

MONITORIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN EL EMBALSE DE RULES (GRANADA)

Cristina Reyes-Carmona (1), Jorge Pedro Galve (1), Anna Barra (2), Marcos Moreno-Sánchez (1), Oriol Monserrat (2) Adrián Riquelme (3), Teresa Teixidó (4), Patricia Ruano (1), Agustín Millares (5), Roberto Sarro (6), José Vicente Pérez-Peña (1), Pablo Ezquerro (6), Juan López-Vinielles (6), Marta Béjar-Pizarro (6), José Miguel Azañón (1) y Rosa María Mateos (6)

(1) Departamento de Geodinámica
Universidad de Granada

cristinarc@ugr.es, jpgalve@ugr.es, marcosms@ugr.es, pruanos@ugr.es, vperez@ugr.es, jazanon@ugr.es

(2) Divisió de Geomàtica
Centre Tecnològic Telecomunicacions Catalunya (CTTC)
anna.barra@cttc.cat, omonserrat@cttc.cat

(3) Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Alicante
ariquelme@ua.es

(4) Instituto Universitario de Investigación Andaluz de Geofísica Y Prevención de Desastres Sísmicos (IAG)
Universidad de Granada
tteixido@ugr.es

(5) Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA)
Universidad de Granada
mivalag@ugr.es

(6) Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
r.sarro@igme.es, p.ezquerro@igme.es, jlviniielles@igme.es, m.bejar@igme.es, rm.mateos@igme.es

RESUMEN

Los deslizamientos en embalses pueden generar situaciones críticas y peligrosas que conlleven a una gran cantidad de pérdidas materiales, económicas e incluso humanas. Monitorizar el movimiento de deslizamientos activos, así como su caracterización geológica y geomorfológica es esencial para evitar o minimizar estos desastres. En este trabajo, presentamos los resultados obtenidos mediante InSAR en el Embalse de Rules (Sur de España), donde existen varios deslizamientos activos, junto con caracterización de mayor detalle de uno de ellos: el deslizamiento de El Arrecife. Con estos datos es posible realizar una evaluación preliminar del riesgo que implican los deslizamientos en el embalse y en otras infraestructuras relacionadas.

1. INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de las laderas en infraestructuras críticas como un embalse suelen provocar situaciones peligrosas que pueden suponer una gran cantidad de pérdidas materiales, económicas e incluso humanas. Varios acontecimientos históricos nos recuerdan este riesgo, desde el conocido caso del embalse de Vajont en Italia (Kiersch, 1964) con 2000 víctimas mortales, hasta otros ejemplos del mundo en EEUU, Perú, China o España (Jones et al. 1961, Novosad et al. 1979, Wang et al. 2004, Gutiérrez et al. 2010, respectivamente). La monitorización y caracterización de los deslizamientos en un contexto de embalse es fundamental para prevenir este tipo de desastres. Además, el estudio geológico y geomorfológico de un deslizamiento es esencial para aportar un primer modelo conceptual de la ladera que permita guiar y optimizar otras investigaciones futuras como, por ejemplo, campañas de monitorización in situ, modelizaciones 3D de posibles roturas o estimaciones del movimiento futuro. La monitorización del deslizamiento es clave para una evaluación del riesgo y normalmente, implican la obtención de tasas de desplazamiento de la superficie medidas a lo largo del tiempo (Clague y Stead 2012).

Para la monitorización de una ladera, existe una amplia gama de técnicas que pueden proporcionar datos de desplazamiento: (i) técnicas de teledetección, que incluyen la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) (p.ej., Massonnet y Feigl, 1998), sistemas de posicionamiento global (GPS) (p.ej., Brunner et al. 2003), el escáner láser terrestre (TLS) (p.ej., Teza et al. 2007), y la fotogrametría (Kraus, 1997, Niethammer et al. 2012); (ii) técnicas geofísicas, como el Radar de Penetración Terrestre (GPR) (p.ej., Lissak et al. 2015); o (iii) sistemas convencionales de monitorización in situ como inclinómetros o extensómetros (p.ej., Corominas et al. 2000).

En cuanto a las técnicas de teledetección, la técnica InSAR permite detectar movimientos milimétricos del terreno de forma retrospectiva y con una alta resolución espacial y temporal. Esta técnica consiste en la comparación de varias imágenes satélite radar durante un periodo de tiempo para obtener variaciones en la superficie del terreno. El reciente aumento del número de satélites ha supuesto un gran avance en la técnica InSAR, especialmente gracias a los satélites Sentinel-1A y Sentinel-1B, lanzados en 2014 y 2016, respectivamente (Rucci et al. 2012). Los satélites Sentinel-1 han mejorado la adquisición y el análisis de datos, ya que sus imágenes se obtienen con una alta resolución temporal (muestreo de 6 días) y son gratuitas. Esto facilita la gestión de peligros naturales en áreas tanto locales como regionales. Por ejemplo, la técnica InSAR ha demostrado ser una herramienta muy útil para la monitorización de embalses (p.ej., Wang et al. 2011 Sousa et al. 2014, Milillo et al. 2016, Cignetti et al. 2016, Reyes-Carmona et al. 2020).

Con respecto a las técnicas geofísicas, se puede utilizar la técnica GPR si una carretera discurre a lo largo de una ladera en movimiento. La carretera puede ser deformada y por tanto reasfaltada debido a un deslizamiento, registrando de este modo antiguos desplazamientos a lo largo de un periodo determinado. Así, en un perfil de GPR se puede identificar la secuencia de las capas de asfalto para estimar una tasa de desplazamiento vertical a partir del espesor de las capas de asfalto (Lissak et al. 2015).

En este trabajo se resumen los resultados principales obtenidos en Reyes-Carmona et al. (2020) y Reyes-Carmona et al. (2021) sobre la aplicación InSAR en los deslizamientos del embalse de Rules (sur de España) y sobre la caracterización de mayor detalle en el deslizamiento potencialmente más peligroso del embalse: el deslizamiento de El Arrecife. En este deslizamiento se han realizado análisis InSAR de mayor detalle y se han aplicado otras técnicas para obtener una tasa de desplazamiento (GPR). Se pretende así aportar una primera evaluación geológica del deslizamiento que sea útil para diseñar con mayor precisión investigaciones y campañas de monitorización futuras.

2. CASO DE ESTUDIO

El embalse de Rules está situado a mitad del curso del río Guadalfeo en su confluencia con el río Ízbor, en la provincia de Granada (sur de España) (Figura 1). El embalse fue inaugurado en 2004 y tiene un almacenamiento máximo de agua de 117 m³ y una superficie de inundación de 3.08 km². La presa de Rules está situada en el borde sur del embalse y es una presa de gravedad de 118 m de altura, de hormigón vibrado con una planta curva de 500 m de radio. Por la margen oriental del embalse, discurre la carretera autonómica A-346 y la autovía A-44, que cruza uno de los ramales del embalse con el Viaducto de Rules, de hormigón y de 585 m de longitud. Asimismo, la Carretera Nacional N-323 discurre por la margen occidental del embalse, que era la única conexión con la Costa de Granada antes de la construcción de la A-44 en 2009.



Figura 1. Localización del embalse de Rules (Sur de España) y los principales elementos e infraestructuras de su entorno.

La afección por deslizamientos en las laderas del embalse de Rules bien conocida localmente por lo que el entorno del embalse ha sido objeto de varios inventarios de deslizamientos (Fernández et al. 1997; Chacón et al. 2007). El inventario de deslizamientos más reciente de la zona ha sido realizado por Reyes-Carmona et al. (2020), en el que se muestran varios deslizamientos activos y por primera vez se cartografía el deslizamiento de El Arrecife, que es el deslizamiento potencialmente más peligroso del entorno del embalse (Reyes-Carmona et al. 2020, 2021).

Desde el punto de vista geológico, el embalse de Rules está asentado principalmente sobre las filitas Permo-Triásicas del Complejo Alpujárride (Zonas Internas, Cordillera Bética) aflorando en algunos sectores los mármoles Triásicos suprayacentes (Aldaya et al. 1979). En las rocas alpujárrides se registran varios eventos de deformación en múltiples estructuras (foliaciones, lineaciones, pliegues y fallas) visibles tanto a pequeña como a gran escala. (Simancas, 2018). Las estructuras más visibles en el entorno del embalse de Rules son la foliación S_{2A} que suele ser la foliación principal en las filitas (Simancas, 2018) y los pliegues F_{3A} de escala kilométrica que pliegan la foliación principal (Simancas y Campos, 1993).

3. METODOLOGÍA

En primer lugar, se ha aplicado la técnica InSAR para detectar movimientos del terreno atribuibles a deslizamientos. Tras la identificación de varios deslizamientos activos, se ha realizado una cartografía geomorfológica de detalle de dos de ellos. Paralelamente, se analizaron las series temporales del movimiento de los deslizamientos activos para relacionar su evolución con posibles factores

desencadenantes, como las precipitaciones y las variaciones del nivel del agua en el embalse. Posteriormente, se hizo una investigación geológica de campo más exhaustiva del deslizamiento de El Arrecife, para determinar las distintas familias de foliación en el entorno del deslizamiento, determinar el plano de rotura y estimar su volumen. También se ha aplicado GPR para determinar el desplazamiento del deslizamiento durante las últimas décadas, complementando y correlacionando así la información aportada por la técnica InSAR.

3.1. Interferometría de radar satélite (InSAR)

Para todo el entorno del embalse de Rules, se ha realizado un procesado InSAR utilizando la cadena de “Persistent Scatterer Interferometry chain de la División de Geomática” (PSIG) del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) (Devanthery et al. 2014). Este procesado es de la máxima resolución posible (pixel de 14x4 m) y en órbita ascendente (el satélite viaja en dirección NNO-SSE y mira hacia el este). Se utilizaron 139 imágenes de Sentinel-1A y Sentinel-1B en órbita ascendente, con un rango temporal de hasta 6 días y que cubren un periodo comprendido entre el 10 de marzo de 2015 y el 20 de septiembre de 2018. El punto de referencia se estableció en una pequeña estructura al sur del embalse de Rules (Lat 36,848, Long -3,497; proyección WGS84). Los resultados son un conjunto de puntos que representan la velocidad media anual (en mm/año) y el desplazamiento acumulado (en mm). Tanto la velocidad como el desplazamiento acumulado se calculan a lo largo de la dirección de la línea de visión del satélite (LOS). Por ello, el movimiento detectado se registra como acercamiento o alejamiento al satélite: los valores negativos indican que los puntos se alejan del satélite, mientras que los positivos se refieren a puntos que se acercan hacia el satélite.

Los mapas de velocidad se representan en intervalos iguales, estableciendo el umbral para discriminar los puntos estables de los inestables como dos veces la desviación estándar de los puntos de datos de velocidad (Barra et al. 2017). Por lo tanto, el rango de estabilidad se estableció entre 5 y -5 mm/año. Es importante destacar que el rango de estabilidad también es el rango de error de la técnica. Así, un punto detectado como estable puede ser realmente estable pero también puede ser inestable y no ser detectado como tal al estar dentro del margen de error de técnica (p.ej., movimientos por debajo de 5 mm/año).

Las Series Temporales (TS) de desplazamiento acumulados (cm) de los puntos inestables de los deslizamientos se representan gráficamente para evaluar el comportamiento temporal del desplazamiento y relacionarlo con posibles factores desencadenantes del movimiento, como las variaciones del nivel de agua del embalse y la precipitación. Se han agrupado los puntos inestables, trazando así una TS media de todos los puntos. Las medidas de precipitación y de nivel de agua del embalse se obtuvieron gratuitamente del Sistema Automático de Información Hidrológica de Andalucía (S.A.I.H. HIDROSUR, www.redhidrosurmedioambiente.es).

Para un mayor estudio del deslizamiento de El Arrecife, se han realizado dos procesados adicionales utilizando el servicio de procesado “Parallel Small Baseline Subset” (P-SBAS) (Manunta et al. 2019), disponible en la plataforma “Geohazards Exploitation Platform” de la Agencia Espacial Europea (ESA). Este servicio GEP proporcionó una menor resolución de procesado (pixel 90x90m). Se realizaron procesados en órbita ascendente y descendente (el satélite viaja en dirección SSO-NNE y mira hacia el oeste). Para órbita ascendente, se utilizaron 101 imágenes de Sentinel-1B desde el 30 de septiembre de 2016 hasta el 13 de marzo de 2020 con un rango temporal de 12 días mientras que para la órbita descendente, se utilizaron 241 imágenes de Sentinel-1A y Sentinel-1B desde el 22 de diciembre de 2014 hasta el 19 de marzo de 2020 con un rango temporal de hasta 6 días. El punto de referencia es el mismo que en el procesado PSIG y los resultados son nuevamente, velocidad según la línea de visión del satélite (LOS) y desplazamiento acumulado. Los rangos de estabilidad se establecieron entre 5 y -5 mm/año para el procesado descendente y entre 6 y -6 mm/año para el ascendente. Adicionalmente y ya que se dispone de datos en ambas órbitas, fue posible calcular las componentes horizontales (Veste) y verticales (Vvert) del movimiento a partir de la velocidad media

de los procesados GEP, siguiendo el procedimiento descrito en Notti et al. (2014).

3.2. Análisis geomorfológico

Mediante observaciones de campo, fotointerpretación (imágenes del Vuelo Americano 1956-1957 del Vuelo y del proyecto PNOA 2004-2017) y explotación de Modelos Digitales de Elevación (DEM) y productos derivados (mapas de sombreado y pendientes), realizamos un inventario de deslizamientos del entorno del embalse de Rules y una cartografía geomorfológica detallada de dos deslizamientos activos. La información digital se ha obtenido gratuitamente de la página web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es).

3.2. Análisis geológico

Se ha realizado un estudio geológico de detalle focalizado solo en el deslizamiento de El Arrecife. En primer lugar, se realizó trabajo de campo para la toma de medidas de foliación de las filitas alpujárrides (la roca que aflora en el entorno del deslizamiento). Posteriormente, estas medidas se utilizaron para realizar un análisis cinemático de la ladera mediante proyección estereográfica con el software DIPS. Así, se identificaron las diferentes familias de foliación y se evaluó a favor de cuál puede ocurrir una rotura planar. Para este análisis se introdujeron, además, los datos de la pendiente media de la ladera (23°) y dos conos de fricción de 20° y 25° que representan, respectivamente, los ángulos de rozamiento interno mínimo y máximo de las filitas deslizamiento (Wyllie y Mah, 2004).

Una vez identificada la orientación de la foliación más favorable a la rotura de la ladera, se asumió esta como posible superficie de rotura del deslizamiento de El Arrecife para realizar el cálculo del volumen del deslizamiento. Este procedimiento ha consistido en inicialmente, generar un DEM de 2 m de resolución del deslizamiento antes de ser modificada antrópicamente por la construcción del embalse. Esto se llevó a cabo extrayendo las curvas de nivel de un mapa topográfico de 1995. Una vez obtenido este DEM, se trazaron 6 perfiles longitudinales y se dibujó la superficie de ruptura en cada perfil, basándose en la inclinación obtenida en el análisis cinemático y en las características morfológicas del perfil (escarpe principal y pie de la ladera). Posteriormente, se estimaron las curvas de nivel correspondientes de la superficie de rotura estimada (al proyectarla en cada perfil) y se generó un DEM de esta superficie. Restando el DEM del deslizamiento del DEM de la superficie de rotura, se obtuvo un mapa de tipo ráster que representaba el espesor de la masa deslizada, para finalmente, estimar el volumen multiplicando el espesor medio de este mapa por el área del deslizamiento.

3.3. Radar de penetración terrestre (GPR)

Se utilizó un sistema de radar de penetración terrestre RAMAC (Mala Geosciences) con una antena de 400 MHz para adquirir un perfil de tiene 647.94 m de longitud a lo largo del margen el oeste de la carretera nacional N-323. La señal de radar alcanzó profundidades de 2 m, dando así una resolución del perfil de 10 cm. Los datos se registraron con un intervalo de muestreo de 5 cm, una ventana de tiempo total de 55 ns y considerando una velocidad del terreno de 9.6 cm/ns. El procesado de los datos en bruto se realizó con el software GSSI RADAN 7. Dado que la actividad del deslizamiento de El Arrecife ha causado considerables daños (grietas, baches, hundimientos) a lo largo de la carretera nacional N-323, esta se ha reasfaltado multitud de veces durante los últimos años (Demarcación de Carreteras del Estado 2020, com. pers.). A lo largo de un perfil GPR, se han podido identificar las distintas capas de asfalto como reflectores continuos y horizontales. Por lo tanto, ha sido posible aplicar el método desarrollado por Lissak et al. (2015) y utilizar la evolución temporal de las capas de asfalto para inferir la tasa de desplazamiento (hundimiento) de la carretera. Así, la tasa de desplazamiento se ha estimado dividiendo el espesor de toda la secuencia de capas de asfalto entre el periodo total de tiempo de pavimentación continuada de la carretera.

4. RESULTADOS

4.1. InSAR en el embalse de Rules

El mapa de velocidad media anual se presenta en la Figura 2A, donde se ha detectado movimiento en dos zonas principales que se atribuye a dos deslizamientos: los deslizamientos del Viaducto de Rules y de El Arrecife. El deslizamiento del Viaducto de Rules registra una velocidad media en torno a -2 mm/año mientras que El Arrecife muestra de media -25 mm/año, aunque alcanza velocidades de hasta -65 mm/año, siendo las mayores del entorno del embalse. Cabe destacar que no se ha registrado movimiento en la Presa de Rules ni en las laderas sobre las cuales está construida.

La Figura 2B muestra las series temporal de desplazamiento acumulado (TS) de los deslizamientos del Viaducto de Rules y de El Arrecife. En la TS del deslizamiento de El Arrecife, se observa un comportamiento lineal, donde ni los picos de precipitación intensa ni las variaciones del nivel del embalse afectan (aceleran) este movimiento. Por el contrario, en la TS del deslizamiento del Viaducto de Rules se observa un comportamiento escalonado del movimiento, que se acelera con las bajadas del nivel de agua del embalse. Estos patrones de movimiento evidencian, además, la naturaleza de los deslizamientos: traslacional en el caso de El Arrecife y rotacional en el caso del deslizamiento del Viaducto de Rules.

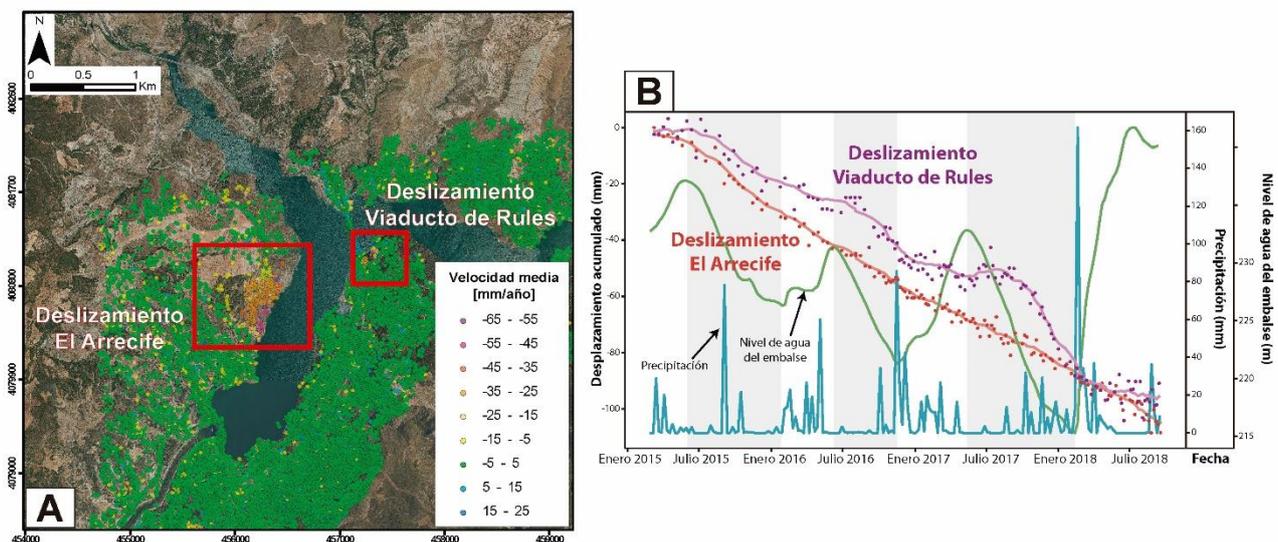


Figura 2. (A) Mapa de velocidad media (mm/año) obtenida del procesado PSIG en el embalse de Rules. (B) Series temporales de desplazamiento acumulado (mm) de los deslizamientos de El Arrecife y del Viaducto de Rules. También se han representado las precipitaciones y las variaciones del nivel de agua del embalse. Los periodos de bajadas del nivel del embalse se han señalado con columnas grises. Modificado de Reyes-Carmona et al. (2020).

4.2. Estudio geomorfológico en el embalse de Rules

Se ha realizado un inventario actualizado de los principales deslizamientos de la zona del embalse de Rules (Figura 3). De estos deslizamientos, se han remarcado tres deslizamientos activos que se han detectado mediante InSAR. En total, inventariamos doce deslizamientos de diferentes dimensiones, dos de los cuales consideramos de especial relevancia los deslizamientos de Ventura y de Los Hoyos, ya que la presa se asienta en ambas laderas. Como se ha mencionado anteriormente, no se ha registrado movimiento ni en la presa de Rules ni en estos dos deslizamientos. Los deslizamientos activos, ya mencionados anteriormente, son los deslizamientos de El Arrecife y Viaducto de Rules, junto con otro activo de menor tamaño: el deslizamiento de Lorenzo-1. Los deslizamientos de El Arrecife y Lorenzo-1 afectan a la carretera nacional N-323 y el deslizamiento del Viaducto de Rules a la autovía A-44 y al estribo sur del Viaducto de Rules.

Posteriormente, se han realizado cartografías geomorfológicas de detalle de los deslizamientos del Viaducto de Rules (Figura 3B) y de El Arrecife (Figura 3C), que se han considerado como los más

importantes por ser activos y por su implicación directa tanto con el embalse (deslizamiento de El Arrecife por su gran tamaño) como con las infraestructuras relacionadas (deslizamiento del Viaducto de Rules por su afección al viaducto).

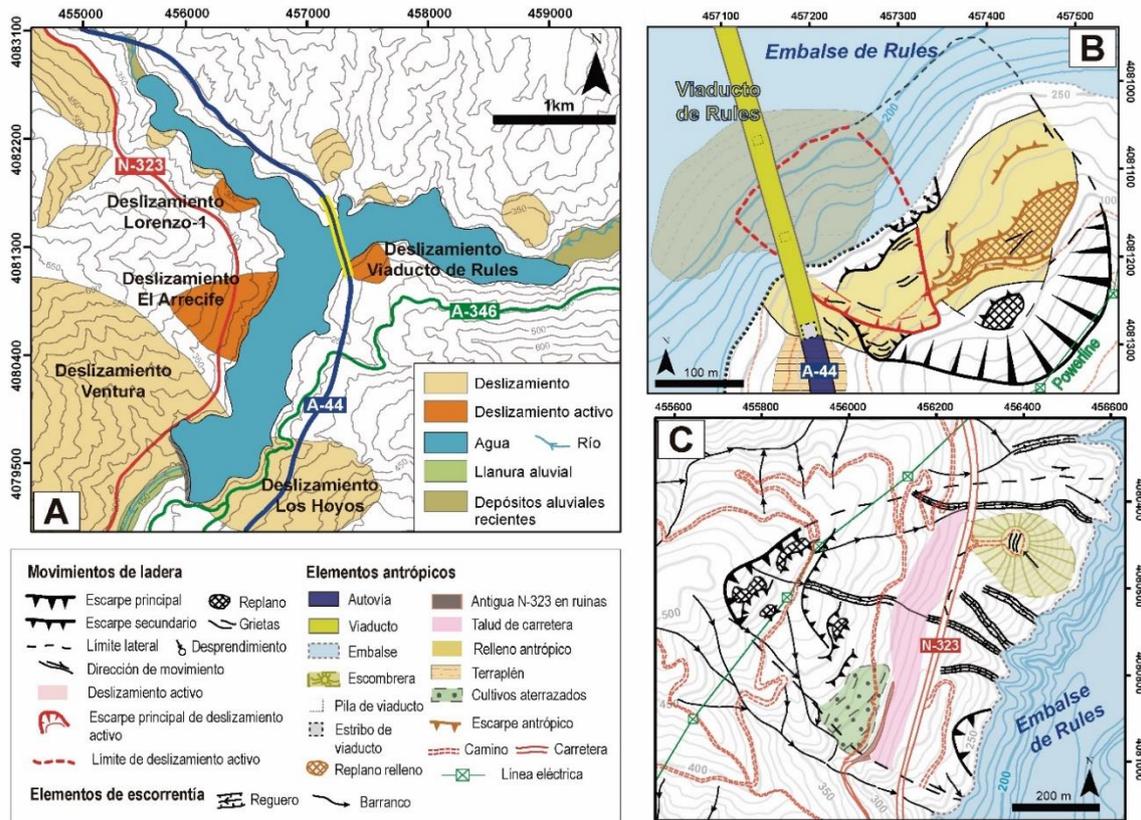


Figura 3. A) Inventario de deslizamientos del entorno del embalse de Rules. B) Mapa geomorfológico de detalle del deslizamiento del Viaducto de Rules. C) Mapa geomorfológico de detalle del deslizamiento de El Arrecife. Modificado de Reyes-Carmona et al. (2020).

El deslizamiento del viaducto de Rules presenta un escarpe de coronación curvado muy prominente y unos límites laterales muy marcados, por lo que es fácilmente identificable en el relieve (Figura 4A). Se observa una alta antropización del mismo (Figura 3B): se ha excavado el pie del deslizamiento para la construcción del terraplén para el Viaducto de Rules y se ha rellenado casi en su totalidad por materiales antrópicos provenientes de, probablemente, las obras del embalse. Se han cartografiado multitud de grietas en este relleno, algunas de ellas muy próximas al estribo sur del viaducto. Nótese que uno de los pilares del viaducto se encuentra ubicado sobre el pie del deslizamiento original. Con respecto al deslizamiento de El Arrecife, este no presenta ni escarpe ni límites laterales prominentes, por lo que no es fácil de identificar en el relieve (Figura 4B). Esta ladera también se encuentra notablemente antropizada (Figura 3C): se ha construido un gran talud para la carretera nacional N-323 y se ha depositado una escobrera de material de la obra del embalse sobre el pie del deslizamiento.

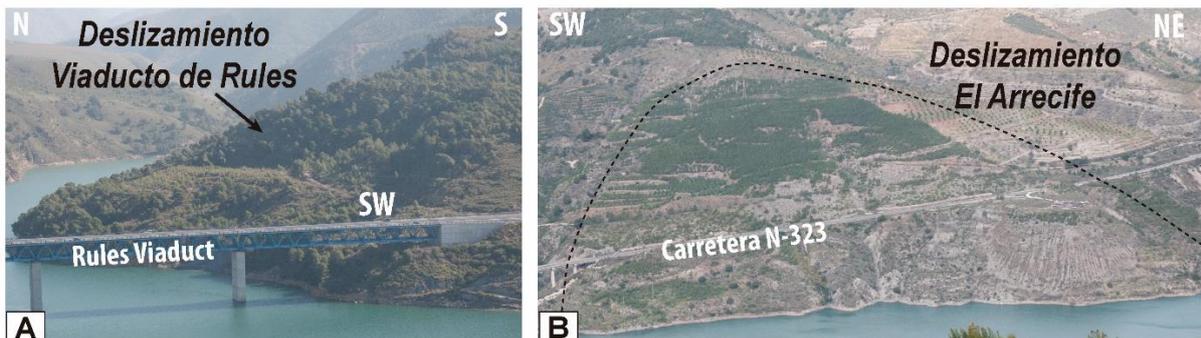


Figura 4. A) Fotografías de los deslizamientos del Viaducto de Rules (A) y de El Arrecife (B). Modificado de Reyes-Carmona et al. 2020.

4.3. Estudio geológico en el deslizamiento de El Arrecife

El mapa geológico del entorno del deslizamiento de El Arrecife se muestra en la Figura 5A. La litología predominante son las filitas alpujárrides, que afloran muy deformadas y fracturadas dentro del perímetro del deslizamiento. La estructura de deformación más penetrativas del entorno es la foliación S_{2A}. Los polos de todas medidas de planos de foliación se han representado en proyección estereográfica para su posterior análisis cinemático (Figura 5B). Dentro del deslizamiento, se observa una orientación preferencial de la foliación según la dirección NE-SO con un buzamiento medio de 25° hacia el SE (Set-1 en Figura 4B). Fuera del perímetro del deslizamiento, se reconocen dos familias: una de tendencia E-O (Set-2 en Figura 4B) y otra NO-SE (Set-3 en Figura 4B). En el Set-1, se observa que hay un polo que cae dentro del “área de ruptura” establecida según el análisis cinemático realizado. A este polo se le ha denominado como “polo crítico”, cuyo “plano crítico” es 21/210 (buzamiento/dirección de buzamiento). Así, se establece este plano como posible plano de rotura del deslizamiento de El Arrecife, tal y como se representa en el corte geológico de la Figura 4C. Con esta asunción, se ha realizado la estimación del espesor del deslizamiento (Figura 4D). El máximo espesor estimado es de 72.6 m en el pie meridional del deslizamiento. Nótese que el espesor estimado en la escombrera incluye el espesor del depósito antrópico. Siendo el espesor medio de 31.1 m y el área del deslizamiento de 473.107 m², se ha estimado un volumen de 14.7 millones de m³. Según la clasificación realizada por Fell (1994), un deslizamiento de tal volumen se puede considerar como “extremadamente grande”.

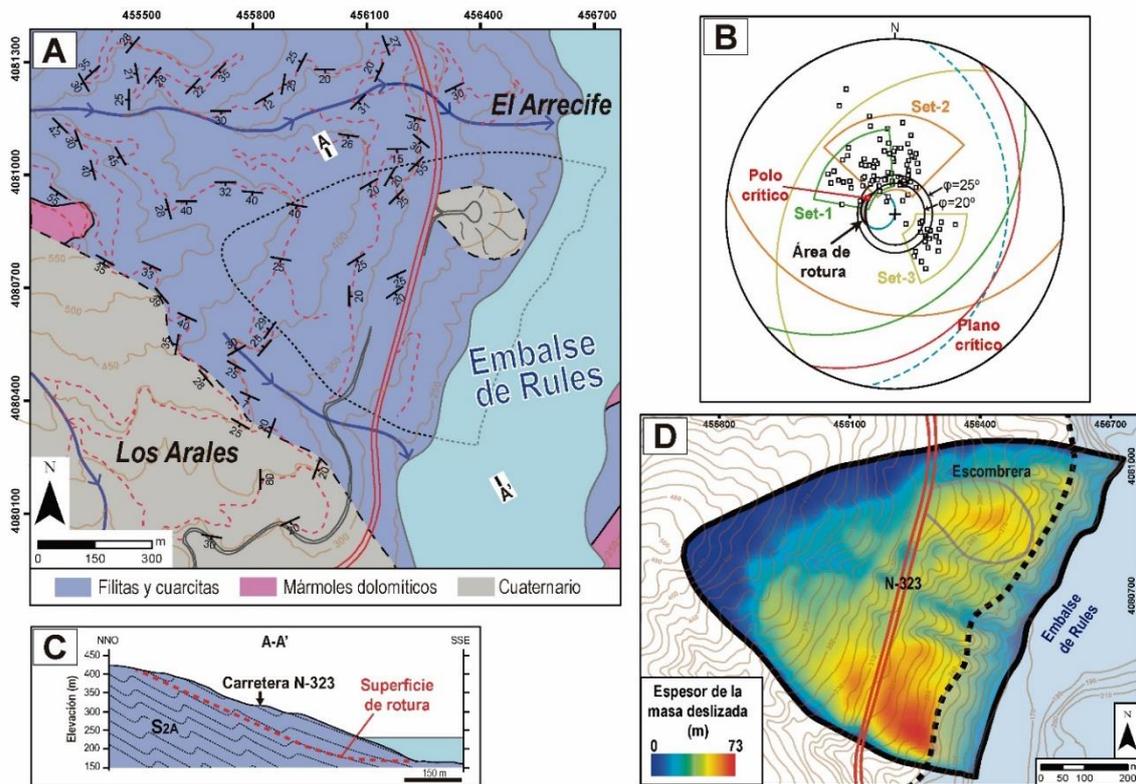


Figura 5. A) Mapa geológico del entorno del deslizamiento de El Arrecife. B) Análisis cinemático del deslizamiento de El Arrecife. C) Corte geológico del deslizamiento de El Arrecife. D) Mapa de espesor estimado del deslizamiento de El Arrecife. Modificado de Reyes-Carmona et al. (2021).

4.3. InSAR en el deslizamiento de El Arrecife

Las Figuras 5A y 5B muestran los mapas de velocidad media obtenidos de la plataforma GEP del deslizamiento de El Arrecife, en órbitas ascendente y descendente, respectivamente. El procesado ascendente registra velocidades medias de hasta -31 mm en el pie del deslizamiento. El procesado descendente muestra una peor cobertura de puntos sobre todo en la parte baja del deslizamiento, que registra una velocidad de hasta 22 mm/año.

Las Figuras 5C y 5D muestran la velocidad en la componente horizontal (Veste) y en la componente vertical (Vvert), derivadas de los procesados GEP (Figuras 5A y 5B). Los valores positivos y negativos indican desplazamientos hacia el este y hundimiento en la vertical, respectivamente. Por tanto, el movimiento hacia el este alcanza hasta 4.5 cm/año a lo largo en el pie del deslizamiento, lo que es coherente con un movimiento del deslizamiento ladera abajo. De la misma forma, se ha registrado hundimiento en la vertical en prácticamente todo el perímetro del deslizamiento, siendo -1.5 cm/año de media que alcanza -2 cm/año en la escombrera.

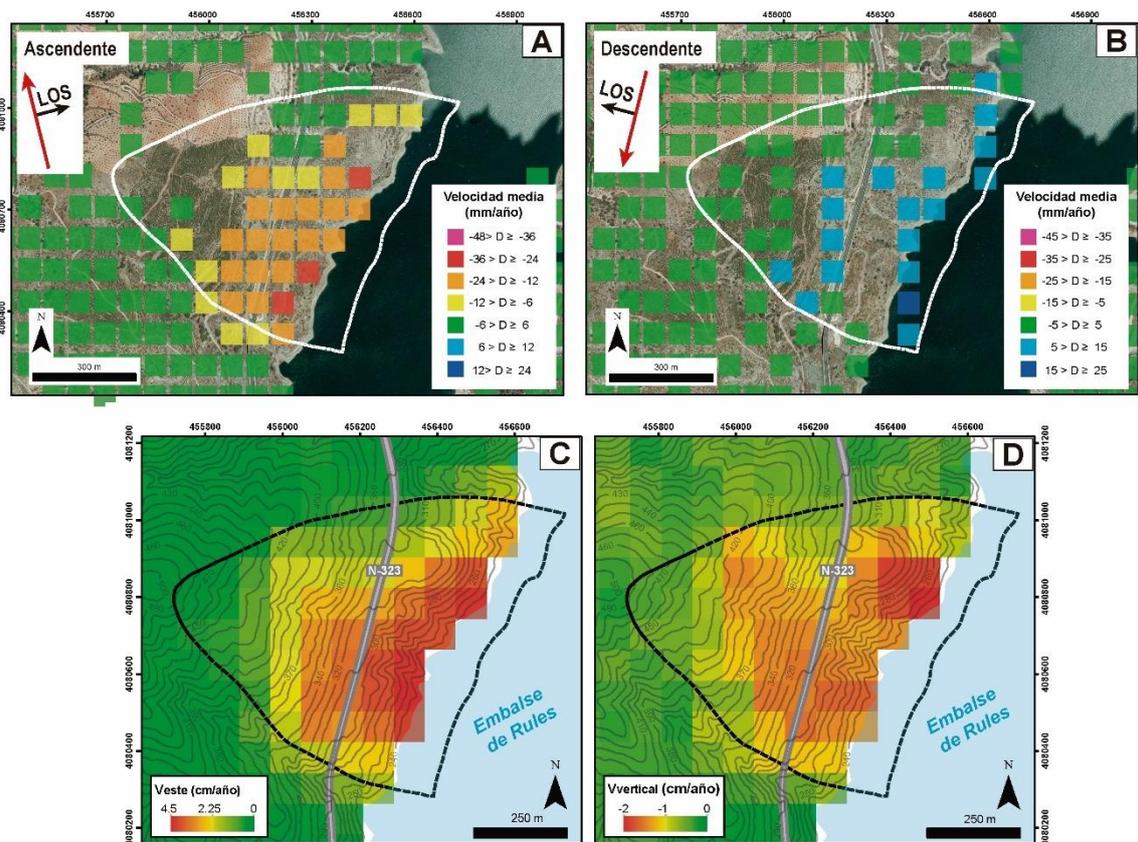


Figura 5. Mapas de velocidad media en órbita ascendente (A), descendente (B), velocidad horizontal (C) y vertical (D) obtenidos de los procesados GEP en el deslizamiento de El Arrecife. Modificado de Reyes-Carmona et al. (2021).

4.4. GPR en el deslizamiento de El Arrecife

En la Figura 6 se muestra una parte del perfil GPR (390-515 m) obtenido a lo largo de la carretera nacional N-323. El espesor mínimo de asfalto añadido es de 0.7 m y el máximo alcanza hasta 1 m. Estas capas de asfalto se han ido superponiendo progresivamente desde la construcción de la carretera N-323, en 1997 (Demarcación de Carreteras del Estado 2020, com. pers.) hasta la fecha de adquisición de los perfiles en marzo de 2020. Sabiendo que el último reasfaltado de la carretera fue en 2019 (Demarcación de Carreteras del Estado 2020, com. pers.) y que el tiempo total registrado en los perfiles GPR es de 22 años, se ha estimado una tasa media anual de hundimiento de la carretera de 1.4 a 2.3 cm/año.

Además, a lo largo de la carretera se observan distintos tipos de daños, como pequeños agujeros

(“pipes”) en el asfalto o baches muy pronunciados (Figura 6). Estos daños también son visibles en profundidad en los perfiles GPR, apreciables como pequeños saltos en los reflectores (en el caso de los baches) y como huecos verticales en los que se registra aire o vacío (en el caso de los “pipes”).

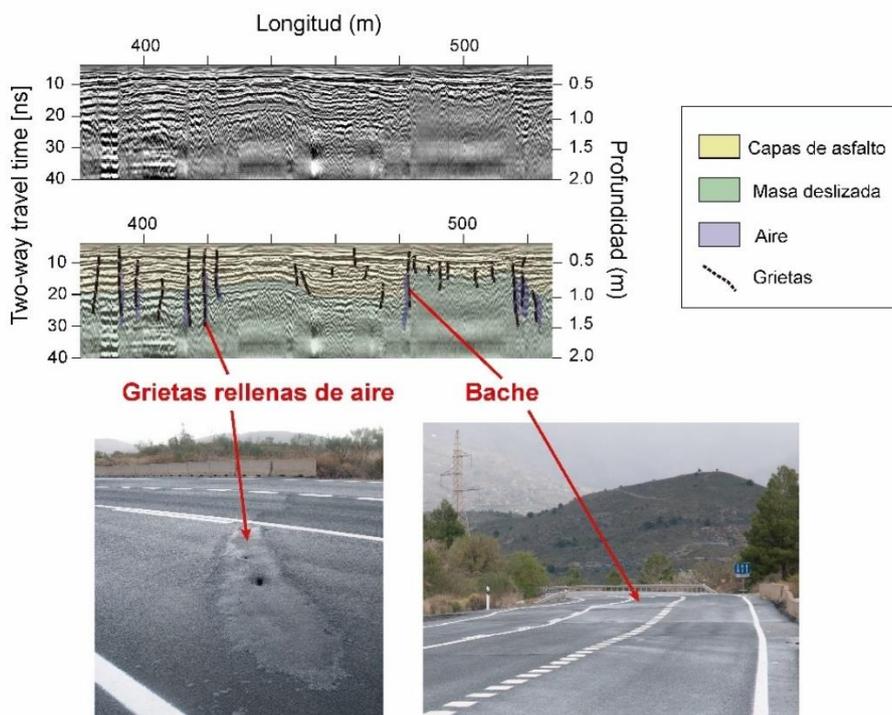


Figura 6. Sección del perfil de GPR obtenido a lo largo de la carretera nacional N-323 y fotografías de los daños visibles a lo largo de esta. Modificado de Reyes-Carmona et al. (2021).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La técnica InSAR ha demostrado ser de gran utilidad para (1) la estabilidad de la presa de Rules y de los deslizamientos sobre los cuales se asienta y para (2) detectar tres deslizamientos en el embalse de Rules, dos de ellos de gran implicación para este: los deslizamientos de El Arrecife y del Viaducto de Rules. Además, gracias al InSAR ha sido posible identificar y delimitar el deslizamiento de El Arrecife, de gran tamaño y no cartografiado hasta la fecha. Asimismo, las series temporales InSAR han permitido establecer un factor desencadenante del movimiento del deslizamiento del Viaducto de Rules: el movimiento de este deslizamiento se acelera con las bajadas del nivel del embalse. Los patrones de movimiento de las series temporales junto con las observaciones geomorfológicas realizadas en campo evidencian dos tipologías de movimiento y de tipos de deslizamientos diferentes: rotacional en el caso del deslizamiento del Viaducto de Rules, que muestra un comportamiento de aceleración-desaceleración y traslacional en el caso del deslizamiento de El Arrecife, que muestra un movimiento continuo en el tiempo. Estos comportamientos permiten realizar una primera visión de la peligrosidad de cada deslizamiento: un rotacional tiende a pararse y equilibrarse tras una aceleración mientras que un deslizamiento traslacional puede llegar a acelerarse de forma extremadamente rápida (Turner, 1996), pudiendo incluso generar un colapso repentino de la masa deslizada dentro del embalse. Este colapso podría generar una ola dentro del embalse con una consecuente inundación aguas abajo si el agua rebasara la presa, tal y como ocurrió el Vajont (Kiersch, 1964). Este escenario es poco probable pero es posible. Por otro lado, el deslizamiento del Viaducto de Rules no representa un peligro significativo al ser muy poco probable que aceleración crítica y colapso en el embalse por su carácter rotacional. Aún así, este deslizamiento puede llegar a afectar al estribo sur del Viaducto de Rules dada su proximidad. Para ambos deslizamientos, se recomienda establecer una monitorización continua del movimiento, preferiblemente con instrumentación in-situ (inclinómetros o extensómetros).

La caracterización geológica junto con la monitorización del movimiento realizada de El Arrecife aporta una primera visión de la peligrosidad de este deslizamiento. Además, esta información puede ser de gran utilidad para diseñar otras campañas de monitorización tanto remotas como in-situ. Este deslizamiento ha sido activo desde al menos las últimas dos décadas, tal y como se evidencian en los datos GPR, por lo que su monitorización debe continuar. La tasa de movimiento estimada de los datos GPR es de 1.4-2.3 cm/año, que se correlaciona muy bien con la velocidad vertical estimada con los datos InSAR (1.5-2 cm/año). La combinación de diferentes técnicas ha sido clave tanto para validar la información obtenida de cada técnica como para incrementar la confianza de las medidas y estimaciones realizadas. Por último, cabe destacar la importancia de confirmar mediante sondeos la profundidad de la superficie de rotura del deslizamiento para poder realizar una estimación del volumen más precisa. Este dato es fundamental para modelizar posibles colapsos de masa deslizada en el embalse así como la altura de las olas que se podrían generar. Nuevamente, el análisis cinemático realizado a partir de medidas de campo y la estimación del volumen (14.4 millones m³) aporta una valiosa información preliminar que puede ser útil en la planificación de una futura campaña de sondeos.

AGRADECIMIENTOS

El acceso a la Plataforma de Explotación de Riesgos Geológicos (GEP) de la Agencia Espacial Europea (ESA) fue facilitado por el programa Early Adopters. Los autores desean agradecer a la Demarcación de Carreteras por proporcionar información y testimonios valiosos. Este trabajo ha sido financiado con el apoyo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto "RISKCOAST" (SOE3/P4/E0868) del Programa Interreg SUDOE. El trabajo también ha sido apoyado por el Programa "Ramón y Cajal" (RYC-2017-23335) del Ministerio de Ciencia de España, el proyecto "MORPHOMED" - PID2019-107138RB-I00 / SRA (Agencia Estatal de Investigación / <https://doi.org/10.13039/501100011033>) y el proyecto "RADANDALUS" (P18-RT-3632) y B-RNM-305-UGR1818 del FEDER / Junta de Andalucía-Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades.

REFERENCIAS

- Aldaya, F., Díaz de Federico, A., García-Dueñas, V., Martínez-García, E., Navarro-Vilá, F. and Puga E., 1979. Lanjarón – Geological Map of Spain 1:50000. Geological Survey of Spain, Madrid
- Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R.; González-Alonso, E., Mateos, R.M., Ligüerzana, S., López, C. and Moretti, S., 2017. A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images. *Remote Sens.*, 9, 1002.
- Brunner, F., Zobl, F. and Gassner, G., 2003. On the Capability of GPS for Landslide Monitoring. *Felsbau*, 21, 51–54.
- Chacón, J., Irigaray, T. and Fernández, T., 2007. Los movimientos de ladera de la provincia de Granada. In: Ferrer M (ed) *Atlas Riesgos Naturales en la Provincia de Granada*, 1st edn. Diputación de Granada-Geological Survey of Spain, Madrid, pp 45–82
- Cignetti, M., Manconi, A., Manunta, M., Giordan, D., De Luca, C., Allasia, P. and Ardizzone, F., 2016. Taking advantage of the esa G-pod service to study ground deformation processes in high mountain areas: A valle d'aosta case study, northern italy. *Remote Sens.*, 8, 852.
- Clague, J.J. and Stead, D., 2012. *Landslides: types, mechanisms and modelling*. Cambridge University Press, Cambridge
- Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A. and Silvano, S. 2000. Measurement of landslide displacements using a wire extensometer. *Eng. Geol.*, 55, 149-166.
- Devanthery, N.; Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M. and Crippa, B. An approach to persistent scatterer interferometry. *Remote Sens.* 2014, 6, 6662–6679.
- Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 261-272.
- Fernández, T., Brabb, E., Delgado, F., Martín-Algarra, A., Irigaray, C., Estévez, A. and Chacón-Montero, J., 1997. Rasgos geológicos y movimientos de ladera en el sector Ízbor-Vélez Benaudalla de la cuenca del río Guadalfeo (Granada), *IV Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*, Granada, pp. 795–808.

- Gutiérrez, F., Lucha, P. and Galve, J.P., 2010. Reconstructing the geochronological evolution of large landslides by means of the trenching technique in the Yesa Reservoir (Spanish Pyrenees). *Geomorphology*, 124, 124-136.
- Jones, F.O., Embody, D.R. and Peterson, W.L., 1961. Landslides along the Columbia River valley, northeastern Washington. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 367, 1-98.
- Kiersch, G.A., 1964. Vaiont Reservoir disaster. *Civ. Eng.*, 34, 32-40.
- Kraus, K., 1997. Photogrammetry, Vol.2, Advanced Methods and Applications. Ed. Dümmler Verlag, Bonn, Germany
- Lissak, C., Maquaire, O., Malet, J.P., Lavigne, F., Virmoux, C., Gomez, C. and Davidson, R., 2015. Ground-penetrating radar observations for estimating the vertical displacement of rotational landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15,1399-1406
- Manunta, M., De Luca, C., Zinno, I., Casu, F., Manzo, M., Bonano, M., Fusco, A., Pepe, A., Onorato, G., Berardino, P., De Martino, P. and Lanari, R., 2019. The parallel SBAS approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: algorithm description and products quality assessment. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 57, 6259-6281.
- Massonnet, D. and Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36, 441-500.
- Milillo, P., Perissin, D., Salzer, J.T., Lundgren, P., Lacava, G., Milillo, G. and Serio, C., 2016. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modelling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 52, 221-229.
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J. and Joswig, M., 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results. *Eng. Geol.*, 128, 2-11.
- Notti, D., Herrera, G., Bianchini, S., Meisina, C., García-Davalillo, J.C. and Zucca, F. 2014. A methodology for improving landslide PSI data analysis. *Int J Remote Sens* 35:2186–221
- Novosad, S., Barvinek, R. and De la Torre Sabrevilla, M., 1979. Estudio de estabilidad del derrumbe No. 5 en el reservorio de Tablachaca de la Central Hidroeléctrica del Mantaro. *Proceedings of the VI Pan-American Soil Mechanics and Foundation Engineering Congress*, 331-344.
- Reyes-Carmona, C., Barra, A., Galve, J.P., Monserrat, O., Pérez-Peña, J.V., Mateos, R.M., Notti, D., Ruano, P., Millares, A., López-Vinielles, J. and Azañón, J.M., 2020. Sentinel-1 DInSAR for monitoring active landslides in critical infrastructures: the case of the Rules Reservoir (Southern Spain). *Remote Sens.*, 12, 809.
- Reyes-Carmona, C., Galve, J.P., Moreno-Sánchez, M., Riquelme, A., Ruano, P., Millares, A., Teixidó, T., Sarro, R., Pérez-Peña, J.V., Barra, A., Ezquerro, P., López-Vinielles, J., Béjar-Pizarro, M., Azañón, J.M., Monserrat, O. and Mateos, R.M., 2021. Rapid characterisation of the extremely large landslide threatening the Rules Reservoir (Southern Spain). *Landslides*, 18, 3781-3798.
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A. and Rocca, F., 2012. Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sens. Environ.*, 120, 156-163
- Simancas, J.F., 2018. A reappraisal of the Alpine structure of the Alpujarride Complex in the Betic Cordillera: interplay of shortening and extension in the westernmost Mediterranean. *J Struct Geol* 115:231– 242
- Simancas, J.F. and Campos, J., 1993. Compresión NNW-SSE tardi a postmetamórfica y extensión subordinada en el Complejo Alpujarride (Dominio de Alborán, Orógeno Bético). *Rev Soc Geol España* 6:23–35
- Sousa, J.J., Hlaváčová, I., Bakon, M., Lazecky, M., Patrício, G., Guimarães, P., Ruiz, A.M., Bastos, L., Sousa, A. and Bento, R., 2014. Potential of Multi-temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring. *Procedia Technol.*,16, 834-841.
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N. and Genevois, R., 2007. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: A new approach. *Int. J. Remote Sens.*, 28, 3425-3446.
- Turner, A.K. and Schuster, R.L., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247; National Academy Press: Washington, DC, USA, 673p.
- Wang, F.W., Zhang, Y.M., Huo, Z.T., Matsumoto, T. and Huang, B.L., 2004. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, three gorges reservoir, China. *Landslides*, 1, 157-162.
- Wang, T., Perissin, D., Rocca, F. and Liao, M.S., 2011. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. *Sci. China Earth Sci.*, 54, 720-732.
- Wyllie, D.C. and Mah, C., 2004. Rock slope engineering. CRC Press, Boca Ratón