

INTEGRACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA Y LIDAR DE DISTINTA RESOLUCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN EL SECTOR DE LA GUARDIA (JAÉN)

Tomás FERNÁNDEZ DEL CASTILLO (1,2), José Luis PÉREZ GARCÍA (1,2), José Miguel GÓMEZ LÓPEZ (1,2), Javier CARDENAL ESCARCENA (1,2), Francisco MOYA GIMÉNEZ (1) y Jorge DELGADO GARCÍA (1)

(1) Grupo de Sistemas Fotogramétricos y Topométricos
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría
Universidad de Jaén

tfernand@ujaen.es, jlperez@ujaen.es, jglopez@ujaen.es, jcardena@ujaen.es, fmoya@ujaen.es,
jdelgado@ujaen.es

(2) Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energías y Medio Ambiente
Universidad de Jaén

RESUMEN

Este estudio trata sobre el empleo de técnicas de fotogrametría y LiDAR aéreo para analizar la actividad de los deslizamientos durante un período prolongado de 32 años (1984-2016), en un área de unos 50 km² a lo largo de la carretera A-44, cerca de Jaén. Además, se emplearon vuelos fotogramétricos realizados con sistemas aéreos no tripulados (2012-2016) en dos sectores de esta área. Una vez orientados los vuelos y calculados los modelos diferenciales de superficies (MdD), se obtuvo un inventario multitemporal de movimientos. El análisis de éste permitió caracterizar geoméricamente las distintas tipologías identificadas (colapsos, deslizamientos y flujos), identificar las condiciones en las que se producen y determinar la actividad de los movimientos en la zona y en una serie de áreas comunes de monitorización. Así, se encontraron algunos períodos más activos (1996-2001, 2009-2013) entre otros menos activos (1984-1996, 2001-2009, 2013-2016), que se relacionan con eventos lluviosos y años secos, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la actividad de deslizamientos y su datación es crucial en los análisis de riesgo, ya que permite determinar la peligrosidad en términos de probabilidad espaciotemporal (Varnes, 1984; Guzzetti et al., 2005). La datación de deslizamientos es difícil en la mayoría de los casos, por lo que generalmente se reduce a la datación directa de una muestra reducida de deslizamientos o a la datación de los factores desencadenantes para determinar la actividad de manera indirecta.

Para áreas más amplias, el análisis geomorfológico es una herramienta fundamental para obtener inventarios multitemporales (Guzzetti et al., 2012). Este análisis suele basarse en la fotointerpretación, técnica que requiere mucho tiempo e introduce cierta subjetividad en el análisis (Brunsdén et al., 1993). En los últimos años, las técnicas geomáticas han abierto una interesante línea de investigación en estos estudios, basada en colecciones de fotografías aéreas e imágenes de satélite, con información sobre la superficie del terreno en el pasado. Así, técnicas

de teledetección combinadas con sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas básicas para el análisis de deslizamientos (Chacón et al., 2006), ya que permiten cartografiar áreas de diferente extensión con la precisión requerida. Estas técnicas pueden basarse en sensores pasivos, o activos, como el LiDAR e InSAR (Scaioni et al., 2014). Estos sistemas, a bordo de plataformas espaciales y aerotransportadas, incluidos los sistemas aéreos no tripulados o remotamente pilotados (UAS o RPAS), permiten el desarrollo de enfoques 3D y multitemporales. Estas técnicas también se aplican al reconocimiento e inventario de deslizamientos, monitorización, análisis y predicción. En estudios de alta resolución con deslizamientos con procesos de reactivación, la fotogrametría aérea es muy adecuada. Por ello, su uso está cada vez más extendido (Prokesova et al., 2010), combinada a veces con otros métodos, como el LiDAR (Dewitte et al., 2008; Fernández et al., 2017) y los GNSS. En estos estudios, la orientación de los bloques de imágenes se basa en técnicas convencionales de aerotriangulación, utilizando un número reducido de puntos de control (GCP). Recientemente, el uso cada vez mayor de UAS, combinados con técnicas de visión por computador como SfM y MVS (Niethammer et al., 2012; Fernández et al., 2016), han extendido la aplicación de técnicas fotogramétricas.

Una vez orientadas las imágenes, se pueden generar productos fotogramétricos, como los modelos digitales de elevaciones (MDE), bien de superficie (MDS) o del terreno (MDT), y ortofotografías. A partir de los MDE de sucesivas épocas se han desarrollado enfoques cuantitativos, como el cálculo de modelos diferenciales (MdD) y cálculos volumétricos (Dewitte et al., 2008; Prokesova et al., 2010; Niethammer et al., 2012; Fernández et al., 2016, 2017). Además, en algunos casos se calculan los vectores de desplazamiento 3D (Niethammer et al., 2012; Fernández et al., 2016), y se realizan observaciones para la caracterización de movimientos mediante la interpretación y el análisis de imágenes (Dewitte et al., 2008; Niethammer et al., 2012; Prokesova et al., 2010; Fernández et al., 2016; 2017). Recientemente se están desarrollando técnicas complejas para estimar vectores de desplazamiento 3D a partir de nubes de puntos, utilizando campos vectoriales de desplazamiento 3D densos (Gojic et al., 2021). Por su parte, las técnicas LiDAR se están utilizando ampliamente en la investigación de deslizamientos de tierra, ya que permiten generar MDE con alta resolución y precisión. La mayoría de estos estudios se centran en movimientos individuales en áreas inestables, aunque algunos de ellos se aplican para detectar deslizamientos en áreas más grandes y elaborar inventarios (González-Díez et al., 2014; Fernández et al., 2021).

En este trabajo se han integrado técnicas aéreas de LiDAR y fotogrametría de distinta resolución para elaborar un inventario multitemporal de deslizamientos y monitorear su actividad en un área relativamente amplia de aproximadamente 50 km². Para ello, se obtuvieron MdD que permitieron identificar cambios verticales en la superficie del terreno, sobre los que se aplican filtros para discriminar los deslizamientos de otras posibles causas de cambios en la superficie. Una vez obtenido el inventario de deslizamientos, se realizaron análisis morfométricos y factoriales para caracterizar el tipo, morfología y actividad del deslizamiento. Además, se utilizó un conjunto de áreas comunes de inestabilidad para monitorizar la actividad de forma más precisa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio de 51,4 km² se encuentra al sur de la ciudad de Jaén, en las inmediaciones de la autovía A-44 que la une con Granada por el valle del río Guadalbullón. Existen numerosos procesos de inestabilidad que suelen corresponder a deslizamientos y flujos e incluso caídas de rocas en menor medida, según la clasificación de Varnes (1978). En la zona aparecen diversos materiales pertenecientes a diferentes unidades tectónicas (Roldán et al., 1988; Pérez-Valera et al., 2017) de una estructura compleja y ampliamente discutida (Figura 1): materiales triásicos (lutitas, carbonatos y evaporitas); materiales subbéticos y prebéticos, constituidos por potentes series carbonatadas (Jurásico) superpuestas por margas y calizas margosas (Cretácico); unidades alóctonas del Guadalquivir, donde se integran lutitas triásicas, margas cretácicas y arcillas y margas miocenas; conglomerados y arenas pliocenas; y recubrimientos cuaternarios (coluviales, aluviales y suelos).

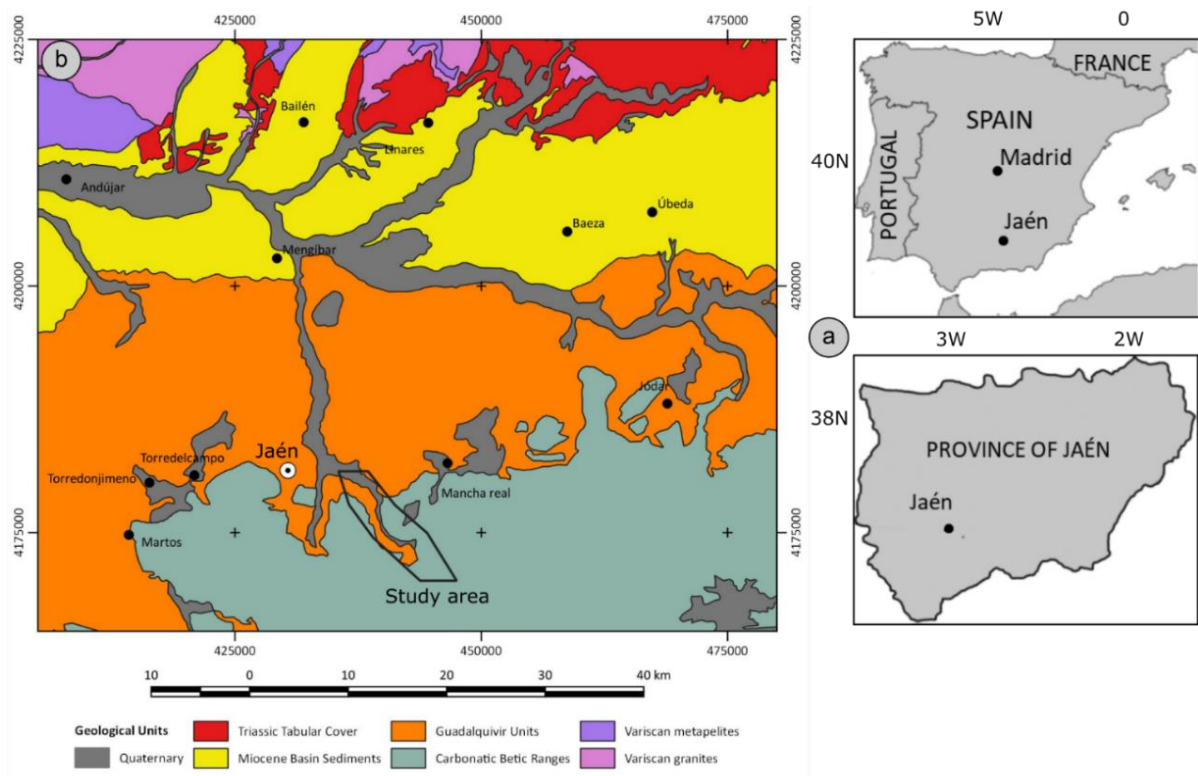


Figura 1. Localización geográfica y entorno geológico del área de estudio.

2.2. Materiales

La metodología se centra en el uso de técnicas de fotogrametría aérea y LiDAR, con datos capturados desde plataformas aéreas convencionales con resolución decamétrica. Así, en 2010 se realizó un vuelo combinado de cámara digital y sensor LiDAR, con sistemas GNSS/ IMU para orientación y georreferenciación directa. Además, se procesaron un conjunto de vuelos convencionales desde 1984 hasta 2016 (Tabla 1). Todos los datos están disponibles en diferentes formatos de imagen desde servidores públicos de datos, como las fototecas del IGN (2022) y de Andalucía (2022). Por último, se realizaron y procesaron varios vuelos UAS con resolución centimétrica (Tabla 1).

Vuelos fotogramétricos convencionales							
Fecha	Bandas	Formato	Escala	Cámara	Res. (m)		
1984	B/N	Analógico	1:30000	Wild RC10	0,75		
1996	B/N	Analógico	1:20000	Wild RC10	0,30		
2001	B/N	Analógico	1:20000	Leica RC30	0,30		
2005	CIR	Analógico	1:30000	Leica RC30	0,45		
2009	RGB	Digital	1:30000	Z/I DMC120	0,45		
2010 ¹	RGB-NIR	Digital	1:10000	Z/I DMC	0,20		
2011	RGB	Digital	1:30000	Z/I DMC120	0,45		
2013	RGB	Digital	1:30000	Vexcel UCXp	0,45		
2016	RGB-NIR	Digital	1:30000	Vexcel UCXp	0,45		
LiDAR aéreo							
Fecha	Sistema						p / m ²
2010	Leica ALS50-II						1-1.5
Vuelos UAS							
Fecha	UAV	Camera	Strip	Photo.	Overl.	Sidel.	Res. (m)
Nov-2012	Falcon8 Asctec	Sony Nex 5N	6	72	70%	40%	0.029
Abr-2013	Falcon 8 Asctec	Sony Nex 5N	6	72	70%	40%	0.030
Jul-2014	Falcon 8 Asctec	Sony Nex 5N	6	72	70%	40%	0.034
Jul-2015	FV-8 ATtyges	Canon G12	6	364	90%	40%	0.037
Feb-2016	Falcon 8 Asctec	Sony Nex 5N	6	72	70%	40%	0.044

Tabla 2. Propiedades de las imágenes aéreas, UAS y datos LiDAR. ¹ Vuelo de referencia.

2.3. Metodología

La metodología para la obtención del inventario multitemporal de deslizamientos consta de varios pasos, parcialmente descritas en estudios previos (Fernández et al., 2016; 2017; 2021):

1. Orientación del vuelo de referencia 2010 (fotogrametría y LiDAR) mediante técnicas de orientación directa basadas en los parámetros de vuelo (GNSS e IMU) en la estación de trabajo fotogramétrica digital y el software Socet Set 5.6. La desorientación residual entre los datos fotogramétricos y LiDAR, se resolvió utilizando un conjunto de 25 GCP altimétricos de la nube de puntos LiDAR. Los errores (RMS) fueron de 0,03 m (XY) y 0,09 m (Z).
2. Orientación de los vuelos fotogramétricos restantes en el mismo sistema de referencia, transfiriendo GCP de segundo orden ubicados en áreas estables del vuelo de referencia de 2010. La Tabla 2 muestra el número y las propiedades de los GCP para cada vuelo, así como los resultados de este proceso. Considerando además la propagación del error desde el vuelo de referencia, los errores RMS en XY varían entre 0,05 y 0,27 m y en Z entre 0,10 y 0,22 m.
3. Generación de los MDS y ortofotografías. Tras la orientación de todos los vuelos, se utilizaron técnicas automáticas de correlación de imágenes y rectificación diferencial para generar los modelos digitales de superficie (MDS) y ortofotografías para cada vuelo, utilizando el módulo NGATE de Socet 5.6. Se consideró una resolución MDS de 5 veces (2,5 m) la de la imagen original. La resolución de las ortoimágenes se fija en el mismo valor de la imagen original (0,5 m). Las incertidumbres verticales fueron de dos a tres veces los errores RMS propagados en Z, lo que condujo a valores de incertidumbres entre 0,23 m para el vuelo de referencia de 2010, 0,25–0,40 m para la mayoría de los vuelos y 0,55 m para el vuelo de 2009 (Tabla 2).

Vuelos fotogramétricos convencionales										
Fecha	Nº Foto	Tipos y Nº GCP	Nº P. Paso	RMS (pixel)	RMS GCP Error (m)		RMS Prop. Error (m)		Incert. MDS (m)	Incert. MdD (m)
					XY	Z	XY	Z		
1984	30	28xyz, 26z	162	0,507	0,266	0,084	0,268	0,125	0,313	
1996	38	20 xyz	178	0,474	0,172	0,136	0,175	0,165	0,413	0,518
2001	32	9xyz	140	0,571	0,067	0,093	0,073	0,132	0,330	0,528
2005	32	11xyz, 19z	164	0,637	0,049	0,133	0,057	0,162	0,405	0,522
2009	33	15xyz, 9z	186	0,506	0,027	0,200	0,040	0,221	0,553	0,685
2010	98	25 z	649	0,328	0,030	0,093	-	-	0,233	0,599
2011	35	33xyz, 17z	201	0,376	0,139	0,110	0,142	0,144	0,360	0,429
2013	31	27xyz	211	0,570	0,068	0,044	0,074	0,103	0,258	0,443
2016	22	16xyz	122	0,604	0,052	0,035	0,060	0,099	0,248	0,357
Vuelos UAS										
Fecha	Nº Ft.	GCP/CHK	P,Paso	Pixel	E XY	E Z	EP XY	EP Z	I MDS	I MdD
2012	72	11/5	17795	0,75	0,017	0,015			0,038	
2013	72	12/5	14322	0,39	0,036	0,020	0,040	0,025	0,063	0,073
2014	72	8/4	14105	0,86	0,030	0,032	-	-	0,080	0,102
2015	364	11/5	17,591	0,50	0,039	0,029	0,049	0,043	0,108	0,134
2016	72	13/5	9045	1,07	0,034	0,025			0,063	0,124

Tabla 2. Errores de orientación de los vuelos fotogramétricos y UAS, e incertidumbres de los modelos.

4. Cálculo de MDS de diferencias (MdD), a partir de los MDS de fechas sucesivas mediante el software QGIS. Estos modelos permiten la caracterización objetiva de áreas con cambios verticales en la superficie del suelo. Las diferencias pueden ser negativas o positivas, dependiendo de si cada modelo se encuentra por debajo o por encima del anterior, para así identificar áreas con descenso o ascenso de la superficie del terreno. Se utilizaron MDS en lugar de MDT debido a que los modelos son de origen fotogramétrico en los que los procesos de clasificación y filtrado automático de nubes de puntos, o la propia edición manual, no aseguran resultados precisos en zonas con una densa cubierta vegetal. Las incertidumbres de los modelos de diferencias se indican también en la Tabla 2, oscilando entre 0,35 y 0,70 m.

5. Una vez obtenidos los MdD, fue necesario discriminar las áreas inestables o deslizamientos de otras diferencias de altitud entre MDS como las debidas a cambios en la vegetación, construcciones, carreteras, etc., además del ruido causado por desorientaciones residuales. Para ello, se aplicaron distintos filtros y máscaras, comenzando por la utilización de índices de vegetación a partir de las bandas espectrales de las ortofotografías disponibles. Así, se ha calculado el NDVI, con las bandas del infrarrojo próximo y rojo, cuando sea posible, y el GLI cuando solo se disponga de las tres bandas de color RGB. A continuación, las imágenes del índice se clasificaron por medio de diferentes umbrales (0,4 para el NDVI y 0,05 para el GLI), con lo que se obtuvieron varias máscaras binarias; éstas se sumaron, se procesaron con un filtro de moda y se aplicaron a todos los MdD. Una vez descartadas las zonas con vegetación, se aplicó una segunda máscara con áreas urbanas y masas de agua obtenidas a partir de capas vectoriales, que igualmente permitió descartarlas. A continuación, se aplicó un filtro de media iterativamente para eliminar o reducir el ruido causado por las desorientaciones residuales y restos de vegetación. Finalmente, con base en la incertidumbre de los MdD, se aplicó otro filtro para descartar aquellas zonas con desniveles con un valor absoluto inferior a 1 m, que se puede considerar como el nivel de detección mínimo para los modelos fotogramétricos.
6. El último paso es la elaboración del inventario y base de datos de deslizamientos, basado en el análisis anterior y apoyado por la fotointerpretación en ortoimágenes y estereopares. Un criterio útil para identificar movimientos fue la detección de áreas adyacentes de descenso y ascenso, donde además las primeras sean topográficamente más altas que las últimas. Los deslizamientos identificados se digitalizaron, y se realizaron diferentes análisis en el SIG para caracterizarlos y completar la base de datos con la tipología de deslizamiento, parámetros morfométricos, litología, actividad, etc. La actividad se determinó a partir del análisis de los MdD dentro de los límites de cada movimiento del inventario. Alternativamente, se ha analizado la actividad de algunas zonas piloto, a través igualmente de los MdD.

Por su parte, los vuelos UAS de 2012, 2014 y 2016 se orientaron a partir de GCP medidos sobre el terreno con GNSS, proporcionando errores inferiores a 0,04 m en XY y Z. Por su parte, los vuelos de 2013 y 2015 se orientaron con puntos transferidos desde los vuelos de 2012 y 2014, proporcionando errores propagados inferiores a 0,05 m. A partir de los vuelos orientados, se obtienen los MDS, las ortofotografías y los MdD. También se han medido desplazamientos horizontales y verticales en un conjunto de 280 puntos de monitorización. Las incertidumbres de los desplazamientos horizontales son inferiores a 0,05 m y las verticales, incluidos los de los MdD, son inferiores a 0,15 m.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis del inventario multitemporal de deslizamientos

La Figura 2 muestra el inventario multitemporal y la Tabla 3 su análisis. Se identificaron tres tipologías básicas: colapsos, deslizamientos y flujos (Varnes, 1978); que en conjunto cubren el 1,90% del área de estudio. Además, se diferenciaron colapsos en taludes naturales (47% del área movilizada) e ingenieriles (17%), además de los deslizamientos (25%) y los flujos (12%). Las áreas promedio oscilaron entre aproximadamente 1000 m² en los colapsos, hasta casi 4500 m² de deslizamientos y 10800 m² de flujos. La relación H/D media es de 0,19 en flujos, 0,5–0,6 en deslizamientos y colapsos, y 2,23 en el desprendimiento. En cuanto a las condiciones, la altitud ronda los 600 m en la mayoría de los casos; la pendiente promedio es de alrededor de 18° en flujos, de 25–30° en los deslizamientos y colapsos y de 60° en el desprendimiento. Las litologías modales son generalmente margosas-arcillosas en deslizamientos, flujos y colapsos naturales, carbonatos en el desprendimiento y materiales cuaternarios en los colapsos ingenieriles. Las diferencias de altitud promedio variaron de -0,13 m en flujos a -0,94 m en deslizamientos, -1,18 m en colapsos naturales, -1,59 m en colapsos en taludes y -3,29 m en desprendimientos.

El análisis multitemporal mostró que los períodos con mayor actividad fueron, por este orden, 2009–2010 (área total afectada de 0,35 km² y 196 casos) y 2011–2013 (0,33 km² y 149 casos). A

continuación, se situaron los períodos 2010-2011 y 1996-2001 (en torno a 0,20 km² y 135 casos). Los períodos con menor actividad son 1984-1996 y 2013-2016 (0,15 km² y 80 casos) y especialmente 2001-2005 y 2005-2009 (menos de 0,07 km² y 33 casos). Los movimientos presentaron áreas promedio entre 1500 y 2000 m² en la mayoría de los períodos, excepto en 2005-2009 cuando fue de solo 600 m². Los desniveles promedio, índices H/D y las condiciones en las que se produjeron los deslizamientos no variaron significativamente en los diferentes períodos. Sin embargo, las diferencias de altitud entre modelos variaron desde -0,53 m en el período 1984-1996 a cerca de -0,70 m en 2001-2005 y 2013-2016, y alrededor de -1,00 m en los períodos restantes, que son los más activos. Los valores negativos implican un descenso general de la superficie del terreno.

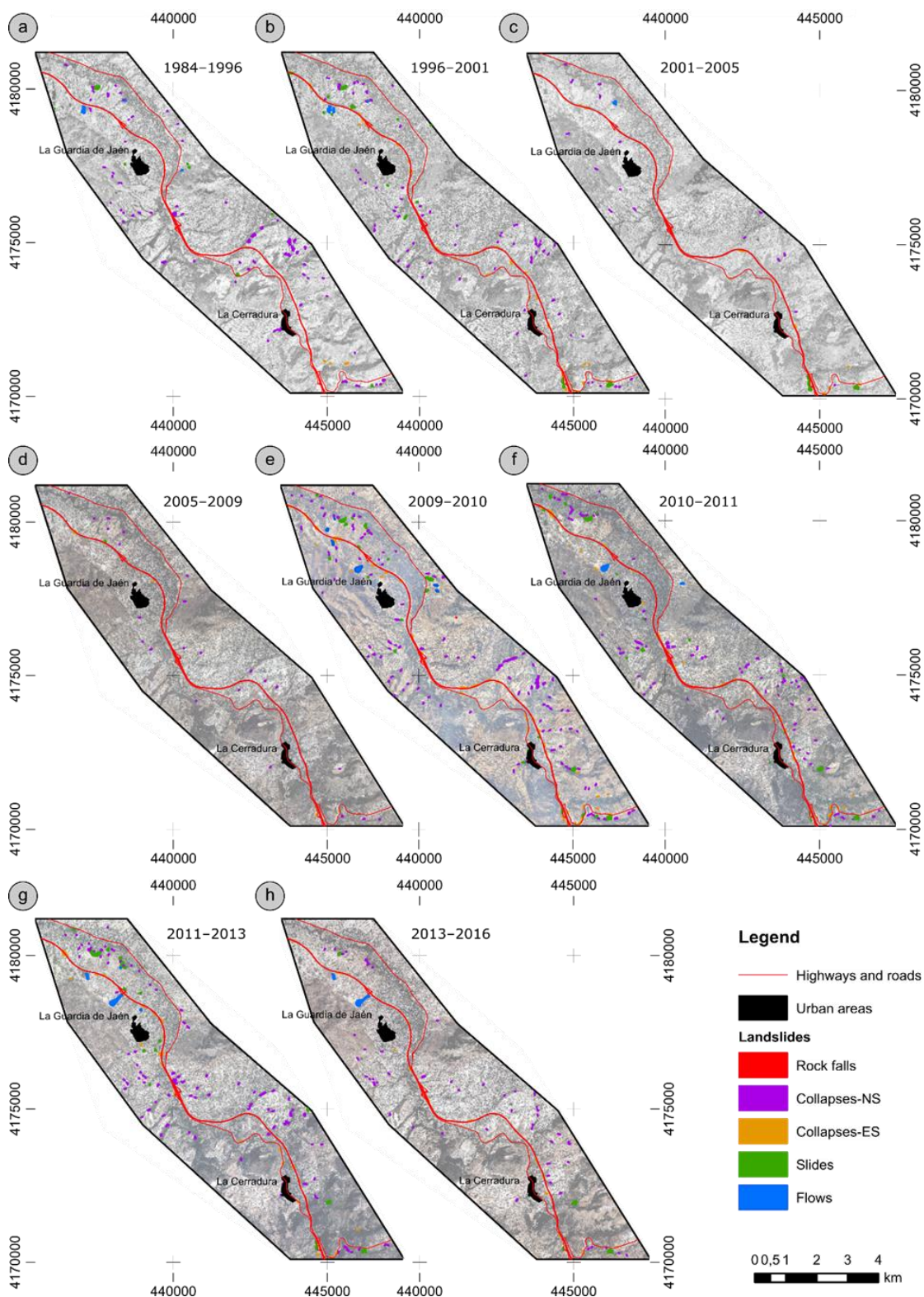


Figura 2. Inventario multitemporal de deslizamientos: (a) 1984-1996; (b) 1996-2001; (c) 2001-2005; (d) 2005-2009; (e) 2009-2010; (f) 2010-2011; (g) 2011-2013; (h) 2013-2016.

Per.	Tip.	Nº	%N	AO	%AO	Area	Per.	Des.	H/L	Alt.	Pen.	Ori.	MdD	Li.
1984 - 1996	C-N	66	80.49	107819	69.22	1634	169	21.22	0.47	609	29.27	150	-0.61	6
	DI	10	12.20	24163	15.51	2416	179	26.80	0.48	528	23.31	355	-0.54	2
	Fl	3	3.66	20097	12.90	6699	308	33.00	0.18	543	25.70	328	0.16	2
	C-T	3	3.66	3678	2.36	1226	191	13.95	0.53	735	31.94	140	-2.00	2
	Tot.	82	100	155757	100	1899	176	22.07	0.43	602	28.51	142	-0.53	6
1996 - 2001	C-N	72	54.55	55,631	31.92	773	126	16.19	0.52	615	33.13	91	-1.33	6
	DI	17	12.88	70,745	40.59	4065	242	26.83	0.37	569	23.00	101	-0.96	2
	Fl	5	3.79	20,850	11.96	4170	269	25.36	0.17	560	17.33	356	-0.17	2
	C-T	38	28.79	27,049	15.52	665	131	11.05	0.57	620	28.86	61	-1.79	8
	Tot.	132	100	174,275	100	1320	149	16.81	0.43	605	28.87	82	-1.11	8
2001 - 2005	C-N	16	50.00	13,517	19.70	845	173	17.03	0.52	619	36.71	216	-1.35	8
	DI	4	12.50	33,588	48.96	8397	403	48.26	0.47	677	31.24	77	-0.13	3
	Fl	1	3.13	7837	11.42	7837	365	28.29	0.14	509	15.01	68	-0.13	2
	C-T	11	34.38	13,663	19.92	1242	183	15.62	0.59	644	30.28	4	-1.77	2
	Tot.	32	100	68,605	100	2144	211	20.80	0.46	632	33.14	68	-0.70	8
2005 - 2009	C-N	25	75.76	15,262	78.98	610	110	15.57	0.56	619	30.42	334	-1.11	6
	DI	1	3.03	1398	7.23	1398	178	11.72	0.28	571	25.03	238	-0.46	8
	C-T	7	21.21	2664	13.79	381	115	9.40	0.64	598	26.48	34	-1.20	2
	Tot.	33	100	19,324	100	586	113	14.15	0.55	613	29.42	337	-1.08	6
2009 - 2010	Dp	1	0.51	268	0.08	268	70	43.29	2.23	990	59.88	187	-3.29	1
	C-N	118	60.20	129,192	36.75	1095	158	18.65	0.50	628	29.75	315	-1.38	6
	DI	26	13.27	113,848	32.39	4379	260	35.35	0.47	582	27.13	205	-1.18	2
	Fl	6	3.06	54,691	15.56	9115	361	39.27	0.18	583	21.44	53	-0.25	2
	C-T	45	22.96	53,525	15.23	1189	191	15.23	0.59	627	29.84	194	-1.50	6
	Tot.	196	100	351,524	100	1801	185	20.84	0.46	621	29.16	254	-1.16	6
2010 - 2011	C-N	85	61.59	72,920	33.53	858	133	16.68	0.50	616	29.52	186	-1.10	6
	DI	19	13.77	73,320	33.71	3859	225	27.23	0.39	586	23.42	195	-1.37	6
	Fl	2	1.45	35,100	16.14	17,550	495	53.71	0.18	630	20.51	50	0.00	2
	C-T	32	23.19	36,135	16.62	1129	177	12.96	0.51	629	28.04	248	-1.37	6
	Tot.	138	100	217,475	100	1576	161	17.81	0.41	615	28.21	194	-1.06	6
2011 - 2013	C-N	94	63.09	124,785	37.94	1327	160	20.26	0.49	594	28.75	331	-1.33	6
	DI	22	14.77	106,383	32.35	4836	276	35.77	0.46	563	26.12	89	-0.92	2
	Fl	4	2.68	58,341	17.74	14,585	484	39.41	0.14	585	15.86	55	-0.33	2
	C-T	29	19.46	39,373	11.97	1358	178	17.54	0.63	592	28.61	53	-1.79	8
	Tot.	149	100	328,882	100.00	2207	190	22.54	0.44	589	27.99	37	-1.08	6
2013 - 2016	C-N	52	70.27	43,096	30.05	829	134	18.12	0.56	637	32.19	184	-1.48	6
	DI	4	5.41	36,132	25.20	9033	372	58.69	0.55	685	30.86	207	-0.33	3
	Fl	2	2.70	51,389	35.84	25,695	852	66.38	0.18	609	12.68	54	0.06	2
	C-T	16	21.62	12,777	8.91	799	153	14.05	0.66	610	32.68	251	-2.25	8
	Tot.	74	100	143,395	100.00	1938	170	20.74	0.43	633	3.69	168	-0.71	6
1984 - 2016	Dp	1	0.12	266	0.03	268	70	43.29	2.23	990	59.88	187	-3.29	1
	C-N	528	63.16	455,609	46.63	1065	147	18.84	0.51	614	30.11	264	-1.18	6
	DI	103	12.32	244,193	24.99	4446	255	35.13	0.47	589	26.06	147	-0.94	2
	Fl	23	2.75	115,147	11.78	10,796	410	44.93	0.19	588	17.98	44	-0.13	2
	C-T	181	21.65	161,943	16.57	1034	167	14.55	0.60	621	29.32	176	-1.65	8
	Tot.	836	100	977,157	100.00	1747	172	20.32	0.48	610	29.09	104	0.00	6

Tabla 3. Análisis del inventario multitemporal: Tipología; Nº: Número y %N; Area Ocupada y %; Area movimientos; Perímetro; Desnivel. H/L (desnivel/longitud); Altitud; Pendiente; Orientación; MdD; Litología. Dp: Desprendimientos; C-N y C-T: Colapsos en laderas naturales y taludes; DI: Deslizamientos; Fl: Flujos.

3.2. Análisis de las áreas de monitorización

Se han establecido 10 áreas comunes de monitorización (Figura 3). En la Figura 4 se muestran los MdD de detalle y en la Tabla 4 su análisis. Los resultados más significativos son los siguientes:

1. El área 1 (colapsos y deslizamientos; Figura 4) mostró tasas generales negativas en 2009-2010 y 2010-2011 (-0,30 y -0,16 m/año). Además, se encontraron sectores con altas tasas de descenso (0,5–4 m/año) en 1996-2001, 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2013.
2. El área 2 (deslizamientos) presentó una tasa general negativa en 2009-2010 (-0,21 m/año). Hay sectores con altas tasas de descenso en 1996-2001 y 2009-2010 (0,4-1,6 m/año) y sectores con tasas de ascenso significativas en 1996-2001 (0,3 m/año).

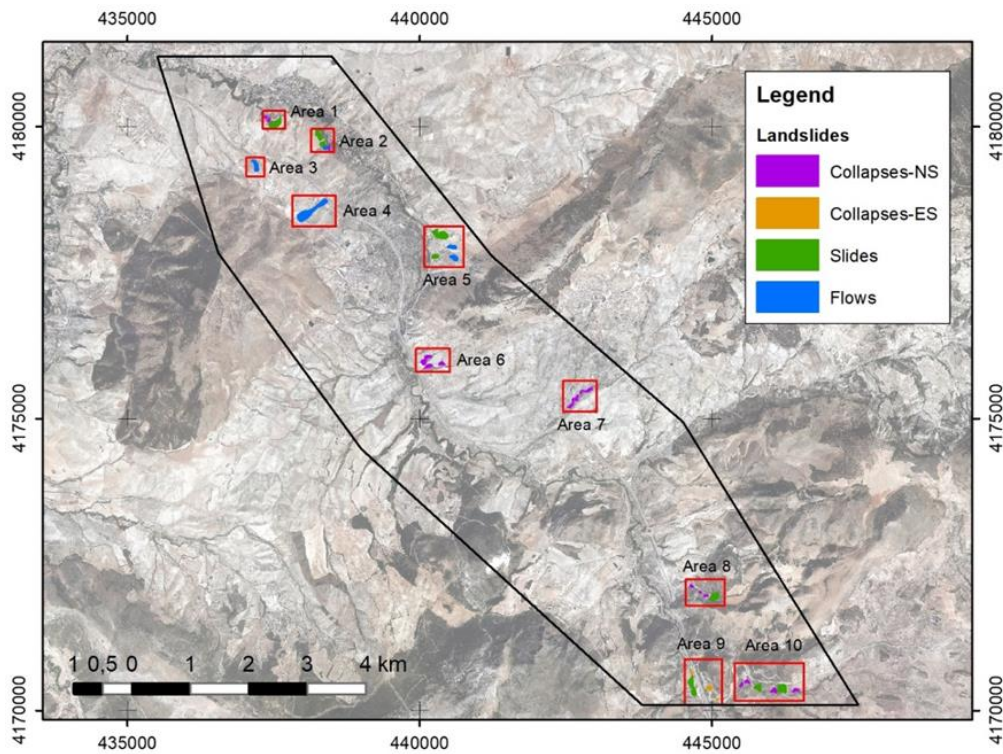


Figura 3. Áreas de monitorización.

3. El área 3 (flujos, Figura 4) presentó una tasa general negativa en 2009-2010 y 2011-2013 (-0,11 y -0,07 m/año). Además, se encontraron sectores con una gran tasa de descenso (3,11 m/año) y otros con una tasa de ascenso moderada (1,4 m/año) en 2009-2010.
4. El área 4 (flujos; Figura 4) mostró una tasa general negativa en 2011-2013 (-0,05 m/año). Además, hubo sectores con tasas de descenso moderadas en 2009-2010, 2010-2011, 2011-2013 y 2013-2016 (0,5–1,3 m/año) y ascenso en 2011-2013 y 2013-2016 (0,6–0,7 m/año).
5. El área 5 (deslizamientos) mostró una tasa general negativa en 2009-2010 (-0,17 m/año), y sectores con tasa de descenso (1,68 m/año) y ascenso (1,53 m/año) en el mismo período.
6. El área 6 (colapsos) presentó una tasa general negativa en 2009-2010 y 2010-2011 (-0,14 y -0,05 m/año), además de sectores con alta tasa de descenso en 2010-2011 (2,93 m/año).
7. El área 7 (colapsos) mostró una tasa general negativa en 2009-2010 (-0,42 m/año), y sectores con altas tasas de descenso en el mismo período (2,57 m/año).
8. El Área 8 (colapsos) presentó una elevada tasa general negativa en 2009-2010 (-0,45 m/año), y sectores con tasas de descenso en el mismo período (2,01 m/año).
9. El área 9 (colapsos en taludes) mostró una tasa general negativa en 1984-1996 y 1996-2001 (-0.13 y -0.26 m/año), además de sectores con tasas de descenso en varios periodos.
10. El área 10 (colapsos) tuvo una tasa general negativa en 2009-2010 (-0,59 m/año), y sectores con tasas de descenso en 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2013 (1-4 m/año).

4. DISCUSIÓN

Los MdD permitieron observar algunos procesos generales, como los relacionados con el crecimiento o disminución de la vegetación por actividades naturales, agrícolas o forestales. La mayoría de estos cambios se descartaron mediante diversos filtros, como los basados en índices de vegetación, que permiten eliminar áreas extensas; y los filtros de moda para eliminar el efecto de árboles aislados. Además de la vegetación, se eliminaron áreas urbanas y cuerpos de agua mediante la aplicación de máscaras de capas vectoriales, aunque se han mantenido las carreteras y su entorno, donde además de cambios antrópicos como la construcción de la autovía A-44 (a mediados de los años 90), se producen deslizamientos en los taludes. La aplicación final de filtros de media para suavizar los MdD y el propio nivel mínimo de detección permiten eliminar algunos restos de vegetación y de desajustes de los modelos. A partir de ahí, los cambios naturales en la superficie del suelo, tales como

deslizamientos se identificaron mediante fotointerpretación y el análisis visual de los MdD, concretamente, mediante la observación de áreas adyacentes de descenso y ascenso del terreno.

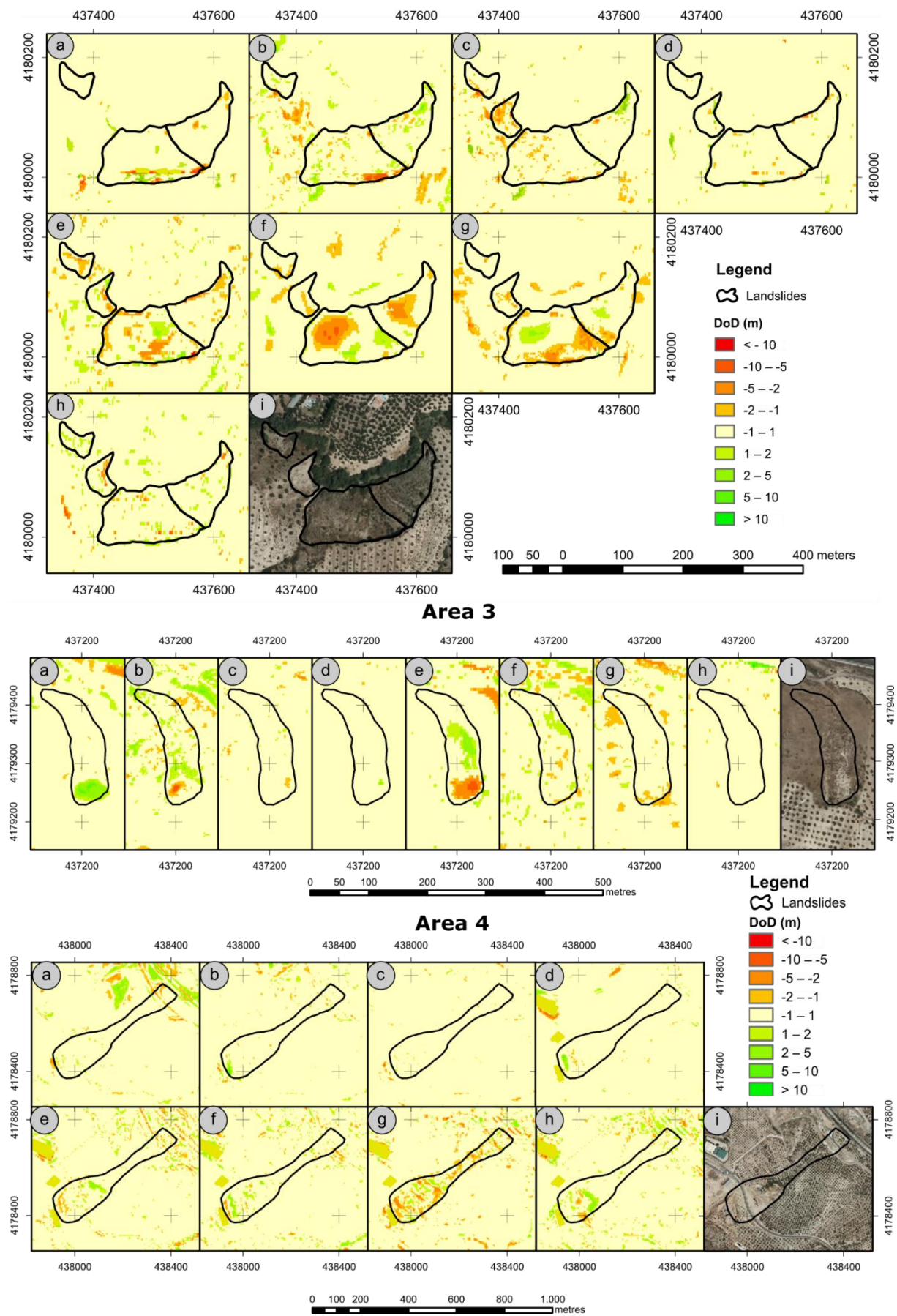


Figura 4. MdD de las áreas 1, 3 y 4. a: 1984–1996; b: 1996–2001; c: 2001–2005; d: 2005–2009; e: 2009–2010; f: 2010–2011; g: 2011–2013; h: 2013–2016; i: ortoimagen (2016).

Tasas de diferencia de altitud (MdD)								
Area	1984-1996	1996-2001	2001-2005	2005-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2013	2013-2016
1 (C-N)	0.00	-0.01	0.01	0.01	-0.30	-0.16	-0.03	0.01
2 (DI)	0.00	-0.01	0.01	0.01	-0.21	0.03	-0.05	0.00
3 (FI)	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.11	-0.04	-0.07	0.01
4 (FI)	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.03	0.00	-0.05	0.01
5 (DI)	0.00	-0.01	-0.01	0.02	-0.17	-0.04	-0.03	0.00
6 (C-N)	-0.01	-0.02	0.01	0.02	-0.14	-0.05	-0.03	-0.01
7 (C-N)	0.00	0.00	-0.02	0.03	-0.42	-0.03	-0.02	0.01
8 (C-N)	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.45	0.04	-0.03	-0.02
9 (C-T)	-0.13	-0.26	0.01	0.02	-0.10	-0.09	-0.01	0.00
10 (C-N)	0.02	-0.09	0.02	0.01	-0.59	-0.16	-0.02	-0.02
Todas	-0.01	-0.05	0.00	0.01	-0.24	-0.05	-0.03	0.00
Tasas de diferencia de altitud en sectores con descenso								
1	-0.14	-0.53	-0.43	-0.41	-2.05	-3.99	-1.36	-0.66
2	-0.12	-0.40	-0.43	-0.53	-1.61	-1.44	-1.01	-0.73
3	-0.10	-0.37	-0.37	-0.28	-3.11	-1.10	-0.58	-0.57
4	-0.16	-0.28	-0.33	-0.37	-1.28	-1.34	-0.69	-0.51
5	-0.11	-0.27	-0.36	-0.39	-1.68	-1.38	-0.65	-0.50
6	-0.42	-0.27	-0.40	-0.38	-1.31	-2.93	-1.22	-0.71
7	-0.11	-0.31	-0.45	-0.55	-2.57	-1.59	-0.81	-0.81
8	-0.20	-0.30	-0.42	-0.39	-2.01	-1.40	-0.90	-0.60
9	-0.57	-0.82	-0.56	-0.39	-1.76	-1.38	-0.82	-0.60
10	-0.23	-0.50	-0.88	-0.63	-4.10	-1.75	-0.85	-0.78
Todas	-0.32	-0.52	-0.50	-0.46	-2.65	-2.60	-0.99	-0.66
Tasas de diferencia de altitud en sectores con ascenso								
1	0.17	0.32	0.45	0.44	1.69	2.47	1.80	0.60
2	0.12	0.33	0.48	0.43	1.88	1.61	0.78	0.59
3	0.27	0.28	0.36	0.47	1.41	1.10	0.00	0.46
4	0.12	0.46	0.36	0.61	1.58	1.52	0.71	0.57
5	0.10	0.27	0.36	0.40	1.53	1.27	0.65	0.49
6	0.14	0.34	0.36	0.34	1.51	2.14	1.48	0.56
7	0.13	0.33	0.37	0.68	2.15	1.48	1.16	0.54
8	0.13	0.29	0.40	0.54	1.41	1.52	0.88	0.56
9	0.22	0.47	0.45	0.47	1.45	1.35	0.86	0.51
10	0.49	0.38	0.68	0.82	3.76	2.42	1.25	0.66
Todas	0.26	0.36	0.50	0.61	2.35	1.98	1.29	0.58

Tabla 4. Análisis de las áreas de monitorización. Altitudes y desnivel en m. Litología: 2: Margas (Cretácico); 3: Lutitas (Triásico); 6: Margas (Mioceno); 8: Glacis (Cuaternario). Las tasas están en m/año. Dp: Desprendimientos; C-N y C-T: Colapsos en laderas naturales y taludes; DI: Deslizamientos; FI: Flujos.

En cuanto al inventario, prácticamente no se identificaron desprendimientos en sentido estricto, pero sí muchos ejemplos de colapsos en las paredes laterales de cauces y cárcavas, así como en taludes ingenieriles. El porcentaje de área movilizada, cercano al 2%, fue superior a otros valores encontrados para movimientos recientes en estudios previos de las Cordilleras Béticas (Irigaray et al., 1999; 2007; Fernández et al., 2012). Esto puede ser indicativo de un área con condiciones naturales y artificiales propensas a deslizamientos (pendientes elevadas en un frente geológico activo con litologías margosas y arcillosas, la excavación de un río y la construcción de una carretera), aunque también puede deberse a la elaboración de un inventario más preciso. Sin embargo, este porcentaje es inferior a los calculados en las referencias anteriores, que también incluyen movimientos antiguos, y llegan a ser del 5-10%. El análisis por tipologías mostró una distribución con una mayor proporción de colapsos (63%) y deslizamientos (25%) que de flujos (12%). Las condiciones en las que aparecieron los colapsos fueron pendientes de alrededor de 30°, excavados en margas del Mioceno y Cretácico, así como en depósitos del Plioceno-Cuaternario; los deslizamientos se asociaron a pendientes de entre 20 y 30° y los flujos a pendientes de entre 10 y 25°, ambos en margas y arcillas del Cretácico o del Mioceno, así como en lutitas del Triásico. Los valores de MdD correspondieron a descensos promedio que van desde valores muy bajos (-0,13 m) en flujos hasta valores cercanos a -1 m en deslizamientos, -1,2 a -1,6 m en colapsos y -2,2 m en desprendimientos. Se observa que los MdD permiten identificar bien movimientos con importantes desplazamientos verticales, pero no tanto aquellos con mayor componente horizontal, en la que se pueden requerir técnicas más complejas (Gojic et al., 2021).

El análisis de inventarios multitemporales se ha mostrado adecuado para la modelización de peligrosidad de deslizamientos (Guzzetti et al., 2012), al permitir estimar la actividad. En este caso, los periodos 2009-2010 y 2011-2013 muestran mayor actividad, tanto en área afectada como en número de movimientos, seguidos de los periodos 2010-2011 y 1996-2001; por su parte 1984-1996, 2001-2009 y 2013-2016, mostraron menor actividad. La proporción de las tipologías con áreas individuales mayores, como deslizamientos y flujos, fue mayor en los periodos más activos que en los menos activos. En cuanto a parámetros morfométricos, los colapsos y deslizamientos mantuvieron áreas y desniveles bastante uniformes, pero los flujos mostraron mayores dimensiones en los periodos más activos. La mayoría de las condiciones en las que se produjeron las diferentes tipologías de movimientos no cambiaron significativamente, al estar más relacionadas con la tipología que con la actividad. Finalmente, las diferencias de altura media entre modelos fueron siempre negativas (descenso del terreno), y mostraron mayores valores absolutos en los periodos de mayor actividad.

En el análisis de las áreas de monitorización, se observaron mayores tasas de descenso general del terreno en el período 2009-2010 (-0,24 m/año), seguido de los periodos 1996-2001, 2010-2011 y 2011-2013 (entre -0,03 y -0,05 m/año), y valores prácticamente nulos en los periodos restantes. Considerando el sector con descensos se observaron tasas significativas en el período 2009-2010, siendo menores en 2011-2013, 1996-2001 y 1984-1996. Mientras tanto, los sectores con ascenso solo muestran valores significativos en 1984-1996. Estos valores concuerdan con el análisis del inventario, donde hay un periodo de máxima actividad en 2009-2010 y otros de cierta actividad, como 2011-2013 y 1996-2001. Los cambios observados en algunas áreas en el período 1984-1996, se relacionaron principalmente con los movimientos de tierra de las obras de la autovía A44. Las áreas con predominio de colapsos y deslizamientos coinciden básicamente con estas pautas, salvo la mayor actividad de los colapsos en taludes en 1984-1996 y 1996-2001, relacionada con la autovía.

Por su parte, las áreas 3 y 4 (flujos), estudiados también mediante campañas UAS, presentaron importantes cambios. Los principales tuvieron lugar en 2009-2010, cuando se estimaron tasas de descenso y ascenso significativas que daban como resultado un balance general negativo, aunque esto también ocurrió en otros periodos activos, como 2010-2011 y 2011-2013. Todo ello está de acuerdo con los desplazamientos observados en las campañas UAS. Así uno de los flujos (Fernández et al., 2016) fue muy activo entre final de 2012 y abril de 2013 en la parte alta, con descensos cercanos a 2 m/año y desplazamientos horizontales de más de 10 m/año, y pequeños ascensos y avances en la parte inferior; la actividad se redujo entre 2013 y 2014; y, sobre todo, entre 2014 y 2015 donde solo quedó una actividad residual en la parte baja. El otro flujo tuvo actividad previa en el período 1996-2001, con importantes descensos en la parte alta, y entre 2009 y 2013, lo que se estudió con detalle en las campañas UAS (Fernández et al., 2015). Así, entre 2010 y final de 2012, se produjeron importantes desplazamientos verticales (descensos) y horizontales (avances) en todo el movimiento. La actividad se mantiene con altibajos en los periodos siguientes, entre 2012 y 2013, para decaer en 2013 y 2014.

Las relaciones de la actividad con las precipitaciones se pueden establecer, analizando precipitaciones semanales y mensuales de la zona. Éstas presentaron valores máximos (superiores a 100 y 250 mm) en el otoño-invierno de los años 1996-1997, 1997-1998, 2009-2010, 2010-2011 y 2012-2013. Así, la actividad máxima del año 2009-2010, y la de otros periodos como 2010-2011, 2011-2013 y 1996-2001 estuvieron claramente condicionadas por estos periodos de mayor precipitación (Fernández et al., 2021; Carpena et al., 2021). Si se incrementa la resolución temporal mediante la realización de vuelos UAS, se pueden establecer relaciones aún más estrechas (Fernández et al., 2015; 2016).

5. CONCLUSIONES

El empleo de técnicas geomáticas, como la fotogrametría, teledetección y LiDAR permite la realización de inventarios multitemporales. Los inventarios multitemporales como el realizado en este estudio permiten, por un lado, la caracterización y realización de bases de datos de movimientos de ladera y el análisis de factores, base de los mapas de susceptibilidad; y por el otro, estimar la actividad de forma directa o también indirecta, a partir de las relaciones con los factores determinantes

(lluvias), base de los mapas de peligrosidad. Futuras investigaciones se centrarán en añadir más campañas, tanto las correspondientes a planes oficiales (PNOA), como realizadas mediante UAS con el fin de realizar un seguimiento más completo de la actividad de la zona. Además, se deben mejorar las técnicas de filtrado para realizar una mejor discriminación de las áreas con cambios en los MDS e implementar técnicas de aprendizaje automático y profundo para la detección automática de deslizamientos de tierra.

Agradecimientos: El trabajo ha sido financiado por el proyecto SPS-LIDAR (Agencia Estatal de Investigación, RTI2018-099638-B-I00) y el Grupo Sistemas Fotogramétricos y Topométricos (PAIDI).

REFERENCIAS

- Brunsdon, D., 1993. Mass movements; the research frontier and beyond. *Geomorphology*, 7, 85–128.
- Carpena, R., Tovar, J., Sánchez, M., Calero, J., Mellado, I., Moya, F., Fernández, T. (2021). Rainfall-Induced Landslides and Erosion Processes in the Road Network of the Jaén Province. *Hydrology*, 8, 100.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: Landslides and Geographical Information Systems (GIS). *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 65, 341–411.
- Dewitte, O., Jasselette, J.C., Cornet, Y., Van Den Eeckhaut, M., Collignon, A., Poesen, J., Demoulin, A., 2008. Decadal-scale analysis of ground movements in old landslides in Belgium. *Eng. Geol.* 99, 11–22.
- Fernández, T., Sánchez-Gómez, M., García, F., Pérez-Varela, F., 2012. Cartografía de movimientos de ladera en el frente montañoso de la Cordillera Bética en el sector de Jaén. *Geotemas*, 13, pp. 1471–1474.
- Fernández, T., Pérez, J.L., et al., 2015. Use of a light UAV and photogrammetric techniques to study the evolution of a landslide in Jaén (Spain). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40, 241.
- Fernández, T., Pérez, J.L., Cardenal, F.J., Gómez, J.M., Colomo, C., Delgado, J., 2016. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques. *Remote Sens.*, 8, 837.
- Fernández, T., Pérez, J.L., et al. 2017. Assessment of the Evolution of a Landslide Using Digital Photogrammetry and LiDAR Techniques in the Alpujarras Region (Granada, Spain). *Geosciences*, 7, 32.
- Fernández, T., Pérez-García, J.L., Gómez-López, J.M., Cardenal, J., Moya, F., Delgado, J., 2021. Multitemporal landslide inventory and activity analysis by means of aerial photogrammetry and LiDAR techniques in an area of southern Spain. *Remote Sens.*, 13, 211.
- Gojic, Z., Schmid, L. & Wieser, A. Dense 3D displacement vector fields for point cloud-based landslide monitoring. *Landslides* 18, 3821–3832 (2021).
- González-Díez, A., Fernández, G., Doughty, M.W., Díaz de Terán, J.R., Bruschi, V., Cardenal, J., Pérez, J.L., Mata, E., Delgado, J., 2014. Development of a methodological approach for the accurate measurement of slope changes due to landslides, using digital photogrammetry. *Landslides*, 11, 615–628.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T., 2012. Landslide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem. *Earth-Science Reviews*, 112, 42-66.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72, 272–299.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J., 2007. Evaluation and validation of landslide susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: Examples from Betic Cordillera. *Nat. Hazards*, 41, 61-79.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping. A case study. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 537–554.
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J., Joswig, M., 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze land-slide: Evaluation and results. *Eng. Geol.*, 128, 2–11.
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A., Pérez-Valera, L.A. , 2017. An evaporite-bearing accretionary complex in the northern front of the Betic-Rif orogeny. *Tectonics*, 36, 1006–1036.
- Prokešová, R., Kardoš, M., Medved'ová, A., 2010. Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs: A case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology*, 115, 90–101.
- Roldán, F.J., Lupiani, E., Jerez, L., 1998. Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000, Mapa y Memoria Explicativa, Instituto Geológico Nacional: Madrid, Spain.
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., Papini, M., 2014. Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. *Remote Sens.*, 6, 9600-9652.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*, Natural Hazards, UNESCO: Paris, France.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement, types and processes. In *Landslides: Analysis and Control*, Schuster, R.L., Krizek, R.J., Eds., Transportation Research Board Special National Academy of Sciences: Washington, DC, USA.; Volume 176, pp. 12–33.