

IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables

TALUDES 2017

27 – 30 Junio 2017, Santander, España

E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)

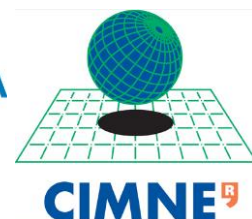


**IX Simposio Nacional
sobre
Taludes y Laderas Inestables**

**IX Simposio Nacional
sobre
Taludes y Laderas Inestables**
E. Alonso, J. Corominas y
M. Hürlimann (Eds.)
Santander, 27 – 30 de Junio de 2017



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables

E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann
(Eds.)

Publicado por

Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)

Barcelona, España

Junio 2017

© Los autores

ISBN: 978-84-946909-5-2

Printed by: Artes Gráficas Torres S.L., Huelva 9, 08940 Cornellà de Llobregat,
Spain

TABLA DE CONTENIDO

Presentación	9
Comité Organizador	10
Entidades Patrocinadoras	10
Entidades Colaboradoras	10
Comité Científico	11
Sumario	13
Índice	15
Conferencias Invitadas	26
Sesión Especial	162
Ponencias	237
Índice Autores.....	1508

Presentación

Presentamos una nueva edición, la novena, del Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Este Simposio se ha consolidado como un foro independiente, abierto y pluridisciplinar, con el objetivo de difundir los conocimientos, presentar los avances recientes y fomentar la discusión entre expertos que trabajan en este apasionante campo.

La edición de 2017 pone de manifiesto la notable evolución experimentada en los últimos años de las herramientas de caracterización y análisis así como de las medidas estabilización y protección. Las técnicas de captura remota de datos como el láser escáner, la interferometría radar, la fotogrametría y videometría digital, con el apoyo de los vehículos aéreos no tripulados, han cambiado la forma de analizar y monitorizar las laderas. No sólo permiten salvar los problemas de accesibilidad en las paredes rocosas de gran desarrollo sino que proporcionan productos de una gran resolución. Como resultado de todo ello, aparece un nuevo reto como es el almacenamiento, tratamiento y gestión de las ingentes cantidades de datos generadas.

Los métodos de análisis de estabilidad han experimentado un notable avance, particularmente el de la post-rotura, tanto en lo que se refiere a la modelación de la propagación como en su expresión tridimensional. Finalmente, se constata la generalización de los procedimientos de estabilización flexibles y de bioingeniería junto con el análisis de su desempeño.

La Cornisa Cantábrica debido a su orografía, clima y constitución geológica es un entorno geográfico particularmente sensible a la formación de grandes deslizamientos y desprendimientos. La construcción reciente de nuevas carreteras y autovías han requerido de análisis complejos de estabilidad así como la ejecución de importantes trabajos de contención y estabilización. Las incertidumbres que genera el cambio climático abren un interesante debate sobre cuál será el comportamiento de las laderas y taludes en esta y otras regiones de nuestro entorno. En este contexto surge la necesidad de mejorar los análisis del papel que ejercen sus diferentes factores determinantes, así como su contribución al estudio de la amenaza y riesgos generados por estos procesos.

Eduardo Alonso, Jordi Corominas, Marcel Hürlimann (editores)

Santander, Junio 2017

Comité Organizador

- Alberto González
- César Sagaseta
- Eduardo Alonso
- Jorge Cañizal
- Jordi Corominas
- Jaime Bonaechea
- Marcel Hürlimann
- Miguel A. Sánchez
- Juan Remondo
- Gema Fernandez

Entidades Patrocinadoras

Universidad de Cantabria

Universidad Internacional Menéndez y Pelayo

Universitat Politècnica de Catalunya

Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)

Entidades Colaboradoras

Asociación Española de Empresas Especialistas en Taludes

Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería

Comité Nacional Español de Grandes Presas

Gobierno de Cantabria

Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Delegación de Cantabria

Sociedad Española de Geomorfología

Sociedad Española de Mecánica de Rocas

Sociedad Española de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica

Comité Científico

Antonio Abellán
U. Cambridge

Eduardo Alonso,
U.P. Catalunya

José M. Azañón
U. Granada

Viola Bruschi,
U. Cantabria

Jordi Corominas
U.P. Catalunya

José Chacón,
U. Granada

Almudena Da Costa
U. Cantabria

Enrique Dapena
Cedex

Carlos Delgado
U.P. Madrid

Luis Fernández
CYGSA

Mercedes Ferrer
IGME

Antonio Gens
U.P. Catalunya

Josep Antoni Gili
U.P. Catalunya

Alberto González
U. Cantabria

René Gómez
C. Hidrográfica Ebro

Luis González de
Vallejo
U. Complutense

J.M. Gutiérrez Manjón
FCC

Gerardo Herrera
IGME

Marcel Hürlimann
U.P. Catalunya

Marc Janeras
ICGC

José L. Justo Alpeñés
U. Sevilla

Alberto Ledesma
U.P. Catalunya

Alejandro Lomoschitz
U. Las Palmas GC

Carles López Carreras
Eurogeotécnica

Carlos Monge
ADIF

Vicente Navarro
U.C. La Mancha

Claudio Olalla
U.P. Madrid

Luis Ortuño
Uriel y Asociados

Calos Oteo
U. Coruña

Fernando Pardo
Cedex

Manuel Pastor
U.P. Madrid

Aurea Perucho
Cedex

Isabel Reig
ACCIONA

Juan Remondo
U. Cantabria

Manuel Romana García
U.P. Madrid

Manuel Romana Ruiz
U.P. Valencia

Moisés Rubín de Célix
M. Medio Ambiente

Eugenio Sanz
U.P. Madrid

César Sagaseta
U. Cantabria

José B. Serón
U.P. Valencia

Davor Símic
Ferrovial Agroman

Antonio Soriano
U.P. Madrid

Roberto Tomás
U. Alicante

Measa Tsigé,
U. Complutense

Pedro Velasco
ITASCA

Joan M. Vilaplana
U. Barcelona

Irene Villegas
Consultor

SUMARIO

Conferencia Invitada.....	26
Sesión especial:	
Asociación Española de Empresas Especialistas en Taludes.....	162
Aludes de nieve.....	237
Análisis de rocas blandas - Ensayos de laboratorio.....	261
Análisis de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo	314
Avances en técnicas de reconocimiento y captura de datos del terreno	492
Base de datos - Sistema de Información Geográfica.....	629
Corrección y estabilización de laderas y taludes	686
Estabilidad de laderas y taludes en presas y embalses.....	785
Estabilidad de taludes en rocas y análisis de desprendimientos	834
Estabilidad de taludes en vías de comunicación.....	930
Grandes deslizamientos	1098
Influencia del agua en la estabilidad - Efecto del cambio climático	1142
Mallas y redes de protección.....	1212

Modelación numérica	1313
Restauración de taludes y laderas	1368
Sismicidad y estabilidad de laderas	1387
Técnicas de auscultación	1423
Índice Autores	1508

ÍNDICE

Conferencia Invitada

¿Qué hemos aprendido de la distribución espacio-temporal de los deslizamientos? El caso del Bajo Deba (Guipúzcoa).....	26
<i>J. Remondo</i>	
Análisis y corrección de patologías en el ámbito de la red de carreteras del estado.....	37
<i>José Luis García de la Oliva</i>	
Colapsos: monitorización y alerta temprana	76
<i>J.M. Azañón</i>	
¡Alerta, riesgo de aludes!.....	102
<i>Vilaplana Fernández, J.M.</i>	
Aspectos determinantes para el diseño de los taludes de una corta minera	121
<i>Galera, J.M.</i>	
Vulnerabilidad de edificios frente a deslizamientos y desprendimientos.....	141
<i>Mavrouli O.</i>	

Sesión especial:

Asociación Española de Empresas Especialistas en Taludes

Corrección de deslizamiento mediante diversos sistemas de contención en infraestructuras de alta montaña. Caso de la A-136 en tramo Biescas Formigal	162
<i>Gonzalez García S.F., R. Sancho Gómez-Zurdo and A. Gracia Bernal</i>	
Ejemplos de restauración y revegetación de taludes mediante técnicas de bioingeniería mixta	174
<i>Sanz P.</i>	
Estabilización de taludes para rehabilitación de CTRA. DN-66 Bumbesti Jiu - Petrosami (Rumanía) - C.N.A.D.N.R. (Gobierno de Rumanía).....	186
<i>Braceras G. and J. Ibáñez</i>	
Estabilización y protección contra los desprendimientos en la Cala Banyalbufar (Mallorca).....	198
<i>OLIVERAS R.</i>	
Factores diferenciales en la protección contra desprendimientos en la geología volcánica de las Islas Canarias. A través del ejemplo de los trabajos realizados en la Carretera Insular TF-445, Isla de Tenerife.....	207
<i>Israel Hernández Rodríguez and Javier Luque González</i>	

La tecnificación de la ejecución de obras en Taludes 219
T. Löpfe

Sellado de los taludes de Cabreiros..... 227
Torres I. and J.J. Míguez Veiga

Aludes de nieve

Aplicación del registro sísmico producido por una avalancha de nieve para la validación de su modelo numérico 237
Pere Roig Lafon, Emma Suriñach, Cristina Pérez-Guillén, Mar Tapia, Perry Bartelt and Betty Sovilla

Evaluación del alcance de aludes en el Pirineo Catalán mediante modelización estadística 249
Oller P., G. Furdada and C. Baeza

Análisis de rocas blandas - Ensayos de laboratorio

Análisis de la degradabilidad de las rocas detríticas arcillosas. Aproximación mediante muestras artificiales de composición conocida..... 261
J. Martínez-Bofill, A. Gaya and A. Soler

Caracterización frente a la degradación ambiental de litologías margosas en taludes heterogéneos tipo Flysch. Resultados preliminares 271
Cano M., R. Tomás, A. Riquelme and J.L. Pastor

Evaluación de la resistencia al corte en rotura de unas margas sobreconsolidadas mediante ensayos de laboratorio 283
N. S. Montero and J. Estaire

Influence of the climate change on the evolution of soil bearing capacity: an experimental study on the effects of freezing/thawing cycles..... 295
J. Torche and E. Prina Howald

Nuevo método para la interpretación de imágenes digitales de inestabilidad mediante la técnica PIV 307
Pinyol N.M., M. Alvarado and A. Ruiz

Análisis de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo

Algunas potencialidades del uso de la toponimia como índice histórico y prehistórico de antecedentes para la evaluación de la peligrosidad y riesgo geológico. Estudio de casos en el pirineo catalán 314
Planas X., P. Oller and S. Riba

An overview of vulnerability assessment of buildings impacted by gravitational natural hazards. Possible applications in Switzerland..... 323
A. Mapelli and E. Prina Howald

Análisis de riesgos asociados a las infraestructuras viarias de la Diputación Provincial de Jaén	335
<i>Carpena R., I. Mellado, F. Moya, C. Colomo, P. Bédmar, J. Calero, A. Pérez, T. Fernández, M. Sánchez and J. Tovar</i>	
Análisis, evaluación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en la Vía Aloag - Santo Domingo (Ecuador).....	347
<i>Torrijo F.J., J. Garzón-Roca, I. Cantarino, V. Capa and A. Boix</i>	
Estudios de la susceptibilidad asociada a procesos de inestabilidad de ladera en el contexto de la iniciativa de ciudades emergentes y sostenibles (BID) - Casos de Xalapa, Tegucigalpa y Cuzco	359
<i>Joaquín Pérez-Romero, Ginés Suárez Vázquez, Jorge Rojo Gómez and María Álvarez Mingorance</i>	
Evaluación de la susceptibilidad de generación de remociones en masa mediante redes neuronales artificiales en la costa este del Fiordo Comau, región de Los Lagos, Chile.....	371
<i>Villela B., P. González and J. Lagos</i>	
Metodología de gestión de taludes en desmonte en la red carreteras de la GENCAT: experiencia en la aplicación	383
<i>Paniagua Serrano I. and Eugenia Álvarez Álvarez</i>	
Metodología integrada para la evaluación de riesgos en la Red de Carreteras de Gipuzkoa	395
<i>J Corominas, O. Mavrouli, I. Ibarbia, I. Jugo, N. Alonso, J. Ruiz, S. Luzuriaga and J.A. Navarro</i>	
Modelización de la peligrosidad de deslizamientos para diferentes escenarios empíricos en el cantábrico oriental.....	407
<i>Bonachea J., J. Remondo, V. Rivas, A. González and J. Sánchez</i>	
Propuesta de una metodología para la obtención de un modelo de riesgo específico de desprendimientos de roca en espacios naturales	419
<i>A. Lara Hidalgo and A. González Díez</i>	
Propuesta metodológica y análisis retrospectivo de la desaparición de una antigua iglesia del S. XVII debido a un corriente de derrubios, en Andorra	432
<i>Riba Porrás S., J. Altimir Planes and I. Villaró Pantebre</i>	
Reactivación de un deslizamiento costero por el urbanismo. El caso de Marina del Este (Almuñécar, Granada): monitorización mediante técnicas psinsar e inclinometría.....	444
<i>Azañón J.M., D. Notti, J.P. Galve, R.M. Mateos, O. Montserrat, F.J. Roldán, F. Fernández and V. Pérez</i>	
Sistema de alerta para procesos torrenciales a escala regional combinando mapas de susceptibilidad y datos del radar meteorológico.....	456
<i>M. Hürlimann, M. Berenguer, R. Palau and D. Sempere</i>	

Spatial Target Mapping: an approach to susceptibility prediction based on iterative cross-validations.....	468
<i>A. G. Fabbri, A. Patera and C.-J. Chung</i>	
Utilización de datos de distintos niveles de resolución para modelizar la susceptibilidad de deslizamientos	480
<i>Remondo J. and A.G. Fabbri</i>	
Avances en técnicas de reconocimiento y captura de datos del terreno	
Análisis de la actividad de deslizamientos mediante técnicas de LiDAR y fotogrametría en el entorno de la autovía A-44 (Jaén).....	492
<i>Colomo C., J.L. Pérez, J.M. Gómez and T. Fernández</i>	
Análisis de la evolución de desprendimientos a partir de datos lidar en el escarpe de Puigcercós (Pallars Jussà - Catalunya).....	504
<i>X. Blanch, M. Guinau and M.J. Royán</i>	
Análisis de la evolución de laderas inestables mediante técnicas de UAV y fotogrametría en el sector de La Guardia (Jaén).....	516
<i>Fernández T., J.L. Pérez, A. Mozas, F.J. Cardenal, J.M. Gómez, C. Colomo and J. Delgado</i>	
Aplicación de la técnica de interferometría de radar de síntesis de apertura (InSAR) en la detección de movimientos en masa en el municipio de Independencia.....	528
<i>Raventós J., M. Arroyo, W. Heredia and A. Cruz</i>	
Aplicación de técnicas remotas en el deslizamiento de Cerro Gordo (Granada). Análisis de daños e investigación de su dinámica	533
<i>Mateos R.M., J.M. Azañón, F.J. Roldán, D. Notti, J.P. Galve, V. Pérez-Peña, J.L. Pérez-García, C.M. Colomo, J.M. Gómez, O. Montserrat, N. Devantéry and F. Lamas</i>	
Caracterización geomecánica del talud desprendido de Cortes de Pallás (Valencia) mediante Structure from Motion (SfM) con imágenes adquiridas con Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)	545
<i>Riquelme A., J.C. García, R. Sarro, R. Tomás, M. Cano, J.L. Pastor, A. Abellán and G. Herrera</i>	
Caracterización geomorfológica y estructural de zonas de salida de bloques en una zona afectada por desprendimientos en Montserrat (Cataluña)	557
<i>Blanch X., M. Guinau and J.M. Royán</i>	
Empleo de técnicas geomáticas para el estudio de paredes rocosas	569
<i>Buill F., M. A. Núñez-Andrés, C. Puig-Polo, N. Lantada and A. Prades</i>	
Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera	581
<i>Ruiz R., J. Corominas and M. Hürlimann</i>	

Identificación de deslizamientos activos mediante servicios web de la Agencia Espacial Europea 593
Galve J.P., J.M. Azañón, R.M. Mateos, D. Clossom, F. Caló, J.V. Pérez, D. Notti, G. Herrera, M. Bejar and O. Monserrat

Integración de datos geomorfológicos, geotécnicos y nubes de puntos 3D para la caracterización de un talud excavado en limos erosionables 605
R. Tomás, M. Cano, A. Abellán, A. Riquelme and J.L. Pastor

Reconstrucción de la dinámica y características de un deslizamiento de rocas usando técnicas de teledetección (fotogrametría, LiDAR y datos sísmicos): Comparación entre diferentes técnicas y análisis complementarios..... 617
Tapia M., M. Guinau, M. Torné, M.J. Royán, C. Pérez, A. Echeverría, P. Roig and E. Suriñach

Base de datos - Sistema de Información Geográfica

El inventario de movimientos de ladera de España ALISSA: Metodología y análisis preliminar 629
Javier Hervás

Inventario de deslizamientos en la cuenca alta del río Segre (Pirineo Oriental)..... 640
Mas R., J. Moya and R. Copons

La base de datos de movimientos del terreno de Cataluña (LLISCAT): Una herramienta para la gestión de los riesgos geológicos..... 651
Marta González, Jordi Pinyol, Josep Ramisa, Neus Querol and Jordi Marturià

Los movimientos de ladera en España: Hacia una base de datos conjunta 663
Herrera G., R.M. Mateos, J.C. García-Davalillo, V. Alonso, J. Mulas, M. Hernández, P. Buxó Pagespetit, M. González, J. Pinyol and J. Marturià

Plataforma on-line para el seguimiento geológico y geotécnico de la red ferroviaria de FGC 674
D. Santana, J. Pons, H. Rodríguez, E. Prat, F. López, M. Janeras, P. Buxó, J. Comellas, A. Ferré and D. Paret

Corrección y estabilización de laderas y taludes

Actuaciones de estabilización y protección frente desprendimientos en la ladera de Martiánez (Tenerife): Un enfoque innovador en la definición de la solución 686
Asensio Doz C. and A.I. Santana Mancheño

Aplicación de la UNE-EN 1537 en la fabricación y diseño de anclajes de cable y barra 698
Vilar Brumbeck A. and V. Herrera Guerrero

Estabilización de la ladera del Molinet, tramo final del Paseo Marítimo de l'Estartit (Girona)..... 709
López F., E. Prat, M. Janeras and P. Buxó

Estabilización de taludes aplicando la técnica de “soil nailing” en suelos de la ciudad de Quito - Ecuador	721
<i>Capa V.E., P. Calderón, F. J. Torrijo and I. Payá</i>	
Estabilización deslizamiento mediante geocompuestos	729
<i>Félix E. González Valle and Julián Laso Fernández</i>	
Factores a considerar en la selección de sistemas activos y pasivos de protección contra desprendimientos.....	741
<i>P. Benito de las Heras</i>	
Portales en condiciones difíciles. Túnel de Yanango	753
<i>Sánchez Rodríguez S., M. Prieto Domínguez and E. Silva Espiña</i>	
Prevención de inestabilidades en la contención de una excavación al pie de una ladera.....	765
<i>J. Castro, J. Casanueva, J. Cañizal, A. Da Costa and C. Sagasetta</i>	
Técnicas de estabilización tras la reactivación de un gran deslizamiento en Tolosa (Guipúzcoa).....	777
<i>Puell Marin F. and J. Marin Loeches</i>	

Estabilidad de laderas y taludes en presas y embalses

El desprendimiento en Cortes de Pallàs	785
<i>Elipe J.C. and J. Cervera</i>	
Problemas de inestabilidad en laderas rocosas de Guatemala	797
<i>Oteo J., C. Oteo, P. Sola and C. Rozas</i>	
Supervivencia de una tubería forzada apoyada en una ladera inestable	809
<i>E. Alonso and M. Sondon</i>	
Trabajos en Cortes de Pallás	822
<i>Greco M.</i>	

Estabilidad de taludes en rocas y análisis de desprendimientos

Análisis del desprendimiento rocoso de Son Poc (Mallorca) mediante modelización 3D	834
<i>Sarro R., R. M. Mateos, I. García-Moreno and G. Herrera</i>	
Cálculo de estabilidad de la rotura plana mediante continuidades cohesivas y friccionales en la cantera de Luque (Córdoba).....	845
<i>A. Daza, J. Gutiérrez-Ravé, G. Aroca, A. Viñals, J.L. Castillejo, G. López and F. Gavilán</i>	
Diseño y primeros resultados de tres ensayos de lanzamiento de bloques de roca para el estudio de la fragmentación	857
<i>Gili J.A., G. Matas, J. Corominas, N. Lantada, R. Ruiz, M.A. Núñez, O. Mavrouli, F. Buill, J. Moya, A. Prades, C. Puig, J. Martínez and Ll. Saló</i>	

Modelización de cunetas contra desprendimientos con CRSP-3D	869
<i>Yepes J., C. García-González and M. Franesqui</i>	
Modelización de desprendimientos rocosos considerando la fragmentación	881
<i>Matas G., N. Lantada, J. Corominas, J.A. Gili, R. Ruiz-Carulla and A. Prades</i>	
Modelo de fragmentación fractal para desprendimientos rocosos	893
<i>Ruiz-Carulla R., J. Corominas and O. Mavrouli</i>	
Simulación y análisis con CRSP 3D de factores condicionantes de la distancia de parada de los desprendimientos en taludes volcánicos.....	905
<i>Yepes J., C. García-González and M.A. Franesqui</i>	
¿Qué nos enseña la pared de Degotalls en Montserrat sobre los desprendimientos de roca?	917
<i>Marc Janeras Casanova</i>	

Estabilidad de taludes en vías de comunicación

Análisis de estabilidad y medidas correctoras en los taludes de la vía Cahuají - Cotaló (Ecuador).....	930
<i>J. Garzón-Roca, J. Company, N. Arias and V. Capa</i>	
Caracterización y modelización 2D y 3D de los desprendimientos del escarpe de Cabrerizos (Salamanca).....	944
<i>Cuadrado J. and M.J. Rodríguez</i>	
Desprendimientos de taludes en las Carreteras del Estado en Cantabria en los últimos años (2011-2016)	955
<i>Collazos Arias F., L. Ayres Janeiro and S. Sánchez Matallanes</i>	
Estabilización de un deslizamiento en el Puerto de Pajares.....	967
<i>Fernández C., C. Oteo and P. Sola</i>	
Estabilización de un desmonte en la autovía Ex-A1	979
<i>Gómez A., A. Soriano Martínez and A. Soriano Peña</i>	
Estabilización de un talud en desmonte en la carretera A-2602; Los Pintanos - Puerto de Cuatro Caminos (Zaragoza)	991
<i>Pérez Picallo M.A., A. Gracia Bernal, J.M. Rico Romero and A. García Pérez</i>	
Estudio de riesgos geotécnicos en la A-316 (provincia de Jaén).....	1003
<i>Villegas I., J.M. Thode and F. Ureña</i>	
Estudio y estabilización del deslizamiento que afecta a la línea de ferrocarril Castejón Bilbao en las proximidades de la población de Alfaro (La Rioja)	1015
<i>Luis Serrano Martín and Manuel Bermejo Martínez</i>	
Hundimiento en el ramal de salida a Corrales de Buelna. Autovía A-67 (Cantabria).....	1027
<i>Collazos Arias F., J.L. Garcia de la Oliva, G. Armijo-Palacio and S. Sanchez-Matellanes</i>	

Inestabilidad en Porciles (Asturias) y medidas de reparación.....	1039
<i>Uriarte J., J. M. Zamora, C. Oteo and P. Sola</i>	
Inestabilidades de ladera en una carretera de montaña: talud 23 de Port Ainé (Pirineo de Lleida)	1051
<i>Prat E., H. Rodríguez, F. López, M. Janeras, A. Ferré and J. Comellas</i>	
Inspección y mantenimiento de sistemas de protección contra desprendimientos rocosos en las carreteras de la Serra de Tramuntana de Mallorca.....	1063
<i>Rius J.M. and R. Aguiló</i>	
Metodología para la determinación de la peligrosidad y riesgo de los taludes en carreteras. Planificación y gestión de la inversión.....	1075
<i>J. Amigó, P. Ferrer and C. López</i>	
Taludes y laderas inestables de la Doble Vía Aloag - Santo Domingo (Ecuador). Problemática general y empleo de técnicas LIDAR y Dron.....	1086
<i>Montalvo Villacís P., S. Sánchez Rodríguez, J.D. López Valero and A. Estévez Pascual</i>	

Grandes deslizamientos

El deslizamiento de Pico de Navas (Burgos, España): una rotura causada por la fluidificación de arenas caoliníferas de las facies Utrillas	1098
<i>Sanz E., I. Menéndez, A. Lomoschitz and R. Galindo</i>	
El deslizamiento del Bec Vermell en la costa norte de Menorca (Baleares).....	1108
<i>Roig F.X., J.M. Vilaplana, A. Rodríguez, J.A. Martín and B. Gelabert</i>	
Los movimientos en masa asociados a los depósitos morrenicos y áreas de cumbres de la Sierra de Urbión (Cordillera Ibérica)	1120
<i>Sanz de Ojeda P., E. Sanz, I. Menéndez and R. Galindo</i>	
Reconocimiento de los depósitos de debris avalanche de Gran Canaria: unos mega-deslizamientos poco conocidos.....	1130
<i>Lomoschitz Mora-Figueroa A., J. Hervás and R. Casillas</i>	

Influencia del agua en la estabilidad - Efecto del cambio climático

Aplicación del análisis espectral para la determinación de ciclos climáticos desencadenantes de deslizamientos. El caso de Mallorca	1142
<i>Luque J.A., R.M. Mateos, I. García, E. Pardo and G. Herrera</i>	
Desarrollo de un programa orientado a la caracterización del flujo en taludes.....	1154
<i>G. De la Morena, R. Balmaseda, E. Calcerrada, A.M. Díaz, L. Asensio and V. Navarro</i>	
El barranco de Portainé (Pirineo Central): un laboratorio in situ completo para el estudio de la actividad torrencial	1165
<i>J. Pinyol, M. Hürlimann, G. Furdada, M. Moysset, R. Palau, A. Victoriano, M. González, J. Moya, M. Guinau and C. Raimat</i>	

Generación de indicadores de erosión hídrica en taludes mediante un sistema automático de control..... 1177
Fernández Jiménez A., E. Antuña Yudego, E. Álvarez Álvarez, A. Fernández Villán, J.L. Carús Candás, R. González Martínez and P. García

Modelización hidrogeológica y estudio de afección sobre la estabilidad de la ladera sito en el municipio de Ermua (Vizcaya)..... 1189
A. Larrea, Barral N., R. Husillos, R. Pérez, G. Fernández and J.M. De Luis

Pérdida de suelo en laderas bajo cambio climático. Procesos físicos, modelación predictiva y posibles estrategias de mitigación - el proyecto de investigación "Smucphy" 1200
M Hürlimann, J. Vaunat, R. Oorthuis, J. Moya, C. Puig, F. Buill, A. Núñez, E. Romero, M. González and J. Pinyol

Mallas y redes de protección

Actuaciones de protección del Torrent del Forn y el río de La Comella frente a episodios de corrientes de derrubios para el proyecto de urbanización de la PP-SUR-17A..... 1212
Villaró I., S. Riba, J. Altimir, V. Casals and J. Torrebadella

Análisis comparativo de las características mecánicas de diferentes membranas flexibles y la validación de los niveles de soporte ofrecidos para su empleo en sistemas flexibles de estabilización de taludes 1224
Juan Antonio Torres Vila and Jesús Miguel Llano Flórez

Dimensionamiento de sistemas de contención flexible 1236
J. Coll and R. Majoral

Empleo de redes de cable de acero en la estabilización de muros de escollera fallados. Caso práctico..... 1244
Benito de las Heras P.A.

Experiencia en el empleo de sistemas flexibles de estabilización de taludes mediante el uso de mallas y redes como membranas de altas prestaciones y baja deformación reforzadas con cables horizontales 1257
Juan Antonio Torres Vila and Jesús Miguel Llano Flórez

Influencia de los sistemas flexibles de estabilización de taludes de alta capacidad de soporte en la reducción global de costes para la estabilización de taludes respecto a las soluciones tradicionales..... 1269
Juan Antonio Torres Vila, Jesús Miguel Llano Flórez and Héctor Peñalba Balbontín

Instrumentación y análisis de ensayos sobre pantallas dinámicas para la retención de rocas 1281
Castanon L., E. Blanco and D. Castro

Las mallas para taludes y las nuevas normas internacionales ISO 1292
R. Majoral and J. Coll

Simulación de dos pantallas dinámicas mediante FEM y calibración mediante ensayos in situ reales	1304
<i>L. Castanon-Jano, E. Blanco-Fernandez, D. Castro-Fresno and D. Ferreño</i>	

Modelación numérica

Aceleración de deslizamientos por efectos térmicos. Modelación mediante el Método del Punto Material.....	1313
<i>M. Alvarado, N.M. Pinyol and E.E. Alonso</i>	

Análisis cinemático de un deslizamiento lento de ladera mediante un modelo viscoplástico tridimensional de elementos finitos. El Portalet	1321
<i>Bru G., J.A. Fernández, J.C. García, G. Herrera and J. Fernández</i>	

Comparación de los métodos analíticos y numéricos en el cálculo de drenes verticales como técnica de mejora de terreno bajo terraplenes	1332
<i>S. Melentijevic and P. Martín</i>	

Mecanismos que controlan la velocidad de los deslizamientos	1344
<i>Pinyol Núria M., M.R. Scoppettuolo and E.E. Alonso</i>	

Relación entre la velocidad de movimiento y el factor de seguridad en grandes movimientos de ladera	1356
<i>Gómez R.</i>	

Restauración de taludes y laderas

El papel de la bioingeniería como herramienta sostenible para la estabilización de taludes	1368
<i>Valenzuela M.</i>	

Restauración hidrológica y ambiental del depósito de sobrantes de Balantxa (T.M. Hernani, Gipuzkoa).....	1375
<i>M.L. Giral Conde-Salazar, M. Azurmendi and S. Luzuriaga</i>	

Sismicidad y estabilidad de laderas

Análisis de susceptibilidad de las inestabilidades cosísmica de laderas en la región de Murcia.....	1387
<i>Tsige M., M.J. Rodríguez and I. García</i>	

Mecanismo de rotura de los grandes deslizamientos asociados a sismos en la Zona de Falla de El Salvador	1399
<i>Tsige M., I. García and M.J. Rodríguez-Paces</i>	

Proyecto Epilates: una estrategia para la evaluación de las incertidumbres asociadas a los mapas previsores de inestabilidades sismo-inducidas.....	1411
<i>Delgado J., J. Garrido, M.J. Rodríguez, M. Tsigé, J.M. Andreu, J.A. Peláez, J.J. Giner, J. Rosa, F. Llinares and C. Missori</i>	

Técnicas de auscultación

- Análisis de series temporales de movimientos de ladera mediante herramientas Wavelet: Fundamento y ejemplos de aplicación 1423
Tomás R., J.M. López Sánchez and Z. Li
- Barrio de l'Estació (Sallent), de zona residencial a zona experimental. Monitorización de movimientos del terreno mediante el sistema Wi-GIM..... 1435
Rodriguez X., J. Marturiá, F. López, P. Buxó, L. Mucchi, G. Gigli, A. Fornaciai, R. Schina and F. Trippi
- Geotecnia sísmica y deformación por vibración en las capas: activa, no-saturada y profunda 1447
A. Daza, J. Gutiérrez-Ravé, G. Aroca, M. Carreras, J. Valverde, I. Vega and P. Torralbo
- La Campa de San Bernabe, un caso singular de inestabilidad de ladera..... 1461
González-Gallego J., J.L. García de la Oliva and J. Moreno
- Puigcerçós: un laboratorio de campo para experimentar con los desprendimientos de rocas 1473
Vilaplana J.M., M.J. Royán, A. Abellán, X. Blanch, M. Guinau, G. Khazaradze, C. Pérez, P. Roig, M. Tapia and E. Suriñach
- Veinte años de auscultación del deslizamiento de Vallcebre (Pirineo Oriental): experiencias y lecciones aprendidas..... 1485
Moya J., J. Corominas, J. A. Gili, A. Ledesma, A. Lloret and M. Mulas
- ¿Los desprendimientos del Tajo de San Pedro son una amenaza para la Alhambra de Granada?..... 1496
F.J. Roldán, J.M. Azañón and J.L. Pérez

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TALUD DESPRENDIDO EN CORTES DE PALLÁS (VALENCIA) MEDIANTE *STRUCTURE FROM MOTION* (SfM) CON IMÁGENES ADQUIRIDAS CON *REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEM* (RPAS)

Adrián Riquelme^(1,2), Juan Carlos García-Davalillo⁽³⁾, Roberto Sarro⁽³⁾, Roberto Tomás^(1,2,3), Miguel Cano^(1,2), José Luis Pastor⁽¹⁾, Antonio Abellán⁽⁴⁾, Gerardo Herrera⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alicante.

⁽²⁾ Grupo de Trabajo de Clasificaciones Geomecánicas (GTCCG). Sociedad Española de Mecánica de Rocas.

⁽³⁾ Geohazard InSAR Laboratory and Modelling Group. Área de Riesgos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España.

⁽⁴⁾ Scott Polar Research Institute. Department of Geography. University of Cambridge.

RESUMEN

El 6/04/2015 un desprendimiento en el vaso del embalse de Cortes de Pallás (Valencia) sepultó instalaciones de una central hidroeléctrica de Iberdrola dejando ocho meses incomunicada la población por carretera. Durante la emergencia, Iberdrola encargó un vuelo de reconocimiento del talud, aún inestable y peligroso, sin patrón específico. Sobre estas fotografías se generó un modelo 3D de la ladera aplicando técnicas fotogramétricas SfM. El análisis de la nube de puntos mediante el programa “Discontinuity Set Extractor” permitió caracterizar las discontinuidades predominantes del macizo. Por último, se calcularon los factores de ajuste de la clasificación SMR, para las discontinuidades y cuñas compatibles con la geometría del talud. Esta metodología ha permitido obtener de manera remota, rápida y suficientemente precisa la información necesaria para la caracterización geomecánica de las inestabilidades producidas y potenciales mediante análisis retrospectivo en un talud inaccesible y sin exposición directa de los técnicos durante la toma de datos.

1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas de adquisición remotas permiten la toma de datos de una superficie sin acceder a la misma. El resultado de su aplicación consiste normalmente en un archivo digital que contiene información de la superficie, ya sea mediante puntos de la misma o mediante elementos triangulares de superficie que la definen (Lai, Samson, & Bose, 2014). A priori,

esta información proporciona información de la superficie permitiendo la inspección visual mediante programas informáticos. Sin embargo, el tratamiento de los datos permite la obtención de información geométrica de gran valor para determinados análisis geotécnicos.

Existen dos técnicas de adquisición remota que actualmente gozan de gran popularidad. La primera es mediante el empleo de láser escáner 3D, también conocida como *Light Detection and Ranging*. (LiDAR) (La instrumentación utilizada debe de posicionarse en una plataforma móvil o estática. Un caso particular de gran difusión es cuando la plataforma es móvil y aérea, denominándose *Aerial Laser Scanner* (ALS) . En este caso, la dirección del láser es subvertical debido a las características del vuelo y de la posición del láser. Con esta instrumentación se obtienen nubes de puntos 3D que permiten la generación de modelos digitales de elevación o *Digital Elevation Models* (DEMs). La dirección subvertical del láser implica una resolución mucho mayor en superficies horizontales que en verticales, por lo que es inadecuado para obtener información de taludes de gran pendiente. La configuración en vehículos móviles también se ha llevado a cabo en embarcaciones (Alho et al., 2009) y automóviles (Kukko, Kaartinen, Hyypä, & Chen, 2012). En estos casos, la dirección del láser es principalmente horizontal, con lo que las características del resultado varían respecto a la plataforma aérea. Asimismo, esta instrumentación también puede posicionarse sobre trípode en el terreno, denominándose *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), permitiendo escanear también con haces subhorizontales, más adecuados para taludes subverticales (Jaboyedoff et al., 2012).

La segunda técnica es la fotogrametría digital, concretamente la denominada *Structure from Motion* (SfM). Esta técnica consiste en la captura de fotografías de una superficie desde distintos puntos de vista, y básicamente determina automáticamente las posiciones de las cámaras y reconstruye puntos de la superficie comunes en varias fotografías. Si el objetivo es modelizar un talud subvertical, la toma de fotografías determinará las características del resultado. La captura de las fotos desde el terreno conlleva que las superficies subhorizontales situadas a cierta cota no serán adecuadamente representadas en las imágenes, con lo que la restitución de esas superficies presenta menor calidad que otras en las que la superficie haya sido adecuadamente capturada. Sin embargo, si las fotografías se capturan con un *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), la posición de éstas, permite obtener las fotografías desde cotas superiores a las que se tomarían manualmente. Esto posibilita el capturar mucha mayor superficie del talud desde distintos ángulos y posiciones. Con ello, un aumento en la calidad de los resultados. La popularidad de esta técnica está en aumento (Abellán, Derron, & Jaboyedoff, 2016), probablemente por los resultados satisfactorios que ofrece y la accesibilidad de la instrumentación necesaria para su aplicación.

Las nubes de puntos adquiridas de superficies ha sido aplicada a diversos campos, siendo uno de ellos la mecánica de rocas (Riquelme, Tomás, & Abellán, 2016). La caracterización de taludes mediante información digital ha sido abordado por varios investigadores (Jaboyedoff et al., 2007; Lato & Vöge, 2012; Riquelme, Abellán, & Tomás, 2015; Riquelme, Abellán, Tomás, & Jaboyedoff, 2014a; Slob, Turner, Bruining, & Hack, 2010),

y actualmente es una técnica que se aplica profesionalmente en proyectos de ingeniería.

El presente trabajo muestra una caracterización de un talud mediante una combinación de la instrumentación ALS con la técnica SfM, con una toma de datos no planificada. En un talud rocoso en el que se ha producido la rotura, se realizó un vuelo de reconocimiento con un RPAS. Las fotografías adquiridas se tomaron sin seguir un plan de vuelo específico, ni tampoco se emplearon las técnicas recomendadas para la aplicación del SfM que permiten escalar, orientar y corregir deformaciones no lineales propias de la técnica (James & Robson, 2014). La carencia de puntos de control fue subsanada mediante la extracción de coordenadas a partir de una nube de puntos de poca resolución obtenida de un repositorio público (Instituto Geográfico Nacional, 2016). La nube de puntos obtenida permitió la aplicación de técnicas de identificación y extracción de familias de discontinuidades planas mediante software de código abierto (Riquelme, Abellán, Tomás, & Jaboyedoff, 2014b). A partir de los resultados, se identificó el mecanismo que causó la rotura en el talud. La aplicación de esta técnica muestra un apoyo para los técnicos que deben de evaluar rápidamente el estado y posible evolución de inestabilidades en escarpes inaccesibles y/o peligrosos durante la fase de emergencia posterior al desprendimiento.

2 METODOLOGÍA

La metodología seguida consiste en los siguientes pasos: (a). la adquisición de las fotografías del talud, que a priori deberían seguir un plan de vuelo según las recomendaciones para la aplicación de la técnica SfM, aunque en este caso no es así; (b). se obtienen los puntos de control, que son lugares del escenario identificables en las fotografías capturadas de los que se conocen sus coordenadas en un sistema de referencia, relativo o absoluto; (c) se aplica la técnica SfM con un software específico, con lo que se obtiene una nube de puntos 3D de la superficie; y (d) análisis de un sector representativo del talud a partir de la nube de puntos obtenida. Este análisis permite identificar tanto el número de familias de discontinuidades planas presentes en el afloramiento, como la orientación principal y la clasificación de los puntos según familias.

La captura de fotografías suele llevarse a cabo según un plan de vuelo siguiendo ciertas estrategias. En el caso de una superficie plana, el manual de ayuda del software Agisoft Photoscan Professional Edition (Agisoft LLC, 2016) recomienda tomar las fotografías equidistantemente para el caso de un paramento (Fig. 1). Otros autores, sin embargo, apuntan la conveniencia de tomar las fotografías con cierta inclinación respecto a la normal a la superficie con el fin de reducir el efecto domo (James & Robson, 2014). En cualquier caso, es importante que el número de fotografías sea, al menos, del orden de 30 a 50, pudiendo superar los 100 en función de la extensión y detalle con el que se pretenda estudiar la superficie.

En el caso de un talud, si las fotografías se toman manualmente, habría que tomarlas a nivel del suelo de forma perpendicular al mismo. Esto implica no tener capturas desde puntos de

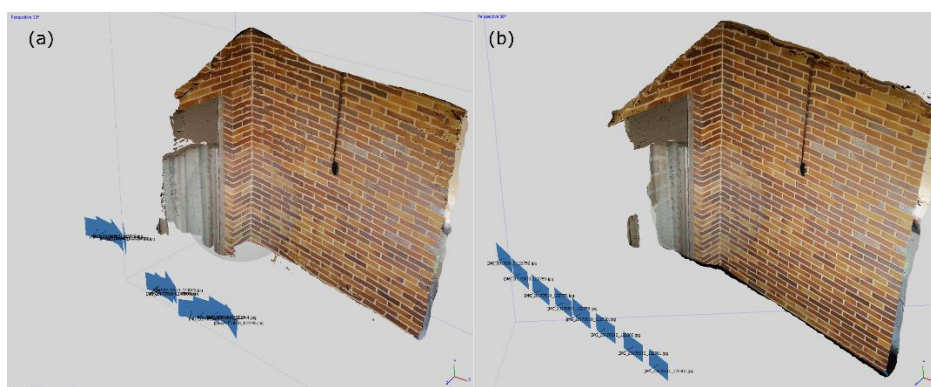


Fig. 1. Recomendaciones para la captura de fotografías según el software Agisoft Photoscan Professional edition (2016). (a) forma incorrecta de tomar las fotografías; (b) forma correcta.

vista superiores. Sin embargo, el empleo de RPAS permite la adquisición de imágenes desde cotas superiores, obteniendo información adicional respecto al caso anterior.

Los puntos de control, también llamados GCP (*Ground Control Points*), son necesarios por dos motivos. En primer lugar, permiten que el modelo generado se ajuste a la realidad gracias a las coordenadas de estos puntos. Dicho de otra forma, los GCP atan el modelo al terreno. Si las coordenadas de estos GCP están en un sistema de referencia global o local, las lecturas de los planos coincidirán con aquellas tomadas en campo (con la preceptiva corrección del norte magnético). Por este motivo, es fundamental que estos GCP tengan unas coordenadas acordes a los objetivos que se persiguen.

Finalmente, una vez que se dispone de la nube de puntos, es posible llevar a cabo un análisis estructural en el que se identifiquen las familias de discontinuidades planas y sus parámetros geométricos, siempre en sectores con características homogéneas (Riquelme, 2015). Por características homogéneas, se entiende que el talud rocoso muestra una o varias familias de discontinuidades planas con los mismos parámetros geométricos en cuanto a orientación. Es fundamental que una familia esté bien representada en ese sector, para que pueda ser estadísticamente visible. Este análisis puede ser llevado a cabo mediante multitud de técnicas propuestas por diversos autores (Jaboyedoff et al., 2007; Riquelme et al., 2014a; Slob et al., 2010; Vöge, Lato, & Diederichs, 2013). En este estudio se ha empleado la técnica propuesta por Riquelme et al. (2014a), la cual está implementada en el software de código abierto Discontinuity Set Extractor (DSE) (Riquelme et al., 2014b; Riquelme, Cano, Tomás, & Abellán, 2016).

3 CASO DE ESTUDIO

El talud estudiado se encuentra en el embalse de Cortes de Pallás, en la provincia de Valencia (España) (Fig. 2). En este embalse se encuentra la central hidroeléctrica La Muela de Cortes. El seis de abril de 2015, aproximadamente a las ocho de la tarde, se produjo un desprendimiento en el talud rocoso de la ladera sur, justo al lado de las instalaciones de la

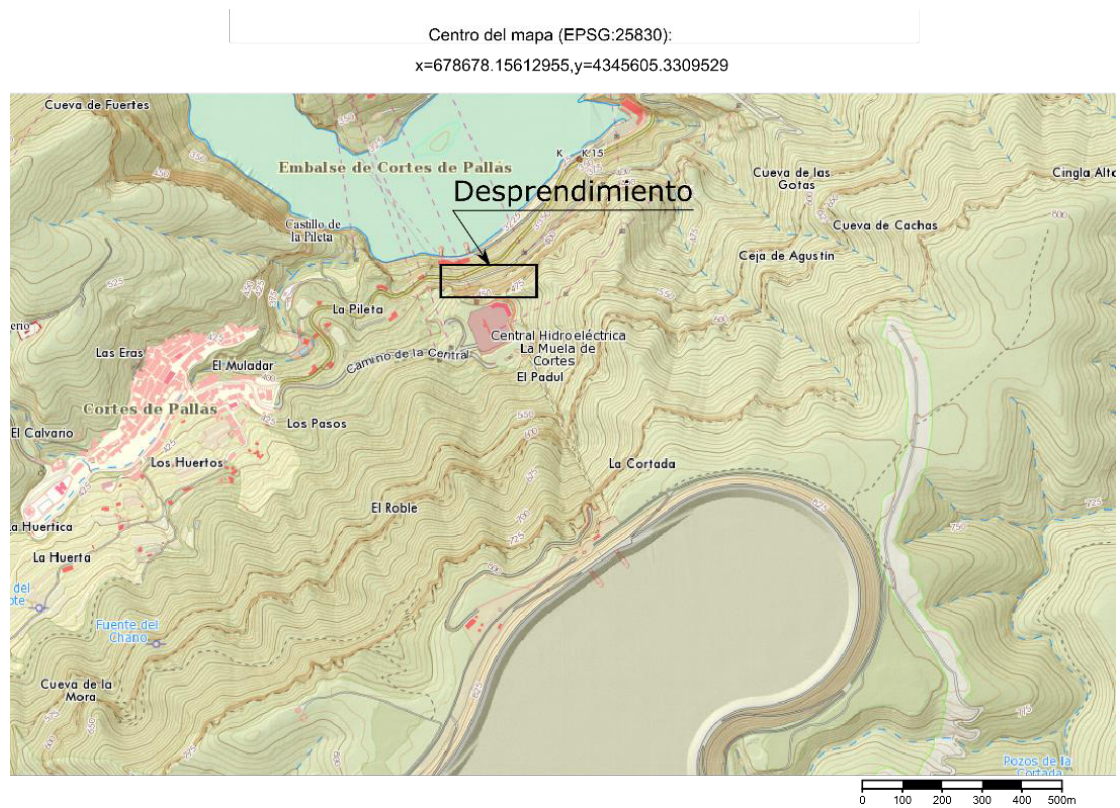


Fig. 2. Localización del caso de estudio. Fuente: <http://terrasit.gva.es/es/ver>.

central. La masa rocosa dependida se estimó en unos 8000 m³ y afectó a unos 100 m de la carretera CV-428. Este acceso es el único asfaltado a la localidad de Cortes de Pallás, la cual quedó sin comunicación durante varios meses. Además, las instalaciones de toma de agua de la central hidroeléctrica que la empresa eléctrica Iberdrola tiene bajo el escarpe quedaron también parcialmente sepultadas.

Las primeras observaciones de campo realizadas por técnicos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) tras el evento permitieron identificar el mecanismo de inestabilidad como un deslizamiento traslacional tipo cuña de un gran bloque de roca caliza con posterior caída y fragmentación de la masa inestable. Inmediatamente después la fase de emergencia, Iberdrola comenzó los trabajos de reconocimiento del talud, aún inestable y peligroso, realizando un vuelo mediante un RPAS con cámara óptica, con el que se obtuvieron un video y una serie de fotografías del talud.

Los técnicos del Área de Riesgos Geológicos del IGME desplazados a Cortes tras el evento (Fig. 3) realizaron una serie de observaciones en campo que permitieron definir el tipo y cinemática de la rotura (deslizamiento planar de una cuña de roca con posterior caída y fragmentación del material), estimar la morfometría y volumen del movimiento (7 980 m³) y determinar las posibles causas del movimiento (orientación desfavorable de



Fig. 3. Técnicos del IGME durante el reconocimiento de campo realizado en la fase de emergencia.

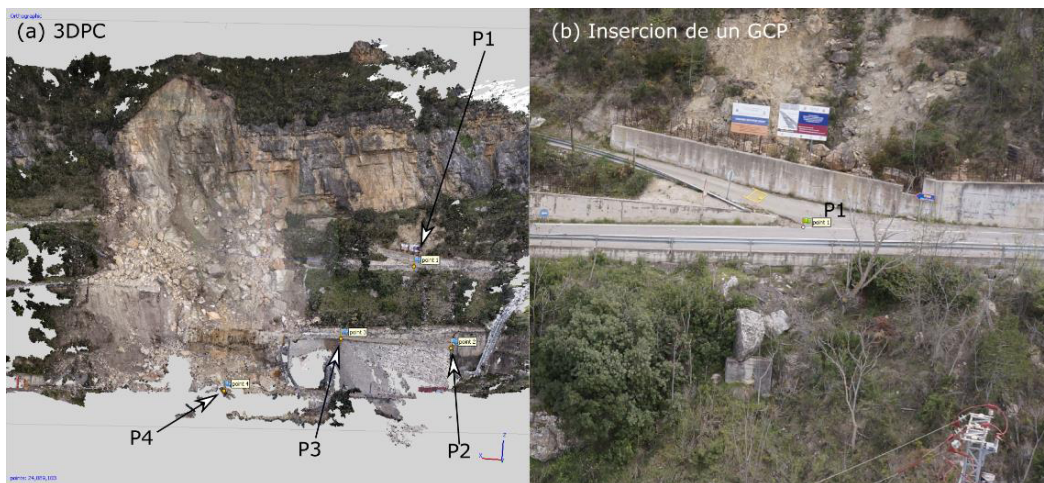


Fig. 4. (a) Nube de puntos generada con el software Agisoft Photoscan Professional Edition, con cuatro GCP insertados (P1 a P4); (b) Imagen adquirida con el RPAS en el que se ha insertado un GCP.

discontinuidades, contraste de permeabilidad, contraste de competencia (erosión diferencial), descompresión de tensiones naturales, lajamiento, vibraciones y aumento de presiones intersticiales en el macizo por saturación del suelo y presencia de agua en las grietas propiciada por lluvias precedentes). Entre las observaciones realizadas se obtuvieron datos de disposición espacial de las tres familias de juntas que definieron la cuña inestable: Familia S_0 planos de estratificación sub-horizontal (130-150/10-30), Familia 1 a la que pertenece la junta sobre la que deslizó principalmente el bloque principal (305-315/55-65) y la Familia 2 que individualiza la cuña (225-235/75-85).

A pesar de que estas fotografías no fueron tomadas según las recomendaciones de la técnica SfM (plan de vuelo arbitrario e inexistencia de dianas para GCP), en este trabajo se han empleado junto con puntos de control extraídos de una nube de puntos georreferenciada descargada del Centro de Descargas del CNIG (Instituto Geográfico Nacional, 2016). Esta



Fig. 5. Sector analizado del desprendimiento del talud. El sector se encuentra a la derecha del desprendimiento en la zona central del mismo.

Tabla 1. Ajuste por bloques (*blundle adjustment*) de los GCP.

GCP	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagen (px)
P1	14.8062	7.45995	-12.5937	20.8201	1.181 (7)
P2	-42.1018	-13.2284	4.50677	44.3605	0.794 (4)
P3	24.4611	38.0809	6.65431	45.7469	0.415 (4)
P4	3.122	-30.2075	2.33613	30.4582	15.842 (3)
Total	25.4945	25.4622	7.56057	36.8165	6.523

nube de puntos corresponde con un vuelo LiDAR del año 2009, con una densidad de puntos aproximadamente de $0,4 \text{ pts m}^{-2}$. Esta nube de puntos está mejorada con la incorporación del color del punto RGB mediante el empleo de ortofotos. Con ello se ha obtenido de manera rápida y accesible, las coordenadas de puntos identificables tanto en las fotografías como en la nube de puntos LiDAR: intersección de carreteras, una estructura de hormigón, etc, que servirán como puntos de control para el escalado y orientación de la nube de puntos 3D.

El número de imágenes empleadas es de 48, con una altitud de vuelo media de 69 m. La resolución media de las imágenes es de $1,77 \text{ cm px}^{-1}$, y la superficie aproximada de la reconstrucción es de $0,0161 \text{ km}^2$. La cámara empleada es una NEX-5N de 18 mm, y la resolución de las imágenes es de 4912×3264 .

4 RESULTADOS

4.1 Nube de puntos

La nube de puntos generada se muestra en la Fig. 4 (a).

Para la generación del modelo digital se introdujeron cuatro GCP (Fig. 4 a), extraídos de la inspección visual de la nube de puntos LiDAR del PNOA (Instituto Geográfico Nacional

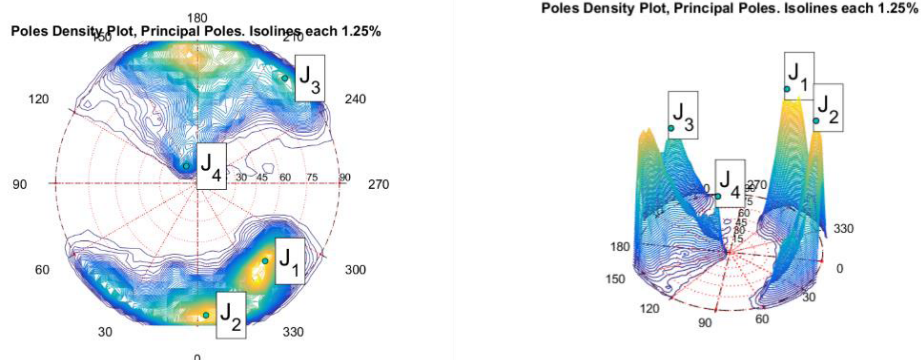


Fig. 6. Análisis de la densidad de polos para cada punto de la nube. Izquierda: proyección de la densidad de polos en 2D; derecha: vista de la densidad de polos en 3D.

de España, 2016), capturada en 2009. Los resultados del ajuste por bloques se muestran en la Tabla 1. Puesto que los GCP se extrajeron de una nube de puntos georreferenciada en ETRS89 (30N), la nube de puntos obtenida también está georreferenciada en este mismo sistema de referencia. La nube de puntos densa obtenida tiene 6 658 612 puntos, y se procesó con una calidad media, empleando un total de 19 minutos y 58 segundos. El tiempo empleado total para cargar las fotografías, descargar la nube de puntos del PNOA y extraer los cuatro puntos de control no superó los 30 minutos. Es decir, el tiempo total empleado en reconstruir la nube de puntos es de tan solo 45 minutos, aspecto que ilustra la agilidad del método propuesto.

El sector a analizar se muestra en la Fig. 5. Su elección se debe a que se muestran varias familias de discontinuidades planas, aproximadamente representadas por igual en superficie. Este sector tiene una extensión aproximada de $65 \times 25 \text{ m}^2$, y la nube consta de 379 089 puntos.

4.2 Análisis DSE del sector

Para cada punto se determina su vector normal asociado mediante la búsqueda de los 30 vecinos más próximos. Si se supera un test de coplanaridad del conjunto de puntos (Riquelme et al., 2014a), se representa el polo del vector normal en proyección estereográfica. Con todos los polos representados, se lleva a cabo un análisis estadístico analizando la función no paramétrica obtenida de aplicar la técnica *Kernel Density Estimation* (kde) (Botev, Grotowski, & Kroese, 2010). A priori, la Fig. 6 muestra que hay cuatro familias representadas en ese sector, cuyas direcciones se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2. Familias de discontinuidades planas extraídas del sector analizado

	Dip dir / Dip [°]	Densidad	% de los puntos	Campo [°]
J ₁	319.01 / 71.92	1.9482	20.82	305-315 / 55-65
J ₂	356.31 / 85.87	1.8859	45.06	No identificada
J ₃	219.78 / 87.68	1.1375	22.02	225-235 / 75-85
J ₄	146.49 / 16.25	0.8222	3.77	130-150 / 10-30

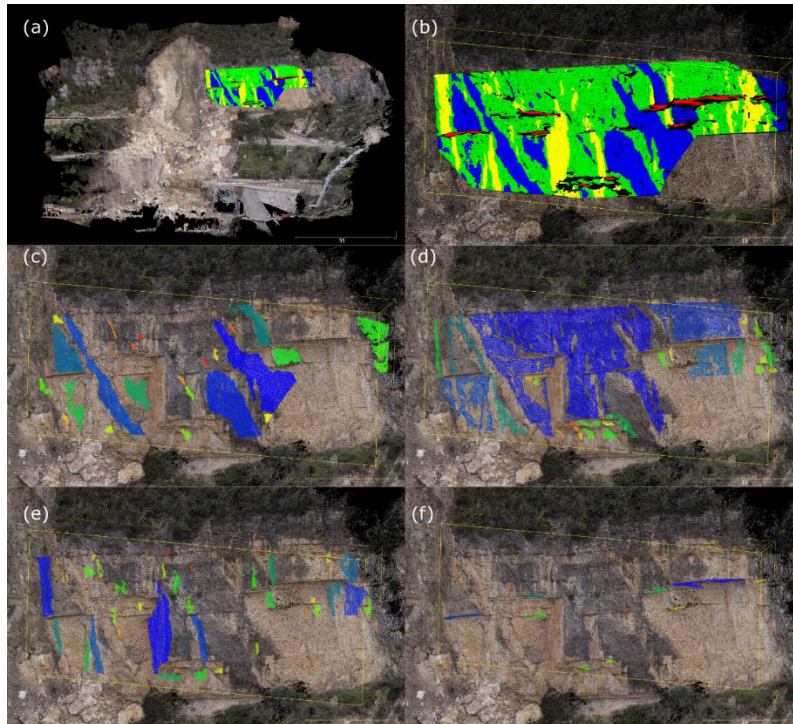


Fig. 7. (a) Vista de la clasificación de la nube de puntos superpuesta con una vista general del desprendimiento; (b) vista en detalle de las cuatro familias de discontinuidades; (c-f) vista de los puntos pertenecientes a las familias 1 a 4.

La Fig. 7 muestra la clasificación del sector, en el que cada punto se ha coloreado con un color según su familia o número de plano diferenciado en una misma familia. En la subfigura (b), la familia 1 corresponde con el color azul, la 2 con el verde, la 3 con el amarillo y la 4 con el rojo. La inspección visual permite observar cómo las familias 1, 3 y 4 son en efecto familias de discontinuidades planas, las cuales se distribuyen por todo el talud. Sin embargo, la familia 2 no es una familia de discontinuidades sino más bien el propio talud. De esta figura se observa cómo las familias 1, 3 y 4 han formado una cuña (colores azul, amarillo y rojo), la cual también se ha formado con una dimensión mucho mayor en el área desprendida. El tiempo empleado en analizar este sector es inferior a los 30 minutos.

Tabla 3. Cálculo de los factores de ajuste del índice SMR para el talud (173/88). A, B y C son los ángulos auxiliares para calcular los factores de ajuste F_1 , F_2 y F_3 respectivamente.

id	dip dir [°]	dip [°]	A [°]	B [°]	C [°]	Modo de fallo	F_1	F_2	F_3	F_4	$F_1 F_2 F_3$
J_1	320	72	33	7	160	Vuelco	0.15	1	-25	0	-4
J_2	356	86	3	8	174	Vuelco	1	1	-25	0	-25
J_3	220	88	47	8	0	Plana	0.15	1	-25	0	-4
J_4	146	16	27	1	-72	Plana	0.4	0.15	-60	0	-4

4.3 Análisis de los factores de ajuste del índice SMR

La dirección del talud se determinó mediante el ajuste de un plano a tres puntos de la zona desprendida (173/88°), como se muestra en la Tabla 3. En esta tabla se muestra que los factores de ajuste restan 4 puntos al índice SMR en el caso de J_1 , J_3 y J_4 , y de 25 en el caso de J_2 . Cabe considerar que esta última discontinuidad coincide con el propio plano del talud, que al tener la misma dirección hace que el factor de ajuste F_1 tenga un valor máximo. Igualmente, cabe destacar que en esta tabla no se ha tenido en cuenta el análisis de caída por cuñas ni bloques.

5 DISCUSIÓN

Evaluar el estado en el que se encuentra una zona afectada por un movimiento de ladera que ha afectado a bienes y/o personas es de vital importancia durante la fase de emergencia para el desarrollo seguro de las labores de rescate y estabilización. Así mismo, los datos de campo obtenidos durante estos primeros instantes son cruciales para una correcta caracterización del movimiento y el análisis de las posibles causas que lo desencadenaron.

En el caso de desprendimientos como el de Cortes de Pallás, la caracterización del macizo rocoso mediante la observación del estado y la disposición espacial en el que se encuentran la matriz rocosa y las discontinuidades, permitirá tomar decisiones de gestión y mitigación de la amenaza a corto y largo plazo.

Al comparar los datos obtenidos por los técnicos del IGME en campo con los obtenidos del análisis DSE presentados en la tabla 2 se observa como los resultados para la S_0 concuerdan con los de la J_4 , mientras que la Familia 1 difiere de la J_1 en el ángulo de buzamiento, y por último los de la Familia 2 correspondiente a la J_3 difieren algo en su dirección. Estas diferencias podrían deberse a que las condiciones de obtención de los datos de espaciales en campo no fueron idóneas ya que, salvo para los planos de estratificación, en ningún momento pudieron hacerse directamente sobre el escarpe y debieron estimarse mediante técnicas visuales.

El presente trabajo muestra que la obtención de un modelo 3D de la ladera y el análisis espacial mediante el programa DSE de las discontinuidades son una herramienta muy útil y

precisa para la caracterización de este tipo de inestabilidades.

6 CONCLUSIÓN

El trabajo de campo realizado por los técnicos en una situación de emergencia como esta se lleva a cabo en condiciones de presión debido a la necesidad urgente de informar a las autoridades sobre, entre otras, la causa del evento y las medidas de seguridad a adoptar. Es necesario recopilar rápidamente información, y emitir un juicio para llevar a cabo las actuaciones oportunas. A pesar de contar con todo el apoyo de las autoridades, los escombros y las limitaciones físicas suponen un impedimento a la hora de tomar datos. En este trabajo se ha mostrado cómo, sin haber planificado una campaña de análisis de discontinuidades, se ha podido llevar a cabo un análisis sencillo y objetivo, empleando para su análisis un tiempo inferior a la hora y media. Se abre por tanto la posibilidad de utilizar la metodología descrita en este trabajo para poder proporcionar información de apoyo a los técnicos que trabajan en emergencias de forma remota. Esto supone un claro avance para la labor de los geólogos e ingenieros en estas situaciones.

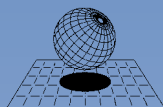
7 AGRADECIMIENTOS

Las fotografías adquiridas mediante RPAS fueron cedidas por el Servicio de Explotación de Presas y Conservación de Obra Civil de Iberdrola Generación SAU. El reconocimiento de campo se llevó a cabo en el marco del proyecto MOVES, Base de datos de movimientos del terreno en España financiado por el IGME. Este trabajo ha estado parcialmente financiado por la Universidad de Alicante (proyectos vigrob-157, GRE140-4 y GRE15-19) y por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), los fondos EU FEDER bajo el proyecto TIN2014-55413-C2-2-P y la ayuda *Marie Skłodowska-Curie* (MSCA-IF-2015-705215) del Programa H2020 de la Unión Europea.

REFERENCIAS

- Abellán, A., Derron, M.-H., & Jaboyedoff, M. (2016). 'Use of 3D Point Clouds in Geohazards' Special Issue: Current Challenges and Future Trends. *Remote Sensing*, 8(2), 130. <http://doi.org/10.3390/rs8020130>
- Agisoft LLC. (2016). *Agisoft Photoscan User Manual: Professional Edition, V 1.2*. Agisoft LLC. Retrieved from http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf
- Alho, P., Kukko, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Jaakkola, A. (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(13), 1831–1838. <http://doi.org/10.1002/esp.1879>
- Botev, Z. I., Grotowski, J. F., & Kroese, D. P. (2010). Kernel density estimation via diffusion. *The Annals of Statistics*, 38(5), 2916–2957. <http://doi.org/10.1214/10-AOS799>
- Instituto Geográfico Nacional. (2016). Centro de Descargas del CNIG (IGN). Retrieved 28 December 2016, from <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>
- Instituto Geográfico Nacional de España. (2016). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

- Retrieved 9 September 2016, from <http://pnoa.ign.es/presentacion>
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.-H., Locat, J., & Turmel, D. (2007). New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In T. & Francis (Ed.), *Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands. Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, May 27-31, 2007* (Vol. 1, pp. 61–68).
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, *61*(1), 5–28. <http://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, *39*(10), 1413–1420. <http://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance. *Sensors*, *12*(12), 11712–11733. <http://doi.org/10.3390/s120911712>
- Lai, P., Samson, C., & Bose, P. (2014). Visual enhancement of 3D images of rock faces for fracture mapping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *72*, 325–335. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.09.016>
- Lato, M. J., & Vöge, M. (2012). Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *54*, 150–158. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>
- Riquelme, A. (2015). *Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica*. Universidad de Alicante. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/51107>
- Riquelme, A., Abellán, A., & Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Eng. Geol.*, *195*, 185–195. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>
- Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014a). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, *68*(0), 38–52. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014b). Discontinuity Set Extractor. Alicante, Spain: Institutional Repository of the University of Alicante. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/50025>
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Abellán, A. (2016). Using open-source software for extracting geomechanical parameters of a rock mass from 3D point clouds: Discontinuity Set Extractor and SMRTool. In *Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to the Future* (Vol. 2, pp. 1091–1096). incollection, Ulusay, R.; Aydan, Ö; Gerçek, H.; Hindistan, M.; Tuncay, E.
- Riquelme, A., Tomás, R., & Abellán, A. (2016). Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *84*, 165–176. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008>
- Slob, S., Turner, A. k., Bruining, J., & Hack, H. R. G. K. (2010). *Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning*. TU Delft, Delft University of Technology. <http://doi.org/0166077>
- Vöge, M., Lato, M. J., & Diederichs, M. S. (2013). Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data. *Engineering Geology*, *164*, 155–162. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.07.008>



CIMNE

International Center
for Numerical Methods in Engineering