de 2011. Ortoimagen multiespectral obtenida en el vuelo de 2011 delimitada a la zona El Cautivo, desierto de Tabernas.

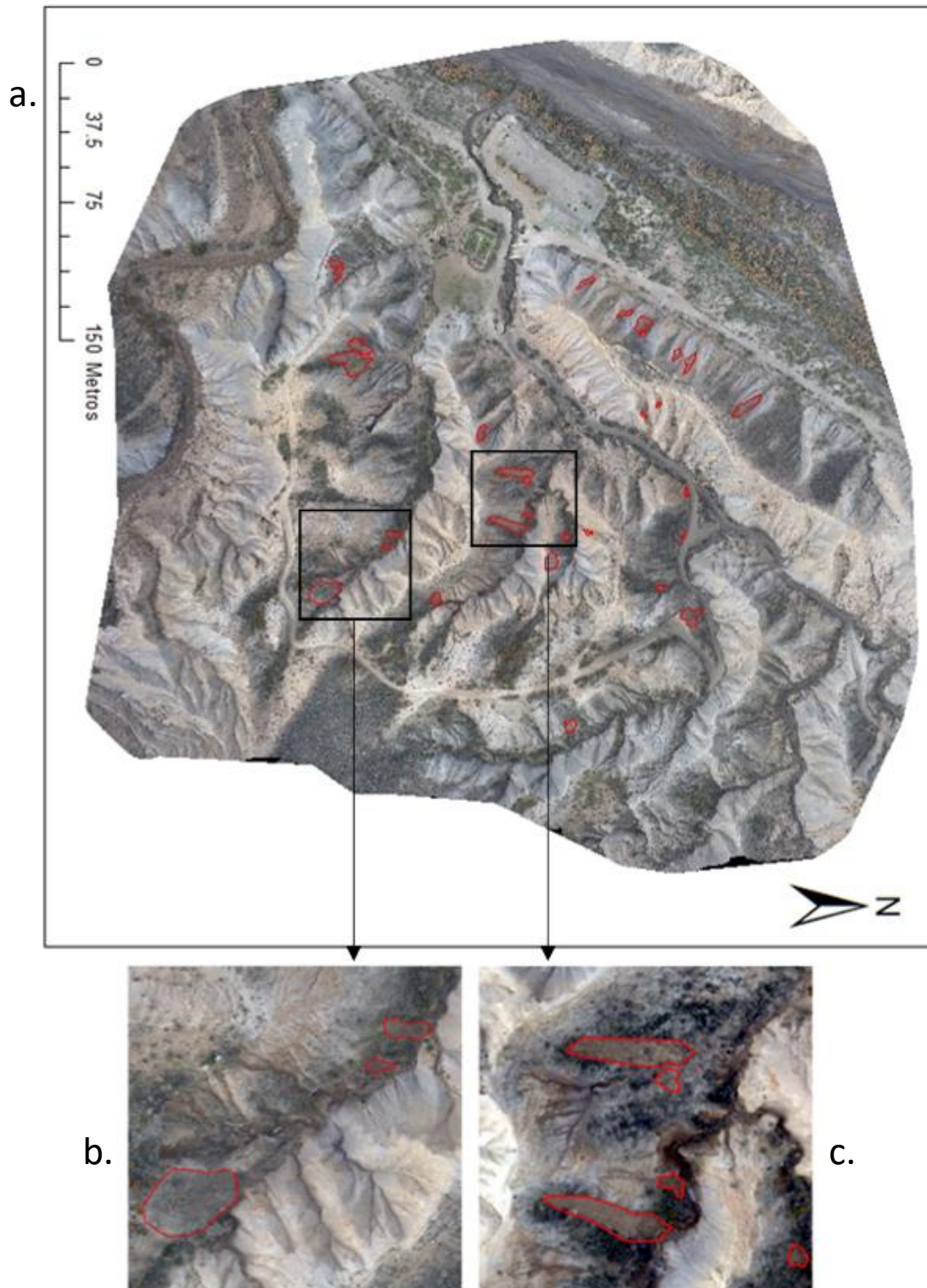


Figura suplementaria 3. Movimientos en masa inventariados en la zona de estudio. Movimientos en masa ocurridos tras los episodios de lluvia en contorneados en color rojo (a), detalle de algunos de los movimientos más evidentes y de mayor tamaño (b) y (c).