



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Uso de nubes de puntos 3D para identificación y
caracterización de familias de discontinuidades
planas en afloramientos rocosos y evaluación de la
calidad geomecánica

Adrián Riquelme Guill



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departamento de Ingeniería Civil

Tesis Doctoral:

**Uso de nubes de puntos 3D para identificación y
caracterización de familias de discontinuidades
planas en afloramientos rocosos y evaluación de la
calidad geomecánica**

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Autor:

Adrián Riquelme Guill

Directores:

Dr. Roberto Tomás Jover

Dr. Antonio Abellán Fernández

Alicante, julio de 2015



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departament d'Enginyeria Civil
Departamento de Ingeniería Civil

Tesis doctoral presentada por D. Adrián J. Riquelme Guill, en forma de compendio de publicaciones, de acuerdo con lo establecido por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante, en su reunión de 17 de diciembre de 2013 donde se aprobó el Reglamento interno de la Escuela de Doctorado, para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Alicante bajo la dirección de los Doctores Roberto Tomás Jover y Antonio Abellán Fernández

Vto. B°. Directores de la Tesis doctoral

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Roberto Tomás Jover

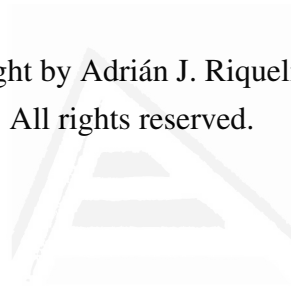
Antonio Abellán Fernández

El doctorando

Fdo. Adrián J. Riquelme Guill

Alicante, julio de 2015

© Copyright by Adrián J. Riquelme 2015
All rights reserved.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



A Ángela y a quien viene de camino

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Hay actividades humanas que se ejercen como Artes, otras son Ciencias, pero teniendo que recurrir muchas veces al Arte, cuando la Ciencia no le da respuesta. Así ocurre con la Medicina, y así pues, a todas estas actividades que están en un estado intermedio de evolución, les llamaré Medicinas. Y la Geotécnica es una Medicina.

D. José Entrecanales Ibarra

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumen

En este trabajo se estudia el uso de las nubes de puntos en 3D, es decir, un conjunto de puntos en un sistema de referencia cartesiano en \mathbb{R}^3 , para la identificación y caracterización de las discontinuidades que afloran en un macizo rocoso y su aplicación al campo de la Mecánica de Rocas. Las nubes de puntos utilizadas se han adquirido mediante tres técnicas: sintéticas, *3D laser scanner* y la técnica de fotogrametría digital *Structure From Motion* (SfM). El enfoque está orientado a la extracción y caracterización de familias de discontinuidades y su aplicación a la evaluación de la calidad de un talud rocoso mediante la clasificación geomecánica *Slope Mass Rating* (SMR).

El contenido de la misma está dividido en tres bloques, como son: (1) metodología de extracción de discontinuidades y clasificación de la nube de puntos 3D; (2) análisis de espaciados normales en nubes de puntos 3D; y (3) análisis de la evaluación de la calidad geomecánica de taludes rocoso mediante la clasificación geomecánica SMR a partir de nubes de puntos 3D.

La primera línea de investigación consiste en el estudio de las nubes de puntos 3D con la finalidad de extraer y caracterizar las discontinuidades planas presentes en la superficie de un macizo rocoso. En primer lugar, se ha recopilado información de las metodologías existentes y la disponibilidad de programas para su estudio. Esto motivó la decisión de investigar y diseñar un proceso de clasificación novedoso, que muestre todos los pasos para su programación e incluso ofreciendo el código programado a la comunidad científica bajo licencia GNU GPL. De esta forma, se ha diseñado una novedosa metodología y se ha programado un software que analiza nubes de puntos 3D de forma semi-automática, permitiendo al usuario interactuar con el proceso de clasificación. Dicho software se llama *Discontinuity Set Extractor* (DSE). El método se ha validado empleando nubes de puntos sintéticas y adquiridas con *3D laser scanner*. En primer lugar, este código analiza la nube de puntos efectuando un test de coplanaridad para cada punto y sus vecinos próximos para, a continuación, calcular el vector normal de la superficie en el punto estudiado. En segundo lugar, se representan los polos de los vectores normales calculados en el paso previo en una falsilla estereográfica. A continuación se calcula la densidad de los polos y los polos con mayor densidad o polos principales. Estos indican las orientaciones de la superficie más representadas, y por

tanto las familias de discontinuidades. En tercer lugar, se asigna a cada punto una familia en dependencia del ángulo formado por el vector normal del punto y el de la familia. En este punto el usuario puede visualizar la nube de puntos clasificada con las familias de discontinuidades que ha determinado para validar el resultado intermedio. En cuarto lugar, se realiza un análisis *cluster* en el que se determina la agrupación de puntos según planos para cada familia (*clusters*). A continuación, se filtran aquellos que no tengan un número de puntos suficiente y se determina la ecuación de cada plano. Finalmente, se exportan los resultados de la clasificación a un archivo de texto para su análisis y representación en otros programas.

La segunda línea de investigación consiste en el estudio del espaciado entre discontinuidades planas que afloran en macizos rocosos a partir de nubes de puntos 3D. Se desarrolló una metodología de cálculo de espaciados a partir de nubes de puntos 3D previamente clasificadas con el fin de determinar las relaciones espaciales entre planos de cada familia y calcular el espaciado normal. El fundamento novedoso del método propuesto es determinar el espaciado normal de familia basándonos en los mismos principios que en campo, pero sin la restricción de las limitaciones espaciales, condiciones de inseguridad y dificultades inherentes al proceso. Se consideraron dos aspectos de las discontinuidades: su persistencia finita o infinita, siendo la primera el aspecto más novedoso de esta publicación. El desarrollo y aplicación del método a varios casos de estudio permitió determinar su ámbito de aplicación. La validación se llevó a cabo con nubes de puntos sintéticas y adquiridas con 3D laser scanner.

La tercera línea de investigación consiste en el análisis de la aplicación de la información obtenida con nubes de puntos 3D a la evaluación de la calidad de un talud rocoso mediante la clasificación geomecánica SMR. El análisis se centró en la influencia del uso de orientaciones determinadas con distintas fuentes de información (datos de campo y técnicas de adquisición remota) en la determinación de los factores de ajuste y al valor del índice SMR. Los resultados de este análisis muestran que el uso de fuentes de información y técnicas ampliamente aceptadas pueden ocasionar cambios en la evaluación de la calidad del talud rocoso de hasta una clase geomecánica (es decir, 20 unidades). Asimismo, los análisis realizados han permitido constatar la validez del índice SMR para cartografiar zonas inestables de un talud.

Los métodos y programas informáticos desarrollados suponen un importante avance científico para el uso de nubes de puntos 3D para: (1) el estudio y caracterización de las discontinuidades de los macizos rocosos y (2) su aplicación a la evaluación de la calidad de taludes en roca mediante las clasificaciones geomecánicas. Asimismo, las conclusiones obtenidas y los medios y métodos empleados en esta tesis doctoral podrán ser contrastadas y utilizados por otros investigadores, al estar disponibles en la web del autor bajo licencia GNU GPL.

Palabras clave: Nubes de puntos 3D, discontinuidades, LiDAR, TLS, SfM, *3D laser scanner*, DSE, *Discontinuity Set Extractor*, espaciado, espaciado normal, *cluster*, código abierto, clasificación geomecánica, SMR.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resum

En aquest treball s'estudia l'ús dels núvols de punts en 3D, és a dir, un conjunt de punts en un sistema de referència cartesià en \mathbb{R}^3 , per a la identificació i caracterització de les discontinuïtats que afloren en un massís rocós i la seua aplicació al camp de la Mecànica de Rocques. Els núvols de punts utilitzats s'han adquirit mitjançant tres tècniques: sintètiques, *3D laser scanner* i la tècnica de fotogrametria digital *Structure From Motion (SfM)*. L'enfocament està orientat a l'extracció i caracterització de famílies de discontinuïtats i la seua aplicació a l'avaluació de la qualitat d'un talús rocós mitjançant la classificació geomecànica *Slope Mass Rating (SMR)*.

El contingut de la mateixa està dividit en tres blocs, com són: (1) metodologia d'extracció de discontinuïtats i classificació del núvol de punts 3D; (2) anàlisi d'espaiats normals en núvols de punts 3D; i (3) anàlisi de l'avaluació de la qualitat geomecànica de talussos rocosos mitjançant la classificació geomecànica SMR a partir de núvols de punts 3D.

La primera línia de recerca consisteix en l'estudi dels núvols de punts 3D per a l'extracció i caracterització de les discontinuïtats planes presents a la superfície d'un massís rocós. En primer lloc, s'ha recopilat informació de les metodologies existents i la disponibilitat de programes per al seu estudi. Açò va motivar la decisió d'investigar i dissenyar un procés de classificació nou, que mostre tots els passos per a la seua programació i fins i tot que ofereixa el codi programat a la comunitat científica sota llicència GNU GPL. D'aquesta forma, s'ha dissenyat una nova metodologia i s'ha programat un *software* que analitza núvols de punts 3D de forma semi-automàtica, permetent a l'usuari interactuar amb el procés de classificació. Aquest *software* es diu *Discontinuity Set Extractor (DSE)*. El mètode s'ha validat emprant núvols de punts sintètics i adquirits amb *3D laser scanner*. En primer lloc, aquest codi analitza el núvol de punts efectuant un test de coplanaritat per a cada punt i els seus veïns pròxims per, a continuació, calcular el vector normal de la superfície en el punt estudiat. En segon lloc, es representen els pols dels vectors normals calculats en el pas previ en una falsilla estereogràfica. A continuació, es calcula la densitat dels pols i els pols amb major densitat o pols principals. Aquests indiquen les orientacions de la superfície més representades, i per tant les famílies de discontinuïtats. En tercer lloc, s'assigna a cada punt una família en dependència de l'angle format pel vector normal del punt i el de la família. En

aquest punt, l'usuari pot visualitzar el núvol de punts classificat amb les famílies de discontinuïtats que ha determinat per a validar el resultat intermedi. En quart lloc, es realitza una anàlisi *cluster* en la qual es determina l'agrupació de punts segons plànols per a cada família (*clusters*). A continuació, es filtren aquells que no tinguen un nombre de punts suficients i es determina l'equació de cada plànol. Finalment, s'exporten els resultats de la classificació a un arxiu de text per a la seua anàlisi i representació en altres programes.

La segona línia de recerca consisteix en l'estudi de l'espaiat entre discontinuïtats planes que afloren en massissos rocosos a partir de núvols de punts 3D. Es va desenvolupar una metodologia de càlcul d'espaiats a partir de núvols de punts 3D prèviament classificats, amb la finalitat de determinar les relacions espacials entre plànols de cada família i calcular l'espaiat normal. El fonament nou del mètode proposat és determinar l'espaiat normal de família basant-nos en els mateixos principis que en camp, però sense la restricció de les limitacions espacials, condicions d'inseguretat i dificultats inherents al procés. Es van considerar dos aspectes de les discontinuïtats: la seua persistència finita o infinita, sent la primera l'aspecte més nou d'aquesta publicació. El desenvolupament i aplicació del mètode a diversos casos d'estudi va permetre determinar el seu àmbit d'aplicació. La validació es va dur a terme amb núvols de punts sintètics i adquirits amb *3D laser scanner*.

La tercera línia de recerca consisteix en l'anàlisi de l'aplicació de la informació obtinguda amb núvols de punts 3D a l'avaluació de la qualitat d'un talús rocós mitjançant la classificació geomecànica SMR. L'anàlisi es va centrar en la influència de l'ús d'orientacions determinades amb diferents fonts d'informació (dades de camp i tècniques d'adquisició remota) en la determinació dels factors d'ajust i al valor de l'índex SMR. Els resultats d'aquesta anàlisi mostren que l'ús de fonts d'informació i tècniques àmpliament acceptades poden ocasionar canvis en l'avaluació de la qualitat del talús rocós de fins a una classe geomecànica (és a dir, 20 unitats). Així mateix, les anàlisis realitzades han permès constatar la validesa de l'índex SMR per a cartografiar zones inestables d'un talús.

Els mètodes i programes informàtics desenvolupats, suposen un important avanç científic per a l'ús de núvols de punts 3D per a: (1) l'estudi i caracterització de les discontinuïtats dels massissos rocosos i (2) la seua aplicació a l'avaluació de la qualitat de talussos en roca mitjançant les classificacions geomecàniques. Així mateix, les conclusions obtingudes i els mitjans i mètodes emprats en aquesta tesi doctoral podran ser contrastats i utilitzats per altres investigadors, en estar disponibles en la pàgina web de l'autor sota llicència GNU GPL.

Paraules clau: Núvols de punts 3D, discontinuïtats, LiDAR, TLS, SfM, *3D laser scanner*, DSE, *Discontinuity Set Extractor*, espaiat, espaiat normal, *cluster*, codi obert, classificació geomecànica, SMR.

Abstract

In this doctoral dissertation we study the use of 3D point clouds, which are data sets of points on a cartesian system in \mathbb{R}^3 which we use for identifying and characterizing discontinuities normally appearing on rocks which will be applied to the field of Rock Mechanics. Point clouds used for this purpose have been acquired by means of three techniques: synthetic, 3D laser scanner and the digital photogrammetry technique Structure from Motion. This work is focused on the characterization of discontinuity sets and its application to the geomechanical quality assessment of a rock slope by means of the geomechanical classification Slope Mass Rating (SMR).

Its content is divided in three parts: (1) methodology of extracting discontinuities and 3D point cloud classification; (2) analysis of normal spacing of discontinuity sets using 3D point clouds; and (3) geomechanical quality assessment analysis of rock slopes using 3D point clouds.

The first research line consists of the study of 3D point clouds in order to extract and characterize planar discontinuities existing on a rock mass surface. First, different existing methodologies and existing available softwares were found and collected. This fact motivated the decision of researching and designing a novel classification system, showing all its programming steps and even offering its source code to the scientific community under GNU GPL license. Therefore, a novel methodology was designed and a software capable of analyzing 3D point clouds semi-automatically was programmed, allowing users to manage the classification process. This software has been named Discontinuity Set Extractor (DSE). This method has been validated using point clouds acquired synthetically and using 3D laser scanners. Firstly, this code analyses the point cloud performing a coplanarity test to each single point and its nearest neighbours, and then, it calculates the normal vector of the surface corresponding to the studied point. Secondly, poles of normal vectors calculated in previous stages are represented in stereographic projection. Then, the density of poles and those poles showing highest density values are calculated. These poles point the most represented orientations of the surface, and therefore by the discontinuity sets. Thirdly, each point is assigned to a discontinuity set depending on the angle between the normal vector assigned to the point and the normal vector of the discontinuity set. At this point the user can visual-

ize the classified point cloud and the determined discontinuity sets in order to validate these middle results. Fourthly, a cluster analysis is performed to determine those planes that belong to a discontinuity set. Then, those clusters which have a minor size than a certain value are filtered and removed and the equation of each plane is calculated. Finally, classification results are exported to a text file for its analysis and visualization using other programs.

The second line of research consists of the study of the spacing analysis of planar discontinuities, which are exposed on the rock mass, using 3D point clouds. We developed a methodology to calculate the spacing using 3D point clouds, previously classified, in order to find spatial relations between planes of each discontinuity set and its normal spacing. The novel basis of the proposed method is to find the normal spacing of each discontinuity set based on the same principles of those used during traditional fieldwork, but without spatial restrictions, unsafe conditions and difficulties typical in these processes. Two main characteristics of the discontinuities were considered: their non-persistence or persistence, being the first the most important novelty of this research. The development and application of the method through several cases of study allowed to establish its scope. The validation was performed using synthetic 3D point clouds and others acquired by means of 3D laser scanners.

The third research line consists of the analysis of the application of previously obtained information using 3D point clouds to the rocky slope quality assessment through the geomechanical classification SMR. The analysis focused on the use of orientations extracted using different sources of information (i.e. fieldwork data and remote techniques) to the SMR adjustment factors and the SMR index value. These analyses results showed that the use of different sources of information and widely accepted analysis techniques can cause variations in the rocky slope quality assessment up to one geomechanical class (i.e., 20 units). Moreover, the analyses have allowed to confirm the SMR index reliability to map unstable areas on a rocky slope.

The developed methods and software represent a major breakthrough for the use of 3D point clouds to: (1) the study and characterization of rock mass discontinuities and (2) its application to quality assessment of rocky slopes through the geomechanical classifications. Furthermore, the reached conclusions and the used means and methods in this doctoral dissertation can be proven and used by other researchers, as they are available at the author's website under GNU GPL.

Keywords: 3D point clouds, discontinuities, LiDAR, TLS, SfM, 3D laser scanner, DSE, Discontinuity Set Extractor, spacing, normal spacing, cluster, open source, geomechanical classification, SMR.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis directores de tesis hacer posible esta aventura. A Roberto Tomás por haber sido el incombustible motor de esta tesis doctoral, por motivarme a empezar esta singladura, por no dejar ningún correo ni llamada sin responder y por no cesar de infundir ánimos en ningún momento durante estos años. A Antonio Abellán por ser la fuente de inspiración y el catalizador de las ideas aquí presentadas, por infundir el rigor necesario para llevar a cabo la investigación, por el sacrificio que ha hecho dirigiéndome desde la lejanía. Sobre todo, agradecerles el haberme dado la libertad de aprender y permitirme elegir muchos caminos, tanto errados como acertados.

A Michel Jaboyedoff, director adjunto del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Université de Lausanne, quien fue parte del equipo en los primeros pasos y colaboró permitiendo utilizar los medios sin los que este trabajo habría sido imposible, y por su hospitalidad en las visitas a la Universidad de Lausana.

A Miguel Cano, compañero del área de conocimiento en la Universidad de Alicante, por su apoyo en las campañas de campo, consejos, palabras de aliento y sobre todo permitirme tomar decisiones.

A Matt Lato (BGC Engineering) y Robin Harrap (Queen's University), quienes me proporcionaron muchos de los datos utilizados en esta tesis. Al profesor Didier Hantz (Université of Grenoble) por su estimulante discusión acerca de la determinación de los espaciados de familia en macizos rocosos.

A Javier Soler y Andrea Prats, por acompañarme en las campañas de campo para la adquisición de nubes de puntos en Alicante. A Angela Prats, Raquel Riquelme y Javier Soler por haberme prestado los equipos informáticos utilizados desinteresadamente. A Javier Soler, Esther Coves, Vicente Alcalá y Chris Ward quienes revisaron el inglés de los textos publicados. A Paloma Prieto y Gloria Candela por revisar el texto de esta tesis.

A mis padres por el apoyo incondicional durante todo este tiempo.

A Siefko Slob, revisor firmante en los dos artículos presentados en esta tesis, cuyas aportaciones permitieron mejorar los trabajos en revisión, y por su nobleza en su juicio. A los revisores anónimos de los artículos que conforman este compendio, sus comentarios bienintencionados y juicios desinteresados que han permitido mejorar la calidad de este trabajo.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad de Alicante a través de los proyectos vigrob-157, uausti11-11, y gre09-40, el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y EU FEDER a través de los proyectos TEC2011-28201-C02-02, TIN2014-55413-C2-2-P y Objetivo FEDER 2007-2013, el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte en el marco del Programa Estatal de Promoción y Talento y su Empleabilidad en I+D+i a través del proyecto PRX14/00100 la *Swiss National Science Foundation* a través de los proyectos FNS-138015 y FNS-144040 y por la Generalitat Valenciana a través de los proyectos GV/2011/044 y ACOMP/2014/136.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice general

I	Parte I: Síntesis general de la tesis	1
1.	Introducción	3
1.1.	Antecedentes y estado del arte	4
1.1.1.	La mecánica de rocas y el macizo rocoso	4
1.1.2.	Evaluación de la calidad del macizo mediante clasificaciones geo- mecánicas	7
1.1.3.	La adquisición remota de datos	9
1.1.4.	De la nube de puntos a las discontinuidades planas	13
1.1.5.	La parametrización del macizo rocoso con 3DPC	16
1.2.	Planteamiento del problema	18
1.2.1.	Extracción de discontinuidades	19
1.2.2.	Análisis de espaciados normales	19
1.2.3.	Cálculo del índice SMR mediante nubes de puntos 3D	20
1.3.	Objetivos de la investigación	20
1.3.1.	Objetivo 1: orientación y posición de discontinuidades	20
1.3.2.	Objetivo 2: espaciados	21
1.3.3.	Objetivo 3: aplicación de los 3DPC al índice SMR	21
1.4.	<i>Rationale</i>	21
1.5.	Trabajos presentados y justificación de la unidad temática	22
2.	Metodología, hipótesis y plan de trabajo	27
2.1.	Metodología	27
2.1.1.	Obtención de nubes de puntos 3D	27
2.1.2.	Diseño de métodos	31
2.1.3.	Aplicaciones informáticas utilizadas	32
2.2.	Hipótesis	32
2.2.1.	Hipótesis de la primera línea de investigación	32

2.2.2.	Hipótesis de la segunda línea de investigación	34
2.2.3.	Hipótesis de la tercera línea de investigación	34
2.3.	Plan de trabajo	34
2.3.1.	Líneas de investigación desarrolladas	34
2.3.2.	Nubes de puntos 3D utilizadas	35
3.	Resultados	43
3.1.	Resultados de la línea de investigación 1	43
3.1.1.	Desarrollo del algoritmo	43
3.1.2.	Programación del <i>software</i> DSE	50
3.1.3.	Validación	51
3.2.	Resultados de la línea de investigación 2	52
3.2.1.	Desarrollo del algoritmo	52
3.2.2.	Programación del <i>software</i>	56
3.2.3.	Validación	56
3.3.	Resultados de la línea de investigación 3	56
3.3.1.	Desarrollo de la línea de investigación	56
3.3.2.	Programación de la herramienta SMRTool	57
3.3.3.	Aplicación de las herramientas a los casos de estudio	58
4.	Análisis y discusión de los resultados	67
4.1.	Línea de investigación 1	67
4.1.1.	Consideraciones acerca del <i>software</i> DSE	67
4.1.2.	Calibración	68
4.1.3.	Análisis estadístico de la densidad de orientaciones y asignación de familias	69
4.1.4.	Tamaño y definición de <i>clusters</i>	72
4.1.5.	Efecto de la presencia de vegetación en la aplicación del método	74
4.1.6.	Aplicación a casos de estudio reales	77
4.1.7.	Ámbito de aplicación del método	79
4.2.	Línea de investigación 2	80
4.2.1.	Consideraciones del método	80
4.2.2.	Discusión de resultados	81
4.2.3.	Ámbito de aplicación del método y recomendaciones de uso	81
4.2.4.	Automatización	82
4.3.	Línea de investigación 3	82
4.3.1.	Comparación entre origen de datos y método de extracción de discontinuidades	82
4.3.2.	Cálculo del índice SMR a partir de 3DPC	84

5. Conclusiones	87
5.1. Conclusiones específicas	87
5.1.1. Conclusiones específicas de la primera línea de investigación	87
5.1.2. Conclusiones específicas de la segunda línea de investigación	88
5.1.3. Conclusiones específicas de la tercera línea de investigación	89
5.2. Conclusiones globales	89
6. Futuras líneas de investigación	91
Referencias	93
II Parte II: Compendio de artículos	105
7. <i>Artículo 1: A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds</i>	107
8. <i>Artículo 2: Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds</i>	123
9. <i>Artículo en revisión 3: Characterization of rock slopes through Slope Mass Rating (SMR) using 3D point clouds: a review of practical issues through cases study</i>	135
10. Otros resultados de la investigación: Congreso Vertical Geology 2014. Lausanne, Suiza	173

Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

Índice de tablas

1.	Propiedades de los principales tipos de LiDAR, órdenes de magnitud	10
2.	Parámetros del índice RMR_b y posibles fuentes de información.	13
3.	Ajuste de bloque de la nube de puntos generada con SfM	39
4.	Línea de investigación 2: caso de estudio de las escaleras de hormigón.	56
5.	Definición de los factores de ajuste del índice SMR	57
6.	Línea de investigación 3, caso de estudio 1: resultados	62
7.	Línea de investigación 3, caso de estudio 3: cálculo del índice SMR	64



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice de figuras

1.	Afloramiento de rocas calizas en la ciudad de Alicante, España.	6
2.	Representación de la nube de puntos 3D del reloj de sol de la Universidad de Alicante adquirido con técnicas de adquisición remota.	12
3.	Representación del conejo de Stanford en 3D.	15
4.	Diagrama de flujo de la metodología seguida.	28
5.	Nube de puntos 3D de una mesa de comedor generada sintéticamente mediante MATLAB.	30
6.	Escaleras de hormigón en un parque urbano en Crevillent, Alicante (España).	30
7.	Talud rocoso en El Campello, Alicante (España).	30
8.	Análisis de la densidad de polos mediante histogramas o con la estimación con el método kde.	33
9.	Diagrama de flujo del plan de trabajo para las líneas de investigación 1 y 2	36
10.	Nubes de puntos 3D de figuras geométricas regulares creadas sintéticamente.	37
11.	Adquisición de nubes de puntos 3D de figuras geométricas regulares.	38
12.	Talud excavado en cuarcitas junto a una carretera en Ouray, Colorado (EEUU).	38
13.	Afloramiento de calizas en un talud rocoso en El Campello, Alicante (España).	40
14.	Afloramiento de margocalizas en un talud rocoso en la ciudad de Alicante (España).	40
15.	Nubes de puntos 3D utilizadas en la aplicación de las nubes de puntos al cálculo del índice SMR.	42
16.	Diagrama de flujo del método de extracción de discontinuidades con nubes de puntos 3D	45
17.	Aplicación del método de extracción de planos a la nube de puntos de un prisma hexagonal.	47
18.	Función de densidad de la distancia punto plano ajustado por mínimos cuadrados.	49
19.	Captura de pantalla del programa DSE: Interfaz gráfica del método de extracción de discontinuidades.	51

20.	Comparación del cálculo del espaciado normal con distintas hipótesis de persistencia	53
21.	Línea de investigación 2: caso de estudio de las escaleras de hormigón. . . .	55
22.	Interfaz gráfica del SMRTool.	59
23.	Línea de investigación 3, caso de estudio 1: resultados	60
24.	Línea de investigación 3, caso de estudio 1: comparación de resultados . . .	61
25.	Línea de investigación 3, caso de estudio 2: resultados	63
26.	Línea de investigación 3, caso de estudio 2: comparación de resultados . . .	64
27.	Línea de investigación 3, caso de estudio 3: resultados	65
28.	Calibración del número de vecinos y tolerancia	69
29.	Efecto del ángulo máximo entre polo principal y polo asociado al punto, caso de un cilindro	71
30.	Efecto del número de vecinos en la clasificación de planos con orientaciones similares, caso de un icosaedro	73
31.	Identificación de <i>clusters</i> en una pizarra	75
32.	Clasificación de una nube de puntos con presencia de vegetación	76
33.	Clasificación de una nube de puntos con presencia de vegetación: proyección estereográfica	76
34.	Sectorización de una superficie extensa para su análisis en subsectores con características homogéneas	78
35.	Línea de investigación 3, caso de estudio 3. Identificación del modo de fallo.	85

Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

Parte I

Parte I: Síntesis general de la tesis



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

“El mejor científico está abierto a la experiencia, y esta empieza con un romance, es decir, la idea de que todo es posible.”

Ray Bradbury

1

Introducción

La estructura de esta tesis doctoral cumple con los requisitos que la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante exige a las tesis doctorales presentadas en forma de compendio de publicaciones, de acuerdo con lo establecido por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante, en su reunión de 17 de diciembre de 2013 donde se aprobó el Reglamento interno de la Escuela de Doctorado. Estos requisitos establecen que la tesis doctoral debe incluir una síntesis en una de las dos lenguas oficiales de la Comunitat Valenciana en la que se incluyan los objetivos, las hipótesis de trabajo, los trabajos presentados y la justificación de la unidad temática.

Además, esta síntesis debe incorporar un resumen global de los resultados obtenidos, de la discusión de estos resultados y de las conclusiones finales. Esta síntesis debe dar una idea precisa del contenido de la tesis. De esta forma, la tesis queda estructurada en dos partes: una primera parte dedicada a la síntesis general anteriormente mencionada y una segunda en la que se incluyen las publicaciones que se aportan, que en este caso se trata de artículos en revistas indexadas en el *Science Citation Index (SCI)*.

En la introducción (Capítulo 1), bajo el epígrafe de “Antecedentes y estado del arte”, se expone todo el *background* sobre la temática a tratar, con el fin de poner de manifiesto la novedad de este trabajo. A continuación, en el apartado “Planteamiento del problema” se hace una exposición del objetivo a resolver. Posteriormente, se describen los objetivos de la investigación y en el *Rationale* se justifica la relevancia del trabajo presentado. Por último,

tal y como exige la normativa de la Universidad de Alicante para este modalidad de tesis, se justifica la unidad temática de los trabajos presentados.

1.1. Antecedentes y estado del arte

La Ingeniería Civil es la disciplina de la ingeniería que sirve a las necesidades de la sociedad mediante las denominadas obras civiles. Estas requieren estar asentadas sobre agua (estructuras flotantes) o el terreno, siendo este último caso el más habitual. El conocimiento del comportamiento del terreno es fundamental para la correcta concepción y diseño de infraestructuras o estructuras que, o bien asienten sobre este (cimentaciones) o bien requieran la estabilidad de su relleno o excavación en el caso de desmontes o túneles. Por tanto, el ingeniero civil necesita conocer cómo se comportará el terreno, ya sea suelo o roca. Para ello, grandes ingenieros han realizado valiosas aportaciones al conocimiento del comportamiento de estos sólidos, las cuales no han cesado de evolucionar con la experiencia registrada de miles y miles de obras, así como con la irrupción y desarrollo de nuevas tecnologías (es decir: computadores, técnicas, instrumentación de adquisición de datos, etc.).

La Geotecnia es una rama de la Ingeniería Civil que hace referencia a las técnicas del terreno pero no se centró específicamente en estudio del comportamiento y resistencia de los macizos rocosos hasta 1960 (Izquierdo, 1993). Hasta esa fecha los avances en la todavía no conocida como Mecánica de Rocas fueron muy importantes debido al elevado número de fallos catastróficos que se registraron (Hoek & Karakas, 2008), pues en aquella época “estábamos sobrepasando los límites de nuestras posibilidades de predecir las consecuencias de nuestras acciones” (Terzaghi & Voight, 1979). Más tarde en 1962 se fundó la sociedad que impulsó este campo: *International Society for Rock Mechanics*, celebrando su primer congreso en septiembre de 1966 en Lisboa, Portugal. Esta sociedad aglutina a todos los expertos del mundo en mecánica de rocas desarrollando actividades y generando importantes avances en el campo de la mecánica de rocas.

1.1.1. La mecánica de rocas y el macizo rocoso

La mecánica de rocas tiene como objeto fundamental de estudio las rocas y los macizos rocosos. Estos últimos se definen como el conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. La matriz rocosa es el material rocoso exento de discontinuidades, es decir, el bloque de roca intacta delimitado por discontinuidades, que se define como agregado naturales de partículas o cristales con uniones cohesivas permanentes (Ferrer & González de Vallejo, 1999). El término discontinuidad hace referencia a cualquier discontinuidad mecánica de un macizo rocoso con resistencia a tracción muy pequeña o nula, que implica un comportamiento me-

cánico no continuo del macizo rocoso (Barton et al., 1978; Ferrer & González de Vallejo, 1999).

La descripción de las discontinuidades y sus tipos se encuentran ampliamente desarrollados en la literatura existente (Price, 1966; Blyth & De Freitas, 1974; Hobbs et al., 1976; Priest, 1993), donde se indica que el término discontinuidad (*discontinuity*) es general, distinguiendo dos tipos principales de discontinuidades: junta (*joint*) y falla (*fault*). Las juntas se definen como fracturas de origen geológico en la continuidad de un sólido en las que no se aprecia desplazamiento relativo. Las juntas se presentan frecuentemente paralelas a los planos de estratificación, foliación y cleavage y la ISRM las agrupó según: planos de estratificación (*bedding joints*), juntas de foliación (*foliation joints*) y *cleavage (cleavage joints)* (Barton et al., 1978). Por otro lado, la ISRM define las fallas como fracturas en las que se aprecia un desplazamiento relativo reconocible desde orden centimétrico a kilométrico. Otros autores (Ferrer & González de Vallejo, 1999) clasifican las discontinuidades como diaclasas o juntas, fallas, planos de estratificación, planos de esquistosidad, superficies de laminación y superficies de contacto. Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004) describen otra clasificación más amplia:

- Estrato
- Laminación
- Esquistosidad
 - Esquistosidad de fractura
 - Esquistosidad de flujo
 - Foliación
- Pizarrosidad
- Fallas y juntas

Las discontinuidades son por tanto superficies que, a la escala de observación generalmente utilizada, se aceptan como planas (Lisle & Leyshon, 2004), y de forma general es habitual referirse a estas como planos de discontinuidad. Sin embargo, si en la zona de estudio el macizo ha sufrido una deformación dúctil, es posible encontrar discontinuidades que poco o nada tienen que ver con superficies planas. En tal caso se hablará de pliegues, quedando fuera del ámbito de estudio de esta tesis doctoral.

Las discontinuidades casi nunca se disponen en el espacio de forma aleatoria, sino que siguen un patrón espacial relacionado con la historia geológica de la roca (Price, 1966). De esta forma, normalmente a una escala adecuada, los planos de discontinuidad se presentan



Figura 1. Afloramiento de rocas calizas en la ciudad de Alicante, España. Se observa la familia de discontinuidades planas subverticales formada por el plano de estratificación, así como otras familias de discontinuidades de origen mecánico.

paralelos y ordenados en el espacio formando familias de planos con orientaciones preferentes conocidas como familias de discontinuidades (*discontinuity sets*) (Goodman, 1989) (figura 1).

La caracterización de cada una de estas familias de discontinuidades se realiza según criterios geomecánicos (no geométricos) y geométricos (Barton et al., 1978; Bieniawski, 1989; Slob, 2010):

- Geomecánicos: son independientes del sistema de referencia considerado así como de la escala de observación utilizada. Entre otros se encuentran los siguientes:
 - Relleno (*filling*): existencia y naturaleza de rellenos en su interior : material que separa las dos paredes contiguas de la roca que normalmente presenta mayor debilidad que la propia roca.
 - Presencia de agua (*seepage*): existencia de agua en la discontinuidad.
 - Resistencia de las paredes de las discontinuidades (*wall strenght*): es el equivalente a la resistencia a compresión de la pared en la que se encuentra la discontinuidad, y puede ser menor que la de la roca debido a la alteración que sufre al estar expuesta a la meteorización.
 - Número de familias de discontinuidades (*Number of sets*).

- Geométricos: se refieren a las características de las discontinuidades que se pueden definir atendiendo a su geometría espacial en un sistema de referencia global o local. Estas características son:

- Orientación (*orientation*): dirección y buzamiento del plano de discontinuidad. Es el único parámetro que depende del sistema de referencia local o global. En el primer caso es fundamental que al menos la vertical esté debidamente aplomada. Se define según la línea de máxima pendiente del plano y la nomenclatura recomendada por el ISRM es dirección del buzamiento / buzamiento (Barton et al., 1978).
- Espaciado (*spacing*): distancia media entre planos de debilidad (discontinuidades) en el macizo rocoso medidas en dirección perpendicular al plano de discontinuidad (Bieniawski, 1989). Se definen tres tipos de espaciado (Priest, 1993): (1) total (entre dos discontinuidades consecutivas), (2) de familia (entre dos discontinuidades pertenecientes a la misma familia según una dirección del espacio) y (3) normal (espaciado de familia perpendicular a uno de los planos de discontinuidad). Los estadísticos a presentar son (Barton et al., 1978): mínimo, máximo, moda y media.
- Continuidad o persistencia (*persistence*): medida de la extensión de la discontinuidad.
- Rugosidad (*roughness*): irregularidades a gran y pequeña escala de las superficies de discontinuidad (Slob, 2010).
- Apertura (*aperture*): distancia perpendicular entre las paredes de la discontinuidad. Estará rellena de aire, agua o material.
- Tamaño del bloque (*blocksize*): dimensiones del bloque resultante de la intersección de las discontinuidades en la roca.

De esta forma, el comportamiento de un macizo rocoso puede venir gobernado o bien por las discontinuidades, si el macizo está muy fracturado, o bien por la matriz rocosa si esta está muy alterada y el macizo está muy poco fracturado, o por ambas.

1.1.2. Evaluación de la calidad del macizo mediante clasificaciones geomecánicas

La evaluación de la calidad del macizo rocoso, así como la predicción de su comportamiento, se ha llevado a cabo desde finales del siglo pasado mediante las clasificaciones geomecánicas, las cuales permiten asignarle un índice de calidad así como estimar su comportamiento y proponer qué medidas de sostenimiento se recomienda adoptar.

Algunas de las clasificaciones geomecánicas para taludes son el *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1973, 1989), *Rock Mass Strength* (RMS) (Selby, 1980), *Slope Mass Rating* (SMR) (Romana, 1985), *Slope Rock Mass Rating* (SRMR) (Robertson, 1988), *Mining Rock Mass Rating* (MRMR) (Laubscher, 1990), *Mining Rock Mass Rating modified* (MRMR modified) (Haines et al., 1991), *Chinese Slope Mass Rating* (CSMR) (Chen et al., 1995), *Natural Slope Methodology* (NSM) (Shuk, 1994), *Modified Rock Mass Rating* (M-RMR) (Unal, 1996), *Slope Stability Probability Classification* (SSPC) (Hack et al., 1998, 2003), *modified Slope Stability Probability Classification* (SSPC modified) (Lindsay et al., 2001), *Continuous Rock Mass Rating* (Şen & Sadagah, 2003), *Continuous Slope Mass Rating* (Tomás et al., 2007), una clasificación alternativa de macizos rocosos propuesta por Pantelidis (Pantelidis, 2010) y el recientemente publicado *Slope Quality Index* (SQI) (Pinheiro et al., 2015). Algunas de estas clasificaciones son casi universalmente utilizadas, como el RMR (Bieniawski, 1989) o el Q (Barton et al., 1974).

Su uso “intensivo” permite una homogeneización de criterios de macizos rocosos facilitando la comunicación entre técnicos. En el caso de taludes, a pesar de que el RMR es una de las clasificaciones geomecánicas más utilizadas, su aplicación es difícil puesto que los factores de corrección no están definidos de forma precisa. Sin embargo, la clasificación geomecánica SMR (Romana, 1985) sí que define detalladamente dichos factores de corrección (Irigaray et al., 2003), y es una de las más utilizadas mundialmente (Romana et al., 2001, 2003, 2005, 2015). Esta clasificación deriva del RMR básico (RMR_b) (Bieniawski, 1989) y se calcula mediante cuatro factores de ajuste que dependen de la relación geométrica entre las discontinuidades y el talud estudiado, así como del método de excavación.

En general, todas las clasificaciones geomecánicas requieren la caracterización de la matriz rocosa así como de las discontinuidades, según los criterios antes mencionados, y la geometría del talud evaluado. Algunas además incluyen otros factores como la altura del talud (Hack, 2002) o método de excavación utilizado (Romana, 1993). A este respecto, en 1978 la ISRM (Barton et al., 1978) indicó que los parámetros para caracterizar el macizo rocoso se podían describir según tres métodos:

- Descripción de los afloramientos.
- Descripción de la perforación y testigos.
- Fotogrametría terrestre.

La forma habitual de operar en campo consiste, en primer lugar, en identificar visualmente las familias de discontinuidades para, a continuación, adquirir orientaciones mediante brújula con clinómetro. Es conveniente tomar un número elevado de mediciones (entre 80 y 300 dependiendo de la extensión estudiada) (Barton et al., 1978), tarea que requiere pericia, experiencia, empleo de tiempo y dedicación por parte del operador. Esta metodología

de adquisición de datos conlleva de por sí imprecisiones en las lecturas debidas al factor humano y/o instrumental (Slob et al., 2005). Además, en ocasiones, esta toma de datos puede presentar serias dificultades debido a su acceso o a los riesgos asociados a la propia toma de datos. Una vez detectadas las familias de discontinuidades, el siguiente paso es caracterizarlas y obtener información cuantitativa y cualitativa de los parámetros descritos en la sección §1.1.1.

El espaciado normal se mide con cinta métrica a lo largo de una línea perpendicular a los planos de discontinuidad o sobre un plano expuesto perpendicular a las trazas que afloran. A estos efectos es preceptivo considerar la relación geométrica entre la orientación del afloramiento donde se toman los datos y la orientación de las discontinuidades (Barton et al., 1978). Evidentemente, este proceso viene condicionado por la pericia y experiencia del operador, el cual decidirá dónde tomar las lecturas y posicionar manualmente la cinta para dicha medición. Igualmente, la configuración geométrica de la zona de trabajo suele condicionar decisivamente la localización de la toma de datos: las zonas inaccesibles o con riesgo para el operador probablemente quedarán sin registros.

La persistencia se obtiene con cinta métrica de al menos 10 metros o con técnicas fotogramétricas.

La rugosidad se obtiene mediante inspección visual o bien con perfilómetros o con brújula y clinómetros.

En general, según la ISRM (Barton et al., 1978) estos parámetros también se pueden obtener con el estudio de la recuperación de testigos o con técnicas fotogramétricas. El resto de parámetros se obtienen mediante la observación y medición de las discontinuidades o con instrumentación específica, como en el caso de la resistencia de la pared de la roca, en la que es frecuente el uso del esclerómetro o martillo de Schmidt en campo.

1.1.3. La adquisición remota de datos

En el siglo XIX se empezó a utilizar la fotogrametría para cartografiar superficies. En 1978, la ISRM ya contemplaba el uso de la fotogrametría para la identificación de coordenadas de puntos de la superficie mediante la adquisición de fotografías (Barton et al., 1978). Actualmente, se dispone de nuevas técnicas e instrumentación de adquisición remota de datos 3D con elevada rapidez, precisión y resolución (Jaboyedoff et al., 2012).

Una nube de puntos 3D es un conjunto de vértices definidos en un sistema de coordenadas en tres dimensiones. Generalmente, se definen según un sistema de referencia cartesiano mediante sus coordenadas (X, Y, Z) . Las dos técnicas más utilizadas para la adquisición de nubes de puntos 3D son el *3D laser scanner* o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) y la fotogrametría digital. La primera técnica utiliza una instrumentación láser que en el ámbito de estudio de esta tesis se posiciona sobre el terreno mediante un trípode. Por este motivo recibe

Tabla 1. Propiedades de los principales tipos de LiDAR, órdenes de magnitud. Fuente: Vertical Geology 2014, Short Course.

	Distancia máxima [m]	Precisión [mm]	Velocidad [puntos / s]
Tiempo de vuelo	1 000	10	1 – 10 000
Fase	100	41 760	100 000 – 1 000 000
Triangulación	10	0, 1	100 000

el nombre de *Terrestrial Laser Scanner* o TLS. Por otro lado, la técnica de la fotogrametría digital permite la generación de cartografías y modelos digitales en zonas inaccesibles físicamente pero visibles mediante la adquisición de fotografías digitales y la aplicación de ciertos algoritmos (Palà i Comellas et al., 1999). Esta técnica ha adquirido gran popularidad con la evolución de los dispositivos digitales (por ejemplo, cámaras, dispositivos de telefonía móvil, tablets, etc.). La capacidad de computación disponible actualmente en las computadoras domésticas permite la generación de modelos digitales en 3D de superficies. Para ello existen aplicaciones informáticas comerciales (Agisoft, 2014) y gratuitas (Wu, 2007, 2011; Wu et al., 2011; Wu, 2013).

Actualmente, ambas técnicas están generalmente aceptadas para la identificación y extracción de discontinuidades (Slob et al., 2005; Gigli & Casagli, 2011; Jaboyedoff et al., 2012; Abellán et al., 2014). Además, la ISRM dedica un capítulo entero a las técnicas de adquisición de datos 3D en su nuevo texto “*Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*” (Feng & Röshoff, 2015).

Los *laser scanners* emiten y detectan el tiempo de vuelo o la fase de la onda de un haz de luz de tal forma que miden la distancia a la que se encuentra el punto reflector. La detección de la distancia a la que se encuentra el objeto reflector del láser depende del tipo de instrumento utilizado. La tabla 1 presenta los órdenes de magnitud de los tipos de LiDAR, que se clasifican en:

- Tiempo de vuelo o pulso: registra el instante de emisión y de recepción del pulso. Con la velocidad de la luz se determina la distancia.
- Fase: registra el número de fases desde que se ha emitido el pulso hasta que se ha recibido la respuesta. Con la longitud de onda se determina la distancia.
- Triangulación: dispone de dos sensores situados a distancia y posición conocidas. A partir de las distancias y ángulos de emisión del láser se determina la distancia por triangulación.

A partir de los ángulos con los que se ha emitido el haz de luz, se determinan las coordenadas del punto en un sistema de referencia local. El haz se orienta mediante un juego de espejos que rotan bajo control del instrumento, con lo que en muy poco tiempo se efectúan

millones de mediciones. El conjunto de mediciones se convierte en un conjunto de puntos o *point cloud* con coordenadas (X, Y, Z, R, G, B, I) donde:

- X, Y, Z son las coordenadas en un sistema de referencia cartesiano del punto perteneciente a la superficie detectada.
- R, G, B corresponden a la combinación de color verdadero del punto detectado (figura 2 b y c). Este valor suele venir asociado a una fotografía tomada con el mismo aparato con la que se le asigna el color. Los valores de cada uno varían entre 0 y 255.
- I corresponde a la intensidad del láser recibida por el sensor. La banda depende del instrumento, pero normalmente trabajan en el infrarrojo cercano IR (figura 2 a).

El conjunto de puntos adquiridos se denomina nube de puntos 3D, o 3DPC (*3D point clouds*). La adquisición de puntos 3D de la superficie del terreno se puede realizar con elevada resolución (densidades de hasta 10^4 puntos/m²) y alta precisión ($\sigma < 1$ cm a 100 m). Con ello, es posible adquirir las coordenadas (X, Y, Z) de los puntos de la superficie del terreno a grandes distancias (hasta 6000 m). Esto permite la caracterización del terreno y la extracción de algunos de los parámetros geométricos que definen el comportamiento del macizo rocoso. En la última década el número de publicaciones científicas al respecto ha crecido exponencialmente y la comunidad científica ha sido capaz de extraer de la nube de puntos las familias y sus orientaciones principales (Slob et al., 2005; Jaboyedoff et al., 2007; Olariu et al., 2008; Sturzenegger & Stead, 2009b; Sturzenegger et al., 2011; García-Sellés et al., 2011; Khoshelham et al., 2011; Gigli & Casagli, 2011; Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014). Con esta información, diversos autores han trabajado en el estudio de los espaciados (Oppikofer et al., 2009; Slob, 2010), persistencia (Sturzenegger & Stead, 2009a; Sturzenegger et al., 2011; Umili et al., 2013) y rugosidad (Haneberg et al., 2007; Sturzenegger & Stead, 2009a).

Junto con la técnica del *3D laser scanner*, la estereofotogrametría se ha utilizado durante las últimas décadas para la generación de nubes de puntos 3D con precisión y resolución considerables. El uso de pares estereoscópicos de fotografías digitales ha sido muy utilizado para la caracterización de discontinuidades en taludes de roca (Haneberg et al., 2006; Haneberg, 2008; Jaboyedoff et al., 2008; Lato et al., 2009; Sturzenegger & Stead, 2009a; Sturzenegger et al., 2009; Oppikofer et al., 2011; Alameda, 2014). Las recientes evoluciones técnicas, tales como el *Structure from Motion* (SfM), han demostrado un elevado potencial para la generación de nubes de puntos 3D y la reconstrucción de superficies del terreno (figura 2) (Ferrero et al., 2009; Westoby et al., 2012; Assali et al., 2014). Esta técnica utiliza imágenes digitales adquiridas desde distintas posiciones y actualmente está abriendo un nuevo campo para la caracterización de taludes de roca así como para su monitorización. Las fotografías digitales se pueden tomar desde cámaras que, por su ligereza, permiten su montaje sobre drones o vehículos no tripulados. Esto posibilita la adquisición de datos desde cotas

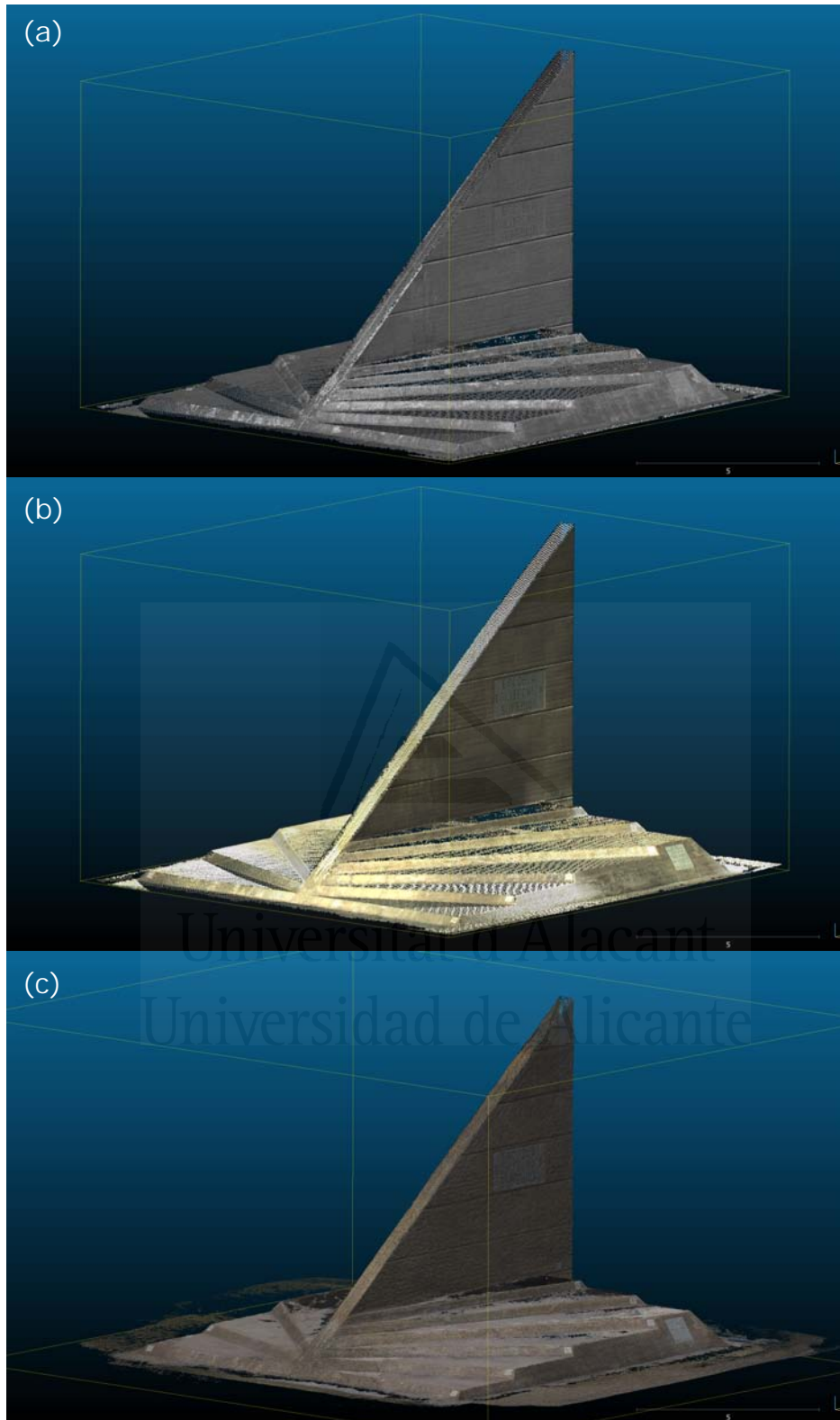


Figura 2. Representación de la nube de puntos 3D del reloj de sol de la Universidad de Alicante adquirido con técnicas de adquisición remota. (a) *3D laser scanner*, vista con la respuesta del láser: intensidad representada en escala de grises; (b) *3D laser scanner*, vista en color verdadero; (c) SfM, vista en color verdadero.

Tabla 2. Parámetros del índice RMR_b y posibles fuentes de información. PLT: *point load test*; UCS: *uniaxial compressive strength*; C: campo; L: laboratorio; T: testificación; F: fotografías; RQD: *drill core quality*; AG: análisis geométrico; IV: inspección visual; 3D: nubes de puntos 3D.

Parámetro	Peso	Adquisición	Origen de datos
X_1 : Resistencia de la roca intacta	15	PLT, UCS	C, L
X_2 : RQD	20	T, AG	C, 3D
X_3 : Espaciado	20	T, AG	C, 3D
X_4 : Estado de las discontinuidades:	30		
- Persistencia	6	GA	C, 3D
- Apertura	6	GA	C, 3D
- Rugosidad	6	GA	C, 3D
- Relleno	6	GA	C, F
- Meteorización	6	IV	C, F
X_5 : Presencia de agua	15	IV	C

más altas que los equipos láser montados sobre trípodes, y por tanto se cubre más superficie y ángulos de visión de la superficie estudiada reduciendo las zonas de sombra. Este hecho, junto con su coste relativamente reducido, permite comprender el elevado interés que actualmente muestra la comunidad científica con esta técnica. Sin embargo, los aspectos referentes a la adquisición remota de datos ha sido ampliamente tratados en textos especializados, publicaciones científicas y otras tesis doctorales, algunas ya citadas anteriormente, no siendo objeto de esta tesis la descripción de la misma sino su aplicación a un campo concreto.

El índice RMR_b se define según la ecuación 1 y sus parámetros se indican en la tabla 2. A pesar de que los parámetros del índice RMR_b se pueden calcular a partir de los datos tomados en campo, algunos de estos pueden ser abordados mediante el uso de técnicas de adquisición de datos remota.

$$RMR_b = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (1)$$

1.1.4. De la nube de puntos a las discontinuidades planas

Varios autores han mostrado previamente cómo, a partir de una nube de puntos 3D de un talud rocoso, es posible identificar las familias de discontinuidades y extraer información geométrica relevante que permiten determinar algunos de los parámetros de las clasificaciones geomecánicas antes mencionadas. Revisando las publicaciones existentes en la fecha de la redacción de este texto se encuentran, entre otros, los siguientes trabajos y aplicaciones:

- SplitFX: *software* comercial distribuido por SplitEngineering. Reconstruye la nube de puntos según una malla con TINs (*Triangulated Irregular Network*) y genera un modelo 2.5D (Slob et al., 2005; Split-FX, 2014; Lai et al., 2014b). Se distribuye bajo licencias comerciales.
- Point Cloud Mapper (PCM): *software* que trabaja con la nube de puntos y agrupa aquellos que potencialmente pertenecen a la misma superficie mediante la transformada de

Hough (1962). Esta técnica detecta figuras que se expresan matemáticamente, como planos, líneas, cuadrados, etc. Su estrategia es la de, a partir de puntos semilla, analizar los vecinos y si cumplen una condición determinada, asignarles un atributo para, a continuación, seguir creciendo a través de ellos (Vosselman et al., 2001; Viero et al., 2009; Slob, 2010).

- Coltop 3D: *software* comercial distribuido por Terr@num y desarrollado en la *Université de Lausanne* (UNIL), Suiza. Analiza cada punto y junto con sus vecinos cercanos determina la orientación del vector normal a la superficie. Según su orientación le asigna un color al punto y representa la nube de puntos en 3D permitiendo la identificación visual de las familias de discontinuidades (Jaboyedoff et al., 2007). Se distribuye con licencias comerciales.
- PlaneDetect: *software* presentado por Matt Lato y Malte Vogue. El programa reconstruye la superficie mediante un modelo *mesh*, con lo que trabaja con modelos 3D (Lato & Vöge, 2012).
- DiAna (*Discontinuity Analysis*): herramienta programada en MATLAB que busca vóxeles (del inglés *volumetric pixel*) y calcula el plano que mejor ajusta por mínimos cuadrados (Gigli & Casagli, 2011).
- ShapeMetrix 3D: *software* de extracción de superficies a partir de cámaras de fotos digitales estándar diseñado por la empresa 3GSM GmbH (Software & Measurement, 2015).
- SEFL (*Surface Extraction from LiDAR*): *software* programado en MS Visual Basic basado en el método de García-Sellés et al. (2011). Permite la identificación y reconstrucción de superficies de un modo supervisado. Tras aplicar un análisis de coplanaridad a los puntos, calcula los vectores normales para representarlos en proyección estereográfica. Obtiene las familias y realiza un análisis *cluster*. Finalmente, reconstruye la superficie por triangulación.
- Siefko Slob utilizó en su tesis doctoral cuatro métodos de reconocimiento de superficies planas: dos de ellos trabajando directamente a partir de nubes de puntos adquiridas con LiDAR y otros dos, mediante reconstrucción de la superficie en 3D y 2D (Slob, 2010). Aplicó los programas SplitFX y PCM y programó los mismos principios en MATLAB para extraer familias de discontinuidades.
- Gexcel: *software* de reconstrucción 3D a partir de datos obtenidos con LiDAR (Solutions, 2015).

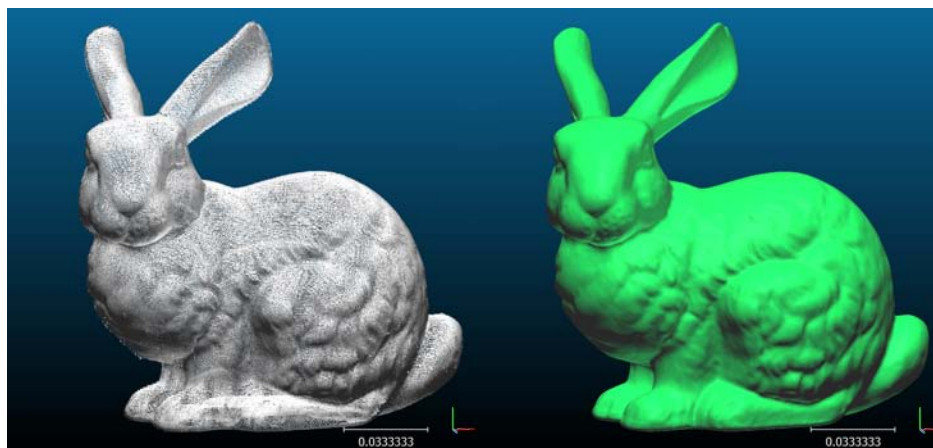


Figura 3. Representación del conejo de Stanford (Turk & Levoy, 1994) mediante una nube de puntos 3D (izquierda) y un modelo con TINs (derecha), generado con la reconstrucción de Poisson

- Sirovision: analiza superficies de roca a partir de fotografías tomadas con cámara estereográfica (Datamine, 2015).
- RANSAC (*Random Sample Consensus*) es un método iterativo para calcular modelos a partir de un conjunto de datos (Fischler & Bolles, 1981). Este método permite la detección de superficies planas y está implementado en el *software* libre CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2011).

Cada uno de estos métodos trabaja de forma diferente con las nubes de puntos 3D y aquellos disponibles son programas comerciales que requieren el pago de una licencia para su uso. Algunos métodos y programas requieren la reconstrucción de la superficie mediante modelos tipo *mesh* que generan una malla de triángulos irregulares (TIN), con lo que analizan los vectores normales de cada triángulo para identificar las superficies planas. En la figura 3 se muestra un ejemplo de la comparación entre la nube de puntos y la reconstrucción de la superficie con el método de Poisson (Kazhdan & Hoppe, 2013). En esta figura se observa cómo la nube de puntos 3D, a priori desorganizada, se dispone según una organización que indica que se corresponden con los puntos de una superficie, mientras que el modelo TIN ya forma parte de una superficie. Otros trabajos como el del profesor de la Universidad de Twente, George Vosselman, trabajan sin reconstruir la superficie únicamente con las nubes de puntos. Estos se encaminaron inicialmente a nubes de puntos generadas con LiDAR aerotransportado o con *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) y se aplicaron a elementos urbanos (Vosselman et al., 2001). Este concepto fue aplicado por Siefko Slob en su tesis doctoral a taludes en roca (Slob, 2010). En esta línea, existen otros trabajos que detectan características específicas de superficies trabajando únicamente con nubes de puntos no organizadas, como el algoritmo *Difference of Normals* (Ioannou et al., 2012).

1.1.5. La parametrización del macizo rocoso con 3DPC

La determinación del vector normal de la superficie en cada punto así como la detección de familias de discontinuidades planas supone el primer paso en la extracción de información para evaluar las discontinuidades del macizo rocoso. El siguiente paso es el de identificar dónde se sitúan en el espacio las discontinuidades, ya sea mediante el afloramiento de los planos o la intersección de las discontinuidades con la superficie del talud, también denominadas trazas (*traces*). Identificados estos elementos se puede afrontar la evaluación de la persistencia, espaciado y rugosidad de las discontinuidades mediante la propia nube de puntos.

El análisis del espaciado mediante nubes de puntos 3D ha sido poco estudiado, y las publicaciones científicas existentes al respecto no ofrecen métodos automatizados para su determinación, sino que normalmente aplican procesos completamente supervisados y manuales. Oppikofer et al. (2009) calcularon el espaciado en el deslizamiento de Äknes, al oeste de Noruega, a partir de una nube de puntos 3D mediante perfiles (es decir, secciones transversales) en las que manualmente se determinó el espaciado normal. Slob (2010) realizó un análisis exhaustivo del cálculo de espaciados con nubes de puntos 3D donde se establecía una metodología programable a partir de las ecuaciones de los afloramientos planos. Este análisis asumió que las discontinuidades tenían persistencia infinita, es decir, que estas se podrían asemejar a planos. En este trabajo el espaciado se analizaba bajo dos puntos de vista: (1) espaciado normal a partir de un punto de referencia o (2) espaciado normal mediante una línea de referencia con la misma dirección que el vector normal de la familia. Otros investigadores han estudiado la detección de las trazas de discontinuidades en un plano de la roca, lo que lleva a un enfoque diferente del estudio de espaciados (Kemeny & Post, 2003; Umili et al., 2013).

El análisis de la persistencia se lleva a cabo a partir de afloramientos planos o de trazas mediante la medición de la longitud del elemento detectado. Sturzenegger & Stead (2009a) analizó la persistencia de un afloramiento mediante tres técnicas: (1) valores de campo; (2) analizando una nube de puntos 3D obtenida con LiDAR; y (3) otra obtenida con técnicas de fotogrametría digital. En este trabajo analizó los posibles inconvenientes y debilidades del uso de nubes de puntos 3D para evaluar la persistencia.

La rugosidad es un factor que permite evaluar la resistencia al corte de la discontinuidad, especialmente en aquellas juntas que no están rellenas por otro material. Se caracteriza por ondulaciones métricas a decamétricas (irregularidades de primer orden o *waviness*) o rugosidad, y de centimétricas a milimétricas (irregularidades de segundo orden o *unevenness*) o aspereza. Si las irregularidades son de primer orden y las dos caras de una discontinuidad están en contacto y encajadas, la rugosidad causa la dilatación del desplazamiento por cortante. En el caso de que estas sean de segundo orden, la rugosidad tiende a dañarse al producirse el desplazamiento relativo de las caras, salvo que las paredes sean lo suficientemente resistentes

o los esfuerzos normales sean pequeños. En este último caso, se puede producir la dilatación (Patton et al., 1966; Barton et al., 1978). El análisis de la rugosidad suele ser direccional, mediante perfiles de rugosidad obtenidos in situ (Barton & Choubey, 1977). Si el desplazamiento que sufrirá el bloque es conocido, la rugosidad se calcula mediante perfiles obtenidos sobre el plano de deslizamiento paralelos a esta dirección, ya sea la del buzamiento del plano o en la dirección de la intersección de dos planos en el caso de cuñas. Sin embargo, si se desconoce la dirección en la que se producirá el desplazamiento, la rugosidad debe ser estudiada en todas las direcciones posibles. La ISRM contempla el uso de brújula y clinómetro o fotogrametría si la superficie es inaccesible (Barton et al., 1978).

En el campo de la Ingeniería Geológica y la Mecánica de Rocas, la rugosidad se cuantifica habitualmente mediante el coeficiente de rugosidad JRC (*joint roughness coefficient*). Este se determina con la comparación de perfiles obtenidos de la superficie de la discontinuidad con los propuestos por Barton & Choubey (1977). El método de la estimación visual presenta el inconveniente de la subjetividad, por lo que algunos autores han presentado algoritmos para determinación automatizada del JRC a partir de la parametrización de la rugosidad. Alameda recopiló el estado del arte a este respecto en su tesis doctoral (Alameda, 2014). El desarrollo de las técnicas de adquisición de nubes de puntos 3D y de los modelos digitales ha permitido nuevos enfoques en este estudio:

- Algunos autores han realizado trabajos de investigación cuantificando la rugosidad de la superficie de la roca a partir de nubes de puntos 3D, determinando el efecto de la escala y la influencia de la precisión utilizada (Rahman et al., 2006).
- Otros autores aplicaron sus estudios a la obtención del parámetro utilizado en el índice RMR_b . Entre ellos Haneberg et al. (2007) estudiaron la rugosidad de una superficie mediante perfiles direccionales y estimaron el JRC (*joint roughness coefficients*) de Barton & Choubey (1977). En su estudio concluyó que la rugosidad de los elementos más pequeños podía ser representada y cuantificada con un orden de magnitud mayor que el espaciado de los puntos de la nube. Sin embargo, la rugosidad de los elementos con amplitudes que no son significativamente mayores que el error asociado a la nube de puntos carece de validez.
- Oppikofer et al. (2009) estudió la rugosidad superficial en una gran superficie de deslizamiento en el oeste de Noruega mediante perfiles obtenidos con TLS. Para ello, utilizó el método de la medición de amplitudes.
- Khoshelham et al. (2011) investigó la influencia del ruido introducido en la adquisición de datos remota, comparando la rugosidad obtenida al ser estudiada con *laser scanner* y las obtenidas manualmente. Concluyó que el ruido debido al proceso de adquisición provoca una sobreestimación de la dimensión fractal obtenida y amplitud de los perfiles de rugosidad.

- Lai et al. (2014a) analizaron la rugosidad superficial de una pared de roca a partir de una nube de puntos 3D adquirida con TLS a 3 metros de distancia. Para ello llevó a cabo una reconstrucción de la superficie mediante el método de Poisson y la curvatura de la superficie.
- Alameda (2014) presentó un método que determina el JRC a partir de imágenes digitalizadas del perfilómetro, la parametrización de los perfiles obtenidos y el uso de correlaciones entre estos parámetros y el JRC propuesto por varios autores.

Las técnicas y métodos expuestos para el estudio de las discontinuidades suponen una nueva forma de caracterizar los macizos rocosos, y, por tanto, de obtener la información necesaria para evaluar los taludes de roca mediante las clasificaciones geomecánicas existentes.

1.2. Planteamiento del problema

La aplicación de las clasificaciones geomecánicas requiere la caracterización del macizo rocoso, para lo que es necesario llevar a cabo un proceso de toma de datos bajo la supervisión del usuario. Este proceso presenta los siguientes inconvenientes:

- Está sujeto a la subjetividad de un usuario. Si este carece de la experiencia y pericia necesaria, la determinación de sus parámetros (familias de discontinuidades, orientaciones, persistencia, espaciado, grado de meteorización, etc) puede verse afectada.
- Los parámetros de caracterización dependen de la cantidad de datos registrados y de la localización de la toma de datos.
- Requiere elevado consumo de tiempo.
- Está sujeto a las condiciones de iluminación (noche, día, niebla, etc.) y a las condiciones atmosféricas.
- El método tradicional de toma de datos requiere el acceso físico a zonas que, en ocasiones, pueden ser inseguras o simplemente inaccesibles salvo para especialistas (por ejemplo, descenso en paredes de roca).
- El proceso de la toma de datos en campo registra las lecturas tomadas por parte del operador. Los datos dependen del operador, por lo que conviene que tenga conocimientos de la materia y que el número de lecturas sea suficientemente alto. Cada campaña de campo ofrecerá unos resultados únicos, siendo improbable que la misma persona realice la misma toma de datos dos veces. Por tanto, el proceso manual se considera no reproducible.

La disponibilidad de nubes de puntos 3D del terreno plantea la posibilidad de su aplicación al campo de la Mecánica de Rocas. El uso de las técnicas de adquisición remota de datos permite modelizar una superficie que, con el estado del arte anteriormente expuesto, mejora el proceso de adquisición de datos para caracterizar los taludes en roca. La aplicación de técnicas de extracción de características sobre estas nubes de puntos no requiere que el usuario esté físicamente en el emplazamiento a analizar, sino que se puede efectuar desde cualquier lugar sin estar sujeto a las condiciones de iluminación ni agentes atmosféricos. Por otro lado, la aplicación de metodologías para la extracción de características del macizo rocoso permite que con la adecuada documentación del proceso, este sea reproducible por otro usuario por lo que se introduce una nueva característica: la objetividad y reproducibilidad. Este aspecto supone una oportunidad de mejora en el campo de la mecánica de rocas, pero todavía existe la necesidad de lograr mayores avances en el uso de las técnicas de tratamiento de esta información y desarrollo de algoritmos (Abellán et al., 2014).

1.2.1. Extracción de discontinuidades

La situación actual de la aplicación de nubes de puntos 3D a la Mecánica de Rocas se encuentra en desarrollo. Las aplicaciones existentes para la extracción de discontinuidades son comerciales o bien no están disponibles para su libre uso, por lo que los investigadores interesados en la materia necesitan programar y desarrollar sus propios algoritmos basados en las publicaciones existentes. De esta forma se detecta que la comunidad científica carece de un proyecto que comparta el conocimiento y los medios necesarios para el estudio de las nubes de puntos y su aplicación a la Mecánica de Rocas.

1.2.2. Análisis de espaciados normales

El espaciado es un parámetro que influye decisivamente en la resistencia, deformabilidad y permeabilidad del macizo rocoso así como en el tamaño de los bloques. La determinación a partir de nubes de puntos 3D sin aplicación de métodos específicos se suele llevar a cabo con métodos manuales, identificando visualmente entre qué planos realizar la medición. Este proceso queda sujeto a cierta componente de subjetividad y conlleva un elevado consumo de tiempo. Los trabajos de automatización existentes suponen que los afloramientos planos son entes 2D infinitos, es decir, suponen que las discontinuidades poseen persistencia infinita (Slob, 2010). El cálculo del espaciado normal requiere la decisión arbitraria sobre dónde se sitúa la línea de medición. Esto implica que en el caso de que los planos no sean perfectamente paralelos, el resultado depende de la localización de este punto. Por tanto, los métodos existentes para calcular el espaciado de las discontinuidades depende en gran medida de las decisiones tomadas por el usuario, restando objetividad al cálculo.

1.2.3. Cálculo del índice SMR mediante nubes de puntos 3D

Las clasificaciones geomecánicas se calculan mediante parámetros que caracterizan al talud y macizo rocoso, que pueden ser definidos cualitativa o cuantitativamente. Algunos de los parámetros necesarios pueden ser definidos a partir de nubes de puntos 3D (tabla 2). La extracción de familias de discontinuidades a partir de nubes de puntos 3D está generalmente aceptada por la comunidad científica si la nube tienen la calidad suficiente. Las dos técnicas más utilizadas para generar la nube de puntos 3D son el *3D laser scanner* y la fotogrametría digital. Esta última ha alcanzado gran popularidad con la técnica SfM y las aplicaciones desarrolladas para instrumentación común (cámaras digitales). Sin embargo, conviene plantearse si el uso de las técnicas de adquisición remota de datos y las metodologías de análisis puede influir en la evaluación de la calidad geomecánica del talud rocoso.

1.3. Objetivos de la investigación

Esta investigación se centra en el estudio de la aplicación de las nubes de puntos 3D obtenidas con técnicas de adquisición remota al campo de la Ingeniería Civil, concretamente a la caracterización de taludes de roca mediante las clasificaciones geomecánicas. Como objetivo general se plantea el desarrollo y validación de metodologías para el reconocimiento, caracterización de discontinuidades y la aplicación de clasificaciones geomecánicas a taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D. Para la consecución de este objetivo general se plantean tres objetivos específicos:

1. Detección de familias de discontinuidades y localización espacial de los planos.
2. Análisis del espaciado normal para cada familia de discontinuidades.
3. Obtención de los factores de ajuste de la clasificación geomecánica SMR.

A continuación, se desarrollan de una forma más detallada los objetivos específicos planteados anteriormente.

1.3.1. Objetivo 1: orientación y posición de discontinuidades

El primer objetivo es el desarrollo de una metodología que, a partir de la nube de puntos 3D de una superficie de un macizo rocoso con características homogéneas en la que los planos son visibles y están definidos geoméricamente, se detecten las familias de discontinuidades y los planos expuestos en su superficie. La nube de puntos se considera desorganizada, es decir, que los puntos no tienen conexión entre sí. Además, se considera que los datos muestran el ruido inherente al proceso de adquisición, así como las irregularidades superficiales del material. Como objetivo complementario se establece la programación de una

herramienta informática que permita testear el método en casos sencillos para su validación, y a continuación en casos reales de taludes de roca escaneados con laser scanner. El resultado de este objetivo específico es el de clasificar cada punto perteneciente a una familia y a un plano expuesto con su ecuación analítica (ecuación 2) o bien considerarlo como un punto aislado por no formar parte de ningún plano.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2)$$

1.3.2. Objetivo 2: espaciados

El segundo objetivo es el de, a partir de la nube de puntos clasificada en el objetivo anterior, analizar el espaciado de cada discontinuidad. Para este fin, se plantea el desarrollo de un método que identifique entre qué planos expuestos se debe realizar la medición del espaciado y, acto seguido, que calcule su distancia normal. Se obtiene pues una población de espaciados asociados a una discontinuidad que permite la extracción de su media y moda para evaluar el espaciado según la recomendación del ISRM (Barton et al., 1974).

1.3.3. Objetivo 3: aplicación de los 3DPC a la clasificación geomecánica SMR

El tercer y último objetivo consiste en determinar: (1) si la evaluación de la calidad geomecánica mediante el índice SMR puede realizarse mediante el uso de 3DPC y (2) si los resultados obtenidos dependen del uso de las fuentes de información y de las metodologías de análisis.

1.4. Rationale

De lo anteriormente expuesto, se desprende que esta tesis doctoral está orientada al estudio y análisis de taludes en roca mediante la información contenida en las nubes de puntos 3D adquiridas a partir del propio talud. Específicamente, el estudio se centra en la determinación de la clasificación geomecánica SMR. La razón de este trabajo se fundamenta en los siguientes aspectos:

- Existencia de taludes cuya configuración física, o bien impide su acceso para la toma de datos, o bien se lleva a cabo bajo condiciones de escasa seguridad.
- Necesidad de desarrollar procesos para extracción de información de las nubes de puntos 3D de forma objetiva y reproducible.
- Escasez de estudios en detalle del cálculo de espaciados con nubes de puntos 3D.

- Sistematización en la toma de datos de taludes para la aplicación de clasificaciones geomecánicas a partir de nubes de puntos 3D.
- Carencia de proyectos de estudio de nubes de puntos 3D que ofrezcan abiertamente el conocimiento y código y permitan su aplicación a otras líneas de investigación.

1.5. Trabajos presentados y justificación de la unidad temática

Los resultados de esta tesis doctoral han sido publicados, aceptados o enviados a revistas indexadas en el *Journal Citation Reports (Science Citation Index SCI)* de *Thomson and Reuters*, del campo de las Ciencias de la Tierra (*geosciences multidisciplinary*) y de la Ingeniería Geológica (*Geological Engineering*) durante 2014 y 2015:

1. *Computer and Geosciences* es una revista de reconocido prestigio a nivel mundial en el campo de las Ciencias de la Tierra de donde las publicaciones aplican la computación de paradigmas científicos sobre problemas geocientíficos, y de las Ciencias de la Computación. En la categoría de Ciencias de la Tierra ocupa la posición 64 de un total de 175 revistas indexadas en esta temática, formando parte de las revistas situadas en el Q2. En la categoría de Ciencias de la Computación ocupa la posición 25 de un total de 102 revistas, formando parte del Q1. y presenta un factor de impacto de 2,054, todo ello referido al año 2014.
2. *Engineering Geology* es una de las revistas con más prestigio a nivel mundial en el campo de la Ingeniería Geológica, ocupando la séptima posición de un total de 32 revistas indexadas en esta área temática, formando parte de las revistas situadas en el Q1. Igualmente forma parte de las revistas pertenecientes a la categoría de Ciencias de la Tierra, ocupando la posición 75 de un total de 175 revistas, formando parte del Q2. Presenta un factor de impacto de 1,744, todo ello referido al año 2014.
3. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* es una de las revistas con más prestigio a nivel mundial en el campo de la Ingeniería Geológica, ocupando la octava posición de un total de 32 revistas indexadas en esta área temática, formando parte de las revistas situadas en el Q2. Igualmente forma parte de las revistas pertenecientes a la categoría de Procesamiento de Minería y Mineral, formando parte del Q1. Presenta un factor de impacto de 1,686, todo ello referido al año 2014.

Estos artículos, que se adjuntan en la segunda parte de esta memoria y que conforman el compendio con el que se presenta esta tesis, son los siguientes:

1. A. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, M. Jaboyedoff, *A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds*, *Computers & Geosciences*, volumen 68, julio de 2014, páginas 38-52, ISSN 0098-3004, doi:10.1016/j.cageo.2014.03.014.
2. A. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, *Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds*, *Engineering Geology*, volumen 195, 10 de septiembre de 2015, paginas 185-195, ISSN 0013-7952, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.06.009.
3. A. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, *Characterization of rock slopes through Slope Mass Rating (SMR) using 3D point clouds: a review of practical issues through cases study*. Artículo enviado a *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, en fase de revisión (Referencia: IJRMMS-D-14-00541R1) ISSN: 1365-1609.

El primer artículo se corresponde con el primer objetivo específico, y está dedicado al análisis de nubes de puntos 3D. En este artículo se describe detalladamente la metodología propuesta para detectar aquellos conjuntos de puntos que se agrupan según planos, así como las familias de discontinuidades. Al contrario que la mayoría de programas existentes en el momento de realizar esta fase de la investigación, todo el proceso se lleva a cabo considerando todos y cada uno de los puntos. Dicho de otra forma, no se reconstruye la superficie según un modelo tipo *mesh* por lo que al terminar el proceso se mantienen los puntos originales que han superado todos los test aplicados. Dicho artículo presenta detalladamente todas las fases de aplicación del método, describiendo los parámetros que se deben definir para ejecutar el proceso. Además, se realiza una calibración de algunos de estos parámetros para analizar el efecto que tiene sobre los resultados. Finalmente, se presentan los casos de estudio sobre los que se aplica el método y se presentan los resultados. En la discusión se identifican las debilidades y fortalezas del método indicando su campo de aplicación y en qué casos no debería aplicarse. En cuanto a la aplicación y programación, se indica la velocidad de computación de cada fase en la máquina utilizada. La validación del método se establece a partir de los resultados anteriormente expuestos.

El segundo artículo se corresponde con el segundo objetivo específico, y está dedicado al estudio y análisis de espaciados de discontinuidades a partir de nubes de puntos 3D. En este artículo se analiza el estado del arte y se detecta la carencia de métodos automatizados que consideren la persistencia finita de las discontinuidades. Tras efectuar un análisis detallado de los trabajos disponibles se identifican las debilidades de las metodologías empleadas en la actualidad para el cálculo de los espaciados. El establecimiento de ciertas simplificaciones razonables permite el establecimiento de mejoras. Básicamente las mejoras introducidas son dos:

1. Paralelismo de las discontinuidades. Un plano es un elemento ideal con dos dimensiones, pero la discontinuidad del macizo rocoso suele presentar irregularidades tales

como rugosidad, ondulaciones y otras imperfecciones. Sin embargo, las discontinuidades del macizo afloran según superficies que normalmente se pueden aceptar planas. Sin embargo, las discontinuidades pueden no ser planas ni ser paralelas en el sector estudiado. El artículo analiza esta característica de los macizos rocosos en el estudio de espaciados, propone una metodología y expone las condiciones de aplicación.

2. Afloramientos planos distribuidos en el espacio. Los planos expuestos pertenecientes a una misma discontinuidad pueden aflorar en distintas posiciones del espacio si su persistencia es suficientemente grande. El método publicado en el primer artículo (Riquelme et al., 2014), así como los existentes en la literatura actual, detectan estos planos pero no autentifican si pertenecen a la misma discontinuidad o no. Por tanto, al determinar su ecuación analítica, a pesar de poder definirla paralela, su posición en el espacio vendrá determinada por su término independiente D (ecuación 2) que con toda probabilidad será diferente. Para ello, se plantea un test que evalúa si dos subconjuntos de puntos pertenecientes a la misma familia pertenecen a la misma discontinuidad a partir de sus medias y desviaciones típicas.

Bajo las consideraciones anteriores, se presenta un algoritmo que para una familia determinada calcula el espaciado normal correspondiente a cada plano expuesto. Este método se aplica en tres casos de estudio generados con distintas fuentes de información. Se presentan los resultados de la aplicación del método y se comparan con los obtenidos en campo. Las diferencias en los resultados se discuten y se pone en valor la aplicabilidad del método propuesto.

El tercer artículo se corresponde con el tercer objetivo específico. Este plantea el uso de las nubes de puntos 3D para calcular ciertos parámetros de la clasificación geomecánica SMR. En este artículo se estudia el cálculo de los factores de ajuste del índice SMR a partir de la información recogida en campo y obtenida con las técnicas de adquisición remota. El índice $RM R_b$, a partir del cual se calcula el índice SMR, se calcula con la información obtenida en campo y las orientaciones de las familias y del talud a partir de la información de la nube de puntos 3D y con la información de campo. Se analizan tres casos de estudio. En el primero, se calculan los factores de ajuste del índice SMR mediante las orientaciones de discontinuidades y planos del talud previamente publicadas por otros investigadores. A continuación, se calculan las orientaciones con el *software* desarrollado en el objetivo 1. Finalmente, se comparan los factores de ajuste y su afección al índice SMR según la fuente de información utilizada y el *software* aplicado. El segundo caso de estudio consiste en calcular el índice SMR de un talud en roca mediante el índice $RM R_b$ con datos de campo y los factores de ajuste con el *software* del objetivo 1. Para ello, se utilizan dos nubes de puntos 3D obtenidas con *3D laser scanner* y con fotogrametría digital. Finalmente, se comparan los resultados y se analizan las desviaciones obtenidas. El tercer caso de estudio se trata

de un talud en roca excavado en una glorieta. Al igual que en el segundo caso de estudio, se obtiene el índice RMR_b con datos de campo y las orientaciones con nubes de puntos 3D. El interés de este caso de estudio es que para calcular el índice SMR, el talud tiene un buzamiento constante pero la dirección varía en función del punto considerado de la glorieta. Se identifican aquellos puntos con menor índice SMR y se comprueba que, realmente, la zona de la excavación clasificada como inestable está afectada por un deslizamiento planar.

Resumiendo, en conjunto los tres artículos presentados aportan un mayor conocimiento a la aplicación de las nubes de puntos 3D a la mecánica de rocas, así como a su aplicación al cálculo de las clasificaciones geomecánicas. Las conclusiones de la tesis resultan de gran utilidad en el campo de aplicación de estas técnicas de adquisición remota de datos para extraer información geométrica de los taludes en roca, y por tanto en el estudio de la estabilidad de taludes en zonas inaccesibles como acantilados, taludes subverticales y de gran altura. La capacidad de procesado de las computadoras actuales permite el tratamiento de millones de datos con precisión, lo que implica una mejora del proceso de evaluación en rapidez, seguridad, eficiencia, objetividad y reproducibilidad. Es, pues, manifiesta la utilidad de este trabajo en las circunstancias expuestas.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

“Están los que saben construir pero no escribir, quedarán sus obras, pero no sus nombres; los que escriben pero no construyen, de quienes no quedará nada...”

Vitrubio

2

Metodología, hipótesis y plan de trabajo

2.1. Metodología

La metodología seguida en la presente tesis se sintetiza en la figura 4. En este diagrama de flujo se detallan los procesos seguidos para la obtención de los tres objetivos específicos. Las dos primeras líneas de investigación desarrollan métodos para obtener información de las nubes de puntos 3D. En ambas, el primer paso consiste en el estudio del estado del arte. A continuación, se generan las nubes de puntos 3D y se desarrolla la metodología junto con una programación para testearla. Finalmente, se valida con casos de estudio. La primera línea es la de extracción de familias de discontinuidades y tiene como fin la clasificación de la nube de puntos. La segunda es la de analizar el espaciado normal de las familias a partir de la nube de puntos clasificada. Esta segunda línea de investigación retroalimenta a la primera en cuanto a las características de la nube de puntos clasificada. La tercera línea de investigación utiliza las orientaciones de la nube de puntos clasificada para calcular el índice SMR, con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos con varias metodologías y fuentes de datos.

2.1.1. Obtención de nubes de puntos 3D

El objeto de esta tesis es la obtención de información del macizo rocoso y su aplicación a la Mecánica de Rocas a partir de nubes de puntos 3D. El primer paso es el de adquirir las

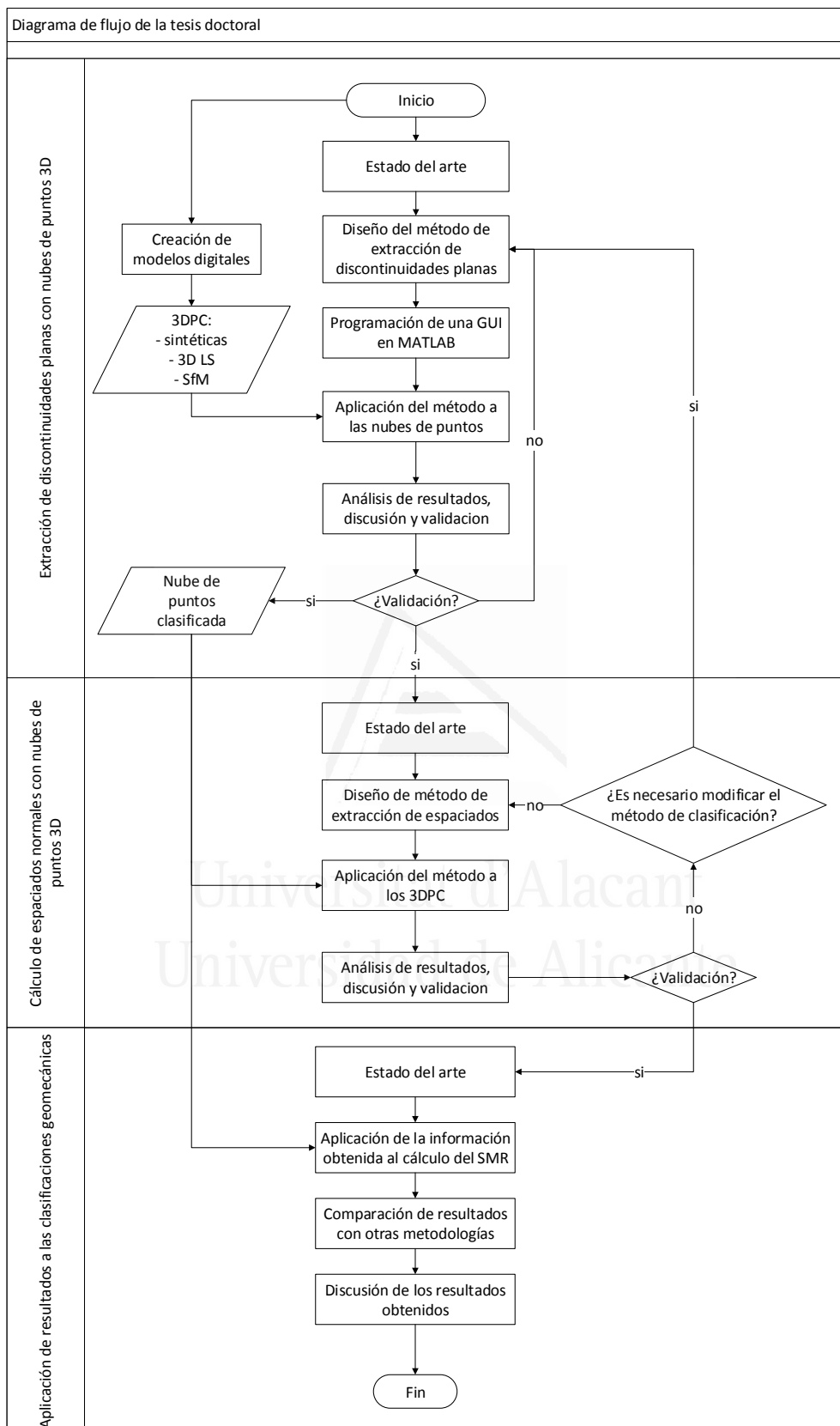


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología seguida.

nubes de puntos de figuras conocidas y superficies reales para poder testear las metodologías desarrolladas y, una vez finalizadas, validar los resultados.

Las nubes de puntos 3D han sido generadas utilizando tres métodos de adquisición:

- **Datos sintéticos.** Son nubes de puntos generadas con *scripts* de MATLAB que representan figuras conocidas (figura 5). La programación se basa en definir las dimensiones de rectángulos u otras formas conocidas y el espaciado entre puntos de la superficie, para a continuación generar una nube de puntos en un sistema de referencia local. Con el fin de modelizar el error instrumental del *3D laser scanner* y de la técnica SfM, se introduce un error artificial gaussiano definido por la desviación típica del error respecto a la media. Este error se introduce en las tres dimensiones. A continuación, se efectúa la rotación según los ejes definidos y una traslación hasta la posición final.
- **Structure from Motion (SfM).** Esta técnica de fotogrametría digital permite obtener una nube de puntos con una calidad aceptable si la cámara digital, la técnica de adquisición de las imágenes y el *software* utilizado son los adecuados (figura 6). El proceso requiere incorporar información geométrica a las fotografías. El *software* Agisoft Photoscan Professional permite la introducción de GCP (*Ground Control Points*) o puntos de control en las fotografías, que no es más que asignar las coordenadas en un sistema de referencia global o local a un mismo píxel en distintas fotografías. De esta forma, la nube de puntos generada tendrá menos error y estará escalada y orientada según el sistema de referencia utilizado. Si no se utilizan los puntos de control, la nube de puntos no estará escalada ni orientada. A pesar de que el escalado, rotación y traslación es un problema sencillo de resolver, la nube de puntos 3D generada puede verse afectada por el efecto bóveda o domo que introduce distorsiones y, por tanto, error en el conjunto de puntos (James & Robson, 2014).
- **3D laser scanner.** Las superficies reales se han escaneado con esta instrumentación, que permite obtener nubes de puntos 3D de superficies desde el terreno con gran calidad y precisión (figura 7). La obtención de la nube de puntos se lleva a cabo con una previa planificación de la campaña de campo, estacionando en las ubicaciones estratégicamente seleccionadas y escaneando la superficie. A continuación, se realiza el registro de los escaneos con sistemas de referencias locales o globales. Estas nubes de puntos tendrán incorporadas el error instrumental y los efectos derivados del uso de esta técnica de adquisición remota.

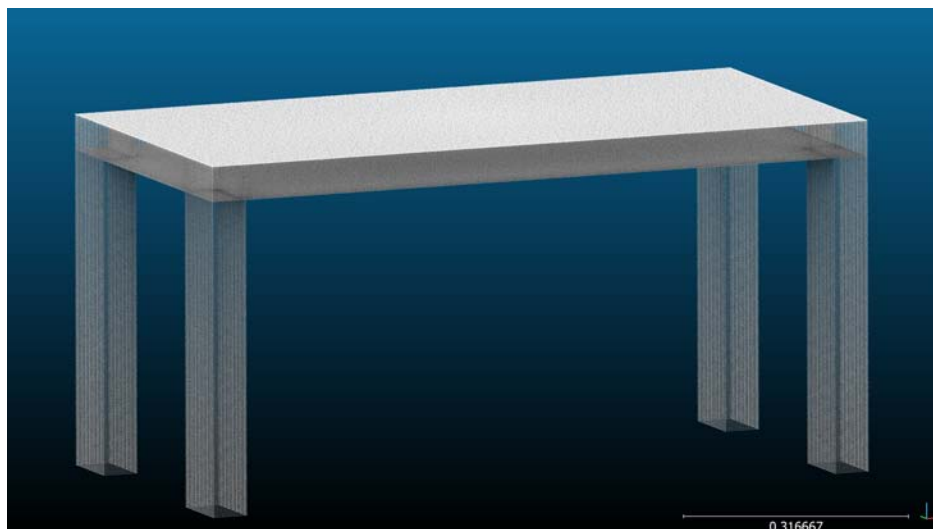


Figura 5. Nube de puntos 3D de una mesa de comedor generada sintéticamente mediante MATLAB.

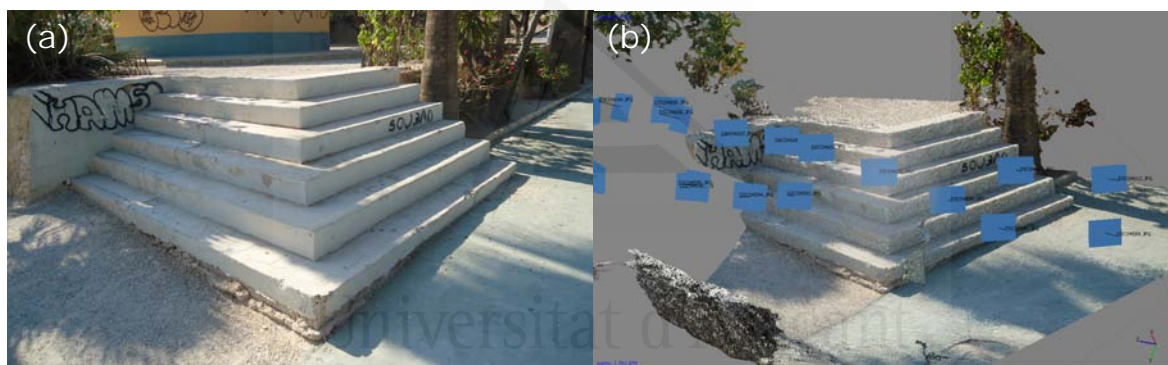


Figura 6. Escaleras de hormigón en un parque urbano en Crevillent, Alicante (España). (a) Fotografía de la superficie; (b) nube de puntos 3D generada mediante la técnica SfM con el *software* Agisoft Photoscan.

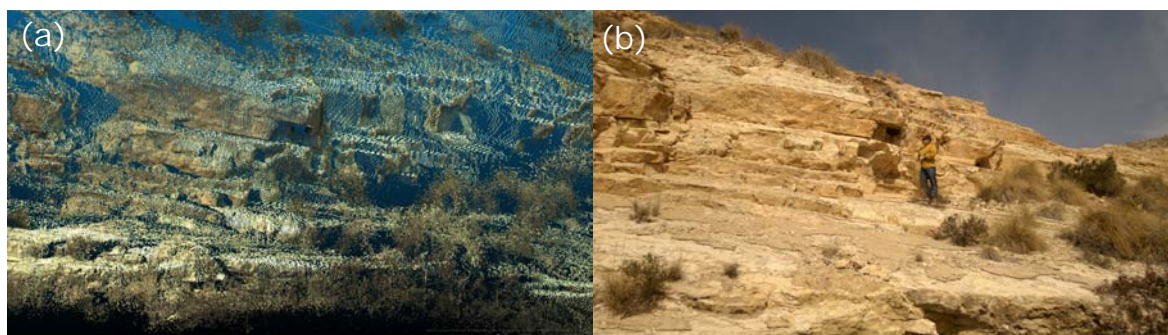


Figura 7. Talud rocoso en El Campello, Alicante (España). (a) Nube de puntos 3D adquirida con un *3D laser scanner*; (b) fotografía de la zona.

2.1.2. Diseño de métodos

El diseño de métodos se ha basado en los procesos tradicionales para obtención y cálculo de diferentes propiedades o características y su adaptación a la programación utilizando las técnicas existentes. Las técnicas utilizadas más relevantes han sido:

- *knnsearch*: función disponible en la herramienta MATLAB que permite buscar los k puntos más cercanos a un punto dado. Esta variable se denominó *knn* en la programación para referirse a los *k nearest neighbours*. De esta forma, el conjunto representa un sector de la superficie estudiada en el punto considerado. También se ha utilizado en el cálculo de espaciados normales para encontrar los planos más cercanos y establecer entre cuales se mide la distancia normal.
- *PCA*: *principal component analysis* o análisis de componentes principales (ACP), es una técnica utilizada en estadística para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Aplicada sobre las coordenadas cartesianas de un conjunto de puntos, determina los tres ejes ortogonales que mejor explican cómo se agrupan en el espacio. El valor propio asociado a cada vector propio indica la cantidad de datos que explica dicho vector propio. Esta técnica se ha utilizado para analizar la coplanaridad de un conjunto de puntos (Rencher & Christensen, 2012). El uso de la técnica está disponible en MATLAB mediante la función *princomp*.
- *kde*: *kernel density estimation* es una técnica para la determinación de la función de densidad de una variable no paramétrica (Silverman, 1986). Al contrario que el uso de histogramas (figuras 8 a y b), el resultado del *kde* no depende del ancho de la banda del histograma ni de la posición del entramado, por lo que el resultado es más objetivo. La técnica consiste en: (1) introducir un elemento llamado *kernel* o núcleo de dimensión definida en la posición de cada dato, (2) calcular la suma de los valores de los núcleos en cada punto de una malla y (3) estimar la función de densidad (figura 8c). La elección del tamaño del núcleo influye en los resultados obtenidos, por lo que se utiliza el tamaño óptimo definido a partir de los datos (Botev et al., 2010). Esta técnica se utiliza en el presente estudio para determinar la densidad de los polos de los vectores normales en una falsilla estereográfica y para representar la función no paramétrica de los espaciados normales.
- *DBSCAN*: *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* es un algoritmo propuesto por Ester et al. (1996) que permite agrupar un conjunto de puntos desorganizados espacialmente en grupos (*clusters*) a partir de la densidad espacial de puntos. Al contrario que otros algoritmos de agrupación como el *k-means* (MathWorks, 2015a), no requiere el previo establecimiento del número de *clusters* que se van a encontrar. Esta técnica se utiliza en el presente estudio para, una vez que se han identifi-

cado los puntos pertenecientes a una misma familia, determinar cómo se agrupan por planos.

2.1.3. Aplicaciones informáticas utilizadas

El desarrollo de la investigación se ha llevado a cabo utilizando *software* específico que se detalla a continuación.

- Stereo32: *software* libre para trabajar con proyección estereográfica (Röller & Trepmann, 2008).
- Polworks: *software* comercializado por la compañía Innovmetric Software (Innovmetric, 2015). Se ha utilizado para visualizar las nubes de puntos y extraer propiedades como planos, vectores normales, coordenadas de puntos, etc.
- CloudCompare: proyecto *open source* desarrollado por Daniel Giraud (Girardeau-Montaut, 2011) que permite trabajar con nubes de puntos y modelos *mesh*. El *software* es gratuito y dispone de gran cantidad de herramientas para trabajar tanto con nubes de puntos 3D como con modelos 3D.
- MATLAB: (*MATrix LABoratory*) herramienta de *software* matemático con un entorno de desarrollo con lenguaje propio (M) distribuido por la empresa MathWorks (MathWorks, 2015b). Incorpora multitud de *scripts* ampliamente testeados por la comunidad de usuarios. El programa permite la creación de interfaces gráficas de usuario o *Graphic User Interface* (GUI), con lo que se ha programado el *software* DSE y el SMRTool.
- Agisoft Photoscan: *software* de procesamiento fotogramétrico con imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D (Agisoft, 2014).

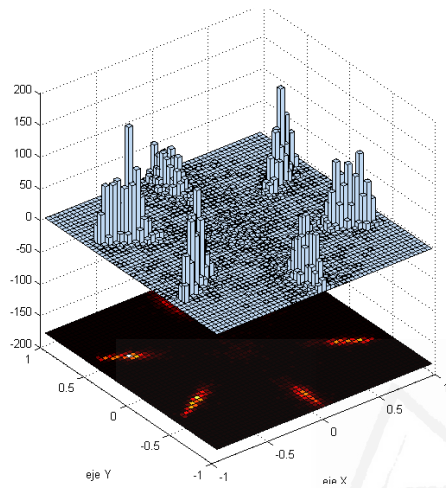
2.2. Hipótesis

Se establece una hipótesis para cada línea de investigación:

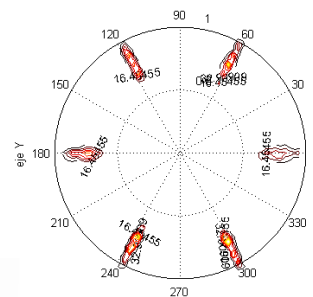
2.2.1. Hipótesis de la primera línea de investigación

“En el sector de una superficie de un talud en el que aflora un macizo rocoso con características homogéneas y sus discontinuidades quedan representadas geoméricamente mediante planos expuestos, del que se dispone una nube de puntos 3D adquirida con técnicas de adquisición remotas, las familias de discontinuidades presentes en dicho macizo y sus planos pueden ser extraídos y localizados respectivamente mediante tres fases: (1) cálculo del vector

(a) Función de densidad de los polos encontrados



(b) Isolíneas de los polos a partir del histograma



(c) Densidad de polos mediante la técnica kde

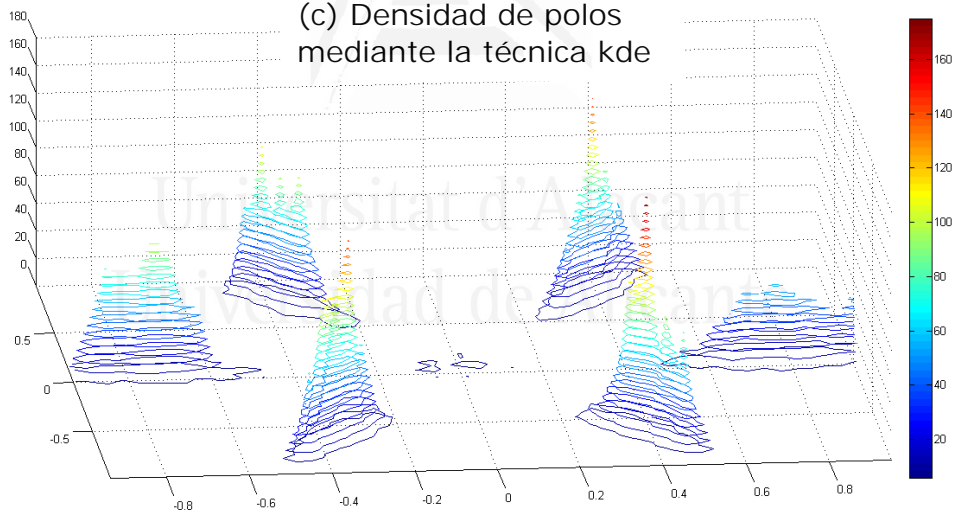


Figura 8. Análisis de la densidad de polos mediante histogramas o con la estimación con el método *kde*. (a) Densidad de polos con histogramas; (b) isolíneas con los valores del histograma; (c) función de densidad no paramétrica mediante la técnica *kde*.

normal de cada punto y sus vecinos que superen un test de coplanaridad; (2) identificación de las familias de discontinuidades mediante la determinación de orientaciones más frecuentes en proyección estereográfica y asignación de una familia a cada punto en dependencia del ángulo que forma el vector normal de familia y el asociado al punto y sus vecinos; y (3) determinación de los planos de cada familia mediante la búsqueda de agrupaciones de puntos con densidad espacial continua”.

2.2.2. Hipótesis de la segunda línea de investigación

“En el sector de una superficie de un talud en el que aflora un macizo rocoso con características homogéneas y sus discontinuidades quedan representadas geoméricamente mediante planos expuestos paralelos en dicho sector, del que se dispone una nube de puntos 3D adquirida con técnicas de adquisición remotas, y dicha nube de puntos está clasificada mediante la asignación de una familia de discontinuidades, un plano y la ecuación algebraica de ese plano, el espaciado normal de familia puede ser calculado mediante la determinación de las relaciones espaciales de cercanía existentes entre cada plano y la determinación de la distancia entre planos medida según la dirección del vector normal de familia”.

2.2.3. Hipótesis de la tercera línea de investigación

“En el sector de una superficie de un talud en el que aflora un macizo rocoso con características homogéneas y sus discontinuidades quedan representadas geoméricamente mediante planos expuestos, del que se dispone una nube de puntos 3D adquirida con técnicas de adquisición remotas, y las orientaciones de las familias de discontinuidades han sido extraídas, la evaluación de la calidad geomecánica del talud mediante el índice SMR depende de la técnica de adquisición de datos utilizada y de la metodología empleada para extraer las orientaciones de las familias”.

2.3. Plan de trabajo

2.3.1. Líneas de investigación desarrolladas

El plan de trabajo presenta una parte común en las tres líneas de investigación. En primer lugar, se efectúa una búsqueda de información mediante publicaciones en revistas científicas y tesis doctorales relacionadas. En segundo lugar, se adquieren las nubes de puntos 3D mediante técnicas de adquisición remota o mediante generación sintética de los datos. En tercer lugar, se desarrollan los objetivos principales de cada línea de investigación.

Las dos primeras líneas requieren el desarrollo de metodologías y su programación en máquinas computadoras. Estas tareas se llevan a cabo simultáneamente (figura 9), lo que

permite testear la viabilidad e idoneidad de cada parte del método. Finalmente, se realiza una validación con los casos de estudio adquiridos.

En la primera línea de investigación se desarrolla y programa simultáneamente un *software* con la herramienta MATLAB, con el fin de automatizar los cálculos, testear los resultados del método y preparar los ficheros de salida. Esto permite la obtención de resultados de fases intermedias y, por tanto, detectar y corregir las debilidades detectadas durante el desarrollo. En aras de proveer flexibilidad al análisis, se disponen ciertos parámetros que el usuario debe definir. Estos parámetros se calibran durante el desarrollo y se incluyen en la correspondiente publicación. Finalmente, se valida la metodología con el *software* programado mediante los casos de estudio.

En la segunda línea se desarrolla un método para el cálculo del espaciado normal de familia. Para ello, se programa una función en MATLAB que parte de la nube de puntos clasificada con el método desarrollado en la primera línea de investigación y aplica el algoritmo desarrollado.

Al contrario que las dos primeras líneas de investigación, la tercera no desarrolla un método, sino que estudia la aplicación de la información obtenida de las nubes de puntos 3D a la evaluación de la calidad geomecánica de un talud rocoso mediante la clasificación geomecánica SMR. Tras analizar el estado del arte y adquirir las nubes de puntos de los casos de estudio, se procesan y se extraen las familias de discontinuidades. A continuación, se programa una herramienta que calcule el índice SMR y permita efectuar un cálculo automático y pormenorizado de los factores de ajuste. El *software* se programa mediante una GUI con la herramienta MATLAB. Mediante este *software* se calcula el índice SMR y los resultados se comparan con los obtenidos en campo y con los obtenidos por otros investigadores. Finalmente, se realiza una discusión de resultados y se establecen conclusiones.

2.3.2. Nubes de puntos 3D utilizadas

A continuación, se muestran las nubes de puntos 3D generadas para cada línea de investigación.

Línea de investigación 1: extracción de discontinuidades

Los primeras nubes fueron generadas sintéticamente mediante *scripts* en MATLAB. La figura 10 muestra las nubes de puntos de varias figuras geométricas regulares, que permiten aplicar el desarrollo del método y su programación al conocer los resultados esperados del análisis. Las figuras 10 a y c muestran un cilindro de iguales dimensiones pero con un error sintético introducido diez veces superior en el caso de a. Este error se observa fácilmente en los modelos tipo *mesh* representados en b y d.

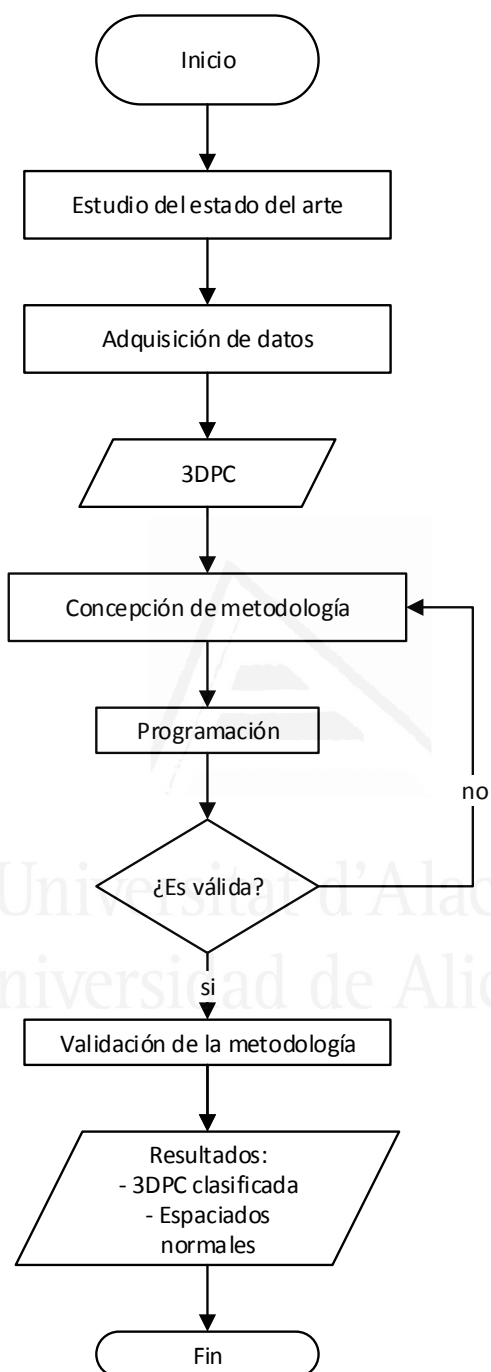


Figura 9. Diagrama de flujo del plan de trabajo para las líneas de investigación 1 y 2

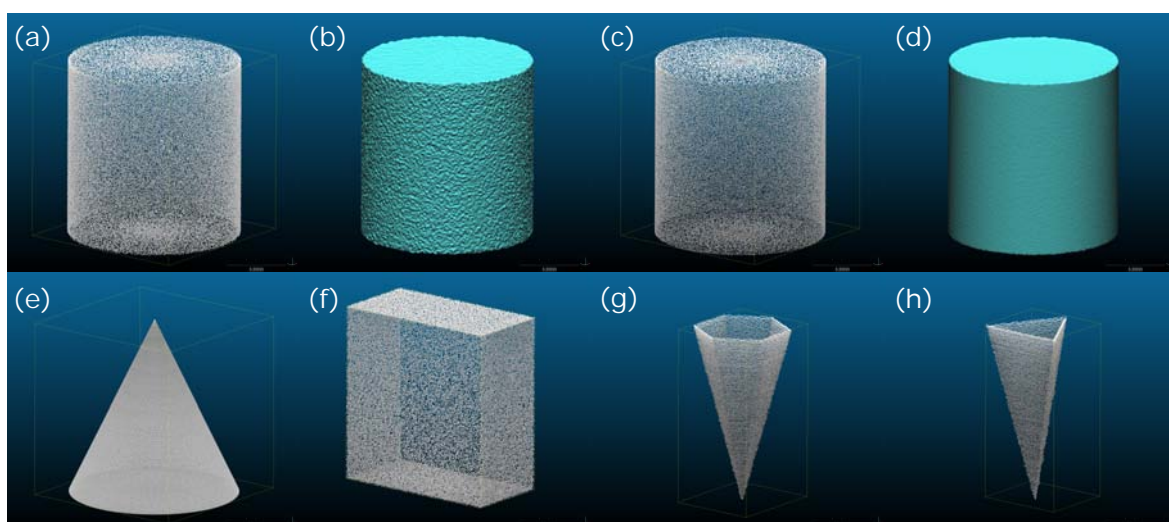


Figura 10. Nubes de puntos 3D de figuras geométricas regulares creadas sintéticamente: (a) y (c) cilindros con un error sintético de 0.1 y 0.01 unidades respectivamente; (b) y (d) modelos *mesh* de los cilindros (a) y (c); (e) cono; (f) hexaedro; (g) pirámide de base hexagonal; (h) pirámide de base triangular.

El primer caso real testeado fue el adquirido con un micro LiDAR modelo Konica Minolta Vivid 9i. En primer lugar, se adquirió un set de figuras geométricas regulares de pequeña escala (figura 11 a). En segundo lugar, se adquirió la nube de puntos 3D mediante la realización de varios estacionamientos con el fin de reducir las zonas de sombra. Finalmente, se registraron las nubes de puntos adquiridas (figura 11 b). Este fue el primer caso afectado por el error instrumental real, por la heterogeneidad de densidad debida al registro de los distintos estacionamientos y por el efecto sombra.

El último caso utilizado en esta línea fue un talud real excavado en roca en Ouray (EEUU), junto a una carretera donde afloran cuarcitas (figura 12). Esta nube de puntos se encuentra disponible en la web *Rockbench Repository* y ha sido utilizada por otros investigadores en sus publicaciones científicas (Lato et al., 2013). Esta misma nube de puntos fue utilizada por John Kemeny en la demostración del *software* SplifFx (Split-FX, 2014).

Línea de investigación 2: análisis de espaciados

Para la segunda línea de investigación se generaron y adquirieron varias nubes de puntos 3D que se adecuaban al problema estudiado. El primer caso de estudio utilizó una nube de puntos sintética consistente en una mesa de dimensiones conocidas. Esta permitió el análisis de espaciados entre las distintas caras de las patas de la mesa así como ilustrar cómo se establecen las relaciones entre planos para medir los espaciados (figura 5).

El segundo caso de estudio consistió en unas escaleras de hormigón de un parque situado en Crevillent (España) (figura 6). La nube de puntos correspondiente se generó mediante la

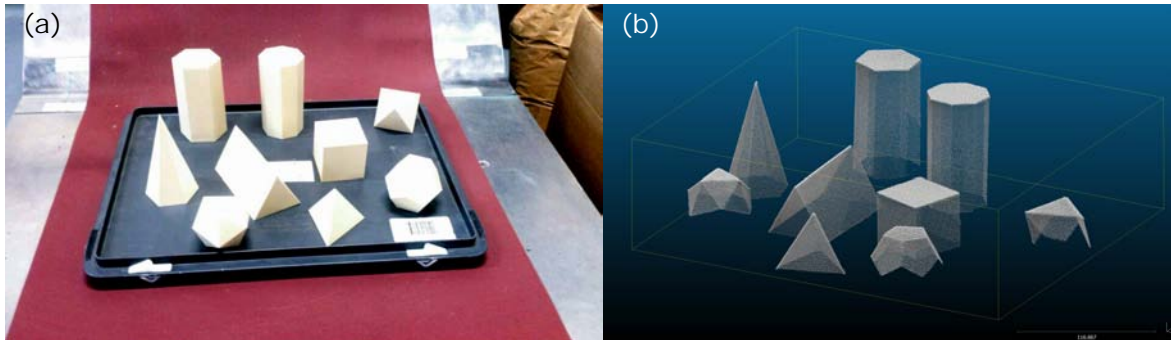


Figura 11. Adquisición de nubes de puntos 3D de figuras geométricas regulares: (a) figuras geométricas regulares reales; (b) nube de puntos adquirida con un micro LiDAR, modelo Konica Minolta Vivid 9i de la UNIL.

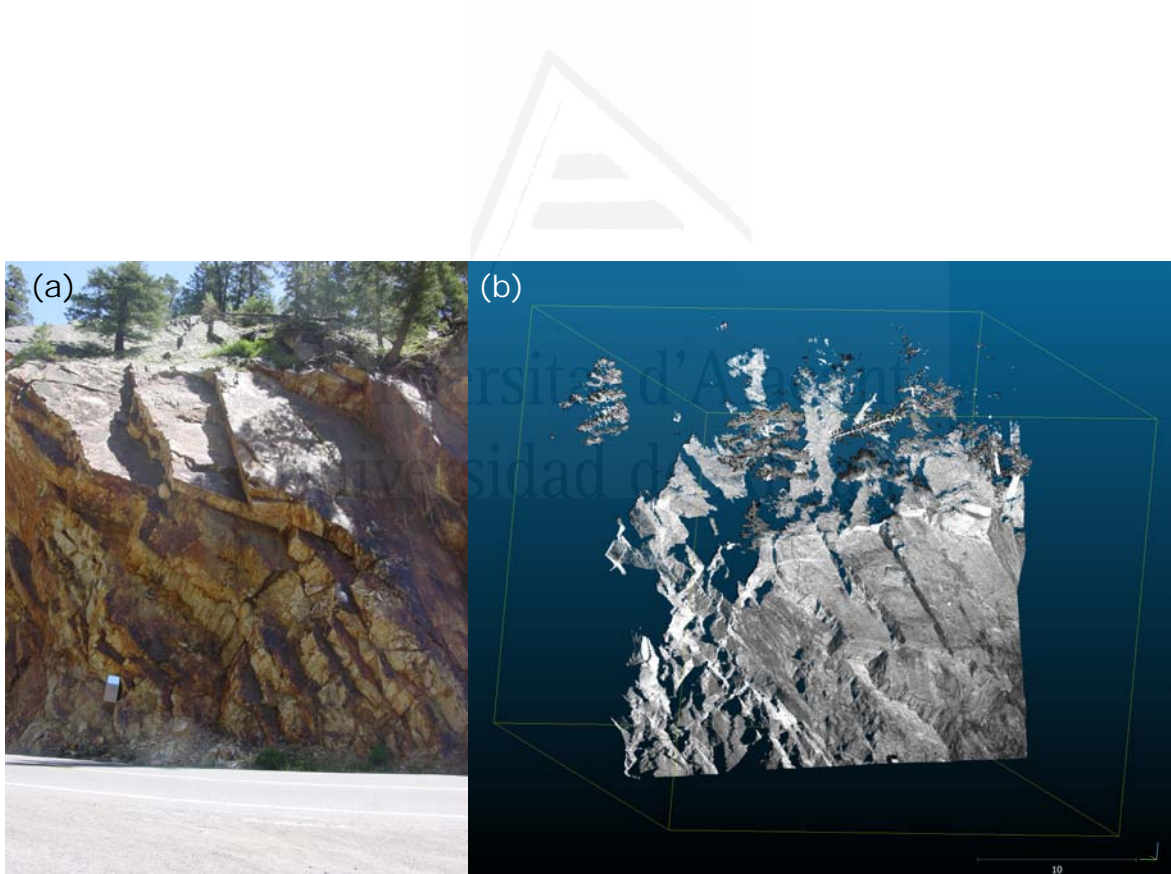


Figura 12. Talud excavado en cuarcitas junto a una carretera en Ouray, Colorado (EEUU). Datos obtenidos de (Lato et al., 2015). (a) Fotografía del talud, (b) representación de la nube XYZI.

Tabla 3. Resultado del ajuste de bloque de la nube de puntos 3D de toda la superficie generada con la técnica SfM en El Campello (España).

Punto de control	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
1	0,006119	-0,007888	0,009467	0,013758	6	0,639342
2	-0,020432	-0,007675	0,001614	0,021885	4	0,709340
3	0,011833	0,009651	-0,015266	0,021592	3	0,688839
4	-0,016739	-0,003038	0,007429	0,018564	3	0,883177
5	0,023624	-0,001366	-0,012041	0,026551	3	0,903197
6	0,048661	-0,028860	0,038985	0,068707	4	1,608003
7	-0,014891	-0,007113	-0,010031	0,019312	4	0,943273
8	-0,007163	0,035513	-0,025396	0,044243	7	0,726343
9	-0,000611	0,013822	0,009358	0,016704	5	0,516337
10	-0,010362	-0,014683	-0,007151	0,019342	5	0,158599
11	-0,014642	0,012148	0,001664	0,019098	6	0,304438
Total	0,019992	0,016305	0,016327	0,030530	50	0,778276

técnica SfM con una cámara digital Sony DSC W-330 y el *software* utilizado fue el Agisoft Photoscan Professional. La resolución de las fotografías fue de $4\,320 \times 3\,240$, tomadas con una longitud focal de 4,7 mm sin precalibración. El modelo se generó con 37 estaciones de cámara sin puntos de control. Por este motivo, cuando se generó la nube de puntos se escaló. La nube de puntos generada tuvo un tamaño de 648 142 puntos, con una densidad de 43 345 *puntos/m*². El interés de este caso de estudio radica en que tanto las caras horizontales como verticales (huella y contrahuella) son equidistantes, por lo que suponía un excelente caso para testear el algoritmo.

El tercer caso de estudio fue un talud en roca caliza en El Campello, Alicante (figura 7). Se adquirió mediante un *3D laser scanner* Leica C10. Se efectuaron tres estacionamientos y se registraron mediante el apoyo de dianas distribuidas por la superficie de la roca. La nube de puntos final se orientó según un sistema de referencia global a partir de puntos de referencia obtenidos de cartografía oficial (IGN, 2014). Igualmente, este talud se digitalizó mediante la técnica SfM con una cámara Canon EOS 100d. Se efectuaron 173 estaciones de cámara. Se utilizaron 11 puntos de control (GCP) obtenidos de la nube de puntos del *3D laser scanner*, siendo el *software* utilizado el Agisoft Photoscan Professional. El error de la nube de puntos generada se muestra en la tabla 3. La nube de puntos se generó para toda la superficie, y posteriormente se seleccionaron los sectores de estudio. La nube de puntos obtenida con el *3D laser scanner* tras el muestreo (*subsample*) fue de 26 884 puntos (una densidad de 1 250 *puntos/m*²). El tamaño del sector de la nube de puntos generada con SfM tras el muestreo fue de 142 696 puntos (una densidad de 5 210 *puntos/m*²).

El cuarto caso de estudio se llevó a cabo con una nube de puntos 3D adquirida con el *3D laser scanner* Leica C10. El registro de los estacionamientos se efectuó con el apoyo de dianas. La nube de puntos final se orientó según un sistema de referencia global mediante el uso de puntos de control obtenidos de fuentes cartográficas oficiales (IGN, 2014). Se seleccionó un sector de estudio y se realizó un muestreo de la nube de puntos. El tamaño del sector fue de 301 089 puntos (una densidad de 8 000 *puntos/m*²).

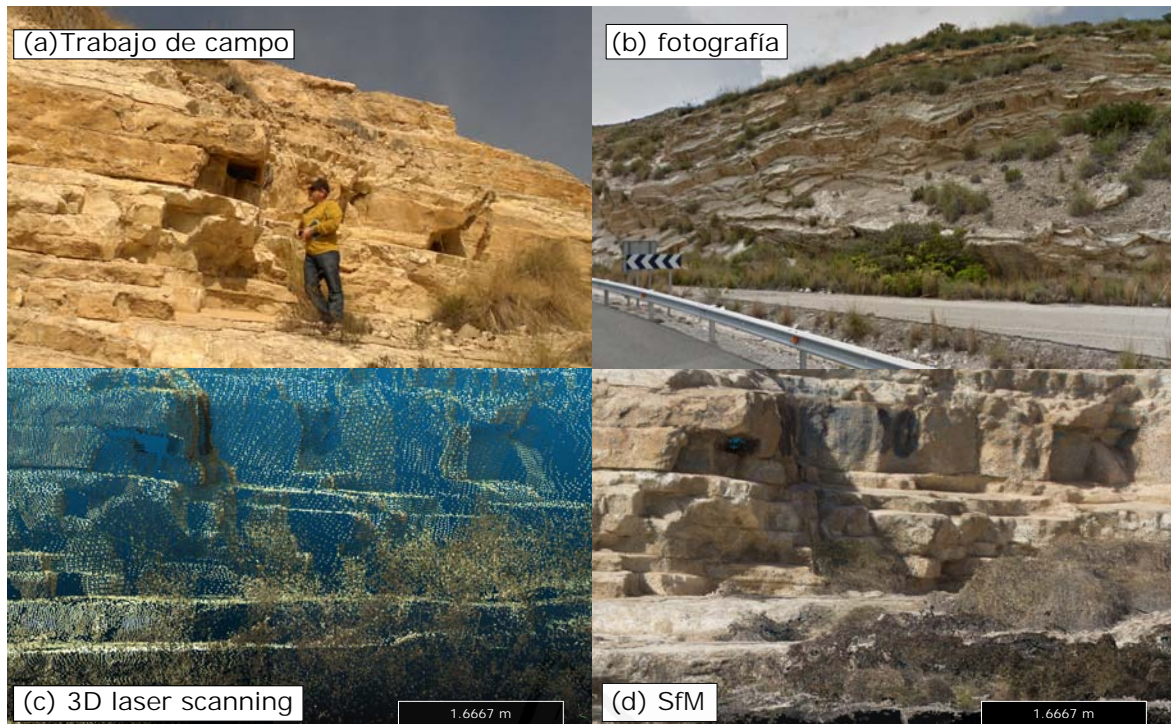


Figura 13. Afloramiento de calizas en un talud rocoso en El Campello, Alicante (España). (a) Fotografía mostrando el desarrollo de la campaña de campo; (b) fotografía del talud; (c) nube de puntos adquirida con *3D laser scanner* modelo C10 de Leica; (d) nube de puntos adquirida con SfM.

Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

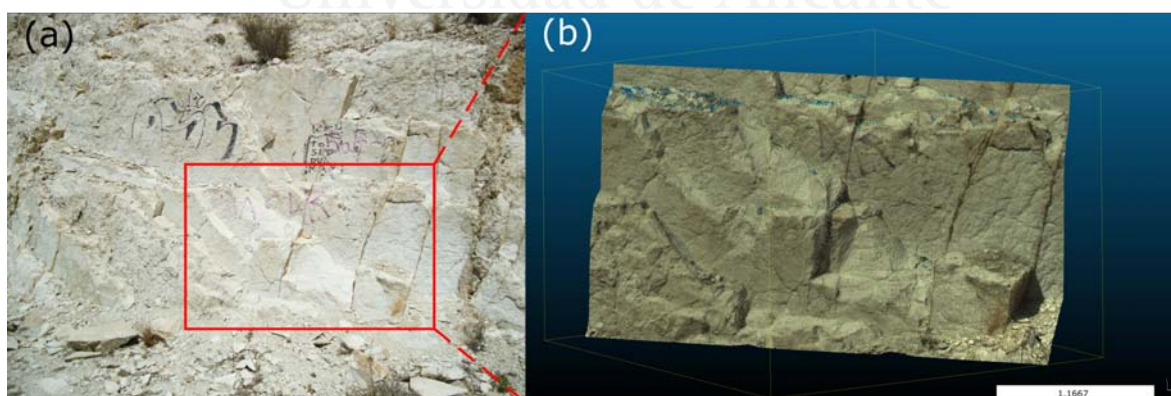


Figura 14. Afloramiento de margocalizas en un talud rocoso en la ciudad de Alicante (España). (a) Fotografía frontal del talud y del sector de estudio; (b) nube de puntos 3D adquirida con el *3D laser scanner* modelo C10 de Leica, representación con el color RGB obtenido durante el scan.

Línea de investigación 3: cálculo del índice SMR con nubes de puntos 3D

En el primer caso de estudio de esta línea de investigación se analizó la aplicación de la información extraída de las nubes de puntos 3D al cálculo del índice SMR. Se utilizaron fuentes de datos de otros investigadores y propias. Al igual que en la primera línea de investigación, se utilizaron las nubes de puntos disponibles en el repositorio Rockbench (Lato et al., 2015). Además, se utilizaron las discontinuidades obtenidas con el método tradicional (trabajo de campo con brújula), con nubes de puntos generadas con *3D laser scanner* y con fotogrametría digital (SfM) previamente publicados en revistas científicas. Igualmente, la nube de puntos obtenida con *3D laser scanner* se analizó con el *software* DSE (figura 15).

El segundo caso de estudio utilizó la nube de puntos de un talud situado en la ciudad de Alicante (España), obtenida con el equipo modelo C10 de la casa Leica, previamente utilizada en la segunda línea de investigación (figura 15 d). Igualmente, este caso de estudio analizó el mismo sector adquirido con la técnica SfM. La campaña de toma de imágenes se llevó a cabo con una cámara digital Canon EOS 550D. Se utilizaron puntos de control obtenidos de una nube de puntos adquirida con *3D laser scanner* y registrada según el DEM oficial de Terrasit (Lidar MDE 1mt 2009, sistema de referencia ETRS89H30) (GVA, 2015). El sector estudiado tenía unas dimensiones de 3x2 metros y su tamaño fue de 835 752 puntos, con una densidad aproximada de 14 000 *puntos/m²*.

El tercer y último caso de estudio utilizó una nube de puntos 3D adquirida con un *3D laser scanner* modelo C10 de Leica. Se efectuaron tres estacionamientos que se registraron mediante dianas planas, y la nube de puntos resultante obtenida se orientó con puntos de control obtenidos ortofotos a partir de fuentes oficiales. La nube obtenida tuvo una densidad de 5 223 *puntos/m²*.

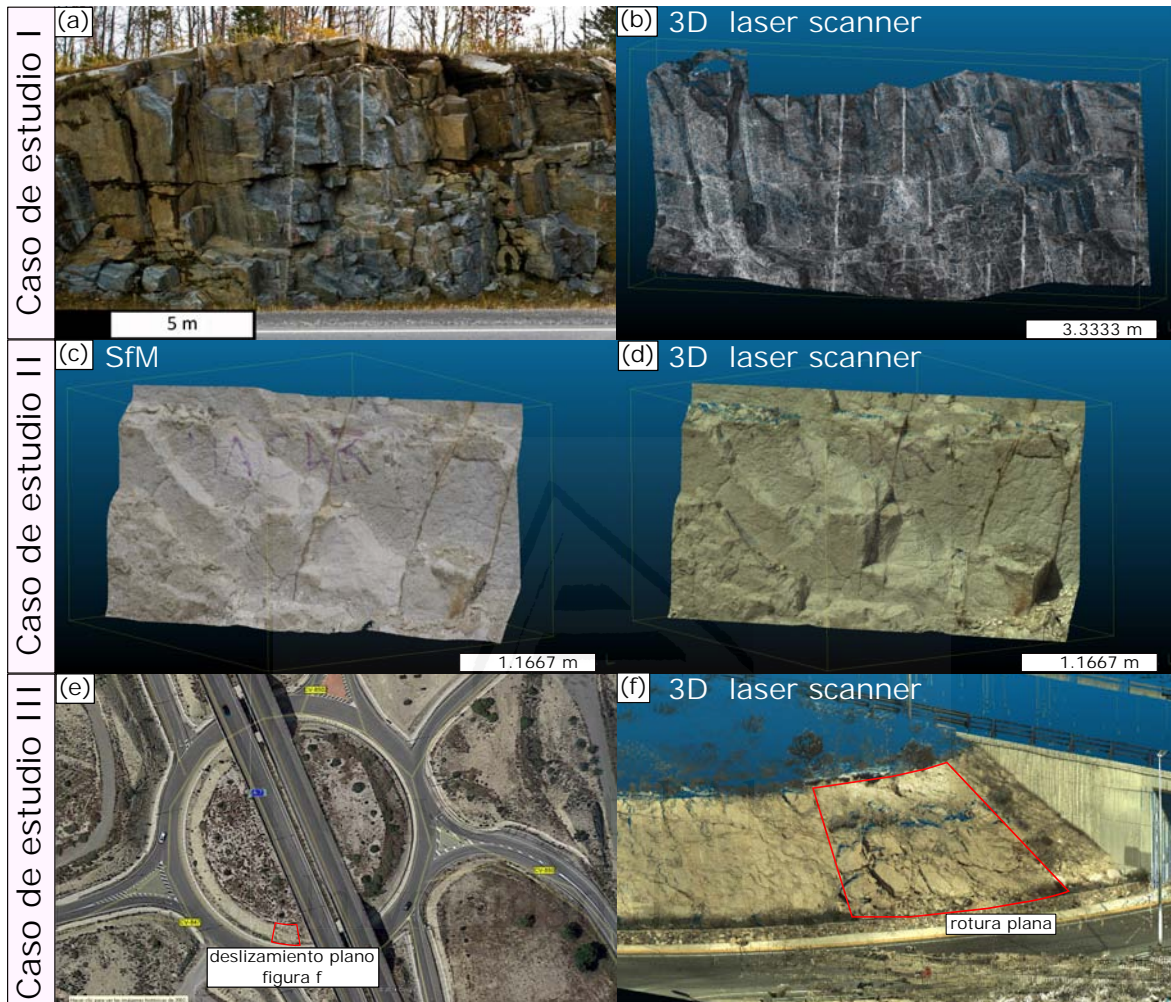


Figura 15. Nubes de puntos 3D utilizadas en la aplicación de las nubes de puntos al cálculo del índice SMR. Caso de estudio 1, Kingston (Canadá): (a) Fotografía del talud; (b) nube de puntos 3D del sector estudiado (Lato et al., 2015); caso de estudio 2, ciudad de Alicante (España) (c) sector estudiado mediante una nube de puntos obtenida con SfM; (d) nube de puntos 3D obtenida con *3D laser scanner* modelo C10 de Leica; caso de estudio 3, glorieta excavada en roca en Alicante (España) (e) ortofoto de la glorieta (Google Earth, fecha 30 de junio de 2013); (f) nube de puntos 3d adquirida con *3D laser scanner* modelo C10 de Leica

“Los hallazgos científicos son pájaros montaraces que no gustan de venir a comer a las manos institucionales, por pródidas que estas se muestren.”

D. José Antonio Jiménez Salas

3

Resultados

A continuación, se muestran los principales resultados de la investigación, los cuales se agrupan en tres bloques derivados de las tres líneas de investigación desarrolladas. En primer lugar, se presenta una metodología para identificación y extracción de familias de discontinuidades planas y clasificación de nubes de puntos 3D y su aplicación a los casos de estudio. En segundo lugar, se presenta una metodología de cálculo del espaciado normal a partir de nubes de puntos 3D clasificadas. Finalmente, se presentan los resultados de calcular el índice SMR a partir de la información obtenida de las nubes de puntos 3D.

3.1. Resultados de la línea de investigación 1

3.1.1. Desarrollo del algoritmo

El resultado principal de esta línea de investigación es el desarrollo de un método de extracción semiautomática de familias de discontinuidades y clasificación de la nube de puntos. El método toma como datos de partida una nube de puntos 3D desorganizada con la información de las coordenadas cartesianas en \mathbb{R}^3 . El proceso llevado a cabo se muestra en el diagrama de flujo de la figura 16 y requiere la determinación de una serie de parámetros que condicionan el proceso. Estos se introducen por el usuario a medida que se avanza en la aplicación del método y se muestran los resultados de los pasos intermedios. El método

consta de tres fases diferenciadas: (1) cálculo local de curvaturas, (2) análisis estadístico y (3) análisis *cluster*.

Cálculo local de curvaturas

Para cada punto de la nube se buscan los knn vecinos más próximos, según la distancia definida por una norma euclídea en \mathbb{R}^3 . El valor del parámetro knn se define antes de iniciar el proceso. La programación de la búsqueda de los puntos más cercanos se ha llevado a cabo empleando la función “*knnsearch*” disponible en MATLAB. La búsqueda de vecinos se puede realizar bajo el enfoque de los puntos dentro de un radio de búsqueda, pero durante el desarrollo del método se comprobó que el establecimiento de un número de vecinos ofrecía un proceso más robusto cuando la nube de puntos presentaba una densidad espacial irregular.

El conjunto formado por punto estudiado y sus vecinos se denominó Q_i . Este conjunto forma parte de la superficie y es razonable plantearse si forma parte de una superficie plana, por lo que se realiza un test de coplanaridad. La técnica empleada es la del análisis de los componentes principales (Pearson, 1901; Hotelling, 1933), la cual está disponible en MATLAB con la orden “*princomp*”. El test PCA aplicado al conjunto de puntos Q_i devuelve tres vectores principales ($\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$) y tres valores propios ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), pues únicamente se analizan tres dimensiones. Los valores propios se ordenan de mayor a menor, siendo λ_1 el mayor, el correspondiente a aquella dirección que más datos explica (\vec{v}_1). El tercer y menor valor propio λ_3 proporciona información acerca de la dimensión que menos datos explica (\vec{v}_3). Si el conjunto se distribuye según un plano, el porcentaje que supone este λ_3 sobre la suma de los tres valores propios deberá ser inferior a cierto umbral que define el usuario. Este valor se ha llamado tolerancia (η) y se define según la ecuación 3.

$$\eta = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (3)$$

El test de coplanaridad consiste en considerar cuán plano es el conjunto Q_i asociado al punto i de la nube de puntos. Para cada punto i se calcula el valor de su tolerancia η_i , y si este valor es inferior o igual a un valor definido por el usuario, el punto se acepta, pero si no lo supera se rechaza y se elimina del proceso. Con los puntos que han superado el test de coplanaridad y sus vecinos, se calcula el vector normal con los dos vectores propios asociados a cada conjunto de puntos.

Análisis estadístico

Los vectores normales asociados a cada punto que ha superado el test de coplanaridad se analizan con el fin de detectar las orientaciones en la superficie definida por la nube de puntos. Si esta superficie se organiza según planos, es esperable que los polos de los vectores normales se concentren en una zona de la falsilla estereográfica alrededor de un polo, que

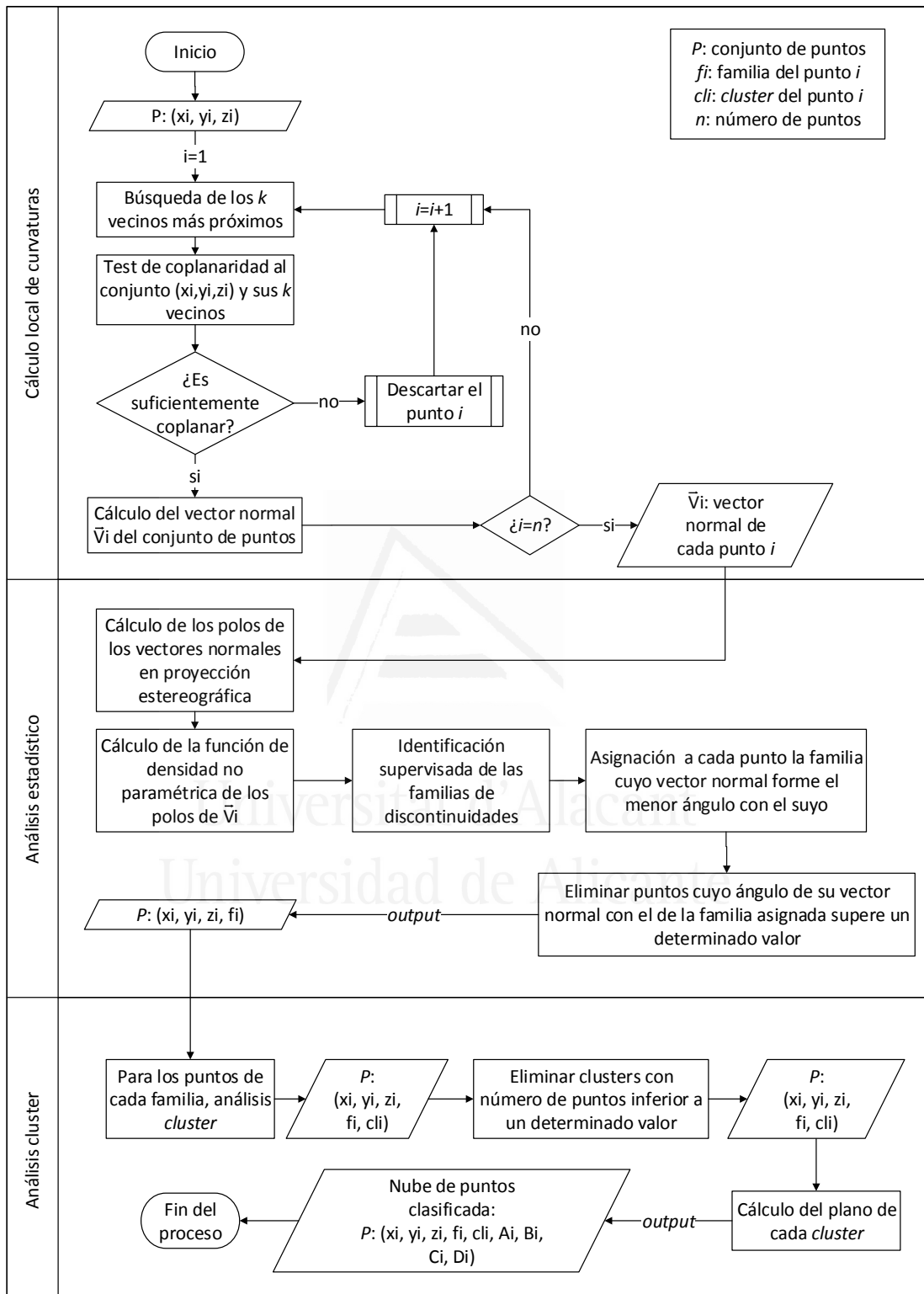


Figura 16. Diagrama de flujo del método de extracción de discontinuidades con nubes de puntos 3D

se denomina polo principal. Este será el más representativo del conjunto y con él se define la orientación de la familia de planos o planos principales. Para llevar a cabo este análisis estadístico se representan todos los polos de los vectores normales en proyección estereográfica y se analiza su densidad. A continuación, se enumeran los pasos seguidos para la determinación estadística de los polos principales:

1. Se representan todos los polos asociados a los puntos que han superado los requisitos anteriores en proyección estereográfica (figura 17 c).
2. La densidad de los puntos se calcula mediante la estimación no paramétrica que proporciona la técnica del *kde* presentada en la sección §2.1.2. Esto permite representar la función de densidad mediante una superficie que muestra picos en los valores máximos (figura 17 d).
3. Antes de la extracción de los planos principales, se establece el ángulo mínimo que deben formar dos vectores normales correspondientes a los planos principales para que sean considerados como tal.
4. La elección de los planos principales se puede efectuar automática o manualmente. La forma automática requiere el establecimiento del número n de planos principales a extraer, con lo que se extraen los n mayores picos o máximos relativos de la función de densidad que cumplen la condición anterior. La elección manual permite modificar la automática y ajustar, insertar o eliminar planos principales propuestos.
5. Finalmente, se lleva a cabo una asignación de un plano principal a cada punto (figura 17 e). El proceso consiste en establecer el ángulo mínimo que debe de formar el vector normal asociado al punto con el del polo principal. Por tanto, a un punto se le asignará el plano principal cuyo menor ángulo forme con su vector normal siempre que no supere cierto valor definido por el usuario. Aquellos puntos que no hayan sido asignados a ningún plano principal se descartan. Al final de este proceso se tiene la nube de puntos con los vectores normales correspondientes y el plano principal (o familia de planos) que se le ha asignado.

Análisis cluster

El último paso es clasificar espacialmente los puntos que, perteneciendo a una misma familia de discontinuidades, se agrupan formando superficies planas. Si los puntos forman planos tendrán, al menos, cierta continuidad en el espacio con una clara separación espacial. De esta forma habrá que buscar aquellos conjuntos de puntos que, siendo miembros de una misma familia, formen un conjunto con una densidad continua. A estos conjuntos de puntos o agrupaciones los llamamos *clusters*.

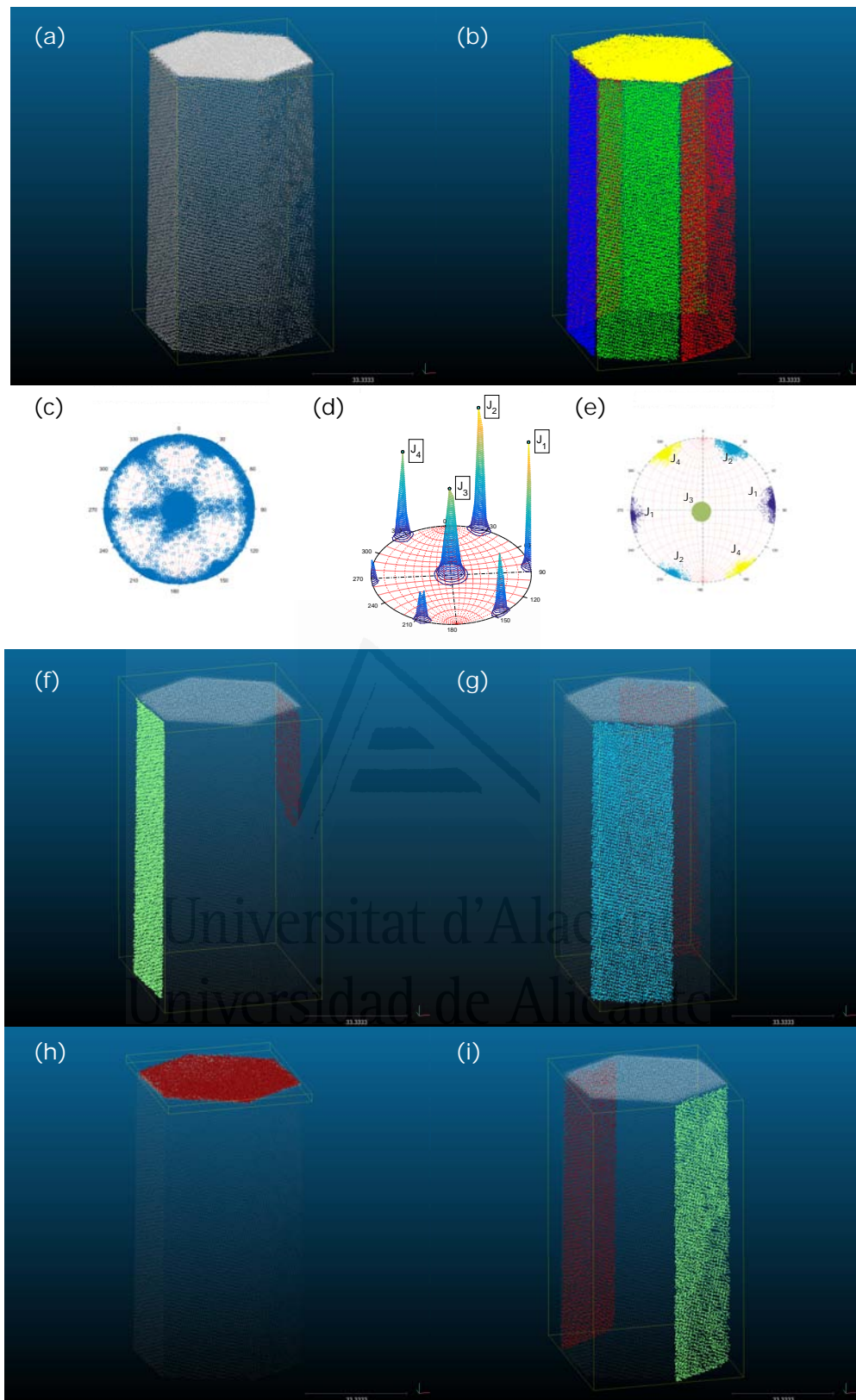


Figura 17. Aplicación del método de extracción de planos a la nube de puntos de un prisma hexagonal. (a) nube de puntos; (b) nube de puntos clasificada con un color por cada familia de planos; (c) representación de los polos de los vectores normales de cada punto en proyección estereográfica; (d) densidad de los polos calculados anteriormente; (e) polos clasificados según familia; (f) a (i) *clusters* de las familias 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

El análisis *cluster* se realiza con la técnica del DBSCAN (Ester et al., 1996) presentada en la sección §2.1.2. La técnica fue adaptada al análisis en \mathbb{R}^3 y programada en MATLAB. Este método requiere establecer un radio de búsqueda para identificar si el punto estudiado y sus vecinos más cercanos tienen suficiente densidad, y por tanto el punto pertenece al *cluster*. Según recomiendan Ester et al. (1996), el radio de búsqueda se estableció a partir de la distancia al cuarto vecino más próximo de la familia mediante un análisis estadístico. Este radio se establece independientemente para cada familia. Al final de este proceso se obtiene la nube de puntos con los vectores normales correspondientes, el plano principal y el *cluster* al que pertenece (figuras 17 f a i).

A continuación, se calculan las ecuaciones del plano de cada *cluster*. A raíz de la segunda línea de investigación se implementó, con posterioridad al desarrollo inicial, la posibilidad de calcular el plano de cada *cluster* según el vector normal del plano principal o mediante un ajuste independiente. En la primera opción todos los *clusters* miembros de una familia tienen el mismo vector normal, y por tanto son paralelos. En la segunda opción cada *cluster* tiene un vector normal según el mejor ajuste por mínimos cuadrados. En este caso, el error punto-plano es menor que en el primero, pero los planos no tienen por qué ser paralelos.

Finalmente, y a tenor de la segunda investigación, se detectó la conveniencia de analizar si dos *clusters* miembros de la misma familia con el mismo vector normal son miembros del mismo plano. En realidad, los puntos incorporan cierto error por diversos motivos, por lo que no ajustan a un plano perfectamente. De esta forma, el establecimiento de si dos *clusters* pertenecen al mismo plano no es inmediata (Slob, 2010). A pesar de calcular todos los planos de la familia con el mismo vector normal, el término independiente D no tiene por qué ser el mismo aunque realmente pertenezcan a la misma discontinuidad plana. Sin embargo, es posible efectuar un test que determine si existen indicios razonables para considerar los dos planos como miembros de uno mismo. El test consiste en calcular la distribución distancia punto-plano de dos *clusters* y analizar cuánto se solapan (figura 18). Si el grado de solape entre ambas es mayor o igual que el que define el usuario, se acepta que ambos *clusters* forman parte del mismo plano. En ese caso, se toma el término independiente D del plano del *cluster* con mayor número de puntos y se le asigna al otro *cluster*.

Presentación de resultados

La salida u *output* del método es el conjunto de puntos clasificado con la siguiente información:

{ x } coordenada cartesiana x del punto original.

{ y } coordenada cartesiana y del punto original.

{ z } coordenada cartesiana z del punto original.

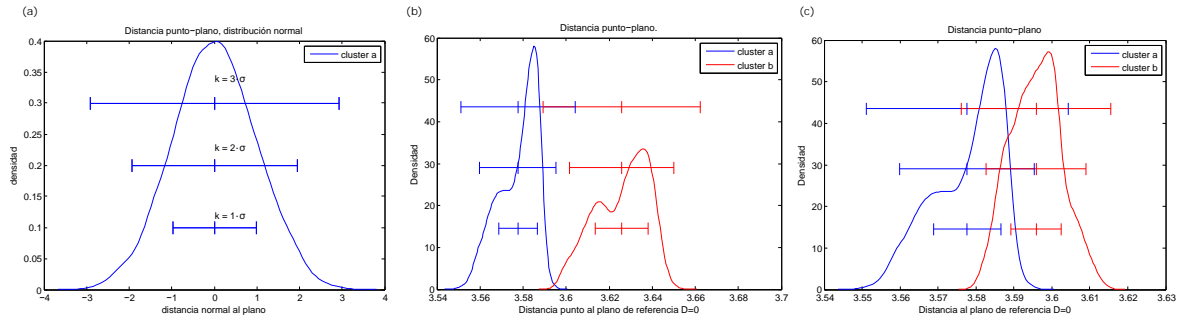


Figura 18. Función de densidad de la distancia punto plano ajustado por mínimos cuadrados. (a) Distribución normal de la distancia punto plano, donde el primer segmento mide 2σ , el segundo 4σ y el tercero 6σ ; (b) dos *clusters* muy cercanos, solape de 2σ ; (c) dos *clusters* separados, sólo 3σ de solape. Las tres líneas horizontales se centran en el valor medio de cada distribución. Cada línea mide $2 \cdot k \cdot \sigma$ ($k=1$ inferior, $k=2$ medio, $k=3$ superior). Notar que el solape de las líneas depende de cuán cerca se encuentren los centros de las distribuciones (μ) y de la dispersión de los puntos (σ).

{f} identificador de la familia de planos a la que pertenece el punto.

{cl} identificador del *cluster* o agrupación de puntos miembros de la misma superficie plana a la que pertenece el punto.

{A} parámetro A de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ecuación 2. Es la componente de eje X del vector normal al plano.

{B} parámetro B de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ecuación 2. Es la componente de eje Y del vector normal al plano.

{C} parámetro C de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ecuación 2. Es la componente de eje Z del vector normal al plano.

{D} término independiente de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ecuación 2. Determina la posición en el espacio del plano.

Igualmente se genera la siguiente información referente a las familias de planos detectadas:

- Familia: identificador del polo correspondiente a la familia de planos detectada.
- Dirección de buzamiento: ángulo que forma el norte con la proyección horizontal del vector buzamiento medido en sentido horario. Siempre está en ángulo recto con la dirección.
- Buzamiento: ángulo que forma el vector buzamiento con su proyección en un plano horizontal.

- Densidad: valor de la densidad de los polos en el polo detectado como polo principal. Este valor sólo tiene utilidad para obtener información de la importancia relativa que tiene un valor respecto a otro en la función de densidad.

Nota: en el caso de líneas producto de la intersección de dos planos, la nomenclatura adecuada es dirección de inmersión e inmersión (Lisle & Leyshon, 2004).

3.1.2. Programación del *software* DSE

La mejora conceptual del algoritmo se llevó a cabo simultáneamente a su programación con el fin de testear la viabilidad del método, lo que permitió identificar debilidades y/o puntos de mejora durante todo el desarrollo del mismo. La programación utiliza una serie de *scripts* y funciones en lenguaje MATLAB que automatizan los cálculos siguiendo el algoritmo propuesto. Para dotar de funcionalidad al proceso se diseñó una GUI para permitir que el usuario tuviera una interacción sencilla y rápida en la aplicación del método (figura 19). La GUI permite introducir la nube de puntos 3D a partir de un fichero de texto, guardar y cargar el estado de procesado, introducir y modificar los parámetros que gobiernan la clasificación, obtener información cuantitativa y gráfica de los resultados intermedios y finalmente exportar los resultados a ficheros de texto en formato ASCII.

El *software* generado se llamó *Discontinuity Set Extractor* (DSE), y está basado en los pasos mostrados en la figura 16. La interfaz ofrece la interacción con el método mediante botones, barras de deslizamiento y cuadros de texto para introducir valores numéricos. Inicialmente todos los botones están desactivados salvo los correspondientes a los primeros pasos del método. La ejecución de una parte del método activa la siguiente, por lo que el usuario está “guiado” durante el proceso. La parte derecha de la interfaz muestra un recuadro para representar la información calculada, ya sea incrustada en la GUI o mediante una ventana emergente (opción *popup*). Esta última tiene especial interés para exportar los gráficos generados en los formatos que permite MATLAB (es decir: png, eps, fig, pdf, svg, tex, etc). Una vez ejecutado todo el proceso, la GUI permite visualizar los resultados de la nube de puntos clasificada y exportarlos a ficheros ASCII, preparados para cargar en otros programas de manejo de nubes de puntos como CloudCompare o Polyworks. La GUI muestra en la parte inferior un recuadro en el que se registran todas acciones llevadas a cabo y los parámetros utilizados.

Uno de los principios básicos de esta tesis doctoral es el intercambio de conocimiento e información. Por este motivo, se decidió compartir el código del DSE con la comunidad científica para facilitar la lectura, comprensión y uso de los textos publicados en esta tesis. El código se encuentra disponible en su última versión en la web <http://personal.ua.es/es/ariquelme>. El software está protegido bajo licencia GNU GPL.

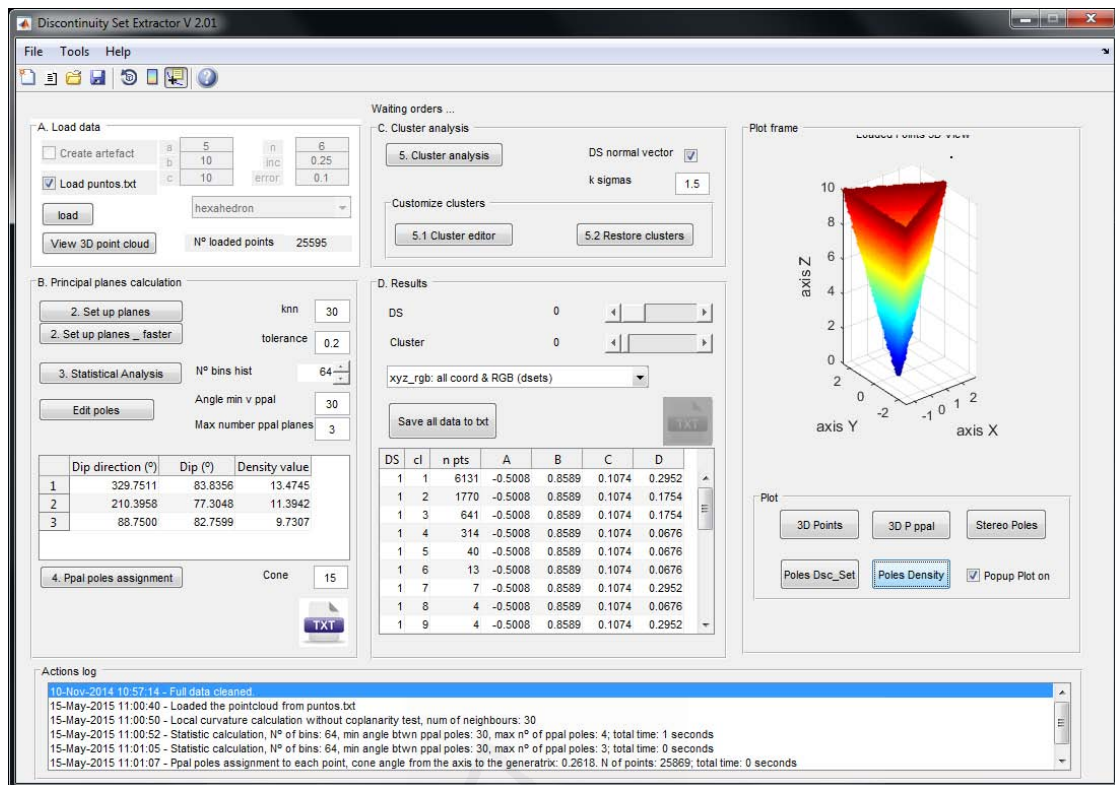


Figura 19. Captura de pantalla del programa DSE: Interfaz gráfica del método de extracción de discontinuidades.

3.1.3. Validación

El método se validó en tres fases. En primer lugar, se llevó a cabo una validación con las nubes de puntos sintéticas (figura 10). Las figuras utilizadas se componían de superficies planas con orientaciones y posiciones conocidas de antemano. Tras aplicar el método desarrollado y llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos con los observados, si las diferencias entre ambos resultados eran admisibles se validaba esta primera fase.

La segunda fase consistió en aplicar la metodología a figuras geométricas regulares de dimensiones conocidas (figura 11), tales que los resultados esperados eran conocidos de antemano. El proceso de validación fue el mismo que en la primera fase.

La tercera y última fase de la validación consistió en aplicar la metodología a un talud real mediante una nube de puntos 3D adquirida con *3D laser scanner* (figura 12). La metodología proporcionó una nube de puntos clasificada por familias, *clusters* y las ecuaciones del plano de cada *cluster*. En esta fase de validación la determinación de los planos se llevó a cabo mediante un ajuste por mínimos cuadrados al conjunto de puntos identificados en cada *cluster*. Dicho ajuste determinó los cuatro parámetros de la ecuación del plano, por lo que se determinó tanto el vector normal como la posición del plano en el espacio. Con el fin de validar los resultados obtenidos, se extrajeron las orientaciones de los planos en la nube de

puntos 3D original mediante el *software* Polyworks, con el que se seleccionaron los puntos miembros de un *cluster* y se ajustó el plano por mínimos cuadrados. De esta forma se obtuvo el vector normal al plano objeto de comparación. Finalmente, se determinó el ángulo que formaban cada par de vectores normales para cada cluster y se observó que presentaba una variación entre 0 y 10°. Estos resultados son razonables y, por tanto, se validó la metodología de identificación y extracción de familias de discontinuidades planas y clasificación de nubes de puntos 3D.

3.2. Resultados de la línea de investigación 2

3.2.1. Desarrollo del algoritmo

El resultado principal de esta línea de investigación es un algoritmo que calcula automáticamente los espaciados entre discontinuidades planas de la misma familia a partir de la nube de puntos clasificada.

El principio básico del algoritmo es establecer las relaciones espaciales entre *clusters* para medir el espaciado normal entre planos, tal y como se haría en campo. Se trata, pues, de detectar un afloramiento plano y buscar el siguiente más cercano que pertenezca a la misma familia.

Según el procedimiento utilizado en esta investigación, las discontinuidades planas son detectadas mediante los puntos de la superficie, aunque estas pueden continuar en el interior del macizo. Por tanto, se desconoce a priori la continuidad de los planos en el interior. El estudio del espaciado mediante la información únicamente de la superficie requiere considerar los planos con persistencia finita o infinita. El hecho de asumir la persistencia como infinita simplifica el problema, pues si los planos son paralelos la distancia normal entre ellos (espaciado) será la diferencia entre los términos independientes D . En caso contrario, es necesario calcular el espaciado según otras metodologías (Slob, 2010). La hipótesis de persistencia infinita es razonable si la discontinuidad es el plano de estratificación o las discontinuidades son suficientemente persistentes para asumirlas como tales. Por otro lado, si la persistencia es finita los valores de espaciado obtenidos pueden diferir notablemente, pero aproximarse mejor a la realidad cuando las discontinuidades tienen una persistencia finita. En la figura 20 se muestra el cálculo de espaciados con ambas consideraciones. En el primer caso se observa que los valores de espaciados normales son significativamente menores que en el segundo caso. De hecho, considerando la persistencia como infinita el espaciado medio es de 16,28 unidades mientras que considerando la persistencia finita resulta igual a 27,16 unidades. Esto pone de relieve que la misma nube de puntos clasificada con el mismo método puede tener como resultado valores muy diferentes de espaciado normal dependiendo de la hipótesis considerada.

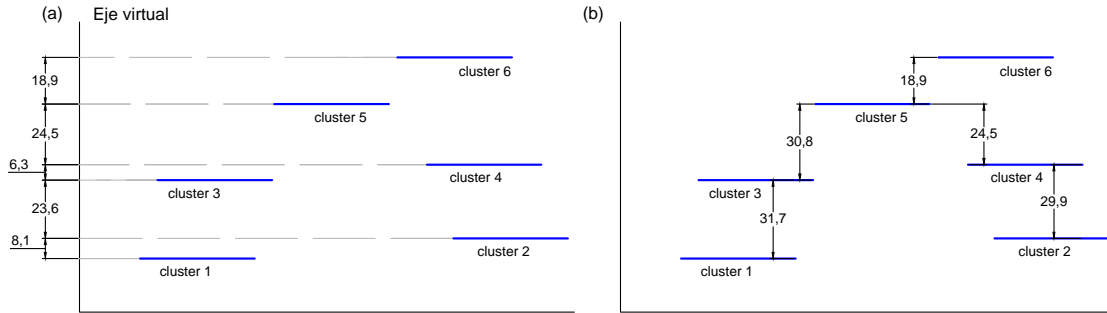


Figura 20. Representación ortogonal a una familia de discontinuidades, donde cada *cluster* representa los puntos de una superficie plana en la nube de puntos 3D. Comparación del cálculo del espaciado normal con hipótesis de (a) persistencia infinita y (b) persistencia finita

El algoritmo desarrollado para el cálculo del espaciado normal requiere asumir que la superficie y su nube de puntos tiene ciertas características. Estas son más restrictivas que las establecidas en el método de identificación y extracción de familias de discontinuidades planas y clasificación de la nube de puntos:

- Las discontinuidades del macizo son planas y paralelas en todo el sector estudiado. Con ello, las superficies afectadas por pliegues quedan fuera del ámbito de aplicación de esta metodología.
- Los planos expuestos de una misma familia pueden aproximarse a superficies planas con el vector normal del plano principal. Es característico de los macizos rocosos encontrar que las discontinuidades varían su orientación en el espacio. Sin embargo, si el sector estudiado tiene dimensiones adecuadas las características de las discontinuidades son homogéneas, por lo que esta consideración es razonable.
- Las discontinuidades quedan expuestas por planos en la superficie del talud. Por tanto, discontinuidades detectadas únicamente mediante trazas de planos en la superficie de la pared de la roca quedan fuera del ámbito de aplicación de este método.

Las puntos principales de la metodología propuesta se muestran en el algoritmo 1 mediante pseudocódigo y se detallan a continuación:

El algoritmo define en primer lugar el conjunto P con todos los puntos de la familia y se ordenan según el parámetro D en orden ascendente, si bien es cierto que también sería válido ordenarlos en orden descendente. El plano de cada *cluster* tiene una ecuación algebraica (ecuación 2), y por tanto todos los puntos miembros de ese *cluster* también. A continuación, se define el conjunto D_{sorted} como el conjunto de valores de D de todos los *clusters* ya ordenados. Por otro lado, el listado $D_{sortedid}$ contiene los identificadores del número de *cluster* correspondiente a su posición del conjunto D_{sorted} . El primer *cluster* a analizar será

Algoritmo 1 Cálculo del espaciado normal mediante nubes de puntos 3D**procedure** CÁLCULO DEL ESPACIADOEntrada: Nube de puntos $P=(X, Y, Z, DS \text{ id, cl id, A, B, C, D})$

Salida: Espaciado = (DS id, cl1 id, cl2 id, spacing, cl1 D, cl2 D)

 $cont = 1$ **for** cada familia i **do** $P_i \leftarrow P$ ▷ P : puntos miembros de la familia i $P_i \leftarrow$ Ordena P_i según D

▷ ascendentemente

 $D_{sorted} \leftarrow$ Valores de D de todos los puntos de P_i $D_{sortedid} \leftarrow$ ids de los clusters de los puntos de P_i crear $R \equiv P$ (puntos de P_i menos los del cl $D_{sortedid}(1)$)**for** cada cluster j **do**crear $Q \equiv P_i$ (puntos de P_i cuyo cluster id sea $D_{sortedid}(j)$) $Dist \leftarrow$ Distancia los puntos de Q a los de R $p \leftarrow$ punto más cercano de Q a R $pid \leftarrow$ id del cluster que contiene al punto p $D_1 \leftarrow D$ parámetro del cluster con id $D_{sortedid}(j)$ $D_2 \leftarrow D$ parameter of the cluster con id pid $espaciado(cont) \leftarrow [DS \text{ i, cl } D_{sortedid}(j), pid, |D_1 - D_2|, D_1, D_2]$ crear $R \equiv R$ (puntos de R salvo si cluster id sea $D_{sortedid}(i)$) $cont \leftarrow cont + 1$

el correspondiente a la primera posición de $D_{sortedid}$, con el índice de $cluster \ i = 1$. El conjunto de puntos R se define como todos los puntos de P salvo los correspondientes al primer $cluster$. La búsqueda del $cluster$ más cercano a este $cluster$ se lleva a cabo como sigue:

- Definir el conjunto Q como los puntos del $cluster$ con índice i .
- Calcular la distancia de cada punto de todos los puntos de Q a todos los puntos de R .
- Tomar la menor distancia encontrada, el punto de R al que corresponde esa menor distancia y el identificador del $cluster$ al que pertenece ese punto. Ese $cluster$ será el más cercano al $cluster$ analizado.
- Tomar el valor de D del $cluster$ analizado (D_1) y el del $cluster$ más cercano (D_2).
- Definir como el espaciado normal asociado a ese $cluster$ como $|D_1 - D_2|$
- Si no se ha llegado al último $cluster$, definir R como R sin los puntos de Q y empezar con el $cluster \ i = i + 1$. De esta forma, la siguiente búsqueda no tendrá en cuenta los $clusters$ ya analizados anteriormente.
- Si se ha llegado al último $cluster$, calcular el espaciado normal como la media de los valores de los espaciados calculados, y calcular los estadísticos que interesen.

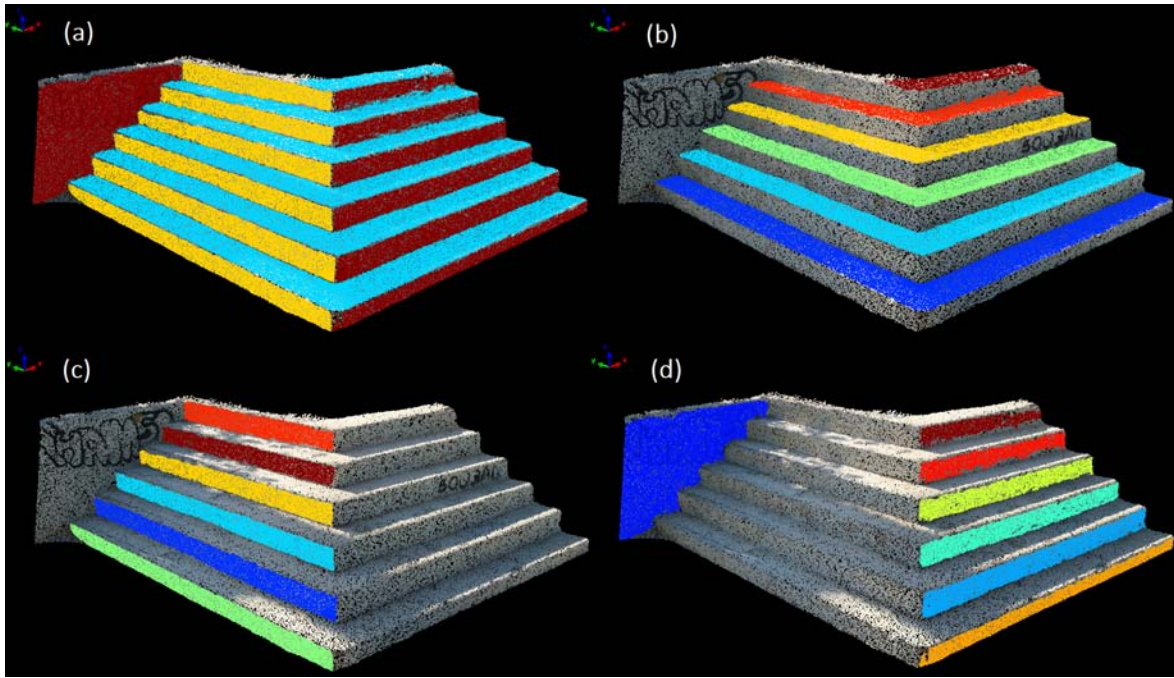


Figura 21. Línea de investigación 2, caso de estudio de espaciados en los planos de la superficie de unas escaleras de hormigón: (a) detección de las familias de discontinuidades planas, con un color para cada una; (b) *clusters* de la familia 1; (c) *clusters* de la familia 2; (d) *clusters* de la familia 3.

Como ejemplo de aplicación, se toma como base el caso de ejemplo mostrado en la figura 6, correspondiente al caso de estudio de unas escalera de hormigón de un parque en entorno urbano localizado en el término municipal de Crevillent, Alicante. En primer lugar, se ha aplicado el método de extracción de discontinuidades y clasificación de la nube de puntos. El resultado se muestra en la figura 21, donde se observa la existencia de tres familias y sus correspondientes *clusters*. Para analizar el espaciado de la familia de puntos subhorizontal, correspondiente a la huella de la escalera, se parte de los puntos clasificados en la figura 21 b, donde cada *cluster* se ha representado con un color. El primer *cluster* será el superior con color marrón, y su *cluster* más cercano será el rojo o inmediatamente inferior. La diferencia entre sus parámetros D se corresponde aproximadamente con la altura de la tabica o contrahuella. Evidentemente, el valor de la diferencia de valores de D no será exactamente igual a la altura. La posición del plano se ajusta por mínimos cuadrados, por lo que el error de los puntos generados por la técnica y la instrumentación utilizada afectará a los valores de D . La tabla 4 muestra los estadísticos calculados, donde se observa que los valores de la media se aproximan a los valores esperados medidos en campo. Igualmente, se observa que en este caso de estudio, la hipótesis de persistencia infinita o finita no afecta a los resultados obtenidos.

Tabla 4. Línea de investigación 2: análisis estadístico del espaciado normal con nubes de puntos 3D para el caso de estudio de las escaleras de hormigón. Comparación entre la hipótesis de persistencia finita e infinita.

	J_1		J_2		J_3	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Persistencia	no	si	no	si	no	si
Mínimo	0,197	0,197	0,288	0,288	0,289	0,289
Máximo	0,223	0,223	0,307	0,307	2,176	2,176
Densidad máxima	0,205	0,205	0,289	0,289	0,302	0,302
Moda	0,197	0,197	0,288	0,288	0,289	0,289
Media	0,209	0,209	0,295	0,295	0,607	0,607
Desviación típica	0,013	0,013	0,008	0,008	0,768	0,768
Número de <i>clusters</i>	6		6		7	
Valor esperado	0,20		0,30		0,30	

3.2.2. Programación del *software*

El algoritmo se ha programado en lenguaje M (MATLAB) y se ha incorporado al *software* DSE como una herramienta extra de análisis.

3.2.3. Validación

El método se validó en tres fases. En primer lugar, se llevó a cabo una validación con algunas nubes de puntos sintéticas (figura 5). El elemento utilizado para la validación consistió en una mesa de comedor. Su superficie está formada por planos con orientaciones y posiciones conocidas de antemano, por lo que el espaciado entre planos es fácilmente determinable. Tras aplicar el método desarrollado y llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos con los observados, si las diferencias entre ambos resultados eran admisibles se validaba esta primera fase.

La segunda fase consistió en aplicar la metodología a una superficie de dimensiones conocidas como es el caso de la escalera de hormigón (figura 6). Los resultados esperados eran conocidos de antemano. El proceso de validación fue el mismo que en la primera fase.

La tercera y última fase de la validación consistió en aplicar la metodología a un taludes reales mediante una nube de puntos 3D adquirida con *3D laser scanner* (figura 13 y 14).

3.3. Resultados de la línea de investigación 3

3.3.1. Desarrollo de la línea de investigación

El objeto de esta línea de investigación es el de analizar la aplicación de la metodología de extracción de discontinuidades propuesta en la primera línea de investigación a la clasificación geomecánica del índice SMR. El índice geomecánico SMR se calcula a partir del índice RMR_b y se corrige con cuatro factores de ajuste según la ecuación 4. El índice RMR_b se calcula a partir de 5 factores definidos por Bieniawski (1989) (tabla 2) y varía

Tabla 5. Factores de ajuste del índice SMR (Romana, 1993). Modos de fallo: P planar; T: vuelco; W cuña. α_j : dirección del buzamiento de la discontinuidad; α_s : dirección del buzamiento del talud; α_i : dirección de la línea de intersección de dos discontinuidades; β_s : buzamiento del talud; β_j : buzamiento de la discontinuidad; β_i : buzamiento de la línea de intersección de dos discontinuidades.

Tipo de fallo		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable	
P	A=	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	30 – 20°	20 – 10°	10 – 5°	
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W	F_1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B=	β_j o β_i	$< 20^\circ$	20 – 30°	30 – 35°	35 – 45°	$> 45^\circ$
P/W		F_2		0.15	0.40	0.70	0.85
T			1.00				
P	C=	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	10 – 0°	0°	0 – (-10)°	$< (-10)^\circ$
W		$\beta_i - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$					
P/T/W	F_3		0	-6	-25	-50	-60
Método de excavación (F_4)							
Talud natural			+15	Voladura o mecánica		0	
Precorte			+10	Voladura deficiente		-8	
Voladura suave			+8				

entre 0 y 100. Los factores de ajuste del índice SMR modifican el valor del índice RMR_b según el término $F_1 \times F_2 \times F_3$, que varía entre 0 y -60 unidades, y el factor F_4 dependiente del método de excavación y que varía entre -8 a +15. Los tres primeros factores de ajuste dependen exclusivamente de la geometría del talud y de las discontinuidades, por lo que es razonable el plantear si su cálculo mediante el uso de nubes de puntos 3D afecta al término $F_1 \times F_2 \times F_3$ respecto a los datos obtenidos en campo por el método tradicional.

$$SMR = RMR_b + F_1 \times F_2 \times F_3 + F_4 \tag{4}$$

donde el valor del índice RMR_b se define según la ecuación 1.

El planteamiento consiste en analizar la sensibilidad del índice SMR al ser calculado mediante nubes de puntos 3D adquiridas con distintas técnicas y analizadas con distintas metodologías publicadas. Las nubes de puntos utilizadas son adquiridas con *3D laser scanner* y mediante fotogrametría con la técnica SfM, anteriormente desarrolladas en la sección § 1.1.3. Se analizan tres casos de estudio: los dos primeros calculan los factores de ajuste del índice SMR con distintas fuentes de información y aplicando distintas metodologías y el tercero calcula el índice SMR en todos los puntos de la superficie de una glorieta.

3.3.2. Programación de la herramienta SMRTool

Los factores de ajuste del índice SMR se determinan según las relaciones definidas por Romana (1993) en la tabla 5. Los datos utilizados son las orientaciones de las familias, obtenidas mediante nubes de puntos 3D o mediante métodos tradicionales.

El cálculo de los factores de ajuste, su interpretación y comparación entre distintas metodologías se llevó a cabo mediante la programación de una herramienta informática llamada SMRTool (figura 22). La herramienta permite automatizar el cálculo de los factores de ajuste a partir de las direcciones de buzamiento y buzamiento de las discontinuidades y del talud. En primer lugar, calcula el tipo de rotura que se puede producir y a continuación los ángulos auxiliares y los factores de ajuste. Con el índice RMR_b introducido calcula el índice SMR y proporciona la clase, descripción, estabilidad, modos de fallo y medidas de sostenimiento propuestas según Romana (1993). Los cálculos se realizan para cada familia de discontinuidades y para las cuñas cuyo movimiento del bloque sea posible. El cálculo de la línea de intersección de dos planos de cada cuña se realiza automáticamente mediante el producto vectorial de los vectores normales de las dos discontinuidades que la definen. En este caso la cuña se define según esta línea, siendo definida por su dirección en su plano de inmersión y su inmersión (Lisle & Leyshon, 2004). Estos valores se introducen en el *software* SMRTool como dirección de buzamiento y buzamiento respectivamente.

La posibilidad de que un movimiento se pueda producir se determina a partir de la relación entre la dirección de buzamiento del talud y la de la línea de intersección, pues si ambas forman un ángulo menor de 90° , el movimiento es cinemáticamente posible. Cabe destacar que la clasificación geomecánica del índice SMR no realiza ninguna comprobación del posible deslizamiento de forma explícita mediante la comparación de la geometría con el ángulo de rozamiento de la discontinuidad como ocurre con el test de Markland (Markland, 1972; Kliche, 1999).

3.3.3. Aplicación de las herramientas a los casos de estudio

Caso de estudio 1: cálculo del índice SMR con distintas fuentes de datos y métodos de extracción de discontinuidades

Este caso de estudio se centró en un talud excavado en roca disponible en una base de datos de nubes de puntos 3D denominada *Rockbench Repository* (Lato et al., 2013). Esta nube de puntos fue utilizada por otros investigadores (figura 15 a y b) por Lato & Vöge (2012). Las discontinuidades de este talud se extrajeron mediante tres fuentes de información: lecturas de orientaciones tomadas en campo, un modelo 3D adquirido mediante *3D laser scanner* y a partir de la técnica SfM. Este talud se analizó utilizando el *software* PlaneDetect y los resultados se muestran en la figura 23. Por otro lado, la nube de puntos adquirida con *3D laser scanner* fue analizada con el *software* DSE. El índice RMR_b no fue calculado por los referidos investigadores, pues no era objeto de la citada investigación. Sin embargo, los factores de ajuste sí que pueden ser calculados porque dependen de la geometría de la discontinuidad, del talud y del método de excavación utilizado. De esta forma, el análisis de

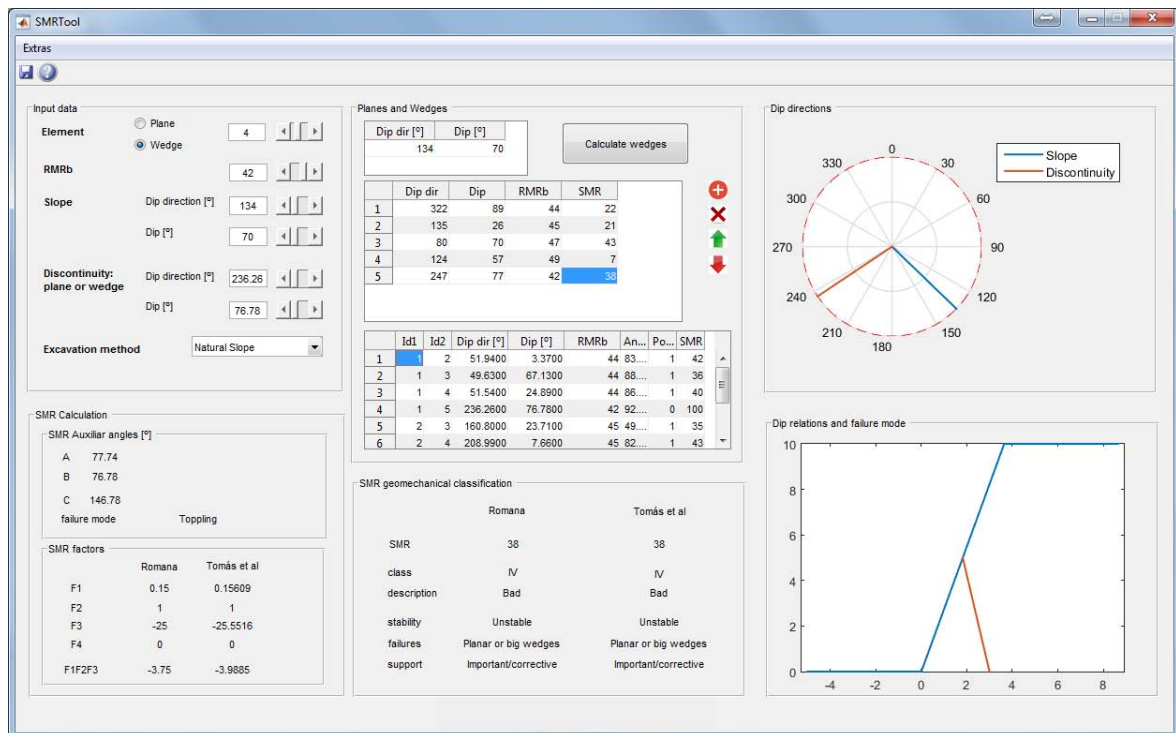


Figura 22. Interfaz gráfica del software SMRTool.

las desviaciones en el índice SMR debido al uso de nubes de puntos 3D y la aplicación de distintas metodologías se llevó a cabo a partir de los factores de ajuste.

La figura 23 a muestra las funciones de densidad obtenidas con distintos métodos de análisis y fuentes de información. En ella se observa que las cuatro funciones de densidad muestran tres familias ortogonales con la misma orientación aproximadamente. La tabla 6 muestra las orientaciones de las familias extraídas para cada análisis. Por otro lado, el talud se compone de tres zonas diferenciadas, cuyas orientaciones de planos se extrajeron mediante un ajuste por mínimos cuadrados aplicado al conjunto de puntos de cada sector. A la vista del material y de los barrenos del talud, se asumió que se excavó mediante voladura (y por tanto que $F_4 = 0$). Con ello, se calculó el producto de los factores de ajuste y se analizó la variación y afección de esta sobre el índice SMR (figura 24).

Caso de estudio 2: cálculo del índice SMR con distintas fuentes de datos

El segundo caso de estudio se centró en analizar la calidad geomecánica de un sector de un talud rocoso mediante el índice SMR. El índice RMR_b se calculó con los datos de campo y los factores de ajuste mediante la información geométrica de tres fuentes de información, que analizadas proporcionaban las familias de discontinuidades y sus orientaciones. La primera fuente de información fue el conjunto de lecturas obtenidas en campo mediante

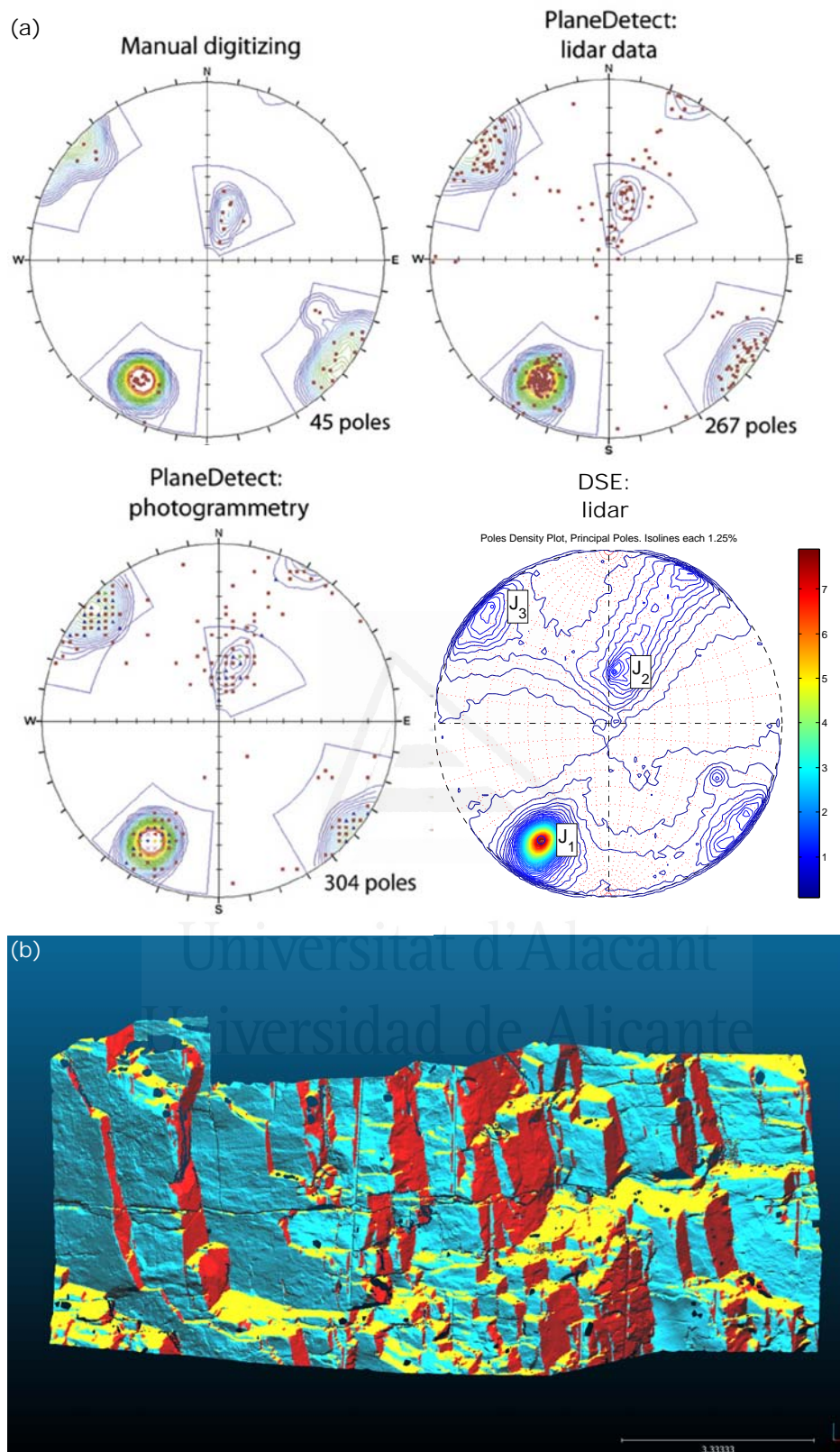


Figura 23. Línea de investigación 3, caso de estudio 1: discontinuidades extraídas del talud con varios métodos y fuentes de información. (a) Densidad de polos obtenida mediante brújula, *3D laser scanner* y fotogrametría empleando el *software* PlaneDetect (Lato & Vöge, 2012) y mediante *3D laser scanner* usando el *software* DSE; (b) superficie del talud clasificada con un color por familia de discontinuidades mediante el DSE.

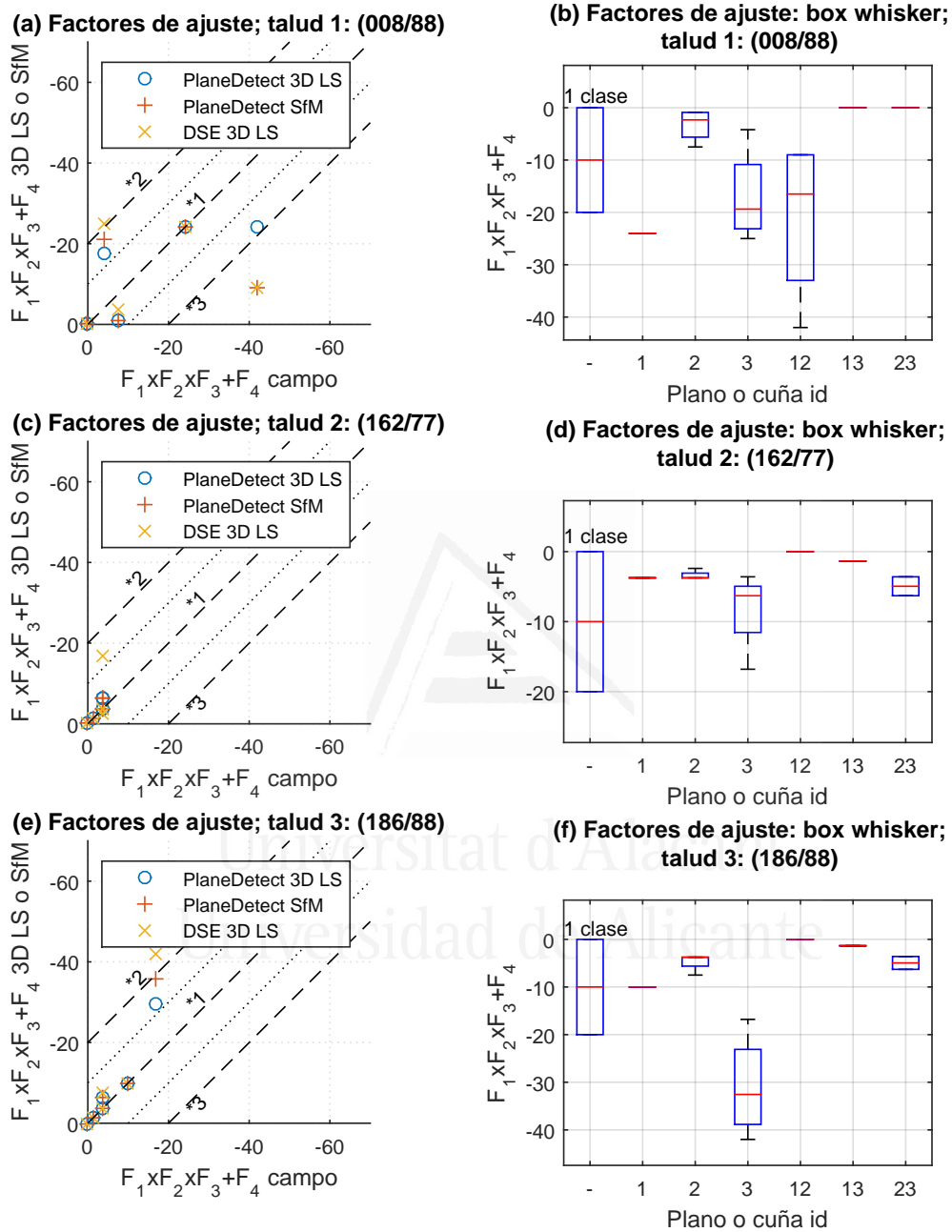


Figura 24. Línea de investigación 3, caso de estudio 1. *1: $SMR_{campo} = SMR_{3DLSoSfM}$; *2: -20 puntos (-1 clase); *3: +20 puntos (+1 clase). (a), (c) y (e) comparación de los factores de ajuste obtenidos con los datos del trabajo de campo y las nubes de puntos 3D; (b), (d) y (f) diagramas *box-whisker* de todas las fuentes de información para cada talud respectivamente.

Tabla 6. Factores de ajuste ($F_1 \times F_2 \times F_3 + F_4$) del talud estudiado mediante los *software* DSE y PlaneDetect y con distintas fuentes de información: brújula, datos LiDAR y SfM.

		J_1	J_2	J_3	W_{12}	W_{13}	W_{23}
dir buza- miento / buzamiento	Brújula	(028/76)	(307/86)	(205/30)	(021/76)	(117/01)	(219/29)
	Plane Detect LiDAR	(029/75)	(308/89)	(198/32)	(034/75)	(117/06)	(218/30)
	Plane Detect Fotogrametría	(029/76)	(309/90)	(194/34)	(039/76)	(117/08)	(219/31)
	DSE LiDAR	(030/75)	(135/87)	(187/33)	(055/73)	(116/12)	(223/28)
Talud 1: (008/88)	Brújula	-24,00	-7,50	-4,20	-42,00	0,00	0,00
	Plane Detect LiDAR	-24,00	-0,90	-17,50	-24,00	0,00	0,00
	Plane Detect Fotogrametría	-24,00	-0,90	-21,25	-9,00	0,00	0,00
	DSE LiDAR	-24,00	-3,75	-25,00	-9,00	0,00	0,00
Talud 2: (162/77)	Brújula	-3,75	-3,75	-3,60	0,00	-1,35	-3,60
	Plane Detect LiDAR	-3,75	-3,75	-6,30	0,00	-1,35	-6,30
	Plane Detect Fotogrametría	-3,75	-3,75	-6,30	0,00	-1,35	-6,30
	DSE LiDAR	-3,75	-2,40	-16,80	0,00	-1,35	-3,60
Talud 3: (186/88)	Brújula	-10,00	-3,75	-16,80	0,00	-1,35	-3,60
	Plane Detect LiDAR	-10,00	-3,75	-29,40	0,00	-1,35	-6,30
	Plane Detect Fotogrametría	-10,00	-3,75	-35,70	0,00	-1,35	-6,30
	DSE LiDAR	-10,00	-7,50	-42,00	0,00	-1,35	-3,60

brújula, la segunda y la tercera fueron las familias extraídas a partir de las nubes de puntos adquiridas con SfM y con *3D laser scanner*, respectivamente.

El trabajo de campo tuvo como primera fase la detección mediante inspección visual de las familias de discontinuidades y la consiguiente toma de datos, donde se detectaron tres familias: el plano de estratificación subvertical, otra familia subvertical perpendicular al frente y otra subhorizontal. Sin embargo, el análisis de las nubes de puntos 3D permitió identificar una nueva familia: J_4 (figura 25 f y h). En términos estadísticos, esta familia tenía poca representación en las superficies expuestas del talud por la cantidad de vectores normales asociados a los puntos de su superficie respecto al resto. Tras una inspección visual del sector J_4 se aceptó como familia de discontinuidades. Por este motivo fue necesario volver a campo para recoger información de esta nueva familia y poder calcular su índice RMR_b .

Con el fin de analizar únicamente las desviaciones de la calidad geomecánica del talud al utilizar distintas fuentes de información, los cálculos del índice RMR_b se realizaron únicamente mediante los datos tomados en campo.

Caso de estudio 3: cálculo del índice SMR en todos los puntos de la superficie de un desmonte de una glorieta

El tercer caso de estudio se centró en el cálculo del índice SMR en todos los puntos de un talud excavado en roca para la ejecución de una glorieta. Las familias de discontinuidades se extrajeron mediante el uso de una nube de puntos 3D y posteriormente se calculó el índice RMR_b con los datos de campo. El talud se modelizó mediante una nube de puntos sintética según un tronco de cono definido por la excavación. A continuación, se calculó la orientación del talud a partir del vector normal de cada punto. Para cada familia de discontinuidades se evaluó si en ese punto el mecanismo de rotura era tipo vuelco o planar, calculando su índi-

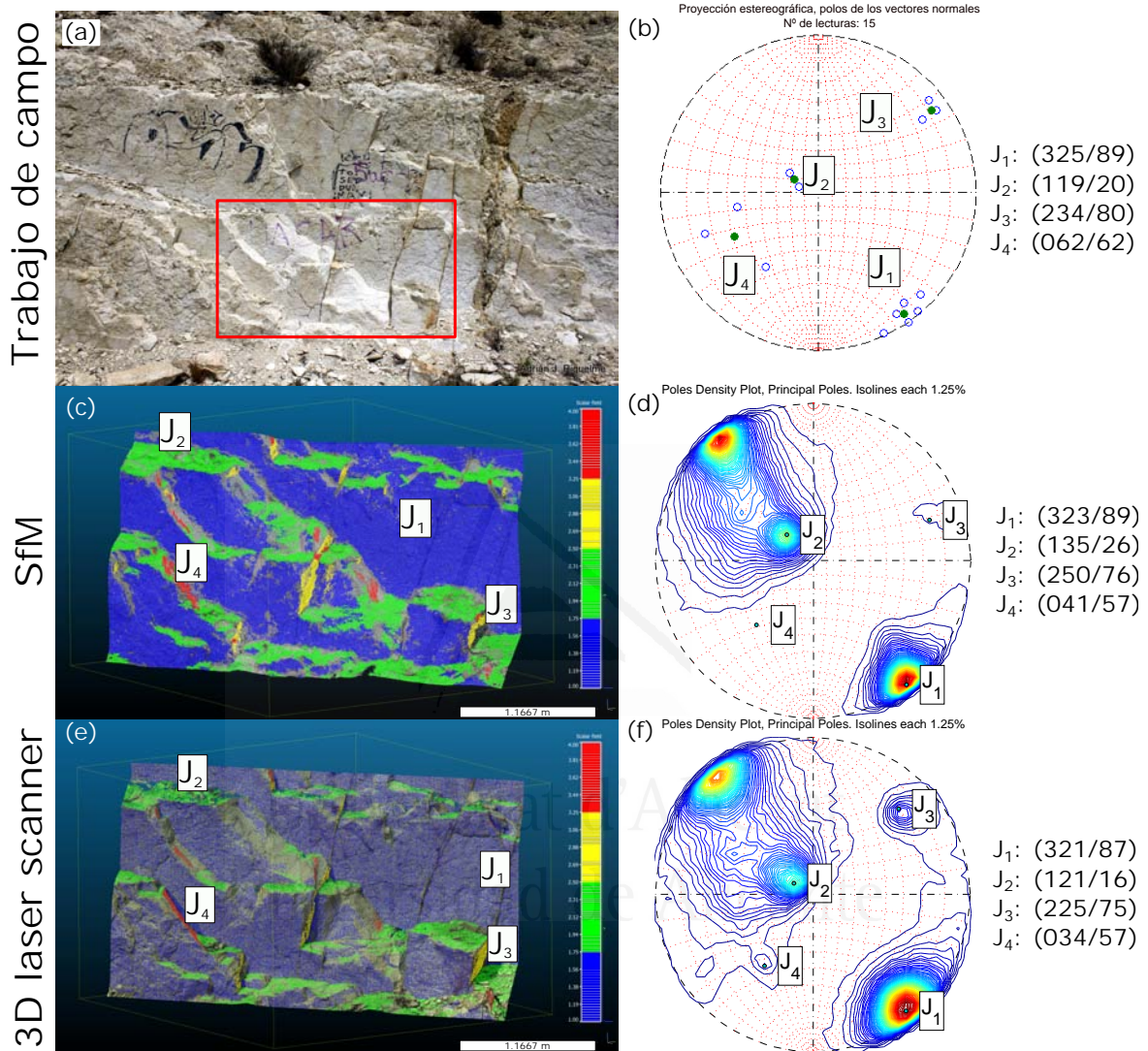


Figura 25. Línea de investigación 3, caso de estudio 2: discontinuidades extraídas del talud del caso de estudio 2 empleando para ello varios métodos y fuentes de información y representación de la densidad de polos en falsilla estereográfica. (a) y (b) trabajo de campo con brújula y clinómetro; (c) y (d) nube de puntos 3D obtenida con SfM clasificada con un color por familia de discontinuidades mediante el *software* DSE; (e) y (f) nube de puntos 3D obtenida con *3D laser scanner* clasificada con un color por familia de discontinuidades mediante el *software* DSE.

3.3. RESULTADOS DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 3

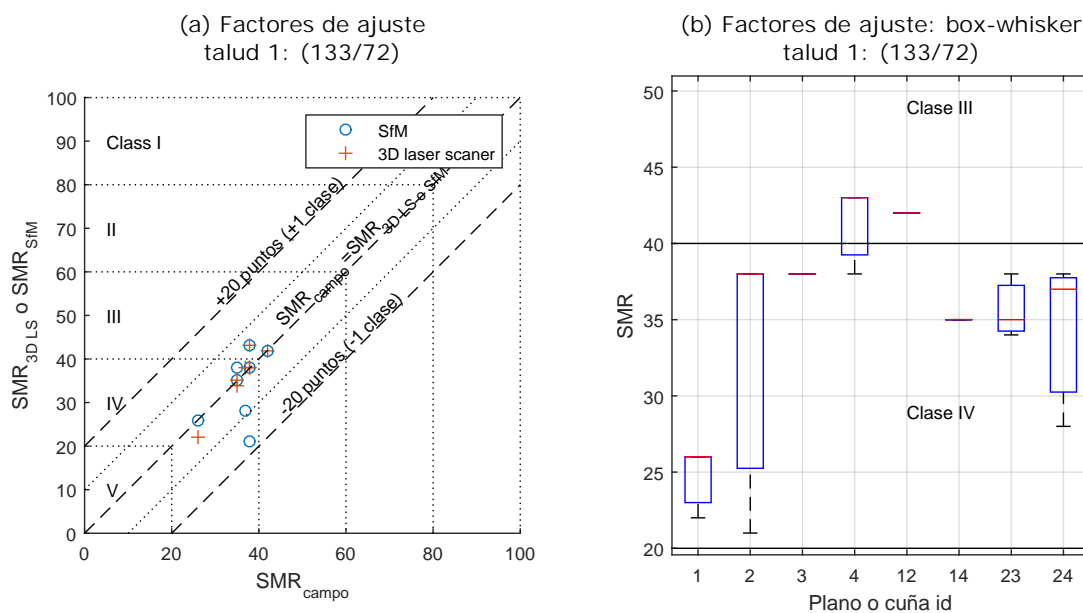


Figura 26. Línea de investigación 3, caso de estudio 2: comparación de resultados: (a) comparación del índice SMR obtenido con el trabajo de campo comparado con el derivado del uso de nubes de puntos 3D; (b) diagrama *box-whisker* para las tres fuentes de información utilizadas.

Tabla 7. Línea de investigación 3, caso de estudio 3: cálculo del índice SMR en una nube de puntos 3D: valores del índice SMR para cada familia de discontinuidades y cuña en la orientación más desfavorable: (190/50).

plano/cuña id	dir buzamiento [°]	buzamiento [°]	RMRb	A [°]	B [°]	C [°]	fallo	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	clase
J_1	190	45	54	0	45	-5	Plano	1.00	0.85	-50	0	11	V
J_2	52	73	66	42	73	123	Vuelco	0.15	1.00	-25	0	62	II
J_3	343	85	85	27	85	135	Vuelco	0.40	1.00	-25	0	75	II
J_4	20	83	60	10	83	133	Vuelco	0.70	1.00	-25	0	42	III
W_{12}	133	28	54	57	28	-22	Vuelco	0.15	0.4	-60	0	50	III
W_{13}	255	23	54	65	23	-27	Vuelco	0.15	0.4	-60	0	50	III
W_{14}	109	9	54	81	9	-41	Vuelco	0.15	0.15	-60	0	52	III

ce SMR correspondiente. Igualmente se calcularon todas las cuñas posibles determinando si su movimiento era posible o no, para a continuación calcular su índice SMR correspondiente. Finalmente, se determinó la envolvente inferior de todos los índices SMR para cada uno de los puntos (figura 27 f), obteniendo que la localización de la excavación con mayor probabilidad de ocurrencia de fallo se encontraba al sur de la rotonda.

La tabla 7 muestra el cálculo del índice SMR para cada familia de discontinuidades y cada cuña cuyo movimiento sea posible en la orientación del plano de excavación más desfavorable: el (190/50). Se observa que el índice SMR resultante para la familia de discontinuidades 1 (es decir, el plano de estratificación) es el menor de todos, por lo que esta familia presenta en esta localización de la excavación la mayor probabilidad de ocurrencia de fallo. El mecanismo de fallo posible es el plano.

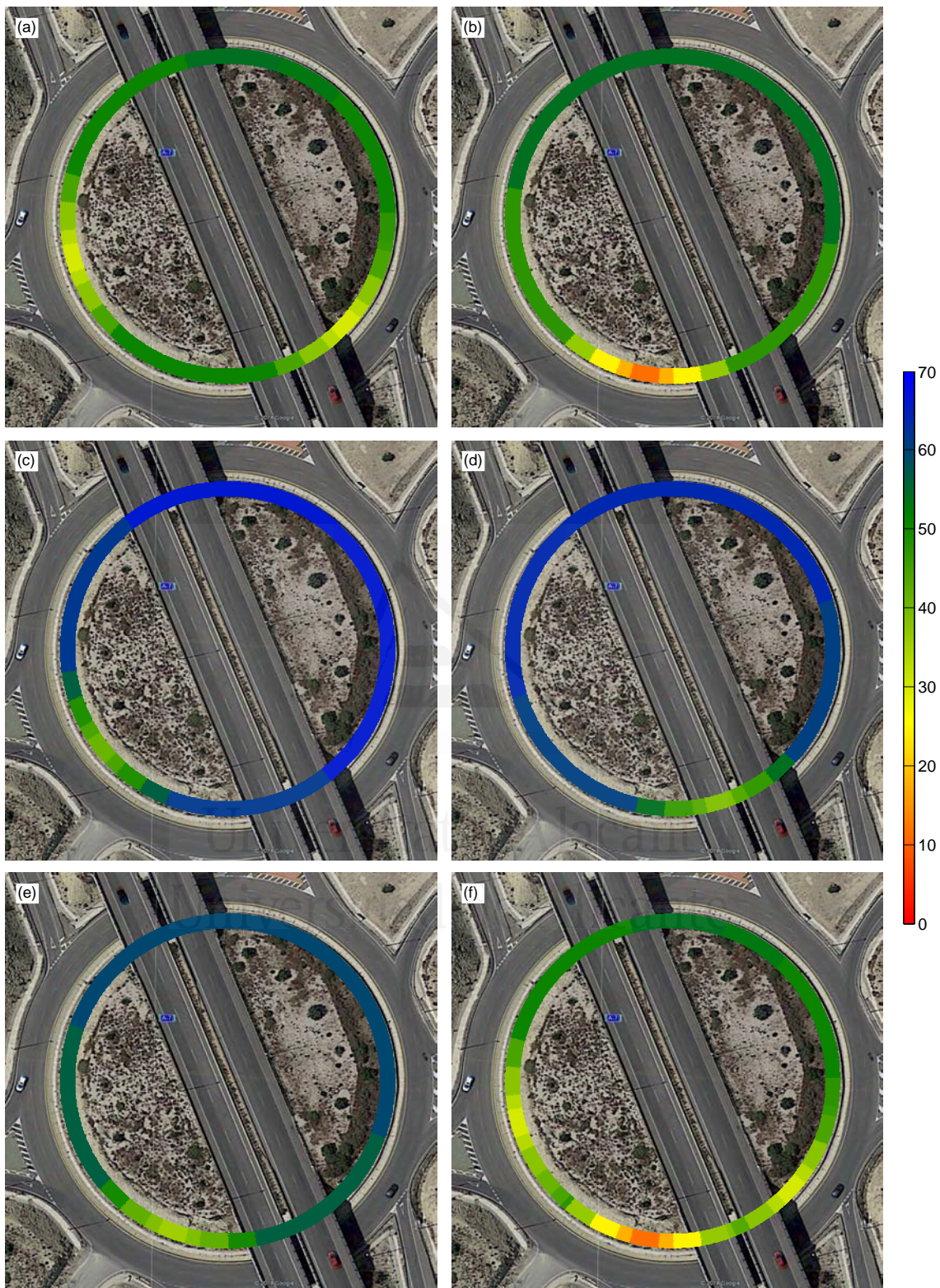


Figura 27. Línea de investigación 3, caso de estudio 3: ortofoto del talud excavado y superposición del índice SMR. (a) Envoltura del menor índice SMR asociado a la rotura de tipo cuña; (b) a (e) valores del índice SMR en cada punto del tronco de cono correspondientes al mecanismo de fallo plano o en vuelco para cada familia J_1 a J_4 respectivamente; (f) envoltura del menor valor del índice SMR para todos los mecanismos de fallo. Los valores varían entre 0 y 70.

“Para el optimista, el vaso está medio lleno. Para el pesimista, el vaso está medio vacío. Para el ingeniero, el vaso es el doble de grande de lo que debería ser”

4

Análisis y discusión de los resultados

4.1. Línea de investigación 1

4.1.1. Consideraciones acerca del *software* DSE

El objetivo de la primera línea de investigación consiste en desarrollar una metodología capaz de extraer familias de discontinuidades, sus planos. Concretamente, esta metodología persigue la clasificación de una nube de puntos no organizada, sin reconstruir la superficie mediante un modelo 3D.

En primer lugar, el método desarrollado evalúa la coplanaridad de cada punto con sus vecinos y, si se acepta que es coplanar, determina la orientación del conjunto. El establecimiento del número de familias, su identificación y la asignación de cada familia al punto correspondiente se realiza sin considerar la relación espacial entre puntos. En realidad, en esta fase del método los puntos no están agrupados según planos, sino que sencillamente han sido asignados a una familia. La inspección visual de la nube de puntos clasificada permite obtener una idea del grado de acierto obtenido, para continuar con la aplicación del método o modificar los parámetros y repetir el proceso. En cambio, el análisis *cluster* sí que analiza la relación espacial de los puntos y establece agrupaciones que pertenecen a una superficie razonablemente plana. Por lo tanto, los planos se determinan al final del proceso.

El primer paso del método es la búsqueda de los vecinos más cercanos a cada punto, con el fin de calcular el vector normal asociado a cada punto. Este proceso puede efectuarse

según dos puntos de vista: búsqueda de los knn de puntos más cercanos o determinando un radio de búsqueda. El método utiliza el mismo criterio de búsqueda para todo el sector estudiado, si bien es cierto que cabe la posibilidad de plantear el uso de una búsqueda de vecinos variando estos parámetros en función de la localización del punto. Otra posibilidad fácilmente incorporable al método es la carga directa de los vectores normales a partir de otro *software*, librerías de PCL (*Point Cloud Library* - <http://pointclouds.org>) o los datos del propio software utilizado para generar la nube de puntos (por ejemplo, Agisoft Photoscan o Leica Cyclone).

4.1.2. Calibración

El desarrollo, programación y aplicación del método a los casos de estudio planteados en la sección §2.3.2 permitió calibrar los parámetros que controlan el proceso de extracción de familias y clasificación de la nube de puntos. La calibración estableció el orden de magnitud de los parámetros, cuyos valores permiten obtener una primera aproximación a la solución. En dependencia de los resultados obtenidos se ajusta cada parámetro en función del problema estudiado.

El primer paso de la calibración consistió en establecer el valor adecuado del número de vecinos knn y la tolerancia máxima para el test de coplanaridad η_{max} . Este análisis se llevó a cabo mediante el estudio de varias superficies planas y sus nubes de puntos 3D adquiridas con un micro LiDAR modelo Konica Minolta Vivid 9i de la UNIL. Dependiendo del número de vecinos considerado se calculó el valor de η (ecuación 3). La figura 28 muestra los resultados de la calibración llevada a cabo, donde se detecta que:

- Si el número de vecinos es pequeño, el valor de η aumenta.
- Si el número de vecinos aumenta, el valor de η disminuye.
- El valor de η es superior en el caso de bordes o vértices que en el caso de superficies planas.

El establecimiento de valores adecuados de knn y de η_{max} permite eliminar parte de los puntos pertenecientes a bordes y vértices. El caso de estudio de las figuras geométricas adquiridas con micro LiDAR demostró que valores reducidos de knn introducían dispersión en el conjunto de punto-vecinos, mientras que si knn era elevado el conjunto era más plano. En efecto, consideremos un conjunto de puntos pertenecientes a una superficie plana tal que sus coordenadas tienen error debido a la técnica de adquisición. Un número pequeño de vecinos implica que los puntos más alejados al punto estudiado pueden estar a una distancia con un orden de magnitud similar a la que tendrían los puntos en un eje perpendicular al plano. Sin embargo, si el número de vecinos es mayor, los vecinos que se añaden al conjunto

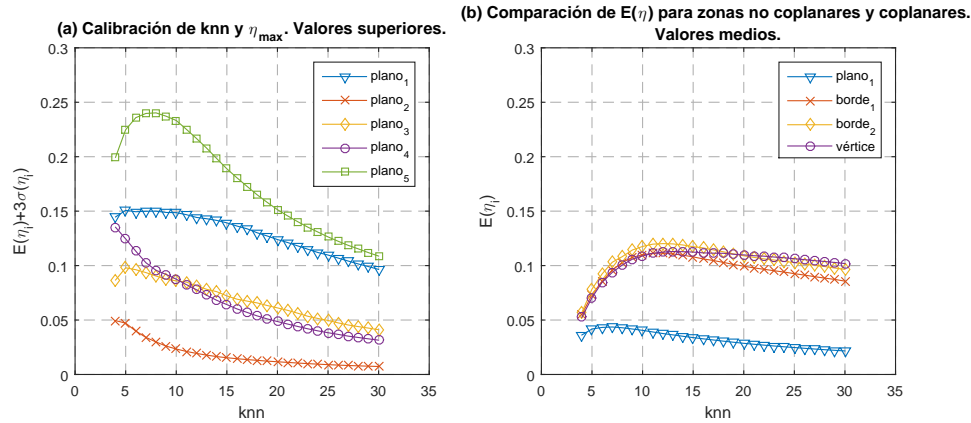


Figura 28. Calibración del número de vecinos knn y de la tolerancia η . (a) Comparación de los valores superiores para puntos de superficies planas; (b) comparación de valores medios para puntos de zonas no planas: bordes y vértices

mantienen el orden de magnitud del error pero se disponen más alejados del punto central, por lo que la dimensión perpendicular al plano pierde relevancia y el valor de η disminuye.

La elección acertada de knn y de η_{max} permite: (1) eliminar puntos que probablemente no pertenezcan a superficies planas; y (2) conseguir que los polos que pertenezcan a la misma superficie tengan orientaciones más próximas a la orientación principal y, por tanto, sean asignados a su familia correspondiente. A la vista de los resultados presentados se concluye que, como primera aproximación, valores de $knn = 15 - 30$ y $\eta_{max} = 20\%$ son razonables.

4.1.3. Análisis estadístico de la densidad de orientaciones y asignación de familias

El análisis estadístico se lleva a cabo mediante la densidad de polos de los vectores normales, calculada partiendo de que cada punto tiene un polo asociado representado en proyección estereográfica (figura 17 c). El cálculo de la densidad de polos depende de la cantidad de puntos con polos asociados, por lo que si hay muchos puntos con la misma orientación, la densidad de polos será elevada en cierta región de la falsilla estereográfica. Por este motivo, si el sector de estudio está formado por alguna familia cuyos planos afloran en grandes superficies (por ejemplo, planos de estratificación), habrá muchos puntos con un polo asociado en la misma zona. En este caso, el polo principal tendrá un valor de densidad muy elevado respecto al resto. Por lo tanto, en el método desarrollado la cantidad de puntos influye en la densidad de polos.

El caso habitual de una nube de puntos adquirida con un *3D laser scanner* a partir de varios estacionamientos es un ejemplo de cómo la cantidad de puntos puede afectar a la densidad de polos y a la detección de las familias de discontinuidades. Al superponer dos nubes de puntos correspondientes a distintos estacionamientos, los puntos de la misma superficie

se combinan y la distancia entre estos disminuye, con el consecuente aumento de densidad espacial de puntos. Sin embargo, esta densidad aumenta de forma diferente según la zona del sector: superficies perpendiculares a la visual tendrán mayor densidad y habrá mayor número de puntos, pero en zonas que no cumplan esa condición (como zonas de sombra o afectadas por la oblicuidad del láser) el aumento de la densidad será menor. Esta variación del número de puntos según la orientación puede dificultar el análisis estadístico: la densidad de polos sufrirá modificaciones. En consecuencia, ciertas orientaciones principales pueden llegar incluso a no ser detectables mediante el estudio de la densidad de polos. La solución a este problema consiste en realizar un filtrado de la nube de puntos registrada en el que se establece una distancia mínima entre puntos. Esto permite reducir el efecto anterior.

Efecto de la curvatura e irregularidad superficial

El análisis de los resultados demostró que el método es apto para su aplicación en nubes de puntos 3D cuya superficie se pueda definir por planos. No es de aplicación en superficies irregulares muy afectadas por la meteorización o cuya orientación tenga grandes variaciones en el sector estudiado. Los análisis llevados a cabo con taludes reales demuestran que el método ofrece resultados satisfactorios si el sector analizado cumple el requisito anterior y está formado por familias cuyas orientaciones tienen características suficientemente homogéneas. Sin embargo, la realidad es que las superficies de discontinuidades planas no forman planos perfectos, sino que presentan variaciones en la orientación superficial en el espacio. Esto pone de relieve la necesidad de dotar al método de cierto grado de libertad en el análisis de los vectores normales asociados a cada punto de la superficie. El método propuesto considera este grado de libertad mediante el ángulo máximo que forma el vector normal principal y el vector normal asociado al punto. Si este ángulo máximo es elevado, el método podría detectar y clasificar familias de discontinuidades con cierta curvatura (por ejemplo, estratos plegados). No obstante, la existencia de otras familias de discontinuidades con orientaciones similares permitiría que un vector normal asociado a un punto pudiese ser asociado simultáneamente a dos vectores normales principales. En este caso, el método asigna el punto al vector normal principal con el que menor ángulo forme.

Un ejemplo muy ilustrativo es el del análisis de un cilindro. Si su radio es suficientemente grande, los puntos de la superficie lateral y sus knn vecinos más cercanos pueden formar un conjunto de puntos cuya curvatura sea suficientemente pequeña como para ser aceptado como superficie plana (figura 29 f). Sin embargo, cada punto tendrá un vector normal asociado diferente según el punto de la superficie del cilindro. La aplicación del método tiene como resultado la sectorización de la superficie del cilindro (figura 29 d), siendo este proceso controlado por el ángulo mínimo entre vectores normales principales y el ángulo máximo utilizado para la asignación de un punto a un polo principal (figura 29 c). Este ejemplo pone

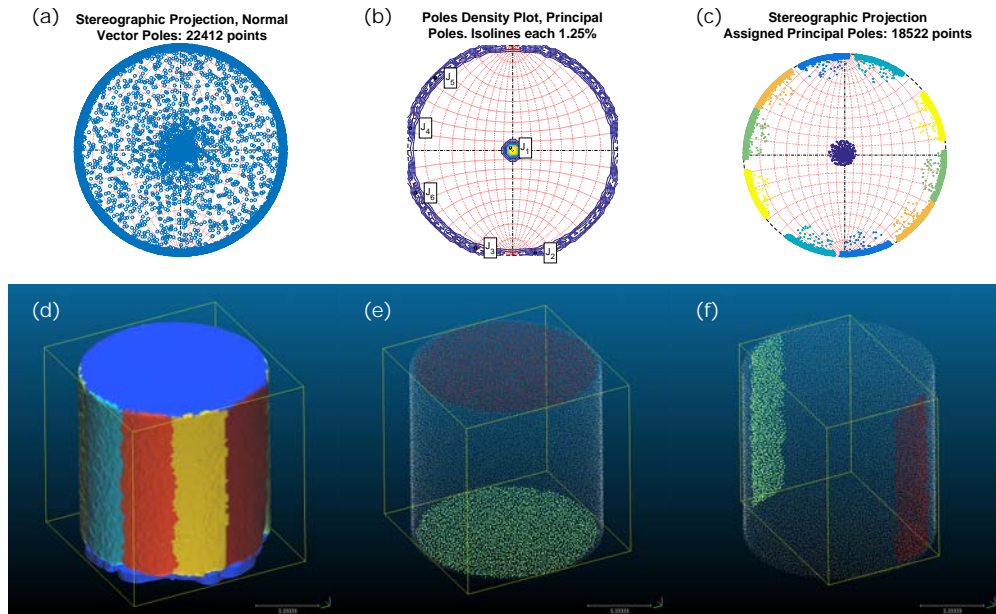


Figura 29. Efecto del ángulo máximo entre polo principal y polo asociado al punto, caso de un cilindro: (a) polos de los vectores normales; (b) densidad de polos y polos principales detectados automáticamente; (c) asignación de polos a familias; (d) nube de puntos clasificada por familias representada en un modelo 3D; (e) *clusters* de la primera familia; (f) *clusters* de la sexta familia, donde se observa que puntos de una superficie curva son clasificados como una familia plana.

de manifiesto la restricción del ámbito de aplicación del método a superficies relativamente planas.

Existencia de familias con vectores normales próximos

El establecimiento del número de vecinos juega un papel fundamental cuando las orientaciones de la superficie forman un ángulo reducido, como es el caso del icosaedro. Esta es una figura regular con 20 caras paralelas de dos en dos, luego tiene 10 familias de planos. La figura 30 muestra la extracción de las 10 familias de un icosaedro utilizando un número de vecinos knn igual a 10 y a 30 con una tolerancia máxima η_{max} igual a 0, 20. En ambos casos las familias se extraen satisfactoriamente, pero la clasificación de puntos no es correcta si el número de vecinos es de 10. Se observa en las figuras 30 e y f que la clasificación con 10 vecinos asigna familias a algunos puntos de forma incorrecta. Por el contrario, con 30 vecinos el resultado es satisfactorio. Esto se debe a que cuando el número de vecinos aumenta, la dispersión de los polos de los vectores normales asociados a los puntos se reduce (figura 30 a y b). En efecto, los polos se concentran alrededor del polo principal y su densidad aumenta notablemente. La posterior asignación de cada punto a un polo principal se realiza según el ángulo que forman sus vectores normales. Si la dispersión es tal que el polo del punto se encuentra cercano a otro polo principal cercano, se asignará a este incorrectamente.

Por este motivo, si existen familias con orientaciones cercanas es conveniente que knn sea suficientemente alto como para evitar este efecto.

4.1.4. Tamaño y definición de *clusters*

El análisis *cluster* permite determinar agrupaciones de puntos que, perteneciendo a una misma familia, forman parte de una misma superficie plana. Sin embargo, se han detectado casos en los que la detección de los *clusters* se lleva a cabo de forma incorrecta.

Cada *cluster* se define según las características de la superficie analizada y de su nube de puntos. Aquellos *clusters* que definen planos extensos muestran buena correspondencia con los identificados visualmente y se caracterizan por tener gran cantidad de puntos. Sin embargo, el análisis devuelve gran cantidad de *clusters* con un tamaño muy reducido. Estos *clusters* son producto de la aplicación del método DBSCAN y no aportan información a la clasificación, por lo que conviene que sean eliminados. Por este motivo, el *software* DSE cuenta con una herramienta específica que permite eliminar automáticamente todos los *clusters* con un número mínimo de puntos.

Por otro lado, cabe destacar que el resultado depende de la densidad de puntos. El método DBSCAN requiere la determinación de un radio de búsqueda, que se ha determinado a partir de la distribución distancia punto - vecinos de los puntos de cada familia. Para ello se ha tomado la distancia al cuarto vecino siguiendo recomendaciones de Ester et al. (1996). Sin embargo, se detectó que si dos planos adyacentes pero separados por un espaciado muy pequeño están definidos por una densidad de puntos insuficiente, el método los clasifica como uno sólo. Si la densidad es pequeña, el radio de búsqueda es mayor por lo que la búsqueda de *clusters* tiene menos precisión. Aquellos casos en los que, además de tener poca densidad de puntos, tienen una superficie cuyos planos sean de difícil delimitación visual son potencialmente problemáticos para su determinación de *clusters*.

La figura 31 muestra un claro ejemplo para este caso, en el que la roca es una pizarra. Estas rocas se caracterizan porque el espaciado entre discontinuidades es mucho menor al orden de magnitud de la superficie. Si la distancia entre puntos no es lo suficientemente pequeña como para que se detecte el salto entre planos, el análisis *cluster* podría considerar que dos planos diferentes son uno mismo. Además, la geometría de la superficie de la roca puede impedir la delimitación de cada *cluster*, dado que si en alguna zona se encuentran comunicados sin saltos con suficiente densidad de puntos, el algoritmo DBSCAN identifica los *clusters* como uno solo. En la figura 31 se observa la existencia de zonas en las que la superficie tiene un salto, por lo que parece razonable que esa sea una delimitación de la superficie plana. Sin embargo, la trayectoria marcada en rojo muestra un camino por el que el *cluster* puede crecer (siempre que la densidad de puntos sea suficiente) y toda la superficie

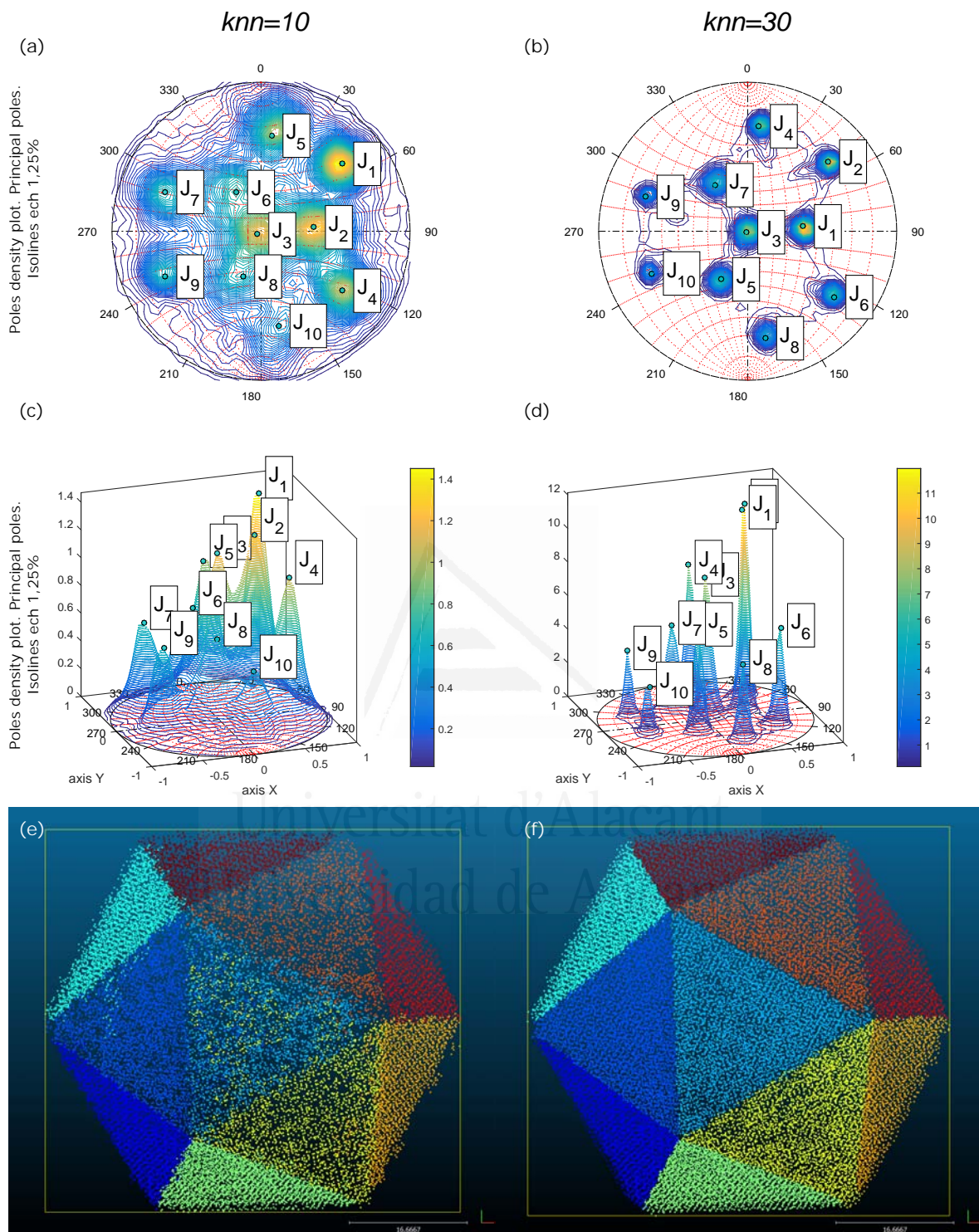


Figura 30. Efecto del número de vecinos en la clasificación de planos con orientaciones similares. (a) a (d) densidad de polos de vectores normales para $knn = 10$ y 30 , respectivamente; (e) y (f) puntos del icosaedro clasificado con un color por familias.

sería identificada como una sola. El método identificaría un único plano en ambos lados del salto y el plano tendría una definición errónea.

Este efecto supone un inconveniente para el estudio del espaciado entre discontinuidades en este tipo de rocas foliadas y en macizos rocosos en los que la densidad de puntos no sea suficiente como para detectar el espaciado entre discontinuidades..

4.1.5. Efecto de la presencia de vegetación en la aplicación del método

El tratamiento previo de la información como la eliminación de la vegetación o el filtrado para obtener densidades homogéneas son procesos que han permitido mejorar la calidad de la nube de puntos y clasificar con éxito los taludes analizados. La vegetación se dispone como puntos que no siguen el patrón espacial de los planos expuestos. Su eliminación previa al análisis puede llevarse a cabo mediante la aplicación de filtros desarrollados por otros investigadores como el filtro CANUPO (*CA*ractérisation de *NU*ages de *PO*ints) desarrollado por Brodu & Lague (2012). Este filtro permite la clasificación y posterior eliminación de los puntos a partir de un proceso de entrenamiento, testado satisfactoriamente con el *software* CloudCompare.

La existencia de vegetación introduce gran cantidad de puntos que no aportan información para la extracción de discontinuidades. La aplicación del método a varios casos de estudio demostró que este es capaz de clasificar nubes de puntos con presencia de vegetación con un grado de acierto satisfactorio. Sin embargo, los pasos intermedios de aplicación del método se ven afectados por su existencia. La figura 32 a muestra un ejemplo de clasificación de una nube de puntos con presencia de vegetación y la figura 32 b la clasificación de los puntos según sean roca o vegetación mediante la clasificación CANUPO. Las figuras 32 c y d muestran el resultado de clasificar la nube de puntos sin la previa eliminación de la vegetación y tras haber eliminado la vegetación respectivamente. Se observa que el resultado es prácticamente el mismo.

A pesar de que los resultados son prácticamente iguales existe una diferencia en el procesado de los datos. La figura 33 muestra la representación de los polos de los vectores normales asociados a cada punto en la nube de puntos completa, la vegetación y la roca. Se observa que la vegetación introduce una cantidad significativa de polos que no ofrecen información y su densidad de polos se presenta muy dispersa (en análisis de la vegetación se realizó con un valor de $\eta_{max} = 1$). Sin embargo, el análisis estadístico muestra que la densidad de polos ofrece valores muy similares en el caso de la nube de puntos completa y la filtrada, hasta el punto de que los polos principales extraídos son los mismos.

El análisis de las fases de cálculo del método de extracción de discontinuidades permite comprender cómo se eliminan los puntos de la vegetación y la similitud de los resultados. Los puntos pertenecientes a la vegetación se disponen según una estructura 3D mucho más

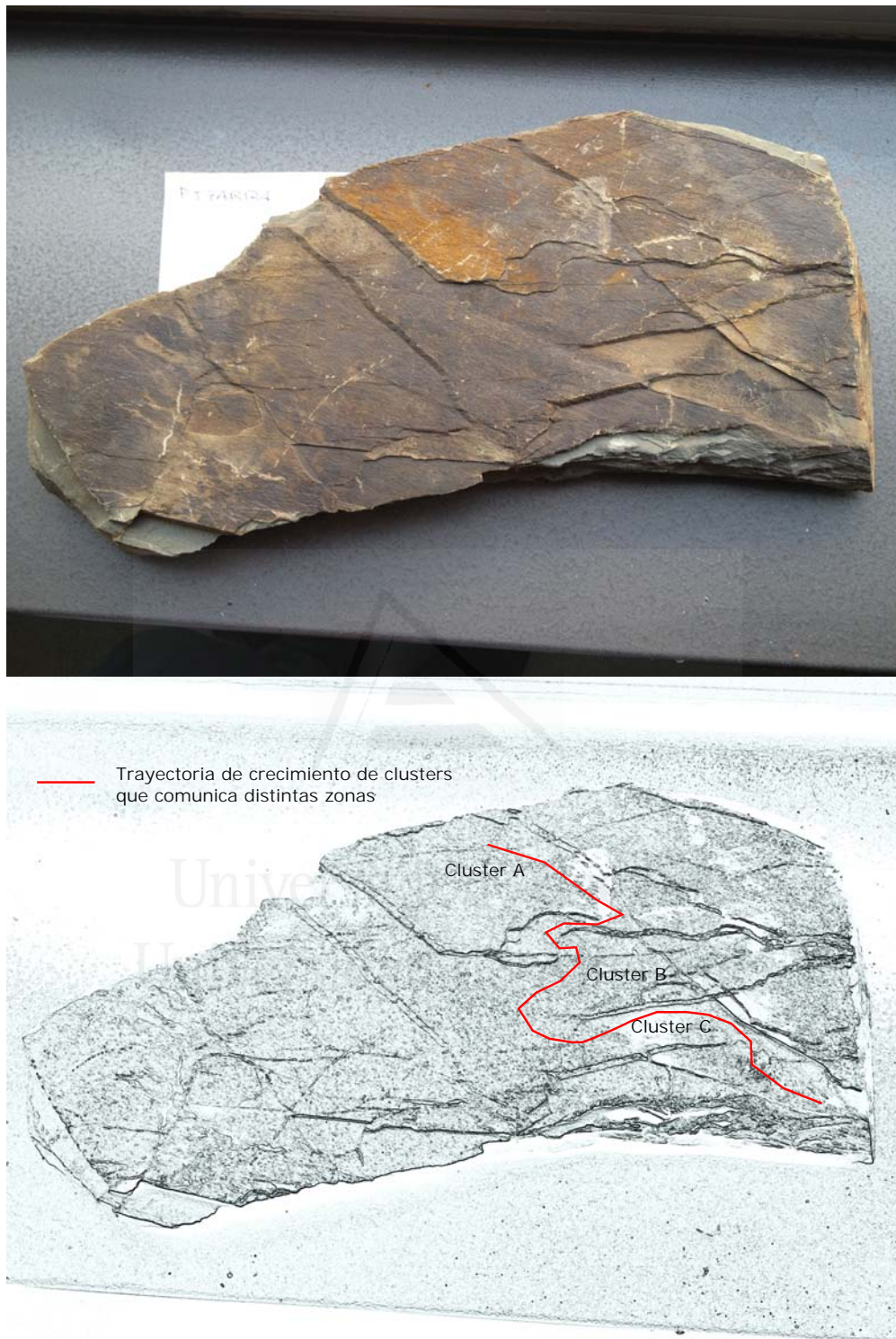


Figura 31. Identificación de *clusters* en una pizarra. Los *clusters* A, B y C se diferencian por saltos en la superficie pero se comunican siguiendo la trayectoria marcada en rojo. Autor de la fotografía: Ignacio Gisbert Sánchez.

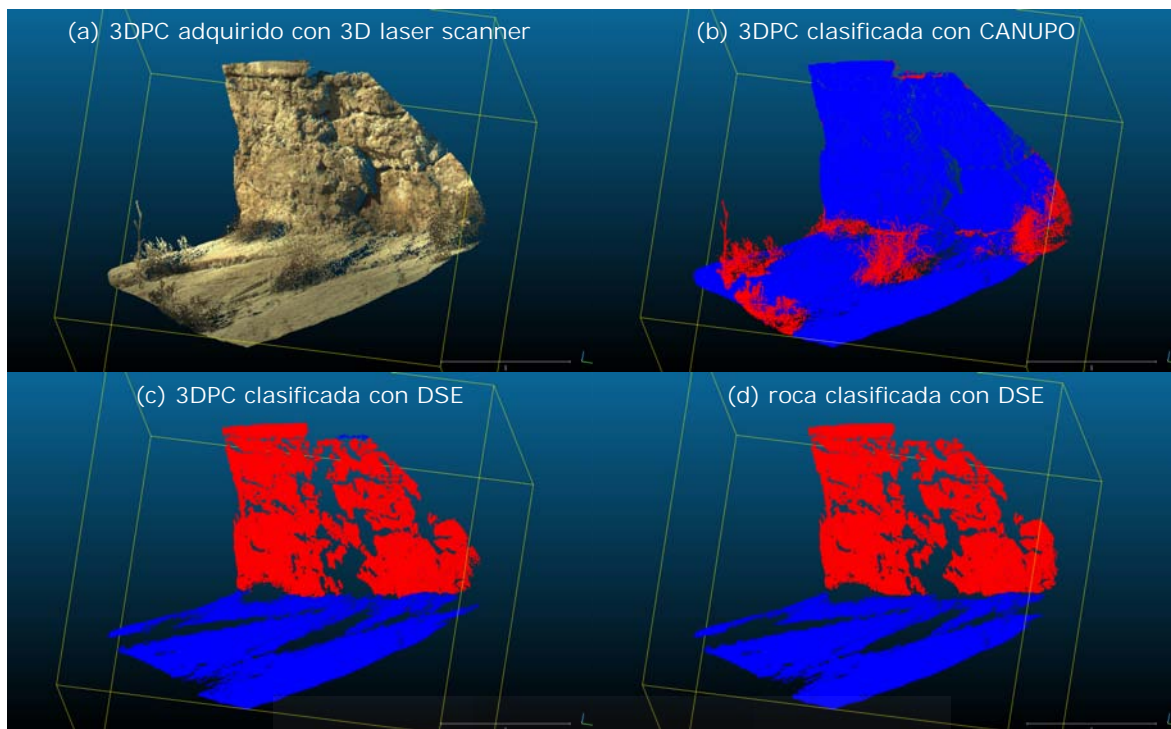


Figura 32. Clasificación de una nube de puntos con presencia de vegetación. Localización El Campello, Alicante, adquirida con un *3D laser scanner* modelo C10 de Leica. (a) sector analizado; (b) nube de puntos clasificada con CANUPO, azul roca y rojo vegetación; (c) nube de puntos sin filtrar clasificada con DSE; (d) puntos clasificados como roca con CANUPO y clasificada con DSE.

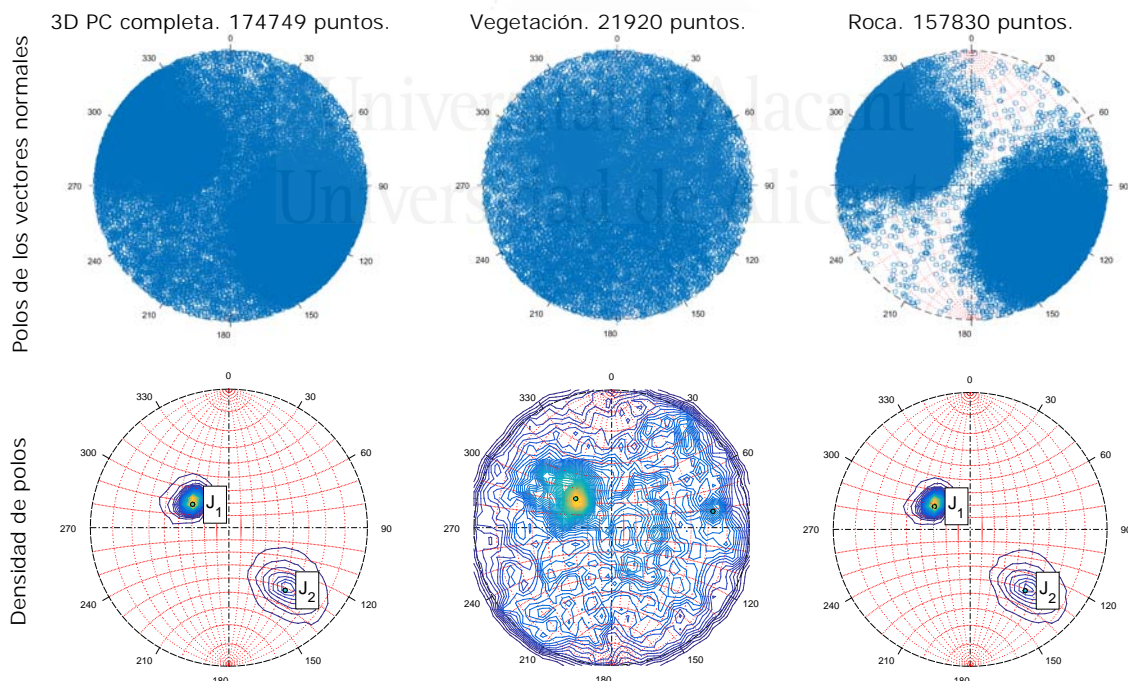


Figura 33. Clasificación de una nube de puntos con presencia de vegetación: representación de los polos y de la densidad de polos de los vectores normales asociados a cada punto. En ambos casos las orientaciones extraídas son: $J_1 : (122/34)$ y $J_1 : (318/62)$.

dispersa que los planos, por lo que el test de coplanaridad elimina parte de estos puntos. En segundo lugar, cada punto de la vegetación tiene un vector normal asociado que no sigue ningún patrón como los puntos pertenecientes a los planos. Aquellos polos cuyo ángulo con el polo principal sea superior a cierto valor definido por el usuario quedan descartados (figura 17 c y e y figura 29 a y c). Finalmente, el análisis *cluster* realiza un último filtrado: los puntos de la vegetación que hayan superado los requisitos anteriores deberán formar conjuntos y con un tamaño mínimo.

A pesar de que el método elimina parte de la vegetación, esta supone la presencia de puntos sin valor que serán procesados. Esto implica mayor consumo de recursos de la máquina y mayor tiempo de procesado. Además, la existencia de vegetación abundante puede introducir tal cantidad de ruido en la densidad de polos que los resultados no sean los adecuados. En consecuencia, es recomendable eliminar la vegetación en la medida de lo posible.

4.1.6. Aplicación a casos de estudio reales

La metodología ha sido aplicada a varios casos de estudio y superficies reales adquiridas con *3D laser scanner* y con la técnica SfM. Los resultados de las orientaciones de planos extraídas a partir de la nube de puntos se compararon con:

- las lecturas obtenidas con brújula en campo,
- las orientaciones extraídas mediante el ajuste de un plano por mínimos cuadrados,
- los resultados obtenidos y publicados por otros investigadores utilizando otras metodologías.

Se observó que las orientaciones extraídas con el método desarrollado son similares a las obtenidas con los otros tres métodos, encontrándose diferencias angulares entre los vectores normales de entre 0 y 10°. Esta diferencia es razonablemente admisible si se considera el error instrumental y las irregularidades que caracterizan a las discontinuidades planas de los macizos rocosos. Sin embargo, las líneas posteriores de investigación plantean la afección de las diferencias encontradas en los resultados obtenidos frente al cálculo de las clasificaciones geomecánicas, concretamente para los factores de ajuste del SMR.

El análisis de la nube de puntos de un talud rocoso viene condicionado por dos factores principalmente: (1) las características de la superficie y de las familias de discontinuidades expuestas y (2) la calidad de la nube de puntos. Las nubes de puntos con poca densidad dificultan la detección de aquellos planos expuestos por pequeñas superficies: su densidad podría ser insuficiente y la existencia en el mismo sector de otra orientación similar más representada motivaría que no se detectara. Este efecto se acentúa si además la orientación de la superficie es desfavorable. En este caso es conveniente realizar varios estacionamientos y registrarlos con el fin de aumentar la densidad de puntos de la zona siguiendo una adecuada

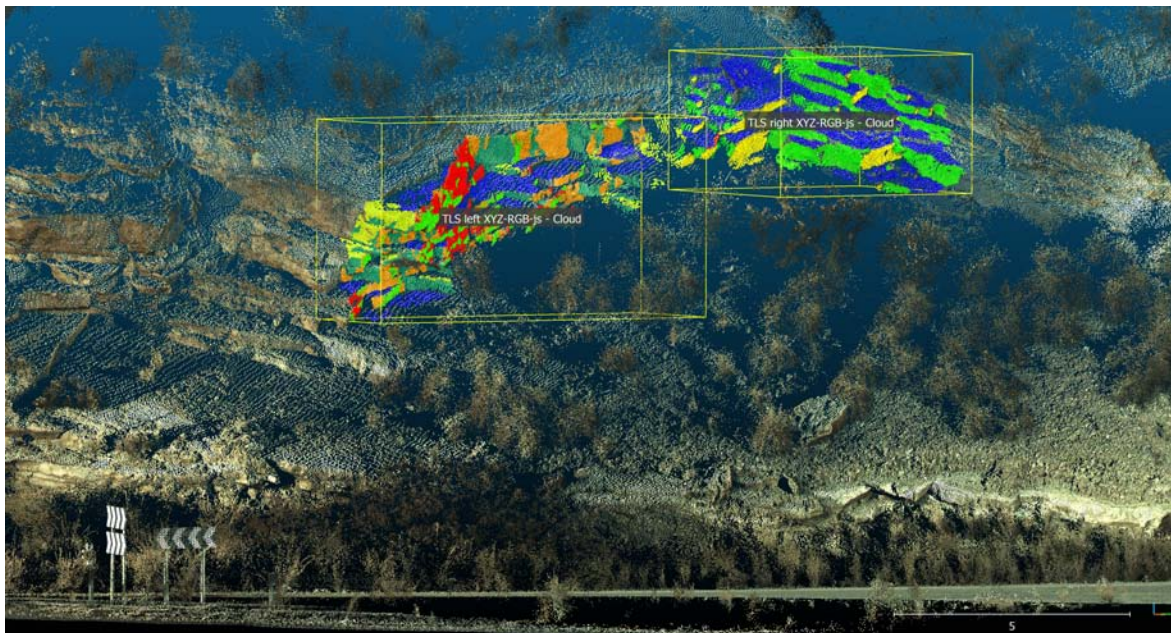


Figura 34. Sectorización de una superficie extensa para su análisis en subsectores con características homogéneas: caso de un talud en El Campello, Alicante (Riquelme et al., 2015).

planificación de la campaña. Sin embargo, si la superficie es inaccesible por su altura es necesario utilizar otras alternativas. Actualmente, el uso de cámaras digitales y vehículos no tripulados permiten tomar datos desde ubicaciones en altura. La combinación de los datos LiDAR con los obtenidos con fotogrametría digital ofrecen una solución muy interesante para este problema, puesto que los propios datos adquiridos con *3D laser scanner* ofrecen puntos de control para la aplicación del SfM.

Otro aspecto determinante para obtener resultados satisfactorios en la aplicación del método es la sectorización de las zonas a estudiar. Un frente puede estar afectado por los varios juegos de discontinuidades con características homogéneas, como el caso de estudio de la escalera de hormigón presentado anteriormente (figura 21). Este caso tiene tres familias con orientaciones ortogonales entre sí y la clasificación se realiza en condiciones óptimas. Sin embargo, la realidad de los taludes rocosos puede ser mucho más compleja. Si las orientaciones de las discontinuidades presentan gran variación en el sector estudiado el usuario puede intentar solucionar este problema estableciendo un ángulo de asignación familia-punto elevado así como un número de vecinos mayor, pero aún así la clasificación puede no efectuarse correctamente. Cuando la superficie tiene discontinuidades con características heterogéneas, el efecto anterior se reduce al sectorizar en zonas donde las familias tengan pequeñas variaciones en su orientación (figura 34) y buscando la mayor convergencia posible en la orientación vector normal asociado al punto con el de la familia extraída.

En algunos casos de estudio de taludes reales, la aplicación del método mostró más juegos de discontinuidades que las detectadas durante el trabajo de campo. En ciertos casos se

comprobó que, en efecto, la familia que el método proponía existía pero no había sido detectada. Esto se debió a que la visualización del talud en campo permite identificar familias de discontinuidades si el usuario detecta un patrón de planos o trazas en el frente del talud, pero si estas afloran en superficies pequeñas muy separadas, su detección puede ser mucho más compleja. La aplicación del método a la nube de puntos 3D ofrece información de la frecuencia con la que una orientación se repite en toda la superficie, por lo que el proceso de detección es más objetivo. Sin embargo, en otros casos la familia detectada con el método no era tal sino una superficie producto de la meteorización de la roca. En realidad, el método desconoce si la orientación que se repite realmente pertenece a una familia de discontinuidades o no. Por este motivo, los polos principales que se detectan pueden pertenecer a:

- Familia de discontinuidades que realmente existe y se ha detectado en campo
- Familia de discontinuidades que realmente existe y no se ha detectado en campo
- Superficie de la roca de cualquier origen (por ejemplo, meteorización o voladura) cuya orientación tiene relevancia estadística respecto al resto

4.1.7. **Ámbito de aplicación del método**

El método es de aplicación en superficies de taludes rocosos con características homogéneas y cuyas discontinuidades están expuestas según superficies planas. El desarrollo del *software* y su aplicación a múltiples casos de estudio permiten establecer las siguientes recomendaciones de uso:

- Antes de aplicar el método de extracción de discontinuidades es necesario identificar visualmente si la superficie a analizar tiene planos expuestos según familias planas. En caso contrario no es recomendable su aplicación.
- La calidad de la nube de puntos es fundamental para obtener resultados satisfactorios. Por tanto, es importante planificar adecuadamente la campaña de adquisición de datos tanto si la nube de puntos se adquiere con *3D laser scanner* como con SfM, evitando tanto las zonas de sombra como el efecto sesgo (Terzaghi, 1965; Lato et al., 2010).
- Además de la calidad, la cantidad de puntos condiciona los resultados. Es recomendable adquirir la nube de puntos con suficiente densidad y posteriormente realizar un muestreo (*subsample*) para conseguir una distancia entre puntos mínima. Para un sector de un talud rocoso de 5x5 metros un orden de magnitud adecuado sería 1 centímetro entre puntos. Este valor debe de utilizarse como una recomendación, pues el valor adecuado depende de la litología de la roca y de las características de la superficie:

podría ser necesario menor espaciado o, por el contrario, un espaciado mayor podría proporcionar resultados satisfactorios.

- Eliminar los datos de la nube de puntos correspondientes a la vegetación y zonas sin interés, como suelo, superficies meteorizadas, etc.
- Identificar sectores con características de las familias de discontinuidades homogéneas y sectorizar la nube de puntos. De esta forma el posterior análisis no se verá afectado por la heterogeneidad de las características.
- Procesar los sectores con el test de coplanaridad usando valores de $knn = 20 - 30$ y tolerancia=20 %.
- Efectuar el análisis estadístico y visualizar la función de densidad. Si se detecta algún polo principal que sature la información de otras familias, hay que plantear sectorizar y revisar la distancia entre puntos. Igualmente se considerará la idoneidad del número de vecinos utilizado. A partir de esta información, se asignarán los polos principales según la función de densidad.
- Asignar los polos principales a cada punto con un valor de ángulo máximo adecuado. Esto permitirá exportar la nube de puntos clasificada e inspeccionarla visualmente para su validación.
- Efectuar el análisis *cluster* y eliminar aquellos clusters con un tamaño inferior al límite que se considere oportuno.
- Exportar los resultados y visualizar la clasificación.

4.2. Línea de investigación 2

4.2.1. Consideraciones del método

La metodología propuesta tiene como objetivo la determinación del espaciado normal entre las superficies planas a partir del uso de nubes de puntos 3D, y se ha descrito en la sección §3.2.

El enfoque elegido para la determinación del espaciado normal consiste en el uso de la información geométrica existente en las nubes de puntos. Partiendo de que la nube está clasificada, cada punto tiene asignada una familia de discontinuidades y un *cluster* con su ecuación algebraica. El método está basado en las relaciones geométricas entre los puntos, por lo que no se tienen en cuenta los valores de color del punto ni la intensidad registrada. Por tanto, no consideran las trazas de la superficie. Esta información podría ser realmente

útil, pero queda fuera de la premisa inicial de considerar únicamente las coordenadas XYZ de los puntos.

4.2.2. Discusión de resultados

Los casos de estudio de taludes reales se analizaron con la metodología propuesta y se compararon con los resultados utilizando los datos obtenidos en campo. La comparación de los resultados obtenidos con el método de cálculo de espaciados propuesto y los obtenidos con el trabajo de campo tradicional mostró que su orden de magnitud era similar en la mayoría de los casos. Sin embargo, en determinados casos el resultado del espaciado normal fue menor. Esta diferencia se debe a que la metodología considera todos los clusters por pequeños que sean, siempre que se cumplan las condiciones del método de extracción de discontinuidades (coplanaridad, ángulos entre vectores normales y mínimo número de puntos por *cluster*). Sin embargo, el trabajo de campo tiene una clara componente subjetiva: el operador debe localizar todas las superficies con orientaciones tales que pertenezcan a la familia en cuestión, para a continuación decidir si las utiliza para medir el espaciado. Acto seguido debe identificar cuál es la siguiente superficie con la que debe medir, orientar la cinta de medición y medir el espaciado. Las condiciones de trabajo en campo pueden ser adversas, peligrosas o incluso imposibles, por lo que este proceso podría llevarse a cabo de manera incompleta y/o sin el suficiente rigor. En efecto, el operador únicamente tomará lecturas en aquellas zonas que sean alcanzables físicamente bajo condiciones de seguridad, mientras que la metodología propuesta considera toda la superficie si está correctamente representada en la nube de puntos. No obstante, puede darse el caso contrario. Un operador experimentado puede juzgar si una superficie, con una orientación igual que la de la familia que ha detectado, es realmente un plano expuesto de la discontinuidad y debe ser considerada o no. En este sentido, los métodos presentados utilizan únicamente la geometría y no incorporan la experiencia del operador. Es por tanto necesario que la nube de puntos esté previamente tratada con el criterio de un técnico competente.

4.2.3. Ámbito de aplicación del método y recomendaciones de uso

El ámbito de aplicación del método desarrollado está constituido por aquellos taludes rocoso en los que las discontinuidades son planas y tienen una orientación similar en el sector estudiado. El método no debe ser aplicado en los siguientes casos:

1. Superficies altamente meteorizadas en las que la superficie plana haya dejado de serlo.
2. En superficies subhorizontales cubiertas de derrubios procedentes del propio talud.
3. Superficies planas extensas con cierta curvatura y espaciados con órdenes de magnitud iguales o menores que el error medio definido por la distancia punto-plano del cluster.

4. Taludes rocosos sometido a estados tensionales tales que las discontinuidades tengan orientaciones diferentes en distintos puntos del sector estudiado (salvo que esté adecuadamente sectorizado).

4.2.4. Automatización

El método de cálculo de espaciados contempla que se parte de una nube de puntos 3D clasificada. Los métodos existentes de extracción de familias de discontinuidades y clasificación de la nube de puntos requieren la supervisión del usuario en mayor o menor medida, tal y como se desarrolló en la sección §1.1.4. El *software* DSE, siguiendo la metodología anteriormente presentada, también requiere la interacción del usuario. Sin embargo, la metodología propuesta para el cálculo de espaciados normales no requiere interacción alguna por parte del usuario, como puede ser observado en el algoritmo 1.

Se parte de la premisa de que la nube de puntos está correctamente clasificada, por lo que todos los *clusters* de una familia representan un afloramiento plano pueden medir el espaciado existente con otra discontinuidad. La determinación de la relación entre *clusters* para pedir el espaciado es obvia en el caso de persistencia infinita. Sin embargo, en el caso de persistencia infinita la relación no es tan directa por lo que se asume que cada espaciado se debe medir para dos *clusters* que estén próximos. De esta forma, la búsqueda de relaciones entre *clusters* se realiza de forma automática mediante la búsqueda de pares de puntos cercanos.

4.3. Línea de investigación 3

La tercera línea de investigación se centra en análisis de la viabilidad de la evaluación de la calidad de taludes rocosos mediante la clasificación geomecánica *Slope Mass Rating* a través del uso de nubes de puntos 3D.

4.3.1. Comparación entre origen de datos y método de extracción de discontinuidades

El primer caso de estudio analizó un talud rocoso previamente estudiado por otros investigadores (Lato & Vöge, 2012). Mediante los resultados obtenidos al aplicar las diferentes fuentes de datos y metodologías de obtención de orientaciones se calcularon los factores de la clasificación geomecánica *Slope Mass Rating*, dependientes de las relaciones geométricas existentes entre el talud y las discontinuidades (es decir, F_1 , F_2 y F_3).

Los resultados obtenidos muestran que, dependiendo de la fuente de datos y/o de la metodología de análisis empleada, en algunos casos el valor del SMR varía significativamente y en otros, no. El análisis en detalle de los resultados indica que, a pesar de que la misma

familia se identifica con éxito y que sus vectores normales forman un ángulo menor a 10° , el término $F_1 \times F_2 \times F_3$ presenta valores de -4 para un caso y de -25 para otro. Esta diferencia varía una clase en la clasificación geomecánica SMR, evidenciando la relevancia de este efecto. Los factores de ajuste se calcularon mediante la formulación discreta de Romana (tabla 5), pero al utilizar las funciones continuas (Tomás et al., 2007) el término anterior se redujo a -2 y -19 . A pesar de la atenuación del efecto, la diferencia en el SMR sigue siendo significativa.

El segundo caso de estudio comparó los resultados de calcular el SMR aplicando el *software* DSE a nubes de puntos 3D adquiridas con *3D laser scanner* y SfM, así como con datos obtenidos en campo mediante brújula. Los resultados obtenidos con *3D laser scanner* mostraron buena correlación con los derivados de los datos de campo. Por otro lado, se observó diferencia con los resultados derivados de la nube de puntos adquirida con SfM. No obstante, no se debe concluir de este resultado que el uso de la técnica SfM dé malos resultados con el cálculo del índice SMR, pero sí que la calidad de la nube de puntos puede afectar a la evaluación de la estabilidad del talud.

El análisis detallado de las familias extraídas y los ángulos auxiliares del índice SMR determinaron que, en algunos casos, pequeñas variaciones angulares en la orientación de la familia genera variaciones considerables en el índice SMR. Los planos subhorizontales presentaron diferencias en el índice SMR por dos motivos:

1. Las fotografías digitales se adquirieron con una visual horizontal desde el nivel del suelo, por lo que la precisión de los puntos obtenidos con SfM era menor que con el *3D laser scanner*. Se observó que la dirección de los planos horizontales mostraban una variación considerable. En efecto, los planos subhorizontales tienen mayor precisión en la definición del buzamiento que en la de la dirección. El factor F_1 se define por el ángulo auxiliar A según las direcciones de los planos, por lo que si la dirección del plano es poco precisa, la variación en el factor de ajuste puede ser relevante.
2. Las superficies subhorizontales estaban cubiertas de fragmentos de roca procedentes del propio talud. El material formaba una superficie plana a gran escala, pero con gran irregularidad a menor escala. Esto introducía error en el cálculo del vector normal, lo que afectó a su definición.

El análisis del sector pone en relieve la importancia de tomar un número elevado de lecturas de orientaciones de planos. Este caso de estudio evidencia que, como es bien sabido, cuando el número de lecturas en campo es reducido la incertidumbre en la determinación de las orientaciones de las discontinuidades crece. En efecto, la discontinuidad J_4 pudo extraerse con los datos 3D debido a la elevada cantidad de puntos obtenida, pero las características del talud impedían tomar más lecturas bajo condiciones de seguridad suficientes. Los resulta-

dos muestran que la dirección de buzamiento obtenida con brújula difería 20° con la obtenida con las dos fuentes de datos 3D.

4.3.2. Cálculo del índice SMR a partir de 3DPC

El tercer caso de estudio evalúa la calidad de un talud rocoso en todos los puntos de la superficie de un talud a partir de la información previamente extraída con las nubes de puntos 3D. La evaluación de la calidad se llevó a cabo mediante el uso de las clasificaciones geomecánicas. A pesar de la diversidad de clasificaciones geomecánicas existentes, previamente presentadas en la sección §1.1.2, se optó por utilizar el índice SMR debido a su sencillez y a su enorme grado de aceptación.

El talud a evaluar se modelizó mediante una superficie troncocónica de una glorieta excavada en desmonte. Uno de los principales intereses de este caso de estudio consiste en que, dependiendo del punto considerado de la superficie del talud, su orientación será diferente. De esta forma, a pesar de considerar que las características del macizo rocoso son homogéneas en cualquier punto, los posibles mecanismos de fallo serán diferentes y la probabilidad de ocurrencia también. Por lo tanto, cada punto situado en el espacio tendrá una serie de características, y por tanto se podrán cartografiar.

El objetivo consistía en asignar a cada punto el valor del índice SMR. Para ello, es necesario conocer el valor del índice RMR_b de cada familia y por tanto las características tanto de la matriz rocosa como de sus discontinuidades. La tabla 2 muestra los parámetros para el cálculo del índice RMR_b y sus posibles fuentes de información. Algunos de estos parámetros presentan la posibilidad de abordar su cálculo mediante nubes de puntos 3D, como la rugosidad, persistencia y espaciado normal. Sin embargo, las técnicas existentes de cálculo de la rugosidad a partir de nubes de puntos 3D todavía requieren mayor desarrollo. A pesar de que el espaciado normal es uno de los avances mostrados en esta tesis, se optó por no considerar su aplicación junto a la rugosidad y persistencia y utilizar únicamente la información geométrica obtenida de las familias.

Los resultados presentados en la sección §3.3.3 muestran cómo para cada punto de la superficie del talud se ha determinado un valor correspondiente al índice SMR. Este valor es diferente para cada familia o cuña y para cada punto, como se muestra en la figura 27. Se observa cómo el valor del SMR varía dependiendo del punto en el que se sitúe en la excavación, pues el parámetro que varía es el de la orientación del talud. La envolvente de todas las familias y cuñas permite determinar la localización del punto con mayor probabilidad de fallo, en este caso al sur de la excavación (figura 35). Se observa que en la orientación (190/50) del talud excavado, junto al estribo situado al sur de la glorieta, se produjo una rotura plana según el plano (182/36), cuyo vector normal forma 10° con el del plano de estratificación detectado (190/45).

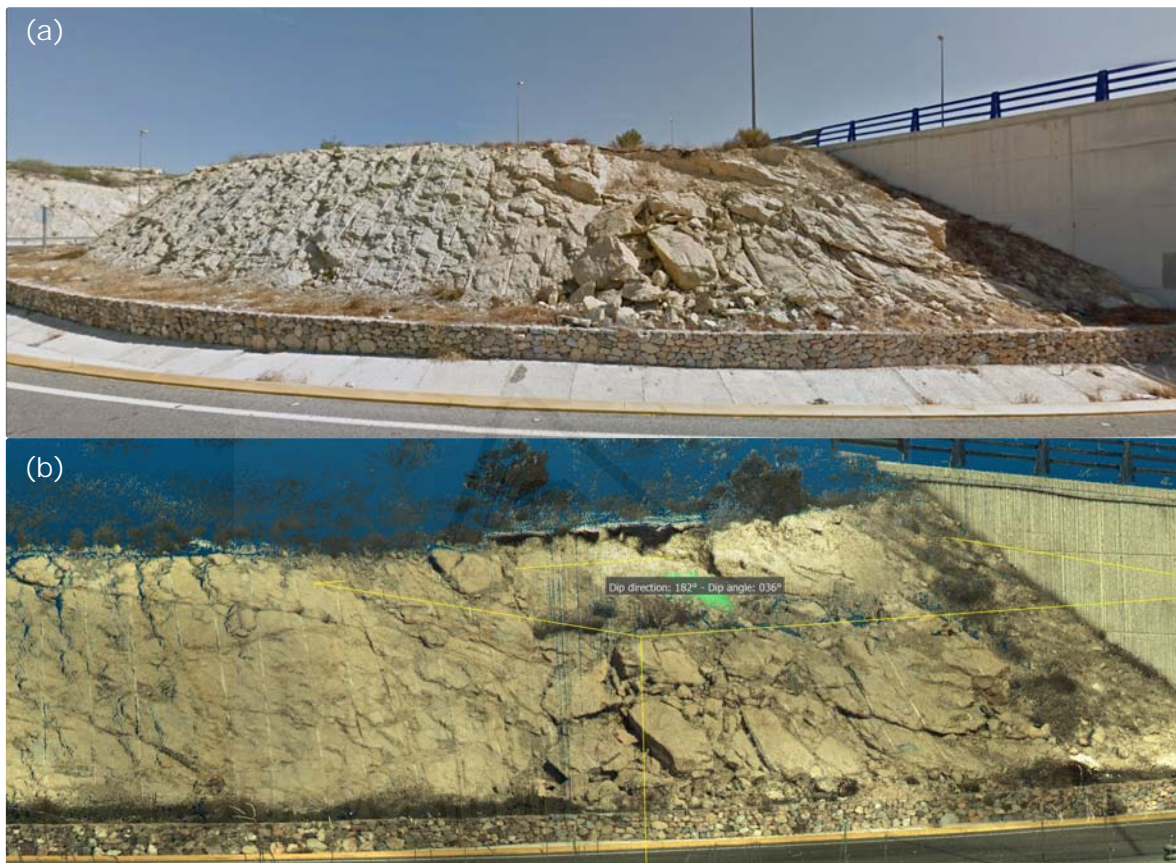


Figura 35. Línea de investigación 3, caso de estudio 3. Identificación del modo de fallo. (a) Imagen del talud excavado en la glorieta donde se observa que junto al estribo sur se produjo una rotura plana, fuente: Google Street View, imagen tomada en junio de 2012; (b) nube de puntos 3D del talud adquirida con un *3D laser scanner* C10 de Leica en noviembre de 2014, la superficie de deslizamiento medida es (182/36) y se obtiene con un ajuste por mínimos cuadrados con CloudCompare.

4.3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 3

El análisis llevado a cabo en este caso de estudio se realizó en un talud excavado, pero es igualmente válido para la fase de anteproyecto de taludes excavados en roca. Igualmente, el presente análisis considera que cada punto de la superficie tiene todas las características de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso, variando únicamente la orientación del talud. Sin embargo, es posible mantener constante la orientación del talud y tomar el vector normal del punto, la familia a la que corresponde y las características del macizo rocoso. De esta forma, para cada punto de la superficie se podría calcular un valor del índice SMR.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

“(..) Y para el investigador no existe alegría comparable a la de un descubrimiento, por pequeño que sea...”

Alexander Fleming

5

Conclusiones

La presente tesis se centra en el uso de las nubes de puntos 3D adquiridos a partir de taludes rocosos y su aplicación a la Mecánica de Rocas. En este capítulo se describen las conclusiones específicas, así como las conclusiones globales según los objetivos planteados en la sección §1.3.

5.1. Conclusiones específicas

5.1.1. Conclusiones específicas de la primera línea de investigación

El objetivo específico de la primera línea de investigación consiste en la detección de familias de discontinuidades planas y la localización espacial de las superficies. Para la consecución de este objetivo se desarrolla una metodología capaz de extraer familias de discontinuidades e identificar sus planos en el espacio a partir de nubes de puntos 3D. El método se valida: (1) mediante su aplicación a nubes de puntos 3D adquiridas con *3D laser scanner* y (2) generadas sintéticamente.

El método desarrollado permite identificar las orientaciones locales en cada punto tras someterlo a un test de coplanaridad. El conjunto de vectores normales permite llevar a cabo un análisis estadístico, determinando la relevancia de ciertas orientaciones. El usuario acepta, rechaza o modifica las orientaciones de las familias de discontinuidades planas, logrando uno de los objetivos específicos de esta línea de investigación.

La asignación de una familia y su orientación a cada punto supone una primera clasificación, que el usuario puede supervisar. La determinación y localización de superficies planas se realiza mediante un análisis *cluster* que determina los conjuntos de puntos que, perteneciendo a la misma familia, se disponen con cierta continuidad en el espacio. Estos conjuntos forman parte de los planos y mediante un ajuste por mínimos cuadrados se determina la ecuación algebraica de cada plano.

El desarrollo del método se realizó junto con la programación del *software Discontinuity Set Extractor* (DSE). El *software* forma parte de un proyecto de código abierto bajo licencia GNU GPL y el código se encuentra disponible en la web <http://personal.ua.es/es/ariquelme>, siendo por tanto accesible, ejecutable y modificable. Esto abre la puerta a que otros investigadores utilicen el trabajo realizado para continuar sus investigaciones y aplicar el conocimiento generado en otras líneas de investigación.

5.1.2. Conclusiones específicas de la segunda línea de investigación

El segundo objetivo específico consiste en el cálculo del espaciado normal de familia a partir de la nube de puntos clasificada, resultado de la primera línea de investigación. Para ello, se desarrolla una metodología de análisis que se valida mediante casos de estudio con nubes de puntos 3D adquiridas con: (1) técnicas de adquisición remota y (2) generadas sintéticamente.

El método consiste en considerar una nube de puntos 3D previamente clasificada en la que se conoce la ecuación algebraica de cada plano. A partir del establecimiento de determinadas condiciones, se desarrolla un algoritmo que determina las relaciones espaciales entre planos y calcula su espaciado normal de familia correspondiente. El espaciado normal de familia se calcula como el valor medio de todos los espaciados calculados para esa misma familia.

Los casos de estudio indican que los resultados son muy satisfactorios en casos sencillos, donde la familia tiene pocos planos pero extensos y bien definidos. Los casos complejos, donde hay planos que tienen la orientación de la familia pero es difícil determinar si realmente es una discontinuidad, también muestran una buena correlación con los datos de campo. El análisis de los resultados evidencia la necesidad de disponer de una nube de puntos clasificada con buena calidad para que los resultados sean acordes a la realidad. Sin embargo, también muestra el enorme potencial del cálculo automatizado de espaciados a partir de las relaciones entre planos.

A la vista de los resultados, se concluye que se ha alcanzado el objetivo específico establecido en esta segunda línea de investigación, el cual aporta información de un parámetro de gran relevancia en la evaluación de la calidad del macizo rocoso.

5.1.3. Conclusiones específicas de la tercera línea de investigación

El objetivo específico de la tercera línea de investigación es el de obtener los factores de ajuste del índice SMR a partir del uso de nubes de puntos 3D. Para ello, se emplearon nubes de puntos 3D adquiridas con: (1) *3D laser scanner*, (2) SfM y (3) datos obtenidos en campo. Las nubes de puntos 3D se estudiaron mediante el *software* PlaneDetect, desarrollado por otros investigadores, y el DSE, desarrollado en la primera línea de investigación de esta tesis.

El uso de nubes de puntos 3D para la determinación de orientaciones de planos ofrece resultados objetivos y asemejables a la realidad. Sin embargo, el uso de datos adquiridos con distintas técnicas y/o distintas metodologías causa la existencia de variaciones en los vectores normales que pueden producir que el índice SMR varíe en una clase. Por lo tanto, un talud podría ser clasificado de forma diferente dependiendo de los datos y metodología utilizada.

5.2. Conclusiones globales

El objetivo general consiste en desarrollar metodologías que permitan el reconocimiento, caracterización de discontinuidades y la aplicación de clasificaciones geomecánicas a la extracción de información de las nubes de puntos y su aplicación a la evaluación de la calidad geomecánica de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D.

La consecución del objetivo global pasa por la consecución de tres objetivos específicos. Estos objetivos han sido logrados según las conclusiones anteriormente expuestas.

La presente tesis doctoral describe una metodología de análisis de nubes de puntos 3D capaz de identificar familias de discontinuidades, localizar planos en el espacio y clasificar la nube de puntos. El conocimiento de las familias de discontinuidades ya supone de por sí un avance muy importante hacia la consecución del objetivo global, pues las familias de discontinuidades son el dato fundamental para evaluar la calidad del macizo rocoso. Los resultados de esta primera línea de investigación proporcionan la información necesaria para el desarrollo de la segunda y tercera línea de investigación.

La segunda línea de investigación parte de la localización de los planos de las familias extraídas en la primera línea. Con esa información se desarrolla una metodología que permite calcular el espaciado normal de las diferentes familias de discontinuidades de manera automatizada. Este resultado supone otro avance de gran relevancia hacia el conocimiento de la calidad del macizo.

La tercera línea de investigación se desarrolló simultáneamente con la segunda. A partir de las orientaciones de las familias de discontinuidades y de la orientación del talud, extraídas de la nube de puntos 3D, se analiza su aplicación al cálculo del índice SMR. El uso de

distintas fuentes de información y metodologías de análisis de las nubes de puntos permite comparar y analizar las diferencias obtenidas en los factores de ajuste del índice SMR.

Las tres líneas de investigación presentan un importante avance científico en el ámbito de uso de nubes de puntos 3D y su aplicación a la Mecánica de Rocas. La metodología de obtención de información de las familias de discontinuidades proporciona resultados muy satisfactorios. Además, no sólo se presenta detalladamente, sino que el código fuente de la programación del *software* utilizado se ofrece de forma totalmente abierta. Esto posibilita continuar con el desarrollo de aplicaciones a cualquier estudiante o investigador interesado en este campo o incluso a profesionales que quieran aplicar la metodología. La metodología presentada para el cálculo de espaciados normales mediante nubes de puntos 3D previamente clasificadas supone otra aportación novedosa a la comunidad científica. El uso de esta metodología permite la obtención de información muy valiosa para la evaluación de la calidad del macizo rocoso: (1) sin necesidad de acceder físicamente al emplazamiento y (2) de manera automática y con absoluta transparencia en sus cálculos. Al igual que la primera línea de investigación, los resultados son públicos y el *software* programado se ofrece mediante su código fuente. La tercera línea analiza el uso de las nubes de puntos para la evaluación de la calidad geomecánica de un talud rocoso mediante la clasificación geomecánica SMR. Este estudio demuestra que el índice SMR puede verse afectado por desviaciones angulares en las orientaciones de las familias según la fuente de información y metodología de análisis empleada.

Por todo lo anteriormente expuesto, se concluye que las implicaciones de esta tesis son de gran importancia para la aplicación de las nubes de puntos 3D a la Mecánica de Rocas.

“No es la posesión de la verdad, sino el éxito que llega
luego de la búsqueda, donde el buscador se enriquece con
ella.”

Max Planck

6

Futuras líneas de investigación

La presente tesis doctoral ha proporcionado resultados muy novedosos a la vez que ha permitido abrir nuevas líneas de investigación relacionadas con los macizos rocosos:

Análisis de nubes de puntos 3D con información multiespectral La información disponible en las nubes de puntos 3D consiste en las coordenadas geométricas, el color verdadero RGB captado por una cámara y la respuesta del láser en la banda del infrarrojo cercano. El método propuesto de extracción de familias de discontinuidades únicamente considera la información geométrica de los puntos. Sin embargo, existe un campo por explorar basado en utilizar no sólo la información geométrica sino la respuesta espectral registrada por el sensor.

La teledetección se caracteriza por la diversidad espectral de sus datos y permite obtener clasificaciones espectrales automáticas. Su uso permite la clasificación de imágenes a través de sus píxeles mediante un proceso de entrenamiento, con lo que se puede clasificar si pertenece a agua, vegetación, suelo, roca, urbanización, etc. El planteamiento de la línea de investigación es incorporar esta información a la nube de puntos mediante una combinación de *3D laser scanner* con cámaras multiespectrales y aplicar los resultados del método de extracción de discontinuidades. Actualmente, esta posibilidad está siendo explorada por el grupo de trabajo *The CIPR Virtual Outcrop Geology Group* de Bergen, Noruega. El objetivo de la línea de investigación es el de clasificar las superficies mediante litologías con la información multiespectral y las firmas de cada litología conocida. De esta forma no sólo

se buscarían superficies planas sino también con curvatura, como es el caso de pliegues en rocas.

Como ejemplo de aplicación de esta línea se considera el análisis de taludes del Flysch carbonatado en Alicante. Estas rocas tienen diferentes características geomecánicas, sobre todo en lo que respecta a su comportamiento frente a la degradación ambiental. Sin embargo, el reconocimiento visual no siempre permite la diferenciación de litologías de aspecto similar, aunque de propiedades diferentes, a no ser que se realice un estudio muy minucioso. Es por ello que se puede establecer la hipótesis de que al ser rocas diferentes, su comportamiento en presencia de agua también será diferente, por lo que la variación de temperatura en la roca se producirá a distinta velocidad. Por este motivo, es razonable plantear que mediante el uso de cámaras térmicas las rocas son diferenciables en este espectro. El objetivo de esta línea de investigación es el de clasificar las rocas de taludes del Flysch carbonatado de Alicante mediante la combinación de nubes de puntos 3D y la información proporcionada por cámaras térmicas.

Estudio de la rugosidad de superficies de discontinuidades mediante nubes de puntos 3D clasificadas El análisis de los parámetros que condicionan la resistencia al corte de las discontinuidades (e.g. Joint Roughness Coefficient, dilation angle, etc.) mediante el uso de nubes de puntos 3D ha sido abordado por diversos investigadores. Sin embargo, la aplicación sistemática de nubes de puntos 3D para su determinación todavía requiere mayor desarrollo. El planteamiento propuesto consiste en el desarrollo y validación de una metodología que permita explorar la información de las diferentes familias identificadas y clasificadas a partir de la nube de puntos para automatizar y sistematizar la determinación de parámetros de corte de las discontinuidades.

Cartografías de la calidad geomecánica de un talud mediante el uso de nubes de puntos 3D La tercera línea de investigación muestra la posibilidad de calcular los factores de ajuste de manera rápida a partir de las orientaciones obtenidas con los métodos propuestos. Se plantea una nueva línea de investigación que continúe los trabajos presentados en esta tesis. Esta línea consiste en la evaluación de la calidad geomecánica del sector de un talud a partir del uso de nubes de puntos 3D mediante la determinación de los factores de ajuste del índice SMR.

Análisis probabilístico del índice SMR La primera línea de investigación ha mostrado la posibilidad de extraer información de las discontinuidades existentes en el macizo rocoso a partir de las nubes de puntos 3D. Sin embargo, también ha mostrado las irregularidades superficiales del talud. Se plantea una línea de investigación que analice los vectores normales de cada familia de discontinuidades y su relación con el talud. La comparación de estos dos

planos permite el cálculo de una distribución para cada factor de ajuste del SMR, calculado para todos los puntos de la superficie. La combinación de los tres factores de ajuste permitiría analizar la función de probabilidad del SMR para cada familia en un sector determinado.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Referencias

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M., & Lato, M. J. (2014). Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 80–97.
- Agisoft, L. (2014). Agisoft photscan professional (version 1.0.4) (software). <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>.
- Alameda, P. (2014). *Aplicación de nuevas metodologías de adquisición de datos para el análisis de estabilidad de taludes: casos de estudio en materiales foliados de la Cordillera Bética*. Ph.D. thesis, University of Granada, Spain.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., & Viguiet, F. (2014). Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66(0), 102 – 114.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814114001187>
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1-2), 1–54.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189–236.
- Barton, N., et al. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6).
- Bieniawski, Z. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12), 335–344.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

- Blyth, F. G. H., & De Freitas, M. H. (1974). *A geology for engineers*. Edward Arnold London.
- Botev, Z., Grotowski, J., Kroese, D., et al. (2010). Kernel density estimation via diffusion. *The Annals of Statistics*, 38(5), 2916–2957.
- Brodu, N., & Lague, D. (2012). 3d point cloud classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 14, (p. 4368).
- Chen, Z., et al. (1995). Recent developments in slope stability analysis. In *8th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Datamine (2015). Sirovision. <http://sirovision.dataminesoftware.com/>. Accessed: 2015-06-21.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *Kdd*, vol. 96, (pp. 226–231).
- Feng, Q., & Röshoff, K. (2015). A survey of 3d laser scanning techniques for application to rock mechanics and rock engineering. In R. Ulusay (Ed.) *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, (pp. 265–293). Springer International Publishing.
URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0_25
- Ferrer, M., & González de Vallejo, L. (1999). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Ferrero, A., Forlani, G., Roncella, R., & Voyat, H. (2009). Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(4), 631–665.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-008-0010-4>
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6), 381–395.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/358669.358692>
- García-Sellés, D., Falivene, O., Arbués, P., Gratacos, O., Tavani, S., & Muñoz, J. A. (2011). Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Computers & Geosciences*, 37(10), 1584–1594.

- Gigli, G., & Casagli, N. (2011). Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution lidar point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 187–198.
- Girardeau-Montaut, D. (2011). Cloudcompare-open source project. <http://www.cloudcompare.org/>.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. ISBN: 978-0-471-81200-5.
- GVA, C. (2015). Terrasit. <http://terrasit.gva.es/es/>. Accessed: 2015-06-21.
- Hack, R. (2002). An evaluation of slope stability classification. In C. D. da Gama & L. Ribeiro e Sousa (Ed.) *Proceedings of the EUROCK*, vol. 4, (pp. 3–22). Funchal, Madeira, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia,.
- Hack, R., Price, D., & Rengers, N. (2003). A new approach to rock slope stability—a probability classification (sspc). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(2), 167–184.
- Hack, R., Price (Adv), D., & Rengers (Adv), N. (1998). *Slope stability probability classification (SSPC)*. Ph.D. thesis, TU Delft; ITC.
- Haines, A., Terbrugge, P., Carrieri, G., et al. (1991). Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. In *7th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Haneberg, W. C. (2008). Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-d rock slope modeling and discontinuity mapping in the united states. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4), 457–469.
- Haneberg, W. C., Norrish, N. I., & Findley, D. P. (2006). Digital outcrop characterization for 3-d structural mapping and rock slope design along interstate 90 near snoqualmie pass, washington. In *Proceedings, 57th annual highway geology symposium, Breckenridge, Colorado*, (pp. 27–29).
- Haneberg, W. C., et al. (2007). Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In E. Eberhardt, D. Stead, & T. Morrison (eds.), *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, (pp. 101–106).
- Hobbs, B. E., Means, W. D., & Williams, P. F. (1976). *An outline of structural geology*, vol. 570. Wiley New York.
- Hoek, E., & Karakas, A. (2008). Practical rock engineering. *Environmental and Engineering Geoscience*, 14(1), 55–58.

- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6), 417.
- Hough, P. V. (1962). Method and means for recognizing complex patterns. US Patent 3,069,654.
- IGN (2014). Sistema de información geográfica nacional de españa. <http://signa.ign.es/signa/>.
- Innovmetric (2015). Polyworks inspector. <http://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector>. Accedido: julio 2015.
- Ioannou, Y., Taati, B., Harrap, R., & Greenspan, M. (2012). Difference of normals as a multi-scale operator in unorganized point clouds. In *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012 Second International Conference on*, (pp. 501–508). IEEE.
- Irigaray, C., Fernández, T., & Chacón, J. (2003). Preliminary rock-slope-susceptibility assessment using gis and the SMR classification. *Natural Hazards*, 30(3), 309–324.
- Izquierdo, F. (1993). *Geotecnia y cimientos I y II, SPUPV 93.552*. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones de la UPV.
- 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.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Minoia, R., Locat, J., & Turmel, D. (2008). Terrestrial lidar investigation of the 2004 rockslide along petit champlain street, québec city (québec, canada). In *4th Canadian conference on geohazards: from causes to management. Presse de l' Université Laval*, (pp. 295–301).
- 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.

- Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(3), 29.
- Kemeny, J., & Post, R. (2003). Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers & Geosciences*, 29(1), 65–77.
URL <http://geol.queensu.ca/faculty/harrap/RockBench/downloads/files/2003%20-%20Kemeny.pdf>
- Khoshelham, K., Altundag, D., Ngan-Tillard, D., & Menenti, M. (2011). Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(8), 1215–1223.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911001456>
- Kliche, C. A. (1999). *Rock slope stability*. SME.
- Lai, P., Samson, C., & Bose, P. (2014a). Surface roughness of rock faces through the curvature of triangulated meshes. *Computers & Geosciences*, 70(0), 229 – 237.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041400137X>
- Lai, P., Samson, C., & Bose, P. (2014b). Visual enhancement of 3d images of rock faces for fracture mapping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 325–335.
- Lato, M., Diederichs, M., & Hutchinson, D. (2010). Bias correction for view-limited lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock mechanics and rock engineering*, 43(5), 615–628.
- Lato, M., Diederichs, M., Hutchinson, D., & Harrap, R. (2009). Optimization of lidar scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 194–199.
- Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R., & Bevan, G. (2013). Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using lidar and photogrammetry. *Computers & Geosciences*, 50(0), 106 – 114. Benchmark problems, datasets and methodologies for the computational geosciences.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002099>

- Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R., & Bevan, G. (2015). Rockbench, sharing geospatial reference datasets. <http://geol.queensu.ca/faculty/harrap/RockBench/>. Accessed: 2015-06-21.
- 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.
- Laubscher, D. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *JS Afr. Inst. Metall*, 90(10), 267–273.
- Lindsay, P., Campbell, R., Fergusson, D., Gillard, G., & Moore, T. (2001). Slope stability probability classification, waikato coal measures, new zealand. *International Journal of Coal Geology*, 45(2), 127–145.
- Lisle, R. J., & Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers*. Cambridge University Press.
URL http://personales.upv.es/lalonso/Traducciones/Tecnicas_proyeccion_estereog.pdf
- Markland, J. T. (1972). *A Useful Technique for Estimating the Stability of Rock Slopes when the Rigid Wedge Slide Type of Failure is Expected*. Imperial College of Science & Technology.
- MathWorks (2015a). k-means clustering. <http://es.mathworks.com/help/stats/kmeans.html>. Accedido: julio 2015.
- MathWorks (2015b). Matlab. <http://es.mathworks.com/products/matlab/>. Accedido: julio 2015.
- Olariu, M. I., Ferguson, J. F., Aiken, C. L., & Xu, X. (2008). Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water jackfork sandstone at big rock quarry, arkansas. *Geosphere*, 4(1), 247–259.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H., & Metzger, R. (2009). Characterization and monitoring of the åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(3), 1003–1019.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M.-H., & Blikra, L. H. (2011). Detailed dem analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F2).
URL <http://dx.doi.org/10.1029/2010JF001807>

- Palà i Comellas, V., Calvet, J., García Sellés, D., & Ximenis, L. (1999). Fotogrametría terrestre en el glaciar johnsons, isla livingston, antártida. *Acta geológica hispánica*, 34(4), 427–445.
- Pantelidis, L. (2010). An alternative rock mass classification system for rock slopes. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 69(1), 29–39.
- Patton, F. D., et al. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. In *1st ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Pearson, K. (1901). Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine Series 6*, 2(11), 559–572.
URL <http://dx.doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., & Correia, A. G. (2015). A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76(0), 182 – 191.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160915000659>
- Price, N. J. (1966). *Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock*, vol. 1. Pergamon Press Oxford.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer.
- Rahman, Z., Slob, S., & Hack, R. (2006). Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data. In *Proceedings of 10th IAEG Congress: Engineering geology for tomorrow's cities, Nottingham, United Kingdom*.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. 727. Universidad Politécnica de Madrid, Red DESIR. Reconocimiento - Sin obra derivada - No comercial.
- Rencher, A. C., & Christensen, W. F. (2012). *Methods of multivariate analysis*, vol. 709. John Wiley & Sons.
- Riquelme, A., Tomas, R., Abellan, A., Cano, M., & Jaboyedoff, M. (2015). Semi-automatic characterization of fractured rock masses using 3d point clouds: discontinuity orientation, spacing and smr geomechanical classification. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 17 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, (p. 15459).
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3d point clouds. *Computers &*

- Geosciences*, 68(0), 38 – 52.
 URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300414000740>
- Robertson, A. (1988). Estimating weak rock strength. In *Proceedings of the SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, Society of Mining Engineers*, 88-145, (pp. 1–5).
- Röller, K., & Trepmann, C. (2008). Stereo32 version 1.01. *Ruhr-Universität Bochum, Institut für Geologie, Mineralogie & Geophysik, Germany*.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In *International symposium on the role of rock mechanics, Zacatecas*, (pp. 49–53).
- Romana, M. (1993). A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. *Comprehensive Rock Engineering*, 3, 575–599.
- Romana, M., Serón, J., Jordá, L., & Vélez, M. (2005). La clasificación geomecánica SMR para taludes: Estado actual, aplicación y experiencia internacional. In *Proceedings of the VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, Valencia*, (pp. 239–250).
- Romana, M., Serón, J., & Montalar, E. (2001). La clasificación geomecánica SMR: Aplicación experiencias y validación. In *V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. I*, (pp. 393–404).
- Romana, M., Serón, J. B., Montalar, E., et al. (2003). SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In *Proceedings of the 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics, ISRM*, (pp. 1–4).
- Romana, M., Tomás, R., & Serón, J. (2015). Slope mass rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. In *The 13th ISRM Congress*. Quebec, Canada. 10-13 de Mayo.
- Selby, M. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 24(1), 31–51.
- Şen, Z., & Sadagah, B. H. (2003). Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engineering Geology*, 67(3), 269–280.
- Shuk, T. (1994). Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects. In *Proceedings of the 4th South American Congress on Rock Mechanics*, vol. 2, (pp. 955–960).
- Silverman, B. (1986). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability. Taylor & Francis.
 URL <http://books.google.es/books?id=e-xsrjsL7WkC>

- Slob, S. (2010). *Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning*. Ph.D. thesis, TU Delft, Delft University of Technology.
URL <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:tudelft.nl:uuid:c1481b1d-9b33-42e4-885a-53a6677843f6>
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., & Kemeny, J. (2005). Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1913(1), 187–194.
- Software, G., & Measurement (2015). Shapematrix 3d. http://www.3gsm.at/static/eng/home_eng.html. Accesses: 2015-06-21.
- Solutions, G. S. (2015). JRC 3D Reconstructor. <http://www.gexcel.it/en/software>. Accesses: 2015-06-21.
- Split-FX (2014). Split-FX tutorial. <http://www.spliteng.com/downloads/>. Accessed: 2015-06-21.
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009a). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3–4), 163 – 182.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000556>
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009b). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., Beveridge, A., Lee, S., & Van As, A. (2009). Long-range terrestrial digital photogrammetry for discontinuity characterization at Palabora open-pit mine. In *Third Canada–US Rock Mechanics Symposium. Paper*, vol. 3984.
- Sturzenegger, M., Stead, D., & Elmo, D. (2011). Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, 119(3), 96–111.
- Terzaghi, R., & Voight, B. (1979). Karl Terzaghi on rockslides: the perspective of a half-century. *Rockslides and Avalanches*, 2, 111–133.
- Terzaghi, R. D. (1965). Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15(3), 287–304.
- Tomás, R., Delgado, J., & Serón, J. (2007). Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(7), 1062–1069.

- Turk, G., & Levoy, M. (1994). Stanford bunny, accessed 2015/01/21. online.
 URL <http://www.cs.jhu.edu/~misha/Code/PoissonRecon/Version6.13/>
- Umili, G., Ferrero, A., & Einstein, H. (2013). A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3d model. *Computers & Geosciences*, 51(0), 182 – 192.
 URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002695>
- Unal, E. (1996). Modified rock mass classification: M-RMR system. *Milestones in rock engineering. The Bieniawski Jubilee Collection. Balkema, Rotterdam*, (pp. 203–223).
- Viero, A., Vosselman, G., Slob, S., Galgaro, A., & Hack, H. (2009). Automatic analysis of terrestrial laser data: the application to a rock cliffs instability in the Dolomites (Eastern Alps-Italy). In *6th EUREGEO - European Congress on Regional and GEOscientific cartography and information systems earth*.
- Vosselman, G., Dijkman, S., et al. (2001). 3d building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/W4), 37–44.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179(0), 300 – 314.
 URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>
- Wu, C. (2007). Siftgpu: A gpu implementation of scale invariant feature transform (sift).
- Wu, C. (2011). Visualsfm: A visual structure from motion system. *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System*.
- Wu, C. (2013). Towards linear-time incremental structure from motion. In *3DTV-Conference, 2013 International Conference on*, (pp. 127–134). IEEE.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., & Seitz, S. M. (2011). Multicore bundle adjustment. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*, (pp. 3057–3064). IEEE.

Parte II

Parte II: Compendio de artículos



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

*“ A new approach for semi-automatic rock mass joints
recognition from 3D point clouds
Computers & Geosciences, Volume 68, July 2014, Pages
38-52, ISSN 0098-3004”*

Adrián J. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, M.
Jaboyedoff

7

***Artículo 1: A new approach for
semi-automatic rock mass joints
recognition from 3D point clouds***

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds



Adrián J. Riquelme^{a,*}, A. Abellán^b, R. Tomás^a, M. Jaboyedoff^b

^a *Departament de Ingenieria Civil, Universidad de Alicante, Alicante, Spain*

^b *Risk Analysis Group, Institut des sciences de la Terre (ISTE), Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, Switzerland*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 October 2013

Received in revised form

19 March 2014

Accepted 20 March 2014

Available online 4 April 2014

Keywords:

LiDAR

Rock mass

Discontinuities

Semi-automatic detection

3D point cloud

Sensitivity analysis

ABSTRACT

Rock mass characterization requires a deep geometric understanding of the discontinuity sets affecting rock exposures. Recent advances in Light Detection and Ranging (LiDAR) instrumentation currently allow quick and accurate 3D data acquisition, yielding on the development of new methodologies for the automatic characterization of rock mass discontinuities. This paper presents a methodology for the identification and analysis of flat surfaces outcropping in a rocky slope using the 3D data obtained with LiDAR. This method identifies and defines the algebraic equations of the different planes of the rock slope surface by applying an analysis based on a neighbouring points coplanarity test, finding principal orientations by Kernel Density Estimation and identifying clusters by the Density-Based Scan Algorithm with Noise. Different sources of information – synthetic and 3D scanned data – were employed, performing a complete sensitivity analysis of the parameters in order to identify the optimal value of the variables of the proposed method. In addition, raw source files and obtained results are freely provided in order to allow to a more straightforward method comparison aiming to a more reproducible research.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Remote sensors such as Light Detection and Ranging (LiDAR) and Differential SAR Interferometry (DInSAR) have become an essential tool for the landslide analysis over the last decade (Abellán et al., 2014; Jaboyedoff et al., 2012; Oppikofer et al., 2009; Rosser et al., 2005; Viero et al., 2010). LiDAR sensors, also known as laser scanners, allow the acquisition of high resolution (density of points up to 10^4 point/m²) and high accuracy (std. dev. < 1 cm at 100 m) three-dimensional information of the ground surface. Such systems allow obtaining the coordinates (X, Y, and Z) of the points of a surface at high speed (more than 222.000 measurements per second) from a considerable distance of acquisition (up to 6.000 m). This sensor has revolutionized the acquisition of rock slope parameters that play a key role in the global and local stability including the orientation, spacing, persistence and roughness of discontinuities. Not surprisingly, the number of publications dealing with the semi-automatic extraction of 3D features has exponentially grown in the last 5 years (García-Sellés et al., 2011; Gigli and Casagli, 2011; Jaboyedoff et al., 2007; Khoshelham et al., 2011; Lato et al., 2009; Lato et al., 2010; Lato and Voge, 2012; Olariu et al., 2008; Slob et al., 2005; Sturzenegger and Stead, 2009b; Sturzenegger et al., 2011). Nevertheless, in order

to enable fast advancement in the application of the sensor in disciplines such as rock mechanics, geotechnics and earth sciences, development of new algorithms is needed (Abellán et al., 2014).

This paper proposes a new approach for the semi-automatic identification and extraction of rock slope planar features – i.e. the discontinuity sets affecting rock mass stability – using 3D point cloud data. The main novel contributions of the proposed method are: (a) the user-supervised removal of noisy points through the creation of a coplanarity test; (b) the semi-automatic identification of discontinuity sets using a Kernel Density Estimation (KDE) Analysis; (c) the automatic extraction of single discontinuities through a density-based clustering algorithm; (d) a complete sensitivity analysis of the parameters playing a key role in the method; and (e) the public availability of the complete 3D RAW and processed data sets used in this publication in order to provide method validation for other researchers in www.3d-landslide.com/projects/discontinuity/.

1.1. Previous studies on discontinuity characterization from 3D point clouds

Rock slope discontinuities play a key role in strength, permeability of rock masses and in the stability of surface and underground excavations (Harrison and Hudson, 2000; Hoek and Bray, 1981). Thus, a thorough understanding of the properties of

* Corresponding author.

E-mail addresses: adririquelme@ua.es, adririquelme@gmail.com (A.J. Riquelme).

discontinuities, included their orientation (i.e. dip and dip direction) is crucial in rock engineering applications.

In order to assess the global quality of a rock mass, several authors proposed the use of geomechanical classifications more than 20 years ago. Rock mass classifications are means for the evaluation of the performance of rock masses based on their most important inherent and structural parameters (Pantelidis, 2009). In practice, a wide number of geomechanical classifications for slopes exist such as those proposed by Bieniawski (1989), Romana (1985), Hack et al. (2003) and Tomás et al. (2007). These classifications require precise information of a series of slope parameters – such as discontinuities orientation, which are classically obtained in tedious fieldwork campaigns using a geological compass. Some well-known techniques, such as the stereo photogrammetry, have allowed the measurement of orientations of individual discontinuities since the 1970s' (Rengers, 1967). In addition, basic photogrammetry principles and pattern recognition routines can be used to model surfaces in 3D, which can be very useful in the rock mechanics field. Unfortunately, these techniques require tedious and time consuming outlining of discontinuities (Slob et al., 2005).

At the beginning of the XXI century, some authors suggested the possibility of accurately obtaining discontinuity orientation from 3D point clouds obtained by a total station (Feng et al., 2001). Since then, and thanks to the wide accessibility of 3D sensors like LiDAR, different approaches were developed for obtaining the orientations of discontinuities. Early studies proposed the use of least square method to a subset of points (Abellán et al., 2006; Fernández, 2005; Sturzenegger and Stead, 2009a). Some other authors proposed the calculation of normal vectors to a series of 2.5D interpolated surfaces (Kemeny et al., 2006a; Slob and Hack, 2004). Recently, the calculation of the normal vector associated to a subset of the 3D point cloud is widely accepted (Ferrero et al., 2009; García-Sellés et al., 2011; Gigli and Casagli, 2011; Jaboyedoff et al., 2007). More specifically, Jaboyedoff et al. (2007) proposed the calculation of the normal vector orientation for every point and its coplanar neighbours using the principal component analysis method (hereinafter PCA). This concept is also used to isolate multi-scale objects from LiDAR data (Ioannou, 2012). Other approaches calculate the orientation for each node in the TIN (Slob et al., 2005; Vogé et al., 2013) or are based on the searching of volumetric pixels (voxels) and subsequent calculation of the planar orientation (Gigli and Casagli, 2011). Remarkably, any of the above mentioned studies utilize kernels for the estimation of the density function, meaning that those points belonging to less sampled discontinuity sets can potentially be overlooked using commonly used methods.

Most of the current discontinuity detection methods use triangulated irregular network (TIN) to simplify the surface (Gigli and Casagli, 2011; Lato et al., 2009; Slob et al., 2007). Conversely, our proposal uses real 3D information contained in every point and its corresponding neighbours to see the local differences in the geometry of the slope.

Some authors offer commercial software packages, such as Split-FX (Slob et al., 2005) and Coltop-3D (Jaboyedoff et al., 2007). Some recent studies include the use of a Graphic User Interface (GUI) in Matlab environment such as the recently developed DiAna (Gigli and Casagli, 2011) or PlaneDetect (Vogé et al., 2013), but the use of these software is not publicly available. Other applications for the geomechanical classifications include: (a) the automatic detection of discontinuity spacing (Slob and Hack, 2004; Slob et al., 2005), which is based on the cluster analysis of sets of discontinuities (Roncella and Forlani, 2005; Turner et al., 2006); (b) the removal of objects characterized by chaotic shapes – such as vegetation – together with the calculation of other parameters of the geomechanical classifications – such as spacing/frequency and persistence – which can also be (potentially) achieved using tools such as 3D-Veros (Brodu and Lague, 2012) and DiAna (Gigli and Casagli, 2011). Unfortunately, only a limited

number of benchmarks is publicly available – such as the Rockbech common repository described in Lato et al. (2013), so there is a need for a comparative performance analysis of the existing algorithms mentioned in this manuscript.

The paper is organized as follows: (a) an introduction to LiDAR techniques and their application to discontinuity extraction is presented in Section 1; (b) the methodology for discontinuity extraction and the presentation of the case studies used in this paper are presented in Section 2; (c) Section 3 shows a sensitivity analysis of the method using simple geometries (case study A); Section 4 shows the application of our method to a more complex scenario (road cut slope, case study B). In addition, the methods' parameters are calibrated and then their processing parameters values are proposed. Finally, Section 5 discusses and summarizes the results and explores the future lines of research.

2. Methodology

The proposed method aims to detect structural discontinuities using 3D point clouds than can be typically obtained from LiDAR sensors, 3D digitizers, etc. Unlike other methodologies, our proposal uses, throughout the workflow, the “true” 3D information contained on the LiDAR point cloud, instead of using interpolated 2.5D mesh surface. Given the set of raw data points (X , Y , and Z) from the observed scene (hereinafter ‘P’), if the slope surface is mostly defined by discontinuities, the outcrop points can be appropriately ordered into sets which define planes. These planes define the discontinuity sets.

The method basically performs a compass data acquisition for each point, but only if it is surrounded by other coplanar points. Therefore, there is an obvious advantage: it is possible to obtain millions of virtual compass measurements in a few minutes, even in otherwise non-accessible areas.

The proposed methodology is developed through three main steps (Fig. 1):

- a) PART A – Local curvature calculation: this consists of a nearest neighbour search and the determination of the discontinuity orientation in every point. This task is described in Section 2.2.
- b) PART B – Statistical analysis of the planes: this consists of the determination of the principal orientations, which represent the different discontinuities sets that affect to the rock mass. The next step is the identification of those points that belong to a common discontinuity set. This part, developed in Section 2.3, requires the user's supervision.
- c) PART C – Cluster analysis: localization of the points that define different clusters in the space and calculation of the outcrop plane equations. This last part is explained in Section 2.4.

2.1. Description of the datasets

Two different series of 3D datasets were used in our study: experimental datasets and real outcrop measurements. The first was obtained under controlled laboratory conditions and the second one is a more complex dataset corresponding to a portion of a real rock mass. We discarded using synthetic datasets due to their over-simplistic characteristics.

2.1.1. Case study A

We first scanned a series of well-known geometrical solid objects using a 3D digitizer (Konica Minolta, Vivid 9i) from University of Lausanne, Switzerland, including a cube, dodecahedron, icosahedron, octahedron, hexagonal pyramid, hexagonal prism, octagonal prism and a triangular prism. Data acquisition was performed through

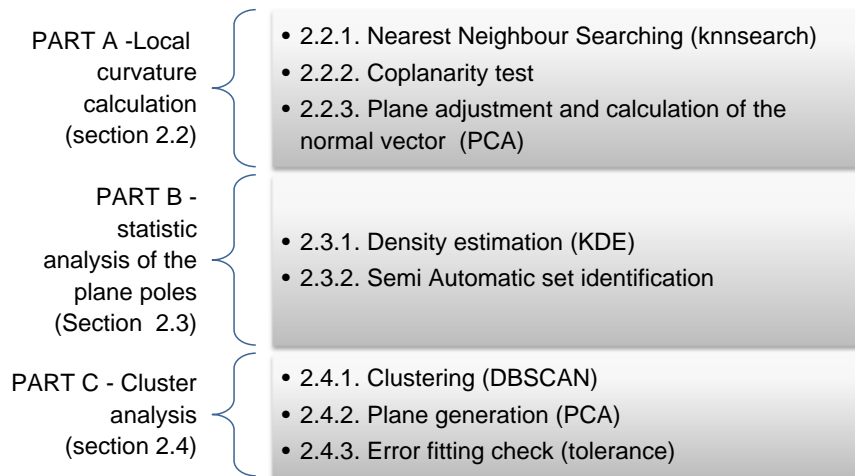


Fig. 1. Flow chart of the proposed methodology.

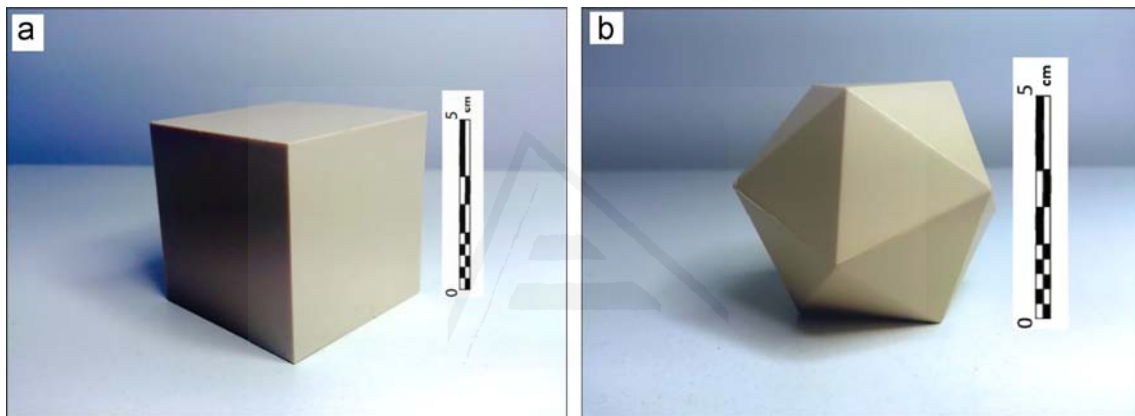


Fig. 2. Experimental datasets: scanned geometries employed in the case study A. (a) cube (50 mm side); and (b) icosahedron (50 mm height).

progressive rotation of the figures around a fixed platform axis and a subsequent scanning. We carried out a total of 10 scans with a mean distance of 1406 mm to the figure. The Line of Sight of the 3D digitizer was inclined about 30° to zenith. As a consequence: (a) the density of points on one of the families, the horizontal planes, was higher than on the other families due to the superposition of different scans, which lead to an overrepresentation of these planes; and (b) a higher alignment error was also observed in these overlaid planes. Both effects are consistent with TLS data acquisition in real case studies.

Then, from these figures, we selected two representative geometries: a cube and an icosahedron (Fig. 2a and b, respectively). The cubic geometric shape, which is formed by 6 square facets grouped on three orthogonal discontinuity sets, was represented by 60,488 points. The icosahedron, which is a type of polyhedron formed by 20 triangular facets grouped on 10 different discontinuity sets, was represented by 37,226 points.

These simple geometries allowed the comparison of our algorithm with true geometries known in advance. As the data was acquired under laboratory controlled conditions, it was possible to evaluate the quality of the methodology through comparing our results with the real plane orientations.

Finally, as these figures are formed as a combination of perfectly plane surfaces, it was possible to test the values of the standard deviation of the error in each single plane. The normal vectors calculated at each of the 3D points allowed us to properly identify not only the normal vectors corresponding to flat surfaces such as discontinuities, but also the normal vectors corresponding

to non-flat regions, such as the vertex and the edges between planes.

2.1.2. Case study B

The application of our method to a real case study was carried out using data from publicly available LiDAR data at Rockbench repository (Lato et al., 2013), providing the possibility to compare our results performance to other researchers. In addition, this case study has been used by other authors in several published papers for extraction of rock mass characterization information (Kemeny et al., 2006b). This case study consists in a real rock cut located in Ouray, Colorado, USA (Fig. 3 and Table 1). As will be described later, in this case study, our method detected four different discontinuity sets.

2.2. Part A – local curvature calculation

The method requires as input the raw data points P , where (P_i) is a point member of P . Given a subset of neighbour points Q_i (where (P_i) is a member of Q_i and the size of Q_i is n_n points), it is possible to calculate its best-fit adjustment plane α (Fig. 4).

The proposed method calculates a normal vector for each 3D point. Thus, the above-described discontinuity planes identification is performed through three main phases:

- For each i point of the raw data (P_i) , the K -nearest neighbours (knn) have to be found in order to create the set Q_i (subsection 2.2.1).



Fig. 3. Real road cut slope used in case study B. Image from Rockbench repository (Dataset 10a).

Table 1
Properties of the Case study B datasets.

Physical setting	Roadcut
Location (close mjr. City)	Ouray, Colorado
Lithology	Quartzite
Scanner	Optech
Laser type	Time of flight
Year scanned	2004
# of scan locations	4
Point spacing	< 2 cm
Number of points	1,515,722
Collected by	John Kemeny
Dataset	10a

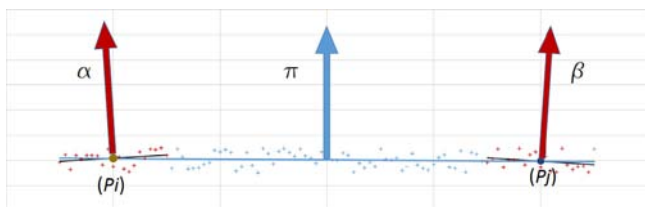


Fig. 4. Subsets and normal vector orientations. The sets Q_i (left) and Q_j (right) are defined by the points (P_i) and (P_j) and their respective neighbourhoods. α , β and π are the orientations of their respective sets Q_i , Q_j and P .

- For each set Q_i the coplanarity condition has to be checked (subsection 2.2.2).
- For each set Q_i a plane adjustment has to be performed in order to calculate its normal vector (subsection 2.2.3.).

These phases are described in detail in the next subsections.

2.2.1. Nearest neighbour searching

The search of neighbours is usually carried out using two different approaches: fixed distance or fixed number of neighbours. Some errors may arise when using the first approach due to the heterogeneity of the density of points (Lato et al., 2010). Thus, a fixed number of neighbours approach was preferred in our study.

The MATLAB function *knnsearch* uses an algorithm that provides a quick and efficient way to find the *knn* nearest neighbours by a selected norm (Friedman et al., 1977). In the proposed approach, the *knn* neighbours are calculated by using *knn* search function and the euclidean distance. Thus, after this step, for each i point of the raw data P_i , a subset of *knn* neighbour points is defined as Q_i .

Summarizing, in this section we have identified the k nearest neighbours for each point of the 3D point cloud. The next step is to check if that set of $k+1$ points are coplanar or not.

2.2.2. Coplanarity test

Due to the fact that the method considers every point and its neighbours as a plane subset candidate, it is advisable to test if the Q_i sub-set of points (defined in previous steps) is coplanar (or not). This validation test must be carried out prior to α orientation calculation (Q_i associated). If the sub-set of points Q_i is coplanar, the rest of the process will continue; otherwise the sub-set Q_i will be rejected.

The coplanarity test is based on the Principal Component Analysis (PCA). Given a 3D set of points, the *princomp* MATLAB function, which allows the implementation of PCA, determines its eigenvalues ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) and eigenvectors (V_1, V_2, V_3). The proportion of variance accounted by the first k components H_k is determined by the following equation (Rencher and Christensen, 2012):

$$H_k = \frac{\sum_1^k \lambda_i}{\sum_1^3 \lambda_i} \quad (1)$$

Assuming that a portion of our measurements are arranged in a plane (π) in a \mathbb{R}^3 space, there will be two dimensions able to explain the majority of the data. The third dimension will explain the error present in the data. If the surface is not flat or the instrumental error is relevant enough, the third dimension will acquire relative importance to the first two.

In order to know if a set of points is coplanar or not, the deviation parameter (η) is defined by the following equation:

$$\eta = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (2)$$

The parameter tolerance (η_{max}) is defined as the maximum allowable deviation in a subset of points, such that the subset plane is reasonably considered a plane. The η_{max} value is established through a sensitivity analysis with real data under certain test conditions. It is commonly accepted that if a set of principal components have 80% or more of the variance, these would represent the data properly (Rencher and Christensen, 2012). Hence, a η_{max} value of 20% is proposed. In those cases in which $\eta > \eta_{max}$, the sub-set is rejected.

Summarizing, in this section we have identified those points which are coplanar with their nearest neighbours. The next step is to calculate the orientation of the coplanar set of points.

2.2.3. Plane adjustment and calculation of the normal vector

Note that, subsequently, a parameters calibration will be performed in this paper. Once all those subsets of coplanar points have been found, the next step is the calculation of the best-fit adjustment plane. The algebraic expression is shown in Eq. (3), where A , B , and C are the three components of the unit normal vector to the plane and D gives the perpendicular distance from

the origin to the plane.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad [A, B, C, D] \in \mathbb{R} \quad (3)$$

Some authors such as [Gigli and Casagli \(2011\)](#) calculate the plane equation by the singular value decomposition (SVD). In our case, since the PCA has been calculated in a previous step, the plane is defined in a more efficient way through the eigenvector \vec{V}_3 .

$$\vec{V}_3 \equiv (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) \quad (4)$$

Summarizing, at this section, we have computed the orientation of the previously identified sets. The next step is to calculate the most representative orientations of the 3D points and their k nearest neighbours.

2.3. Part B: statistical analysis of the planes

The subsequent methodology is based on the expected parallelism of the normal vectors associated to the points. Let's consider a set of points Q_i associated to a point (P_i) that belongs to a discontinuity defined by an unknown plane π . If α is the best-fit plane of Q_i , the orientations of the planes α and π are expected to be close. Similarly, let's consider a different subset Q_j with the same size than Q_i associated to a point (P_j) member of P . This set is also part of

the π plane and it is possible to calculate its best-fit plane β and the three planes (π , α and β) having a close orientation ([Fig. 4](#)).

The statistical analysis is performed by means of the stereographic projection of the planes poles. In order to define the main discontinuity sets: (a) we calculated a normal vector for each plane and converted it to stereographic projection ([Lisle, 2000](#)); and (b) we calculated the density of the poles for each region of the stereographic projection; and (c) we calculated the local maxima.

2.3.1. Density estimation

Kernel density estimation (KDE) is a non-parametric way to estimate the probability density function of a random variable. In order to estimate the multivariable nonparametric density function, [Silverman \(1986\)](#) demonstrated a higher performance using KDE than using classic histograms. Thus, the method implementation uses the Matlab kde function *kde2d* ([Botev et al., 2010](#)) by a Gaussian kernel. This script allows: (a) the automatic calculation of the width of the kernels (e.g. bandwidth); and (b) the computation of their density.

[Fig. 5b](#) shows the stereographic projections of the poles of the normal vector of an experimental dataset consisting in a five centimetres side cube scanned at laboratory using a 3D digitizer (Vivid 3D, Konica Minolta). Note that for the cube shown in [Fig. 5b](#) the poles show three main orthogonal discontinuity sets (J_1 : $223.87^\circ/4.07^\circ$, J_2 : $021.03^\circ/89.47^\circ$, and J_3 : $290.91^\circ/89.62^\circ$). [Fig. 5c](#)

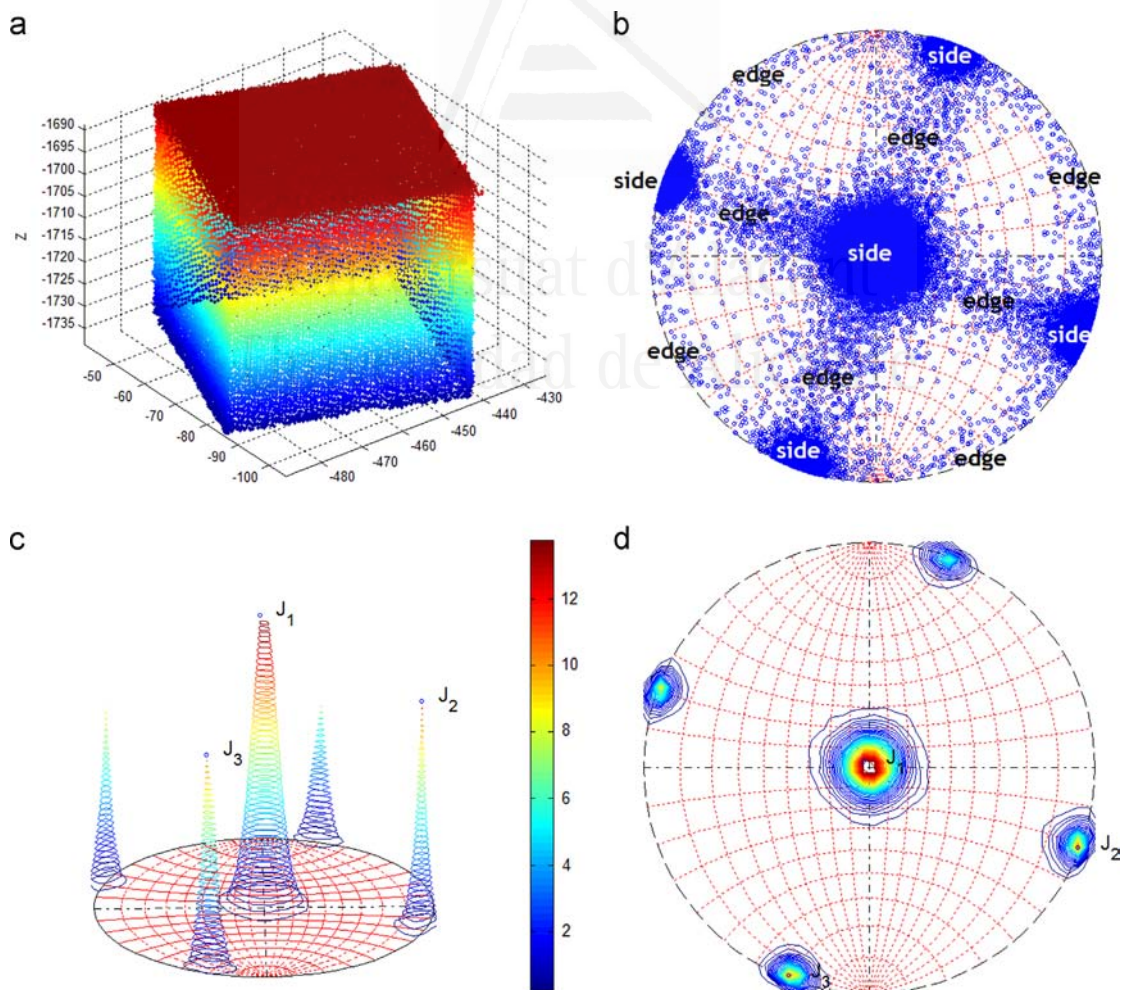


Fig. 5. (a) Raw data 3D view of a 5 cm side cube, 60.488 points. Plotted data were scanned at laboratory using a microlidar; (b) Normal vector poles stereographic projection, $knn=15$. Side and edge poles zones are labelled.(c) and (d) Density estimation via kernels, isolines each 2%. Note that the identification of the main discontinuity sets is able to filter out the normal vectors calculated at the edges between planes.

also shows the calculated density function using the kde method. In this figure, the normal vector poles are clearly clustered into three orthogonal discontinuity sets as it was expected.

At this point, the density of the poles is known. Therefore, we can identify the peaks which reasonably represent the orientations of the 3D point cloud and its neighbours.

2.3.2. Semi-automatic set identification

In this step, the method assigns a principal orientation to every single point in the point cloud. If the method detects that the point is not represented by any principal orientation, there will be no assignment.

The scheme of this step is summarized in Fig. 6. Usually, the density function analysis shows many local maximums, but only a few are principal poles, which is due to the fact that the existence of reading errors and singular points of curved surfaces imply the dispersion of the poles. Hence, two requirements, which can be user-supervised, allow us to define a local maximum as a principal pole:

- a) Condition num. 1 (Cone filter): the user defines a certain value (γ_1). The angle formed by two principal vectors must be higher than this value.
- b) Condition num. 2 (max. poles filter): The user indicates the maximum number of discontinuity sets (n_p) that can be established. The system filters and accepts the n_p principal planes with higher density.

Fig. 7 shows the poles density function of a cube in which peaks are numbered from the highest to the lowest value of the density function ($knn=10$ and $\eta_{max}=20\%$). In Fig. 7a the density function obtained applying no filters shows many local maxima (labelled from 1 to 9). By accepting a minimum γ_1 value of 20° , a cleaner plot of the principal planes is obtained specifically, the relevance of discontinuity sets 1, 2 and 3 on the other is obvious, thus the maximum number of discontinuity sets is set to 3 (Fig. 7b).

The next step consists of the segmentation of the point cloud: we assign a label to each point of the point cloud according to the closest principal families. For every single point, we look for the discontinuity set that provides the minimum angle (γ) between the associated normal vector and the assigned principal plane normal vector. A threshold is then defined in order to limit the maximum allowed value (γ_2). As an example, Fig. 8 shows the application of these criteria for the recognition of the discontinuity sets of the cube. Points are classified according to their closest poles in Fig. 8a; a threshold is then defined in Fig. 8b ($\gamma_2=30^\circ$), classified points are automatically filtered out.

At this point, we have identified the principal orientations of the 3D point cloud and its neighbours. The corresponding orientation has been assigned to each point depending on the point and its neighbours' orientation. We then discarded those points having an orientation considerably different to any principal pole (i.e. higher than γ). Since we have extracted the points belonging to a discontinuity set, the next step is to identify the 3D point clusters of each DS.

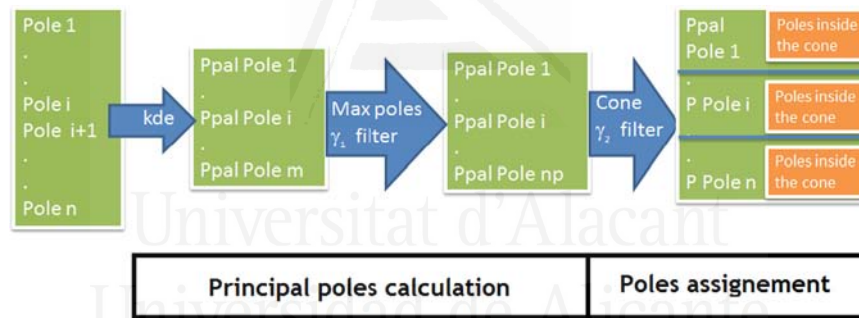


Fig. 6. Scheme of the discontinuity set calculation.

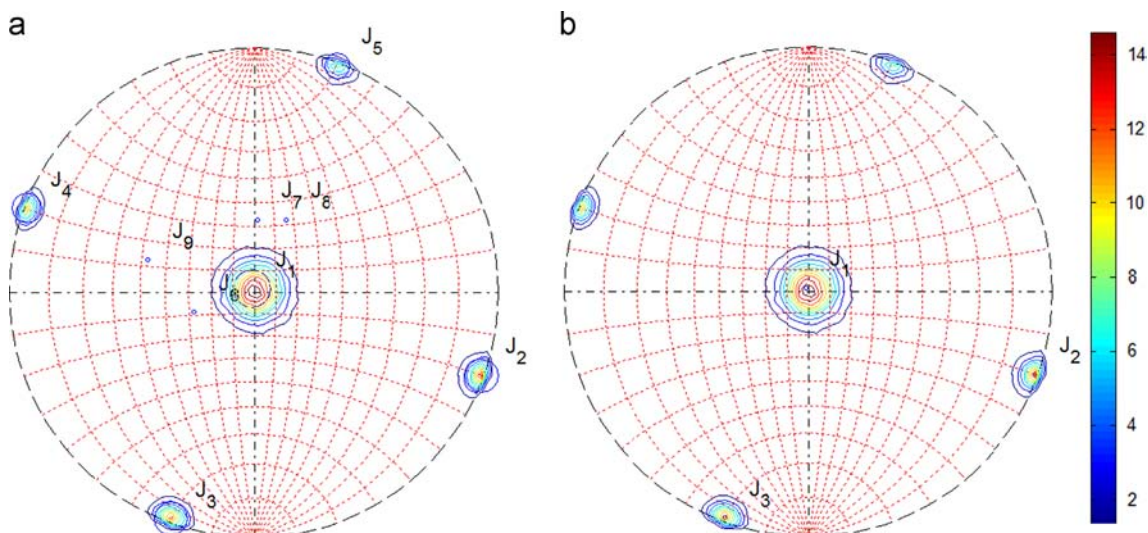


Fig. 7. Poles density of the cube shown in Fig. 2, (a) non-filtered and (b) cone filter ($\gamma_1=20^\circ$) and max. poles filter ($n_p=3$). Note that the labels (J_1 – J_9) indicate the location of the calculated relative maximums. Isolines are plotted each 2%.

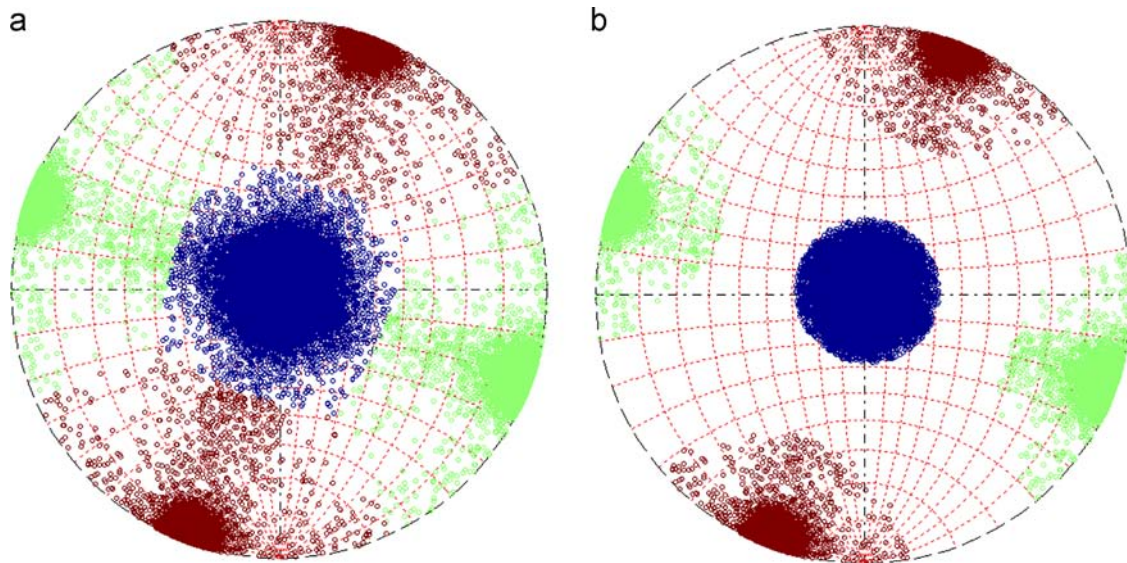


Fig. 8. Stereographic representation of the principal poles assignment of the cube dataset (a) non-filtered poles, 59,705 poles and (b) $\gamma=30^\circ$ cone filtered, 57,134 poles. Note that this step is able to filter out the normal vectors calculated at the edges between planes.

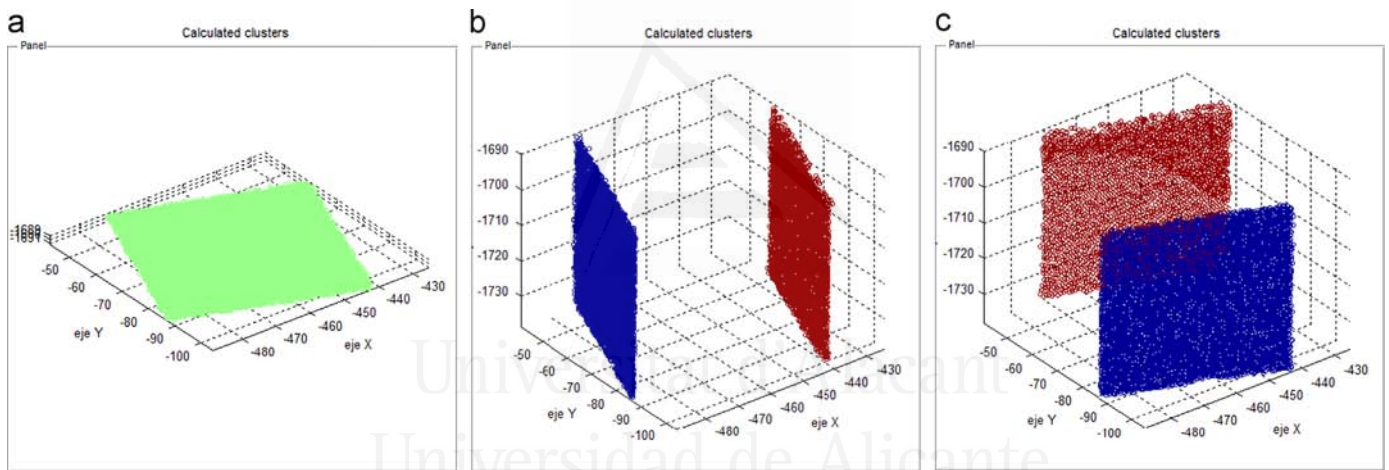


Fig. 9. Identification of the different clusters for the three automatically recognized sets of planes of the cube shown in Fig. 2. Note (left figure) that only the upper face of the hexahedron is recognized by the software because no points are available from the lower face, which is a shadow area for LiDAR.

2.4. Part C: cluster analysis

Given a discontinuity set i it is necessary to find its data subset R_i whose points are grouped according to planar clusters (Fig. 9). The obtained clusters are members of the discontinuity set I which are defined in the space through its plane Eq. (3).

2.4.1. Clustering

For the clustering of the 3D datasets, we employed the “Density-Based Scan Algorithm with Noise” (DBSCAN) (Ester et al., 1996). This clustering algorithm for class identification in spatial databases has been proven in a previous successful application in the processing of LiDAR point clouds (Tonini and Abellan, 2014). This algorithm requires as input the following parameters: (a) ϵ , which is the maximum distance between two points to consider them as neighbours; (b) $Min\text{-pts}$, which is the minimum number of neighbours of point q to consider q as a core point. It is known that large differences in densities might affect the application of automatic methods (Ester et al., 1996; Lato et al., 2010). Although in order to develop this algorithm it is assumed that density of the point cloud is homogeneous, the effects of

heterogeneous density of measurements on the results will be analysed later.

Ester et al. (1996) recommend to set the parameter $min\text{-pts}$ equal to 4. In addition, ϵ should be determined considering the distance of the 4th neighbour for each discontinuity set. The method calculates all the 4th neighbour distances for all the accepted points members of a principal plane. ϵ can be considered as the mean, maximum or other statistically representative values. Maximum value should be inappropriate because of the existence of noisy extreme values. As the method works with raw data, the number of distances is high enough to consider a normal distribution, so the proposed ϵ value is the 4th neighbour distances mean plus two standard deviations.

A real case cluster analysis may find a high number of small clusters. It is possible that the user is only interested in big clusters so the method offers the option of discarding small clusters stating a selection threshold named parameter points per cluster, hereinafter ppc . Thus, only clusters sized by a number of points equal or higher than ppc will be in the output.

At this point, we have calculated the spatial clusters of each discontinuity set. The next step is to calculate the plane equations of these discontinuities to mathematically define the planes.

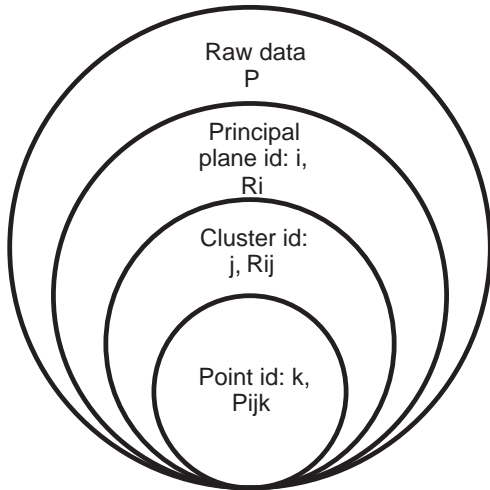


Fig. 10. Relations between indices.

2.4.2. Plane generation

Plane generation is carried out as follows: given (a) a set of points which belong to a discontinuity set i – hereinafter R_i – and (b) a set of points members of a cluster j which constitute a subset of R_i – hereinafter R_{ij} – then (c) we will find the best-fit plane of R_{ij} , which plane equation can be defined by the following algebraic expression:

$$A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij} = 0 \quad (5)$$

We apply the PCA to the k points P_{ij}^k which have coordinates $(x_{ij}^k, y_{ij}^k, z_{ij}^k)$, and are members of the no empty set R_{ij} , obtaining the principal vectors V_3 . The parameters A_{ij} , B_{ij} and C_{ij} are calculated using Eq. (4). It is also possible to calculate these parameters using the normal vector of the discontinuity set principal pole, so all the clusters will exactly have the same orientation. The independent term D_{ij} of the plane Eq. (3) is computed by the least square method which is mathematically defined by the following equation:

$$D_{ij} = -\frac{A_{ij}}{n} \sum_{k=1}^n x_{ij}^k - \frac{B_{ij}}{n} \sum_{k=1}^n y_{ij}^k - \frac{C_{ij}}{n} \sum_{k=1}^n z_{ij}^k \quad (6)$$

Where n is the cluster size of R_{ij} . The relations between the indexes are shown in Fig. 10.

2.4.3. Error fitting checking

Once the R_{ij} plane equation has been calculated, it is convenient to check the quality of the data fitting. Given that $\|\vec{V}_3\| = 1$, the fitting error er_{ij} is defined as the point plane distance (7).

$$er_{ij}^k = Ax_{ijk}^k + By_{ijk}^k + Cz_{ijk}^k + D \quad (7)$$

Therefore the errors er_{ij} associated to the cluster R_{ij} can be defined by Eq. (7). The set er_{ij} must satisfy two characteristics: the value of its module $|\overline{er}_{ij}|$ must be minimum (this will be satisfied as the equation is calculated by the least mean square method) and the value of its standard deviation $\sigma(er_{ij})$ must be reasonably low.

3. Results for case study A: sensitivity analysis and calibration

A sensitivity test and calibration of the proposed methodology, consisting in finding the proper parameter values in order to obtain satisfactory results, is discussed in detail in next subsections. The main steps followed for the calibration are: (a) definition of an experimental test and scanning of regular geometrical figures; (b) analysis of the surface for planar sides and for non-planar surfaces

such as edges and vertexes; (c) test of the method with all the figures separately using the chosen values; and (d) analysis and discussion of the results.

3.1. Coplanarity test calibration: influence on the number of neighbours

The number of neighbours knn and the maximum deviation η (2) are the first parameters used for the coplanarity test calibration. Given a planar surface and its scan data P_i , the deviation η for each subset Q_i member of P_i can be calculated. This process is carried out changing the value of knn , thus η_{max} can be analysed. It is very important to set a value of η_{max} that discards only real noise data in order to avoid the loss of valuable information. A small value of η_{max} may consider normal points as noise due to instrumental error, surface roughness or surface curvature.

The performed sensibility test (Fig. 11) uses the PCA to each Q_i , which is a subset with j neighbours. For each point i and its neighbours j , the deviation η_{ij} (Eq. (2)) is calculated. In order to avoid outliers the 1% lower and upper tails are removed. The final step is calculating the mean $E(\eta_{ij})$ and the standard deviation $\sigma(\eta_{ij})$.

3.1.1. Plane surfaces analysis

This analysis consists of the method execution for sets extracted from known plane surfaces. The main data characteristics of the sets are:

- All the surfaces have the same area but different density of points.
- Planes 1, 2, 3 and 4 are the vertical planes.
- Plane 5 is a horizontal plane with a higher standard deviation (σ) than the vertical planes due to a plane over representation, as stated in data acquisition section.
- Due to the large number of data, the representative value of the deviation (η) is the mean $E(\eta_{ij})$ plus three sigmas, $\sigma(\eta_{ij})$ (Fig. 12a).

This calibration study shows that generally:

- With low values of knn the values of η are usually high. This correlation tends to decrease when knn grows.
- The data bias becomes less important as the knn grows.

3.1.2. Non-coplanar points analysis: edges and vertexes

In order to identify the deviation (η) for the non-coplanar sets – i.e. the edges and vertex – three sets containing two edges and one vertex have been selected and analysed (Fig. 12b). The results of this calibration indicate that the mean error is higher on vertexes and edges than on planes.

3.2. Number of neighbours and deviation tolerance determination

For a straightforward planar feature detection, non-planar features (such as edges and vertex) should be labelled and discarded according to a combination of two different parameters: η_{max} and knn . The calibration test (case study A) pointed out about the convenience of choosing a high value of knn and a low value of η_{max} in order to optimize this segmentation. Thus, a sensitivity analysis on the combination of both parameters was carried out.

The Micro LiDAR case study shows that low numbers of knn (e.g. $k < 15$) retained significant noise in pole calculation. By contrast, a larger number of neighbours (e.g. $knn > 30$) significantly smoothed local curvature. Regarding η_{max} parameter, values below 15% produced the discard of good candidates to coplanar points, whereas

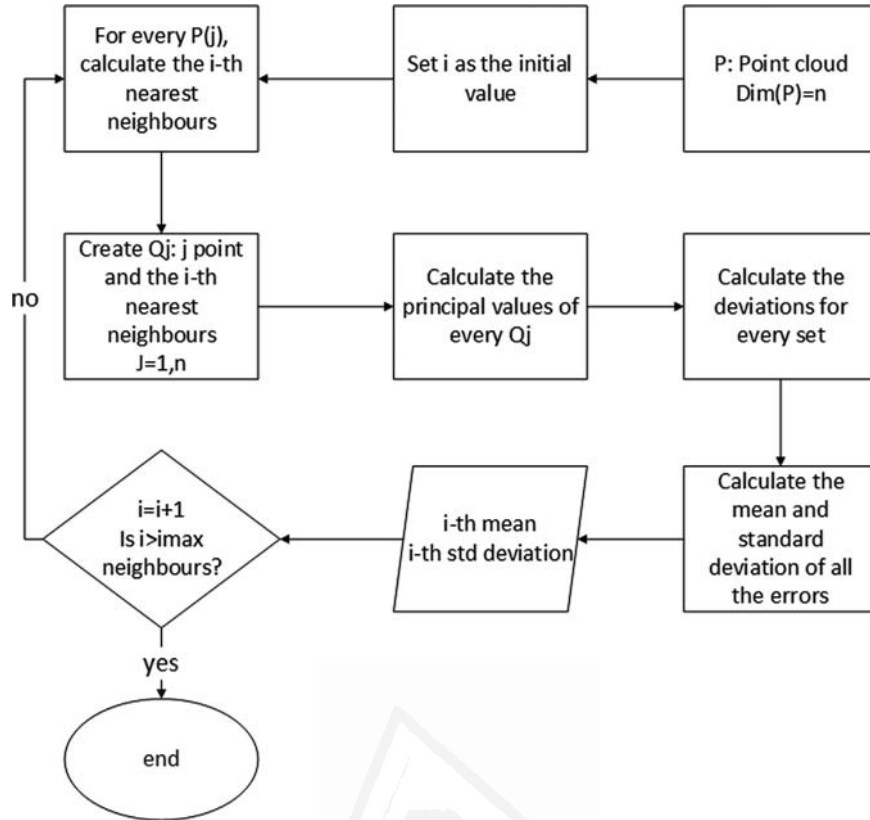


Fig. 11. Model calibration scheme.

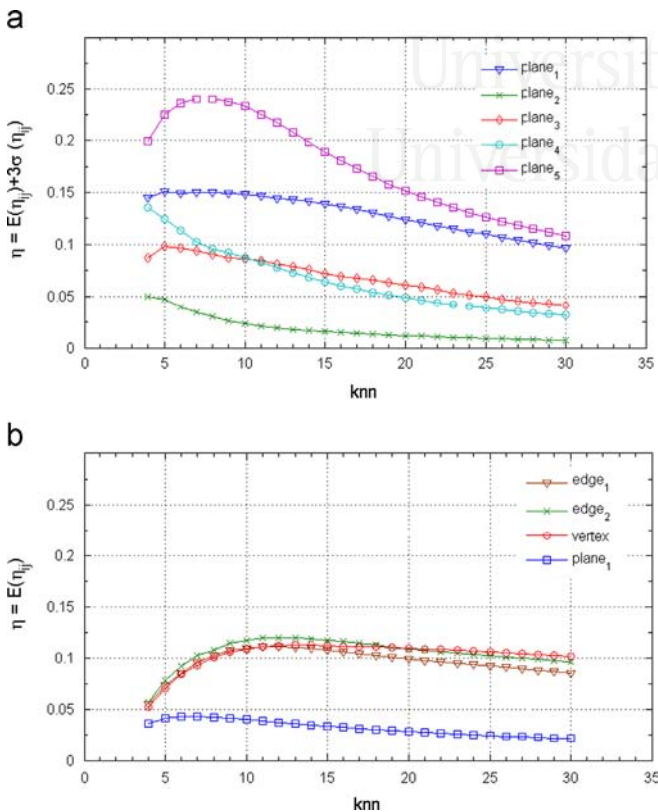


Fig. 12. (a) calibration of the parameters η_{max} and knn for plane surfaces, (b) calibration of the parameters η and knn for non planar sets.

values above 25% generated the admittance of edge points and coplanar points. Accordingly, knn values ranging from 15 to 30 were selected as an optimal compromise between accuracy and resolution. Similarly, the optimal η_{max} value was defined in around 20%.

3.3. Influence of knn in the dispersion of the pole planes

The number of knn neighbours significantly affects to the pole dispersion in the stereoplot, as can be seen in Fig. 13. Considering $knn = (5, 10, 20, \text{ and } 30)$ and $\eta_{max} = 1$, all the poles of the top side of the cube are computed and the density function is plotted. This surface was intentionally chosen because it is horizontal, so the principal pole must be in the centre of the stereoplot – Dip = 0° for all the dip direction values.

The result of this calibration (Fig. 13) indicates that, as the knn parameter grows, the calculated normal vectors tend to be less scattered around the mean value, meaning a greater precision obtained when increasing the number of neighbour points.

This effect happens because all the points belong to the same flat surface. When the points belong to a non-planar surface, such as a very irregular curved surface, the principal pole would not have to converge to a point as knn grows.

3.4. Pole dispersion effects in the cluster analysis

Cluster analysis requires constant density of points in order to obtain homogeneous results (Ester et al., 1996). This analysis shows that, in some particular cases, the pole dispersion in the stereoplot can negatively affect the cluster analysis.

Let's consider a particular case to show this effect. If two adjacent surfaces have very close orientations and at least one

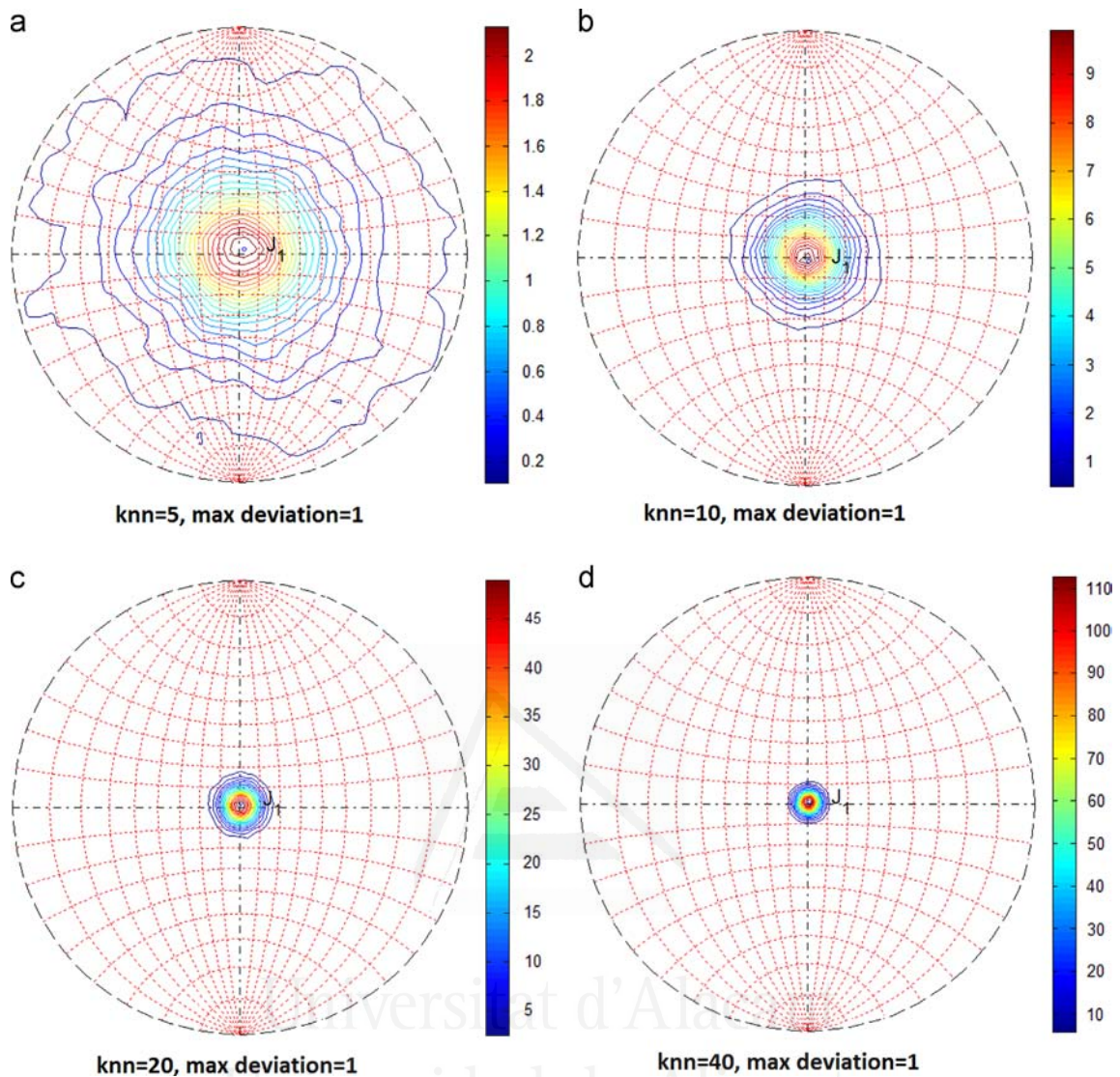


Fig. 13. Influence of the number of neighbours in the scattering of the poles for a single plane (cube datasets, horizontal plane). Poles density of the plane 5, i.e. the upper side of the cube, was calculated with different values of knn : (a) $knn=5$; (b) $knn=10$; (c) $knn=20$ and (d) $knn=30$. Isolines are plotted each 5%.

surface is highly affected by bias, cluster analysis may provide poor results.

Sparse points define planes with orientations not close enough to the principal plane, so it could be closer to the adjacent surface orientation. Thus, sparse poles could be assigned to other principal pole and the cluster analysis will extend the cluster to other surface areas or will consider them as noise.

If the icosahedron is considered, adjacent sides form an angle of 42° approximately. If the surface points' bias is high, the discontinuity set assignment could be wrong. The analysis pointed that if $knn=15$ some points that belong to a surface were assigned to the adjacent one by the cluster analysis. When knn was set to 30, the planes concentrated around the principal pole with less deviation. Therefore, the poles were assigned to points correctly and the cluster analysis offered a good result.

3.5. Proposal of the optimal parameters

The previous performed analyses from well-known regular figures using 3D digitizer data allowed us to conclude that the optimal processing parameters for the different processing stages are: (a) for the step A – planes detection – we set $knn=30$ and $\eta_{max}=20\%$ as optimal parameters; (b) for the Part B – statistical

analysis and poles assignment to discontinuity sets – we determined $\gamma_1=20^\circ$, $n_p=20$; and $\gamma_2=30^\circ$; Finally, (c) for the part C – cluster analysis – we defined the optimal value of $ppc=50$.

Fig. 14 shows the case study of an icosahedron processed using the above listed parameters. As can be seen, the analysis successfully obtained the different clusters of this Platonic solid.

With the proposed parameters, all the geometrical solid objects were successfully processed. Reasonably good results were obtained: (a) the orientation of each face matches with the compass lectures; furthermore, (b) the visual analysis inspection showed that outliers and non-planar parts of the objects (edges and vertex) were properly segmented and discarded. In the following section, these parameters will be used in a real case (case study B).

4. Results for case study B: application to a real roadcut

Once the methodology has been applied and calibrated using regular geometrical figures, the next step consists in the application of the methodology to a real case of study. The datasets – which are publically available at Rockbench.org (Lato et al., 2013) – consist of a 3D point cloud on a quartzitic roadcut in Ouray (Colorado).

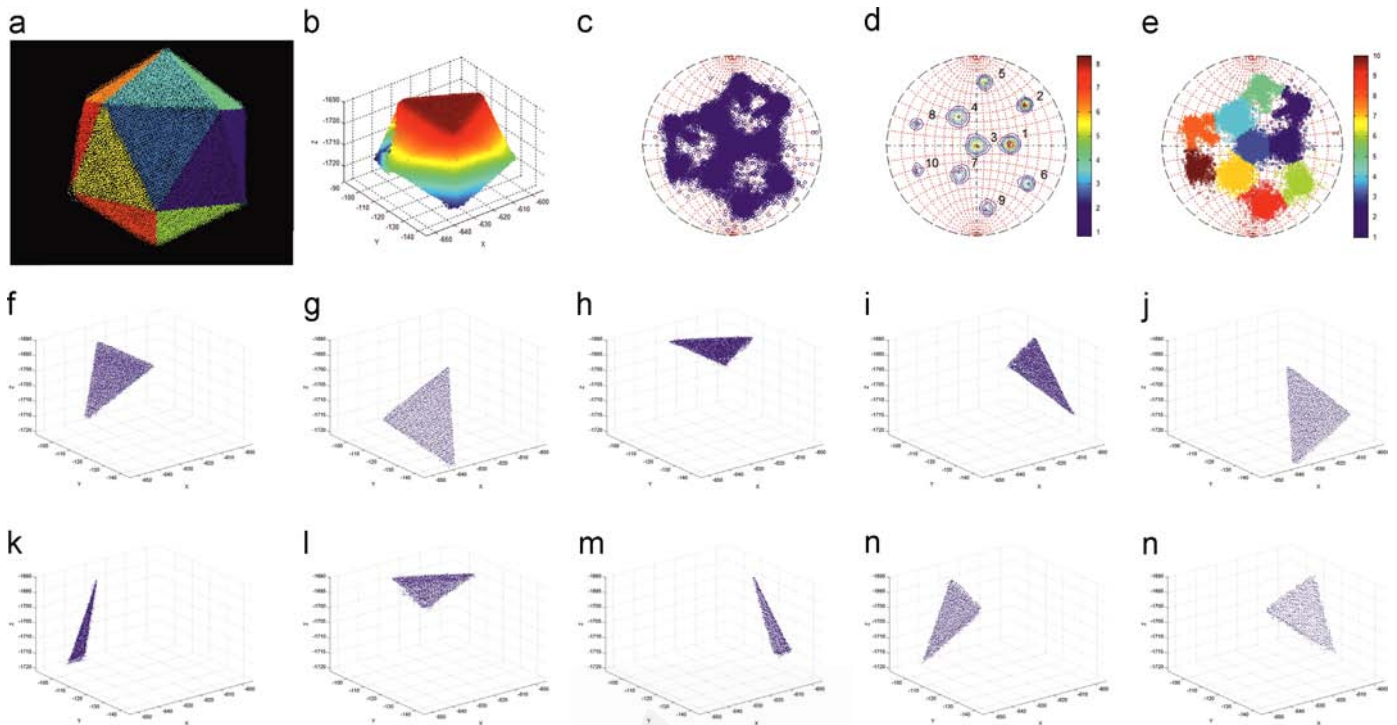


Fig. 14. Icosahedron scan results. (a) 3D points and discontinuity sets coloured plot, (b) 3D data plot, (c) calculated poles stereonet, (d) density function plot and discontinuity sets plot, (e) poles assigned to discontinuity sets plot, and (f)–(o) calculated clusters. Note that only ten clusters (faces) have been recognized because the additional ten clusters (faces) were in a shaded area of the scan and as a consequence no data were obtained from them.

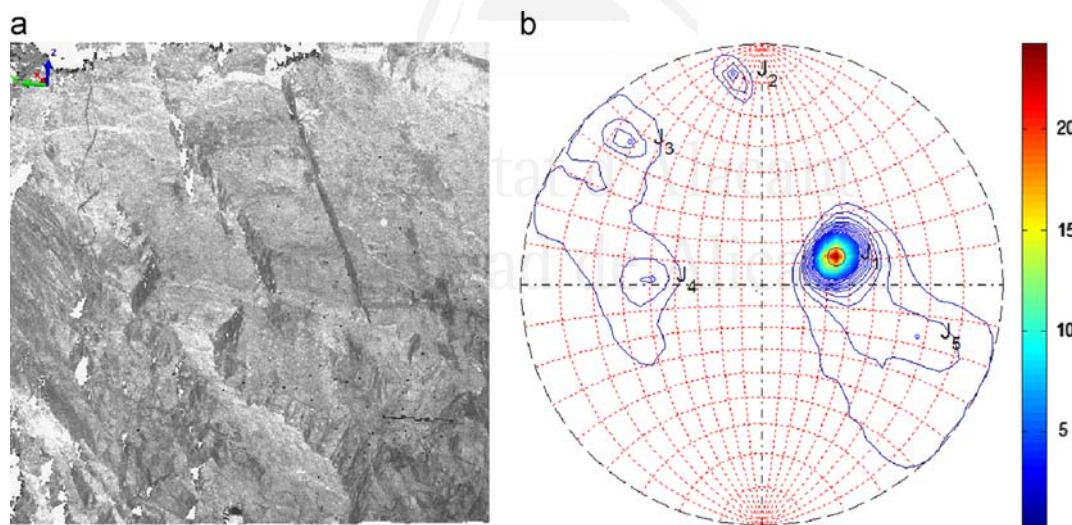


Fig. 15. (a) Scattered point cloud. (b) Normal vector density plot of the different planes. Five principal poles were found: J_1 (249/37), J_2 (172/83), J_3 (137/78), J_4 (093/49) and J_5 (288/68). Isolines are plotted each 1.25%.

Since the point cloud was acquired from a single station, no alignment artefacts were detected. Thus the knn value was set in 15 and η_{max} to 20% based on the above discussion of calibration.

During the analysis, the method detected five principal discontinuity sets (Fig. 15b and Table 2). This figure shows that despite J_1 is the most visible outcrop, there are other discontinuity sets less represented (i.e. J_2 , J_3 , J_4 and J_5). As the method searched local maximum values, the J_2 , J_3 , J_4 and J_5 sets were identified. A visual analysis of the results pointed out that the J_1 orientation (249,04/36,66; Fig. 15b) seems to successfully represent the stratification plane.

In order to obtain good cluster visualization the maximum number of points per cluster (ppc) was set to 500. Each cluster has

associated an equation (Eq. (5)). Table 2 provides the details of the planes adjustment analysis.

As an output data example of cluster computation, a crop of the surface shown in Fig. 16b has been analysed. This window shows the five discontinuity sets and different clusters. In Fig. 17a, we observe the results of the point cloud segmentation: several labelled clusters, whose planes are mentioned in Table 3, are shown with different colour labelling. Note that sets J_1 (represented in Fig. 17b by point labels 11–17; Table 3), J_3 (represented in Fig. 17d by point labels 31–33; Table 3) and J_4 (represented in Fig. 17e by point labels 41–43; Table 3) are almost perpendicular. This can also be observed in Fig. 16b.

Table 2

Results: application of the proposed methodology to the studied roadcut (Case study B). Dip orientation and dip are in degrees. Error is calculated by Eq. (9). See the orientation and location of the discontinuity sets in Figs. 16 and 17 respectively.

Discontinuity set	Azimuth °	Dip °	Number of clusters	Number of points	Mean error (m)	Std. Dev. Error (m)
J_1	249.04	36.66	59	5,58,921	2.61×10^{-4}	1.43×10^{-1}
J_2	172.29	83.16	14	36,781	2.59×10^{-4}	1.36×10^{-1}
J_3	137.33	77.87	56	1,35,858	1.10×10^{-5}	1.42×10^{-1}
J_4	092.96	48.74	34	96,348	1.67×10^{-4}	1.08×10^{-1}
J_5	288.45	68.22	57	1,96,613	2.38×10^{-4}	2.13×10^{-1}

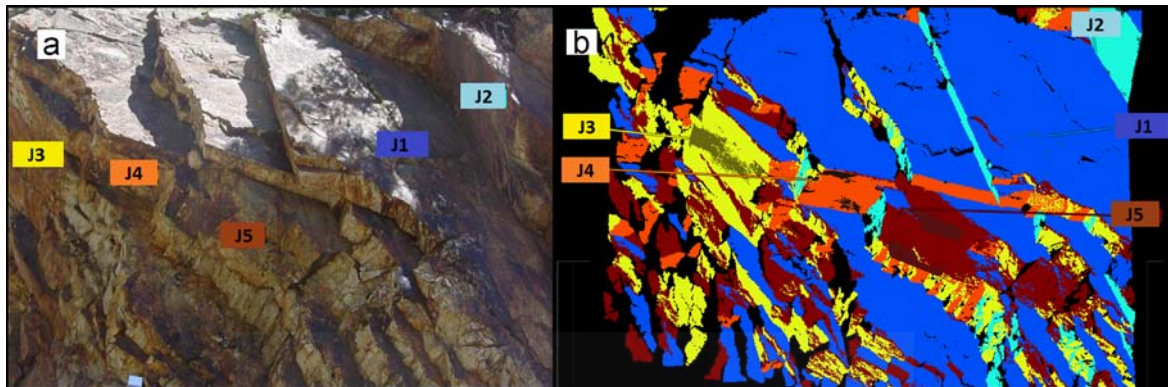


Fig. 16. (a) Picture showing the section of the scanned area and (b) segmented 3D point cloud: discontinuity set assignment (families J_1 , J_2 , J_3 , J_4 and J_5) to each point; the points not associated to any family are not represented.

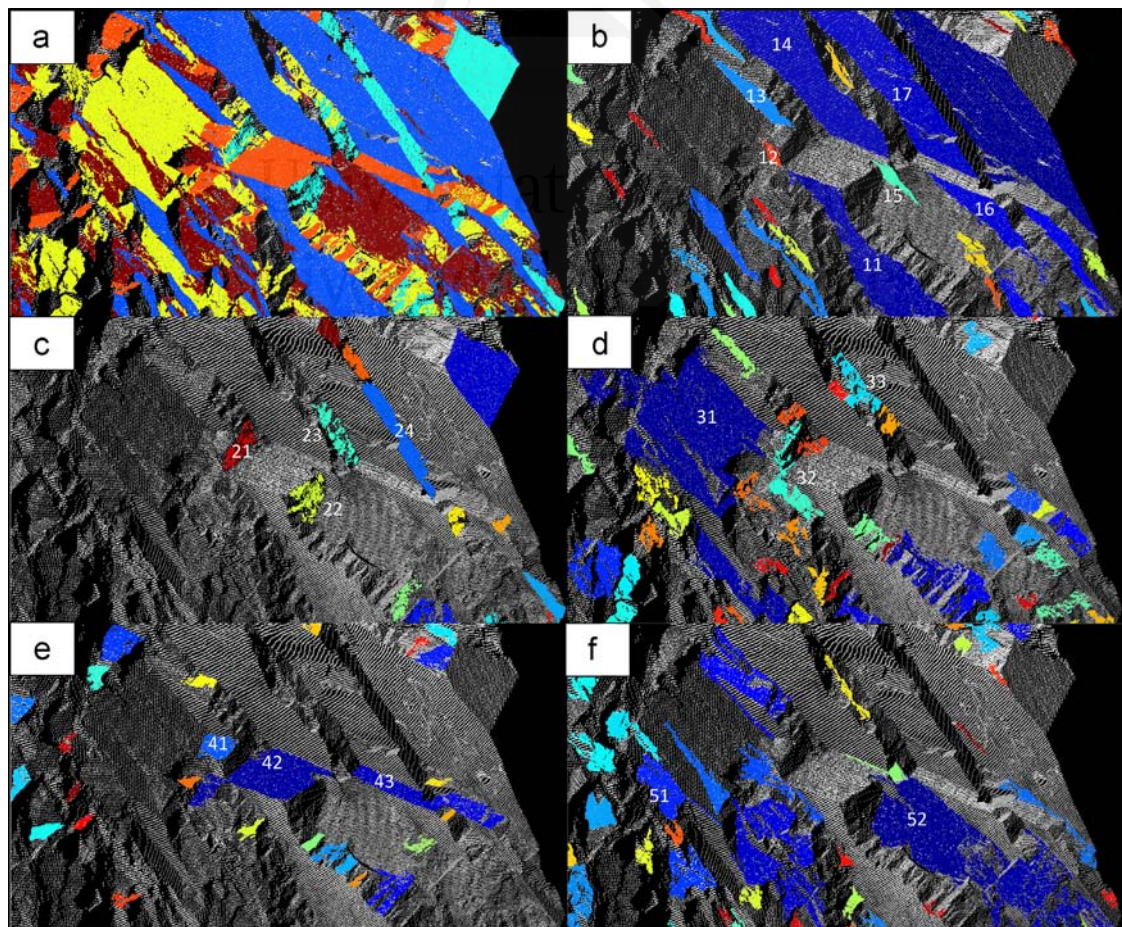


Fig. 17. Clusters identification in a section of the Case Study B. (a) One colour per discontinuity set with all clusters labelled, (b) J_1 , (c) J_2 , (d) J_3 , (e) J_4 and (f) J_5 sets representation using one colour per cluster.

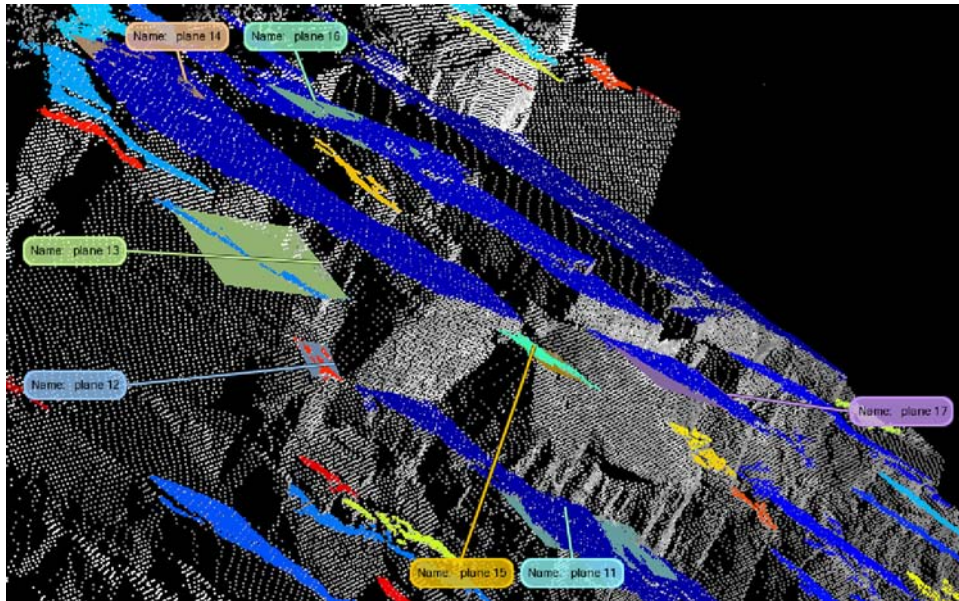


Fig. 18. Best-fit planes extraction of some selected set of points, using Polyworks.

Table 3
Cluster equations identified from the rock mass crop shown in Fig. 15.

Point label (Fig. 17)	Discontinuity set id	Cluster id	Parameters of the cluster equation: $Ax + By + Cz + D = 0$ (Eq. (5))			
			A	B	C	D
11	J_1	2	-0.576	-0.254	0.777	16.247
12		49	-0.770	-0.180	0.612	20.752
13		15	0.551	0.198	-0.811	-14.102
14		3	-0.554	-0.173	0.814	13.056
15		26	-0.550	-0.203	0.810	13.369
16		5	0.553	0.196	-0.810	-12.713
17		4	-0.522	-0.139	0.841	11.055
21	J_2	13	-0.348	0.930	0.118	2.999
22		8	0.230	-0.945	-0.232	-2.657
23		6	0.339	-0.941	0.003	-6.033
24		3	0.109	-0.968	0.227	-3.548
31	J_3	1	0.681	-0.720	0.129	-12.309
32		24	0.746	-0.654	0.128	-15.079
33		19	0.589	-0.808	-0.005	-12.748
41	J_4	7	0.885	-0.117	0.451	-22.315
42		1	0.768	-0.014	0.640	-19.203
43		2	0.738	-0.086	0.670	-17.861
51	J_5	9	0.810	-0.535	-0.239	-18.112
52		1	0.904	-0.255	-0.343	-20.759

So, the proposed methodology defines the scanned surface by algebraic expressions following Eq. (3).

Discontinuity orientations measured on field were not available for this case study. Therefore, the results were validated by comparing our method with the classical approach for normal vector estimation, meaning the best fit plane to a subset of points was calculated according to Fernández (2005). Two different indicators were used (Table 2): (a) the mean error for the different discontinuity sets and their associated standard deviations were analysed and included in Table 2; (b) furthermore, we computed several best-fit planes using Polyworks and compared them with the result (α angle). The extracted vectors (EV) and the method vectors (MV) are almost parallel (Table 4). Nevertheless, the discontinuity J_3 shows the highest angle difference, which was expected due to its surface irregularity.

We finally performed a visual checking of the recognized discontinuities, where each point was coloured according to its

discontinuity set or its cluster. Despite the intrinsic waviness of the discontinuities, results agree with the observed field relationships (Figs. 16 and 17).

5. Conclusions

In this work a new method for the semi-automatic calculation of the orientations and position of rock mass discontinuities from 3D LiDAR data is presented. The method is based on the: (a) calculation of the normal vector using PCA; (b) removal of anomalous points through the creation of a coplanarity test; (c) semi-automatic identification of the main discontinuity sets using a KDE analysis; (d) assignment of each point to a given main family set (or to a noise); and (e) automatic extraction of single discontinuities using DBSCAN algorithm.

Table 4

Validation of the proposed method through comparison of our method with classical best-fit plane using Polyworks. The second column shows the cluster orientation corresponding to the Table 3 label.

Discontinuity set	Plane orientation using classical approach (Fig. 18)	Plane orientation using the proposed method (Fig. 17 and Table 3)	Angle between planes (°)
J_1	249.18/40.23 (Plane 11)	246.24/39.02 (Label 11)	2
J_1	264.23/57.02 (Plane 12)	256.86/52.30 (Label 12)	8
J_1	263.97/41.91 (Plane 13)	070.26/35.80 (Label 13)	11
J_1	252.58/36.53 (Plane 14)	252.68/35.48 (Label 14)	1
J_1	248.71/36.98 (Plane 15)	249.74/35.91 (Label 15)	1
J_1	254.77/29.86 (Plane 16)	070.47/35.92 (Label 16)	6
J_1	249.85/35.94 (Plane 17)	255.12/32.72 (Label 17)	4
J_2	338.68/82.35 (Plane 21)	339.47/83.25 (Label 21)	1
J_2	347.47/79.01 (Plane 22)	166.33/76.58 (Label 22)	3
J_2	341.04/89.50 (Plane 23)	160.20/89.86 (Label 23)	1
J_2	353.50/76.40 (Plane 24)	173.55/76.85 (Label 24)	0
J_3	314.10/77.18 (Plane 31)	136.59/82.58 (Label 31)	6
J_3	302.36/75.92 (Plane 32)	131.25/82.67 (Label 32)	11
J_3	330.19/83.01 (Plane 33)	143.91/89.70 (Label 33)	10
J_4	286.12/58.91 (Plane 41)	097.55/63.22 (Label 41)	9
J_4	274.18/51.09 (Plane 42)	091.07/50.19 (Label 42)	3
J_4	277.22/46.42 (Plane 43)	096.64/47.97 (Label 43)	2
J_5	305.04/77.62 (Plane 51)	123.42/76.15 (Label 51)	2
J_5	290.16/66.99 (Plane 52)	105.75/69.94 (Label 52)	5

Table 5
CPU time.

Step	Computing time (s)	%
Part A: local curvature calculation	4,277	80.59%
Part B: statistical analysis	2	0.04%
Part C: cluster analysis	1,028	19.37%
Total	5,307	100%

A complete sensitivity analysis of the parameters has been carried out as well, playing a key role on the method, and showing the strong influence that the number of neighbours has in the quality of the method, both for planar features, edges and vertex.

The method has been tested using three sources of information – synthetic data, 3D digitized and Terrestrial LiDAR scans – showing a good adaptability of the method to the different sources of information. The case study A allowed us to validate the method and to provide a range of values for the method's parameter, which were then successfully applied in case study B. Furthermore, the method has been tested with more than two million points in a Intel Core i3-350M, 8GB DDR3 RAM with a total processing time of 5307 s (Table 5). The slowest step is the coplanarity test, which increases the execution time geometrically as the knn parameter grows. In addition, it was necessary to adapt the DBSCAN algorithm to large point clouds. Finally, our experience indicates that it is not recommended to analyse a huge number of points in the same test since principal orientations could be masked due to an excess of poles in stereoplots.

One of the strengths of the method consists in using the original information contained in the 3D points during all the process, instead of commonly used approaches that utilize 2.5D interpolated surface model. Although a great improvement in workflow automation is obtained using the proposed methodology, a solid background in structural geology and rock mechanics together with the use of useful material such as field pictures and visual recognition of the results is required for an optimum application of the proposed method.

Further research lines point to a continuous software development in order to automatically obtain geomechanical parameters (e.g. spacing, persistence, etc.) from the scanned rock masses; furthermore, we support the development of a more reproducible research thanks to the new trend in code and data sharing under

Creative-Commons license (e.g. www.reproducibleresearch.net). In order to contribute to the latter, the complete 3D RAW and processed datasets are publically available in our website (www.3D-landslide.com/discontinuity).

Acknowledgements

The laser scanner raw data from the case study B was obtained from Rockbench open repository (www.rockbench.org), the work carried out by the RockBench founders (R. Harrap, M. Lato, J. Kemeny and G. Bevan) is kindly appreciated. This work was partially funded by the University of Alicante (vigrob-157, uausti11-11, and gre09-40 Projects), the Swiss National Science Foundation (FNS-138015 and FNS-144040 Projects) and by the Generalitat Valenciana (Project GV/2011/044).

References

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M., Lato, M.J., 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surf. Processes Landf.* 39, 80–97.
- Abellán, A., Vilaplana, J.M., Martínez, J., 2006. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Eng. Geol.* 88, 136–148.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications.
- Botev, Z., Grostowski, J., Kroese, D., 2010. Kernel density estimation via diffusion. *Ann. Stat.* 38, 2916–2957.
- Brodu, N., Lague, D., 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 68, 121–134.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X., 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *KDD*, pp. 226–231.
- Feng, Q., Sjogren, P., Stephansson, O., Jing, L., 2001. Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Eng. Geol.* 59, 133–146.
- Fernández, O., 2005. Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. *J. Struct. Geol.* 27, 855–858.
- Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H.I., 2009. Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. *Rock Mech. Rock Eng.* 42, 631–665.
- Friedman, J.H., Bentley, J.L., Finkel, R.A., 1977. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Trans. Math. Softw. (TOMS)* 3, 209–226.
- García-Sellés, D., Falivene, O., Arbués, P., Gratacos, O., Tavani, S., Muñoz, J.A., 2011. Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Comput. Geosci.* 37, 1584–1594.
- Gigli, G., Casagli, N., 2011. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 187–198.

- Hack, R., Price, D., Rengers, N., 2003. A new approach to rock slope stability—a probability classification (SSPC). *Bull. Eng. Geol. Environ.* 62, 167–184.
- Harrison, J.P., Hudson, J.A., 2000. *Engineering Rock Mechanics—an Introduction to the Principles*. Elsevier.
- Hoek, E., Bray, J., 1981. *Rock Slope Engineering*. CRC Press.
- Ioannou, Y., 2012. Difference of Normals as a Multi-scale Operator in Unorganized Point Clouds. In: Taati, B., Harrap, R., Greenspan, M. (Eds.), pp. 501–508.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M., Locat, J., Turmel, D., 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. *Rock Mechanics. Meeting Society's Challenges and Demands*. In: *Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium*, Vancouver, Canada, p. 31.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat. Hazards* 61, 5–28.
- Kemeny, J., Norton, B., Turner, K., 2006a. Rock slope stability analysis utilizing ground-based LIDAR and digital image processing. *Felsbau* 24, 8–10–15.
- Kemeny, J., Turner, K., Norton, B., 2006b. LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and Best-practices, Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization. ARMA Golden, Colorado.
- Khoshelham, K., Altundag, D., Ngan-Tillard, D., Menenti, M., 2011. Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 1215–1223.
- Lato, M., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., Harrap, R., 2009. Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 194–199.
- Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R.M., Bevan, G., 2013. Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry. *Comput. Geosci.* 50, 106–114.
- Lato, M.J., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., 2010. Bias correction for view-limited Lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mech. Rock Eng.* 43, 615–628.
- Lato, M.J., Voge, M., 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 54, 150–158.
- Lisle, R.J., 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*, vol. 3. Elsevier.
- Olariu, M.I., Ferguson, J.F., Aiken, C.L., Xu, X., 2008. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. *Geosphere* 4, 247–259.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H., Metzger, R., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1003–1019.
- Pantelidis, L., 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 315–325.
- Rencher, A.C., Christensen, W.F., 2012. *Methods of Multivariate Analysis* vol. 709. John Wiley & Sons.
- Rengers, N., 1967. *Terrestrial Photogrammetry: A Valuable Tool for Engineering Geological Purposes*. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, vol. V/2–3.
- Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *Proceedings International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, pp. 49–53.
- Roncella, R., Forlani, G., 2005. Extraction of planar patches from point clouds to retrieve dip and dip direction of rock discontinuities. In: *Proceedings of Laser Scanning*, pp. 162–167.
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S., Allison, R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 38, 363–375.
- Silverman, B.W., 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. CRC press.
- Slob, S., Hack, H., Feng, Q., Roshoff, K., Turner, A., 2007. Fracture mapping using 3D laser scanning techniques. In: *Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal, pp. 299–302.
- Slob, S., Hack, R., 2004. 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. *Lect. Notes Earth Sci.* 104, 179–189.
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., Kemeny, J., 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. *Transp. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 1913, 187–194.
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009a. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.* 106, 163–182.
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009b. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., Elmo, D., 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Eng. Geol.* 119, 96–111.
- Tomás, R., Delgado, J., Serón, J.B., 2007. Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44, 1062–1069.
- Tonini, M., Abellan, A., 2014. Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: a clustering approach using R. *J. Spat. Inf. Sci.* <http://dx.doi.org/10.5311/JOSIS.2014.8.123>.
- Turner, A.K., Kemeny, J., Slob, S., Hack, R., 2006. Evaluation, and management of unstable rock slopes by 3-D laser scanning. *International Association for Engineering Geology and the Environment*. The Geological Society of London, pp. 1–11.
- Viero, A., Teza, G., Massironi, M., Jaboyedoff, M., Galgaro, A., 2010. Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: the Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps). *Geomorphology* 122, 191–204.
- Voge, M., Lato, M.J., Diederichs, M.S., 2013. Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data. *Eng. Geol.* 164, 155–162.

“Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds

Engineering Geology, Volume 195, 10 September 2015, Pages 185-195, ISSN 0013-7952, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>”

Adrián J. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás

8

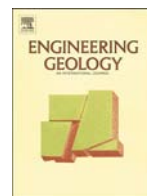
***Artículo 2: Discontinuity spacing analysis
in rock masses using 3D point clouds***

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enggeo

Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds

Adrián J. Riquelme ^{a,*}, Antonio Abellán ^b, Roberto Tomás ^a^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, Spain^b Risk Analysis Group, Institut des sciences de la Terre (ISTE), Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, Switzerland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 August 2014

Received in revised form 5 May 2015

Accepted 14 June 2015

Available online 19 June 2015

Keywords:

Spacing

Discontinuity

3D point cloud

Rock mass

LiDAR 3D laser scanner

ABSTRACT

The complete characterization of rock masses implies the acquisition of information of both, the materials which compose the rock mass and the discontinuities which divide the outcrop. Recent advances in the use of remote sensing techniques – such as Light Detection and Ranging (LiDAR) – allow the accurate and dense acquisition of 3D information that can be used for the characterization of discontinuities.

This work presents a novel methodology which allows the calculation of the normal spacing of persistent and non-persistent discontinuity sets using 3D point cloud datasets considering the three dimensional relationships between clusters. This approach requires that the 3D dataset has been previously classified. This implies that discontinuity sets are previously extracted, every single point is labeled with its corresponding discontinuity set and every exposed planar surface is analytically calculated. Then, for each discontinuity set the method calculates the normal spacing between an exposed plane and its nearest one considering 3D space relationship. This link between planes is obtained calculating for every point its nearest point member of the same discontinuity set, which provides its nearest plane. This allows calculating the normal spacing for every plane. Finally, the normal spacing is calculated as the mean value of all the normal spacings for each discontinuity set.

The methodology is validated through three cases of study using synthetic data and 3D laser scanning datasets. The first case illustrates the fundamentals and the performance of the proposed methodology. The second and the third cases of study correspond to two rock slopes for which datasets were acquired using a 3D laser scanner. The second case study has shown that results obtained from the traditional and the proposed approaches are reasonably similar. Nevertheless, a discrepancy between both approaches has been found when the exposed planes members of a discontinuity set were hard to identify and when the planes pairing was difficult to establish during the fieldwork campaign. The third case study also has evidenced that when the number of identified exposed planes is high, the calculated normal spacing using the proposed approach is minor than those using the traditional approach.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Rock mass, which can be defined as blocks of rock material separated by discontinuities, such as joints, faults, bedding planes, and so on (Bieniawski, 1989), is one of the most important concepts in rock engineering. The discontinuity properties (i.e., spacing, persistence, roughness, infilling, weathering and presence of water) have a capital importance on the geomechanical behavior of the rock mass (Bieniawski, 1973; Priest and Hudson, 1976), and are usually characterized through classical time-consuming techniques (e.g., compass which are commonly utilized in order to obtain discontinuity orientation and also conventional measuring tapes which are used for the

estimation of discontinuity spacing; Palmstrom, 2001). Alternatively to manual discontinuity characterization, it is possible to use remote sensing techniques to acquire 3D information of the terrain with high accuracy and high spatial resolution (Jaboyedoff et al., 2012). The two most commonly employed remote sensing techniques for discontinuity analysis are Light Detection and Ranging (LiDAR) and digital photogrammetry.

Nowadays, LiDAR and digital photogrammetry techniques are widely accepted techniques for discontinuity analysis (Abellán et al., 2014; Jaboyedoff et al., 2012; Oppikofer et al., 2009; Viero et al., 2010). The number of publications has exponentially grown in the last years and has been able to successfully extract the orientation of discontinuities (Slob et al., 2005; Olariu et al., 2008; Sturzenegger and Stead, 2009b; Sturzenegger et al., 2011; Jaboyedoff et al., 2007; Garca-Sellés et al., 2011; Khoshelham et al., 2011; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014). Once discontinuities are identified and the 3D point cloud is classified, it is then possible to use this information to analyze spacing (Oppikofer et al., 2009; Slob, 2010), persistence (Sturzenegger and Stead, 2009a; Sturzenegger et al., 2011; Umili et al.,

* Corresponding author.

E-mail addresses: adririquelme@gmail.com, ariquelme@ua.es (A.J. Riquelme), antonio.abellanfernandez@unil.ch (A. Abellán), roberto.tomas@ua.es (R. Tomás).URL's: <http://personal.ua.es/en/ariquelme> (A.J. Riquelme),<http://www.3d-landslide.com> (A. Abellán), <http://personal.ua.es/en/roberto-tomas> (R. Tomás).

2013) and roughness (Haneberg et al., 2007; Sturzenegger and Stead, 2009a; Oppikofer et al., 2011).

The aim of this paper is to present a new method for the calculation of discontinuity spacing from a rock mass using 3D point clouds. The main novelty of this method is that the proposed methodology allows computing the discontinuity spacing of persistent and non-persistent discontinuities, which are usually studied considering an infinite plane approach. The studied area must be representative of the rock mass properties and only those discontinuities that can reasonably be considered as planes should be studied, otherwise this method could lead to significant errors in the determination of the discontinuity spacing. The input of this method is a 3D point cloud, where each point has previously been classified by an assignment to a discontinuity set and to an aggregation of points belonging to the same discontinuity plane (hereinafter referred to as 'cluster'). Any reliable method that classifies the points and extracts their cluster planes can be applied. The approach used in this paper is the Discontinuity Set Extractor (DSE, available on <http://personal.ua.es/en/ariquelme/>), an open source software developed by Riquelme et al. (2014), which allows the user to calculate the cluster planes with the discontinuity set orientation or with the best fitting plane.

To summarize, the proposed methodology extracts rock mass discontinuities from rock masses affected by persistent and/or non-persistent discontinuity sets using 3D point clouds through the open source software DSE. Then, the relative location of the clusters on the space is analyzed and the spacing between the different discontinuities is calculated. Finally, the results obtained in three different case studies using the proposed method have been compared with those derived from field observations and discussed.

2. Previous considerations

Discontinuity spacing plays a key role in the behavior of the rock masses and has to be accurately computed. The ISRM considers the spacing as a descriptive index and recommends measuring it counting the number of discontinuities that cut a traverse line of known length (ISRM, 1977). However, new remote sensing techniques such as LiDAR allow performing a more realistic and accurate measurement of discontinuity spacing in three dimensions for each different discontinuity set.

2.1. Considerations on discontinuity spacings

Piteau (1970) proposed a widely used method to calculate the spacing between discontinuities. This author proposed the use of a scanline survey technique for the calculation of the discontinuity intensity. This parameter was defined as the number of discontinuities per unit distance, assuming a normal direction to the strike of a set of discontinuities (Priest and Hudson, 1976).

Originally, the ISRM defined the spacing between adjacent discontinuities as the distance between two correlative discontinuities which cut a traverse line of known length (ISRM, 1977). The ISRM recommends expressing it as a mean fracture spacing in meters or millimeters (as in core logging). More recently, Palmstrom (2001) stated that the discontinuity set spacing is the normal or minimum distance between individual discontinuities within a discontinuity set. He claimed that in the case of surface observations (traces), it is usual to use the average of spacing for these sets and that frequently, it is possible to find random discontinuities, which do not necessarily belong to any discontinuity joint set. This spacing has influence on the rock mass global behavior, and defines its block size for each discontinuity set.

Consequently, the three types of discontinuity spacings described above can be summarized as (Priest, 1993; Slob, 2010):

- Total spacing: distance between a pair of adjacent discontinuities measured along a specific line, e.g., a scanline.

- Set spacing: distance between subsequent discontinuities or average spacing between discontinuities from the same set.
- Normal set spacing: distance between a pair of adjacent discontinuities, from the same set, perpendicular to the average orientation in that set.

2.2. Existing approaches for the discontinuity spacing calculation

In practice, analysis of discontinuity spacing using digital information (e.g., digital photographs, orthophotos, and 3D point clouds) can be carried out from several approaches:

- Graphical analysis using scaled digital images. This method is quite similar to the fieldwork approach. It requires properly identifying, and accurately measuring, the orientation and frequency of visible discontinuity surfaces or traces in a rock slope.
- 2D approaches and profile sections (Oppikofer et al., 2011; Slob, 2010). This is a widely used approach in order to compute discontinuity spacing using point clouds. Its main drawback is that results strongly depend on the chosen profile or virtual scanline.
- Fracture estimation analyzing two-dimensional fracture trace information gathered from digital images of exposed rockfaces (Kemeny and Post, 2003).
- Spacing analysis using 3D spatial relations. Normal spacing is calculated as the minimum distance (i.e., orthogonal distance) between exposed planes, measured in a perpendicular direction to one of those planes. If the two planes are not parallel, the distance depends on the location of the measuring line, but if they are parallel, it is a non-directional dependent method. This is the approach considered in this work to compute discontinuity spacing.

2.3. Cluster orientation

The rock outcrops members of a discontinuity set are usually not perfectly parallel due to natural structure complexity and to uncertainties of technique.

The normal procedure for measuring discontinuity spacing consists on intersecting both discontinuities by an arbitrary line. Then, the intersection of this line with the two planes defines two points, and the spacing will be equal to the distance between these two points. Although the orientation and spatial location of this line plays a capital role on the calculation of the discontinuity spacing, there is no common agreement on the parametrization of this variable. For instance, some authors define the direction of this line as parallel to the normal vector of the discontinuity set, nevertheless the spacing values are still affected by the arbitrary selection of the line location (Slob, 2010). This problem can be fixed considering that all clusters have the same orientation of the principal plane of the given discontinuity set, which is a reasonable assumption when the discontinuities are parallel within the studied region. Therefore, in this approach it is required that the normal vector of each cluster plane is equal to the normal vector of the discontinuity set.

3. Methodology: the 3D spacing approach

3.1. Input data

Every point of the point cloud has to be previously assigned to a discontinuity set and to a given cluster (see Appendix A). The necessary inputs for every point are:

- (X, Y, Z) coordinates
- Discontinuity set id
- Cluster id
- Normal vector of the discontinuity set (A, B, C) (Eq. (1))

- Normal vector of the cluster (A, B, C) (Eq. (1))
- Plane position of the cluster: parameter D (Eq. (1))

where the plane equation is written as:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0. \quad (1)$$

3.2. 3D discontinuity spacing calculation

The normal spacing is the distance between discontinuity planes measured along an orthogonal scanline (Palmstrom, 2001), but this definition is not easy to apply when the data are discontinuity planar outcrops unlinked and distributed in the 3D space (point cloud clusters). In this case, these planes may not be intersected by an orthogonal scanline and thus it is needed to make some hypothesis to apply the previous definition.

Unlike existing methods which presume full persistence (e.g., Slob, 2010), non-persistent discontinuities are considered in our methodology. This assumption adds an additional complexity to the discontinuity spacing calculation. A key point of our approach is the fact that the link between clusters is defined considering the three dimensional relationships between clusters, calculating the spacing by measuring the orthogonal distance between a given cluster and its nearest neighbor cluster. A graphical clarification of this concept is given in Fig. 1, where in order to provide a simpler and more comprehensive explanation, the discontinuities have been represented in 2D. This figure shows an orthogonal cross-section of the point cloud containing six different clusters and the different approaches used for calculating their normal set discontinuity spacing: full persistent and non-persistent procedures. When considering non-persistent discontinuities (Fig. 1b), cluster 3 is the closest feature to cluster 1. Nevertheless, when considering full

persistent discontinuities (Fig. 1a), cluster 2 is the closest feature to cluster 1. Then, the calculation of the discontinuity spacing for each cluster generates a completely different distribution of discontinuity spacing: considering full persistence the mean normal spacing results in 16.28 units and considering non-persistent discontinuities the mean normal spacing results in 27.16 units. These results show close resemblance to the ones using standard geomechanical stations, where measurements are taken between close discontinuity surfaces or traces. The main advantage in this case is that calculation is carried out in an automatic 3D point clouds.

Therefore, for calculating the distance between clusters we operate as follows: firstly, all the cluster planes are sorted in ascending order by using the D parameter, giving as a result the list *Dsorted*. Then, the algorithm creates the point set R, which includes all the points of the discontinuity set omitting the points contained on the first cluster. For each point of this cluster, the algorithm searches for the nearest neighbor point within the dataset R. The closest point is member of its closest cluster, and thus, its corresponding distance is the spacing between these two clusters. The algorithm continues with the corresponding following cluster in the list *Dsorted*. The points of this cluster are excluded from the R dataset in order not to repeat spacing calculations. The process continues until all the clusters are computed. At the end, a list of spacing values is provided, including the cluster identifiers used for this calculation.

Algorithm 1. Calculation of the normal spacing using 3D point clouds.

procedure SPACING CALCULATION

Input: Point Cloud P=(X, Y, Z, DS id, cl id, A, B, C, D)

Output: Spacing = (DS id, cl1 id, cl2 id, spacing, cl1 D, cl2 D)

counter = 1

for each joint set *i* **do**

$P_i \leftarrow P$ ▷ P: points member of DS id *i*

$P_i \leftarrow \text{Sort } P_i \text{ by D parameter}$ ▷ in ascending order

$Dsorted \leftarrow D \text{ values of all the points of } P_i$

$Dsortedid \leftarrow \text{cluster ids of all the points of } P_i$

create group $R \equiv P(\text{points members of } P_i \text{ except cluster id } Dsortedid(1))$

for each cluster *j* **do**

create group $Q \equiv P_i(\text{points members of } P_i \text{ and cluster id } Dsortedid(j))$

$Dist \leftarrow \text{Distance from all the points of } Q \text{ to all the points of } R$

$p \leftarrow \text{nearest point from } Q \text{ to } R$

$pid \leftarrow \text{id of the cluster that contains the point } p$

$D_1 \leftarrow D \text{ parameter of the cluster that contains the cluster id } Dsortedid(j)$

$D_2 \leftarrow D \text{ parameter of the cluster id } pid$

$spacing(counter) \leftarrow [DS \ i, \ cl \ Dsortedid(j), \ pid, |D_1 - D_2|, D_1, D_2]$

create group $R \equiv R(\text{points members of } R \text{ except cluster id } Dsortedid(i))$

counter \leftarrow counter + 1

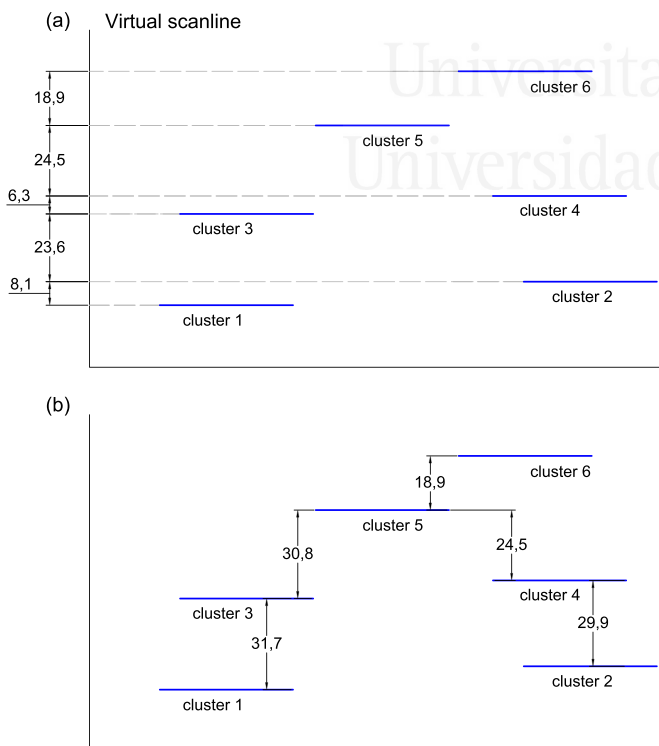


Fig. 1. Scheme of the cluster linking and the discontinuity normal set spacing considering (a) full persistence and (b) non-persistence of the discontinuities. Blue thick lines represent the discontinuities. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3.3. Statistical analysis

The statistical analysis calculates the non-parametric distribution by means of the *kernel density estimation* technique (Silverman, 1986). The normal spacing is calculated as the mean of the calculated distances. Moreover, in this work the following population statistics are calculated: min, max, mode, mean, maximum density value and standard deviation.

4. Case studies

In this section, the above described method is applied to three different cases of study. The first one corresponds to a synthetic case in which a regular table is modeled. In the second and third case studies, the discontinuity spacings of two rock slopes are analyzed using 3D data acquired by means of a 3D laser scanner. Case study 1 focuses on how the spacing is calculated, illustrating the establishment of the connections between clusters. Case studies 2 and 3 correspond to real rock mass surfaces, and their aim is to demonstrate the reliability of the proposed method to calculate discontinuity spacings of rock slopes through 3D point cloud data acquired by terrestrial remote imaging techniques.

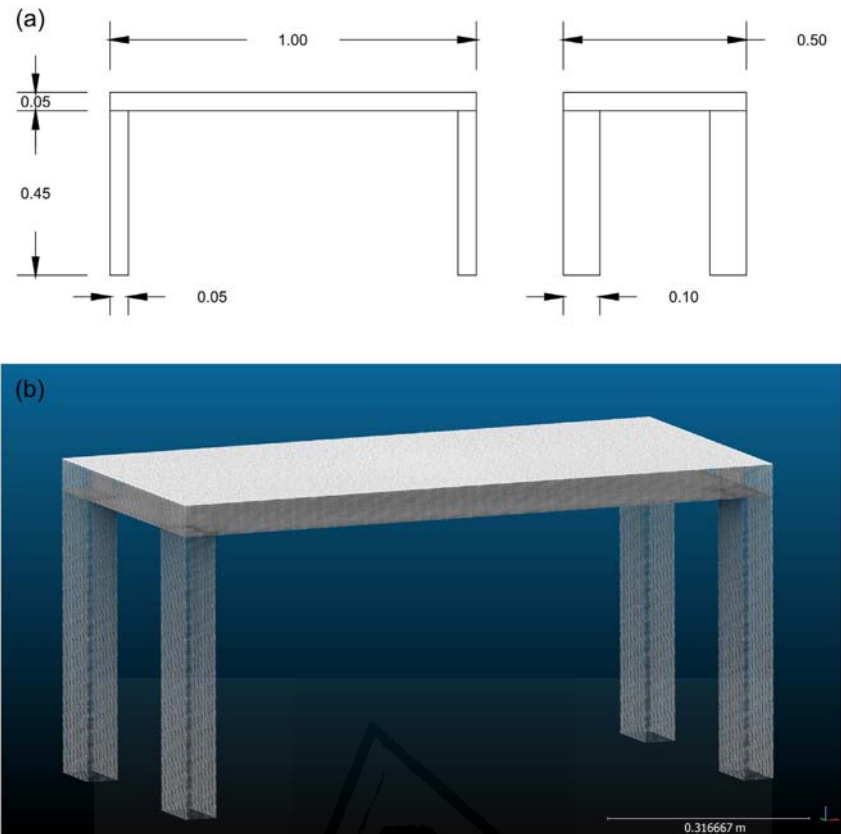


Fig. 2. Case study 1. (a) Map of the studied table, dimensions are in meters; (b) Synthetic point cloud of the table, where all sides of the table are orthogonal.

4.1. Case study num. 1: dining table (synthetic point cloud)

This case study analyzes a very simple geometry: a small dining room table shown in Fig. 2a and b. In this case the 3D point cloud was generated by means of a simple MATLAB code (MATLAB, 2013).

4.2. Case study num. 2: rock slope I (El Campello, Spain)

This case of study analyzes a rock slope excavated in limestones located in El Campello (SE Spain). The approximate size of the analyzed area is 7.5×2.5 m (Fig. 3). The 3D dataset was acquired by a laser scanner survey developed on January 12th, 2015 with a Leica C10 laser

scanner. In order to reduce shadow areas, the data acquisition was performed in three separate stations using planar targets as reference points and the point cloud was registered using data from a digital map (SIGNA <http://signa.ign.es/signa/>). The studied sector was subsampled obtaining a point cloud with 26884 points (a point density of 1250 pts/m^2).

4.3. Case study num. 3: real rock slope II (City of Alicante, Spain)

In this case study an urban rock slope excavated in marly limestones in the City of Alicante (SE Spain) is analyzed. This rock mass presents some practical difficulties for its characterization for four reasons:

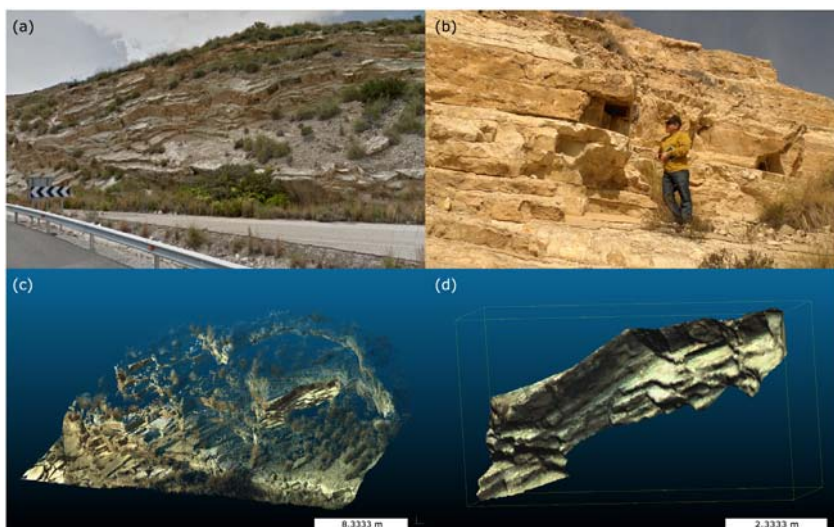


Fig. 3. Case study 2: rock slope in El Campello, SE Spain. (a) Picture of the site; (b) Picture of the fieldwork campaign; (c) 3D point cloud acquired with 3D laser scanner; (d) Analyzed sector.

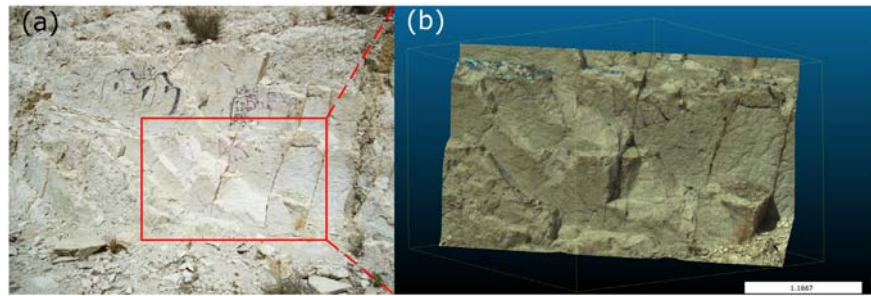


Fig. 4. Case study 3: urban rock slope in the City of Alicante. (a) Picture of the site; (b) 3D point cloud of the slope.

(a) most of the discontinuity surfaces are smoothed by weathering; (b) the strata is slightly folded and eventually affected by several normal faults; (c) In addition, the sub-horizontal surfaces are partially (or even completely) covered by debris due to the progressive degradation of the materials located at the upper part of the slope; and (d) some of the discontinuity sets are not persistent. Consequently, a representative outcrop of the rock mass has been selected to minimize these mentioned effects that can mask the true discontinuity surfaces. The approximate size of the analyzed area is 3×2 m (Fig. 4). The 3D dataset was acquired by a laser scanning survey carried out on March 28th, 2015 with a Leica C10 laser scanner. In order to reduce shadow areas, the data acquisition was performed in three separate stations using planar targets as

reference points and the point cloud was registered using data from a digital map (SIGNA <http://signa.ign.es/signa/>). The studied sector was subsampled obtaining a point cloud with 301089 points (a point density of 8×10^4 pts/m²).

5. Results

5.1. Case study num. 1

The surface of the studied solid is defined by three orthogonal planes, and thus three orthogonal discontinuity sets are expected to be found: J_1 that refers to the horizontal surfaces of the table and J_2

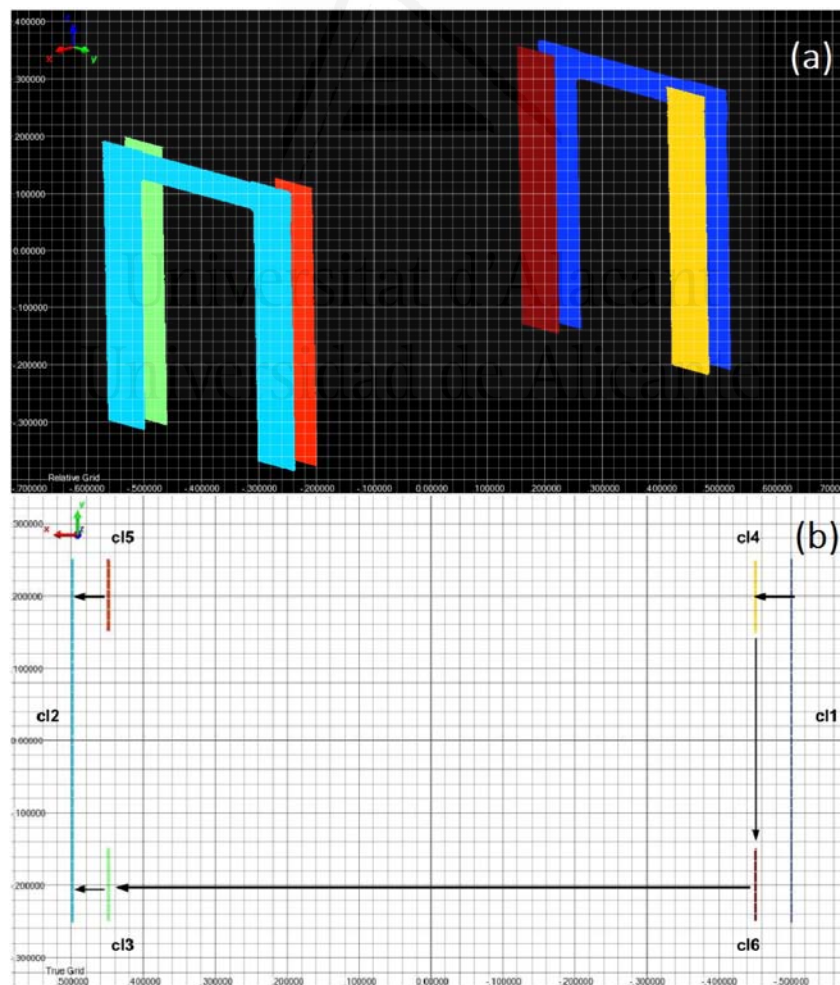


Fig. 5. Case study 1, results (I): (a) Discontinuity set 2 depiction. Six clusters (cl) are depicted, cl1 in blue, cl2 in cyan, cl3 in green, cl4 in yellow, cl5 in orange and cl6 in brown. (b) Top view of the table. Note that in order to calculate the spacing the relations between clusters are indicated using black arrows. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 1
Case study 1, results (I): synthetic table. Cluster relation analysis and spacing calculations, discontinuity set J_2 .

DS	Cl_i	Cl_j	D_i [m]	D_j [m]	$ D_i - D_j $ [m]	Real distance [m]	Abs error [m]	Relative error [%]
2	1	4	-0.4927	-0.4485	0.0442	0.05	0.0058	12
2	4	6	-0.4485	-0.4392	0.0093	0.00	0.0093	-
2	6	3	-0.4392	0.4603	0.8995	0.90	0.0005	0
2	5	2	0.4510	0.5068	0.0558	0.05	0.0058	12
2	3	2	0.4603	0.5068	0.0465	0.05	0.0035	7

and J_3 which refer to the vertical planes. The analysis shows three principal orientations, corresponding to the different sides of the table: four rectangular legs and the table top. This example aims showing how the spacing is calculated. We focus our attention specifically on J_2 .

Fig. 5a shows the members of the clusters of the joint set 2 (J_2). The most repeated spacing should be 5 cm (Fig. 2) and a single value of 0.9 m should be found. The calculation process and the obtained results are, respectively, shown in Table 1 and Fig. 5. The first cluster used in

order to calculate the spacing is the right one (cluster 1 in blue) whose plane equation shows the lowest D value. Once this cluster has been selected, the method searches for the following nearest cluster (cluster 4 in yellow), and calculates the distance between the cluster planes. The method continues with the following clusters sorted according to the D parameter dimension in ascending order (see Table 1). The calculated distances and the real distances between clusters are summarized in Table 1 in which absolute and relative errors in the determination of the spacing are also included.

5.2. Case study num. 2

The 3D point cloud processed in Fig. 3 has been processed to extract the identified discontinuity sets (see Fig. 6a). Six main orientations were obtained, where J_1 corresponds to the bedding plane and J_2, J_3, J_4, J_5 and J_6 are subvertical joints. Fig. 6c shows the classified point cloud using 3D dataset, where each discontinuity set is colored. The studied sector was analyzed using fieldwork data and four discontinuity sets were obtained (see Fig. 6b), where J_1 corresponds to the bedding plane and J_2, J_3 and J_4 are the subvertical joints. The comparison of both results shows that J_1, J_2 and J_4 have been identified by both approaches. Concerning the

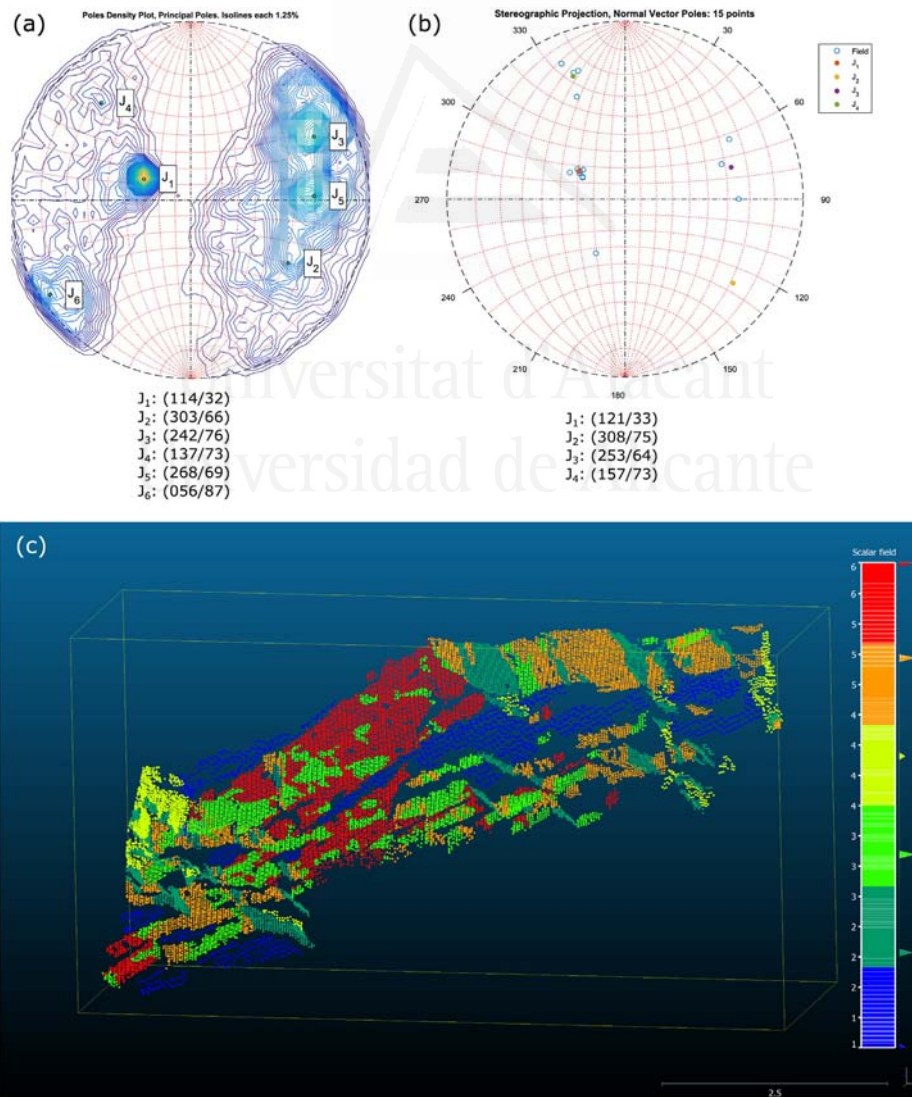


Fig. 6. Case study 1, results (I): El Campello, Alicante. Discontinuity set analysis for case study 2. (a) Results using 3D dataset; (b) Results from fieldwork; (c) Classified point cloud. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

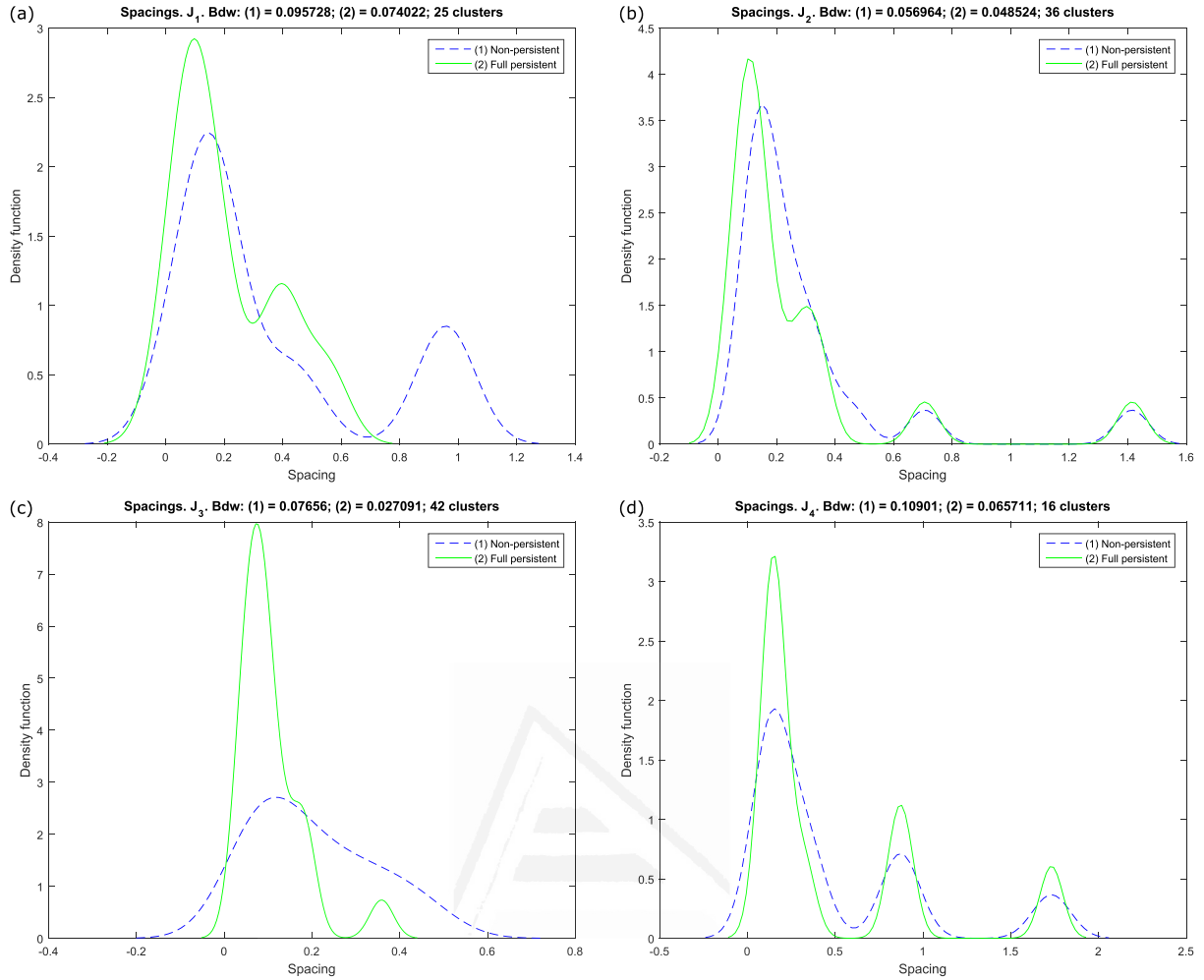


Fig. 7. Case study 2, results (II): El Campello, Alicante. Statistical analysis of the spacings for case study 3. Non-parametric density function of the spacing values: (a) J_1 , (b) J_2 , (c) J_3 and (d) J_4 .

discontinuity set identified as J_3 using fieldwork data, Fig. 6b shows that it was extracted as a single discontinuity. Contrary the 3D analysis showed that previous DS was not identified as a single DS. Actually there were two discontinuity sets with statistic difference, but with similar dip direction and dip. Moreover, the 3D analysis extracted J_6 , but the visual inspection showed that actually this discontinuity set corresponds to the conjugated plane of J_3 .

The normal spacing was computed for each discontinuity set and results are summarized in Fig. 7 and Table 2.

Table 2
Case study 2, results (III): El Campello, Alicante. Statistic values of the spacing values. Comparison between persistent and non-persistent discontinuities.

	J_1		J_2		J_3		J_4	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Persistence	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
Min	0.011	0.011	0.103	0.046	0.029	0.029	0.087	0.087
Max	0.988	0.553	1.415	1.415	0.490	0.359	1.732	1.732
Max dens	0.147	0.098	0.149	0.102	0.116	0.072	0.155	0.158
Mode	0.011	0.011	0.103	0.046	0.029	0.029	0.087	0.087
μ	0.355	0.206	0.296	0.259	0.202	0.107	0.484	0.469
σ	0.348	0.179	0.309	0.329	0.135	0.075	0.528	0.534
n clusters	59		39		57		35	
Field value	0.247		1.425		1.000		0.650	

5.3. Case study num. 3

The 3D point cloud shown in Fig. 4b has been processed in order to extract the discontinuity sets (Fig. 8a) and to classify the point cloud (Fig. 8b).

This analysis shows that discontinuity sets J_1, J_2, J_3 and J_4 are successfully identified (Fig. 8b to f). J_1 is the bedding plane and its exposed planes are defined by the calculated clusters (see Fig. 8c). J_2 is a sub-horizontal plane which is partially covered by debris (see Fig. 8d). J_3 is a sub-vertical plane which is easily identified by its corresponding traces on the slope surface and its outcropping planes (see Fig. 8e). J_4 is a discontinuity poorly represented in the slope that has been identified as their outcropping planes were statistically significant (see Fig. 8f).

The non-parametric density functions for each discontinuity set are shown in Fig. 9a, b, c and d and summarized in Table 3. As in previous case studies, spacing values considering the full persistence hypothesis are smaller than the ones obtained considering non-persistence hypothesis of the discontinuities. The field-measured discontinuity spacings were obtained by identifying the discontinuity traces and exposed planes which outcrop in the rock mass surface. Field values of the spacing were acquired measuring the normal spacing of visible and accessible exposed planes. This sampling method was applied to the bottom of the slope due to the difficult and unsafe access to higher areas. These values were calculated as the number of traces per meter, and then a correction (Terzaghi, 1965) was applied considering the

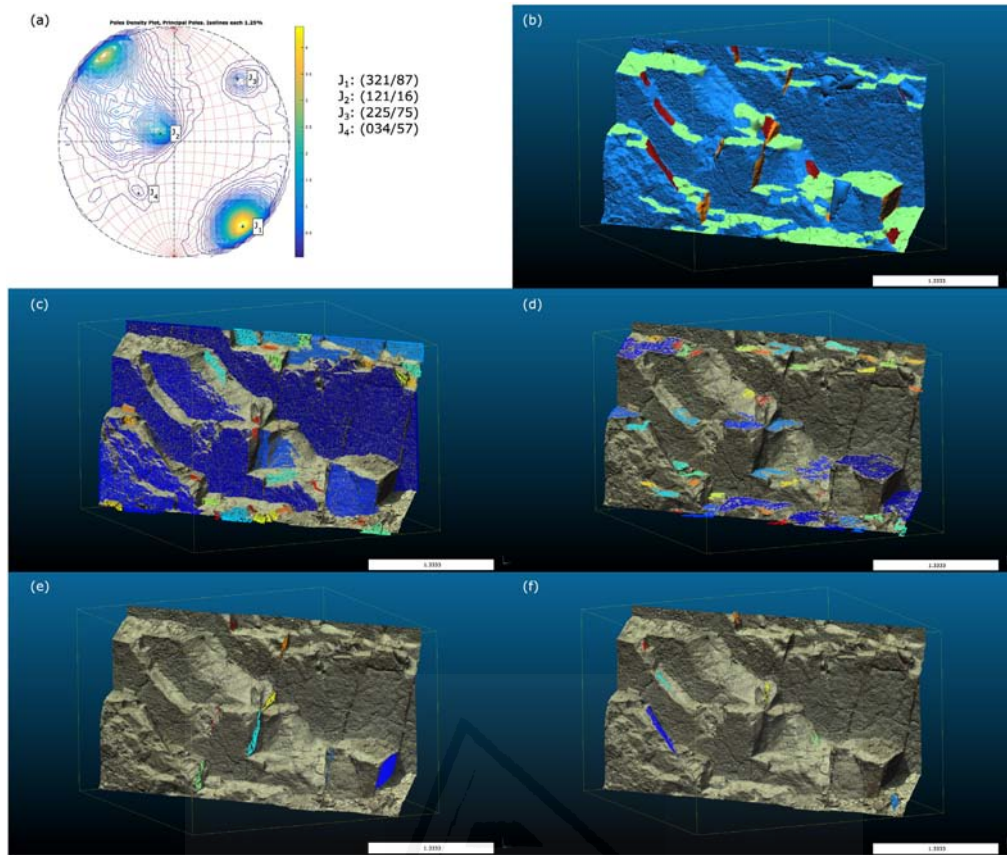


Fig. 8. Case study 3, results (I): City of Alicante. Statistical analysis of the planes. (a) Statistic analysis of the planes; (b) Discontinuity sets: J_1 points are in blue, J_2 are in green, J_3 are in orange and J_4 are in brown; (c) Clusters of discontinuity set J_1 ; (d) Clusters of J_2 ; (e) Clusters of J_3 ; (f) Clusters of J_4 . (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

orientation of the surface and the discontinuity set orientation. Finally, the field value of the spacing was calculated as the mean of all the spacings within a set.

6. Discussion

The proposed method in this work has been proven useful in order to calculate discontinuity spacings and to identify cluster relations. Our approach is based on the three coordinates of surface points and no additional attributes (e.g., reflectance and color) are considered. This fact implies that traces on the rock surface are not taken into account, despite being a very useful information considered by other authors in order to calculate spacing (Kemeny and Post, 2003). The proposed methodology could be improved by considering information extracted from the discontinuity traces. Furthermore, the fact that discontinuities are considered as non-persistent implies that computed spacing values are higher or equal to those calculated with the full persistence hypothesis.

The method was tested using two different sources of information (synthetic data and 3D datasets using terrestrial LiDAR scans) showing a good adaptability. The first case study used synthetic data and allowed us to explain the relations between clusters and how spacing is calculated. In this case of study, due to the geometry of the example, both, the persistent and non-persistent approaches have to provide a similar normal spacing, as confirmed by the calculated mean absolute differences between the real and the calculated normal spacings (5 mm) and the mean relative difference (7.8%).

The second case study shows the algorithm application to a 3D point cloud dataset acquired by means of 3D laser scanner. Four discontinuity

sets were extracted and normal spacings were calculated considering full persistence and non-persistence hypothesis. Then the results obtained through the traditional method and the proposed approach were compared. The results obtained through the proposed approach showed that the discontinuity sets J_1 and J_4 had the same order of magnitude than those obtained with the traditional approach. Contrary, it was observed that the normal spacings obtained using 3D point clouds were significantly minor than those obtained using the traditional method for J_2 and J_3 . This inconsistency may be due to the fieldwork acquisition process and to the particular field conditions. A possible explanation for this result is that: (1) these two discontinuity sets were identified by their exposed planes and not by their traces; and that (2) the exposed planes were not clearly linked at field and thus the minimum distance between them was not accurately measured. Due to this fact, fieldwork spacing data acquisition required: (1) first the identification of those surfaces that belonged to the identified discontinuity set; (2) the visual identification of how each exposed plane is linked to the nearest one; and (3) the normal spacing measurement between paired exposed planes. This process can be really hard if exposed planes are not clearly mappable and if discontinuity sets have close orientations. Contrary, the use of 3D datasets allowed the analytical definition of exposed planes and no physical restriction conditioned the spacing measurements. This is the reason why when using 3D point clouds, more clusters were detected than when using the traditional approach. Moreover, this effect had an influence on the minor resulting normal spacing. This finding suggest that the use of 3D point clouds may lead to different normal spacing values than those obtained using the traditional approach when outcrop conditions difficult the data acquisition.

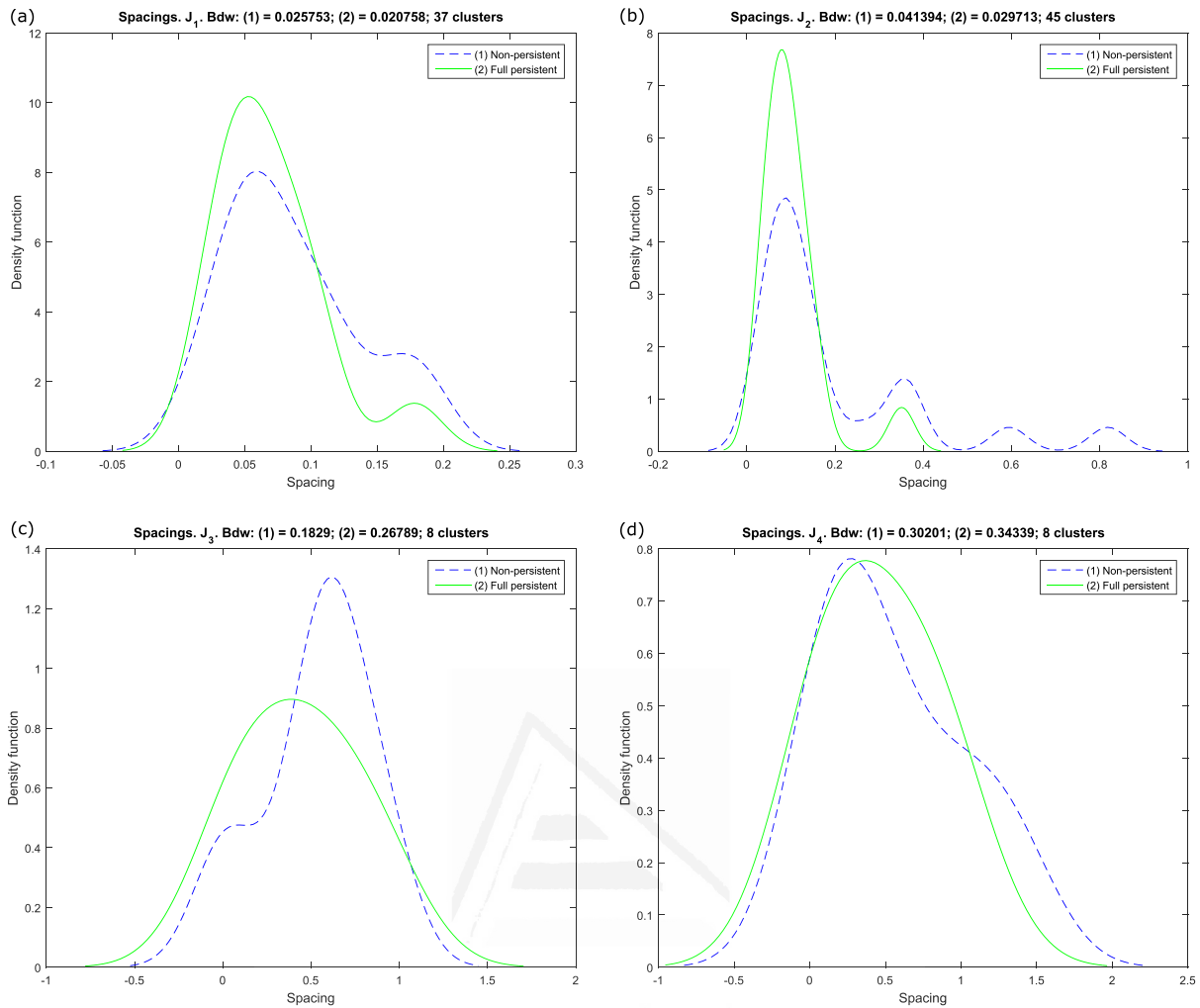


Fig. 9. Case study 3, results (II): City of Alicante. Statistical analysis of the spacings. Non-parametric density function of the spacing values: (a) J_1 , (b) J_2 , (c) J_3 and (d) J_4 .

The third case study (rock slope in the City of Alicante, Spain) is a 3D laser scanner dataset of an urban rock slope. The current results pointed that the calculated normal spacings reasonably matched the field measurements values. Nevertheless, the results derived from 3D point clouds are minor than those obtained using the traditional approach when the number of extracted clusters is high. A possible explanation for this fact is that during fieldwork several small clusters were not identified, were considered as random isolated discontinuities or were

inaccessible. Thus, the analysis using 3D point clouds provided more clusters within the same area, and computed discontinuity spacings were minor. On the other hand, an experienced engineer would be able to identify clusters of a discontinuity set and also to discard non-valid values, while DSE software would consider all exposed planes with the same orientation. As a result, we can conclude that this method has to be used with a proper background in rock mechanics.

One of the strengths of the presented method consists on using the original information contained in 3D points during all the process, and considering discontinuities as non-persistent instead of considering all clusters as infinite planes. Therefore, obtained results considering the non-persistence of discontinuities are equal or higher than the ones obtained considering full persistence. Although the method only uses the geometric information of the surface, there is still a very valuable information to be considered, such as discontinuity traces from the rock mass surface. In addition to this, although a great improvement in workflow automation is obtained using the proposed approach, a solid background in rock mechanics together with fieldwork recognition is required for an optimum application of the proposed method.

Further research lines point out to a continuous software development in order to obtain geomechanical parameters (e.g., persistence and roughness) from the scanned rock masses; furthermore, we support the development of a more reproducible research thanks to new trends in code and data sharing under GNU GPL license (e.g., www.reproducibleresearch.net). In order to contribute to the latter, the

Table 3
Case study 3, results (III): City of Alicante. Statistic values of the spacing values. Comparison between persistent and non-persistent.

	J_1		J_2		J_3		J_4	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Persistence	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
Min	0.020	0.020	0.037	0.037	0.024	0.024	0.075	0.075
Max	0.181	0.178	0.818	0.351	0.900	0.900	1.327	0.935
Max dens	0.057	0.052	0.09	0.077	0.611	0.399	0.284	0.372
Mode	0.020	0.020	0.037	0.037	0.024	0.024	0.075	0.075
μ	0.086	0.069	0.196	0.103	0.529	0.437	0.554	0.453
σ	0.051	0.042	0.202	0.075	0.323	0.344	0.488	0.361
n clusters	37		45		8		8	
Field value	0.172		0.224		0.397		0.503	

complete 3D RAW and processed datasets will be freely available in our website (www.3D-landslide.com/spacing).

7. Conclusions

A new method for calculation of discontinuity set spacings from 3D point cloud data has been presented. This method is based on the classical definition of the spacing, but instead of using a single virtual scanline our method uses the relative positions of clusters to establish how they are linked.

First, this paper considers the existing previous ways to calculate spacings, and focuses specifically on those that use 3D point clouds. After the analysis, some weaknesses of these methods are detected and some solutions are proposed to fix them.

The input of the proposed method consists on a 3D point cloud data, where each point is classified in relation to a discontinuity set and is assigned to a cluster of points belonging to a given discontinuity set. Each cluster is fitted to a plane parallel to the main orientation of its discontinuity set and thus, all clusters members of a discontinuity set are parallel. First, for each discontinuity set all clusters are sorted in ascending order according to the cluster plane D parameter. Following this sorted cluster identifiers array, the closest cluster is determined for each cluster, and the normal spacing is calculated as the normal distance between them. The used cluster is then removed from the database in order to avoid repeated links in following calculations. Consequently, as all cluster planes are extracted parallel to their discontinuity set, spacing is calculated as the distance between two linked clusters. As a result, spacing is calculated considering the non-persistence of discontinuities, which increases the reliability of the method.

This developed approach, which can be used to estimate discontinuity spacing in inaccessible or dangerous outcrops, will help programming the 3D calculation of the degree of fracturing on rock slopes. This will help rock mass scientists and practitioners obtaining more accurate and more reproducible rock mass quality assessment and block size distribution for quarrying. In addition to this, the proposed approach considers the non-persistence of discontinuities, and allows the possibility of considering persistence values for further researches.

Acknowledgments

This work was partially funded by the Swiss National Science Foundation (FNS-138015 and FNS-144040 Projects), the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (MINECO) and EU FEDER under Projects TEC2011-28201-C02-02 and TIN2014-55413-C2-2-P, the Spanish Ministry of Education, Culture and Sport in the framework of the Programa Estatal de Promocin del Talento y su Empleabilidad en I + D + i under project PRX14/00100 and by the Generalitat Valenciana under Project ACOMP/2014/136. The authors would like to acknowledge Prof. Didier Hantz for his stimulating discussion at an early stage of this manuscript concerning the calculation of discontinuity spacing. Special thanks are also due to the computers provided by Mrs. Angela Prats and Mr. Javier Soler, which have considerably speeded up our computation time. Finally, we would like to acknowledge Mrs. Esther Coves and Mr. Vincent Alcalá for the English language revision and correction of this manuscript. Their help is kindly appreciated.

Appendix A. Cluster alignment

One of the discontinuity spacing analysis issues is that discontinuities are commonly non-persistent planes, except for the bedding planes in sedimentary rocks, where they are usually full persistent. Discontinuities are usually characterized at field from outcrops or traces. Then, if a discontinuity crops out in different positions from the rock mass, it becomes hard to determine if they belong to the same discontinuity (and therefore to a given plane) or not. From an analytical perspective, two set of points of the same discontinuity set will have the same

normal vector (A, B, C), and a different plane position value D (Eq. (1)). It is unlikely that the two clusters from the same discontinuity set present exactly the same D value, but they will have similar values and thus can be erroneously interpreted as different discontinuity planes.

In order to solve this ambiguity, a simple approach is proposed to state when two clusters belong to the same plane. Let's consider a cluster a that belongs to the discontinuity set i . The points of the cluster are distributed around its cluster plane. It is possible to calculate the distance of all the points' members of a cluster to its plane, obtaining a density function with mean μ_a and standard deviation σ_a . Furthermore, let's consider another cluster b , candidate to belong to the same discontinuity than the cluster a , with a mean μ_b and a standard deviation σ_b . When both sets of points from the clusters a and b are different parts of the same plane, then these two clusters will be so close that there will be an important overlap of their respective density functions which will be higher than a certain threshold value.

Since each 3D point dataset has its own precision, the proposed test considers the dispersion of the points by means of the standard deviation σ . Firstly, the mean μ and the standard deviation σ of each distance distribution are calculated. Secondly, the segment centered in μ that have lengths $2k$ times the standard deviation σ for each distribution is computed, where k is a positive number (Appendix Fig. A.1a). Then, if the segments $\mu \pm k \cdot \sigma$ of both distributions intersect, it is reasonable to consider them as members of the same plane, and thus, no spacing will be calculated between those two clusters (Appendix Fig. A.1b). Otherwise, both distributions will be considered to belong to different planes and the spacing will be subsequently calculated if it is needed (Appendix Fig. A.1c).

It can be stated that two point clouds, members of planar surfaces with the same orientation (i.e., the same A, B and C parameters) and with D_a and D_b parameters respectively belong to the same plane when:

$$k \cdot (\sigma_a + \sigma_b) \geq |D_a - D_b| \quad (\text{A.1})$$

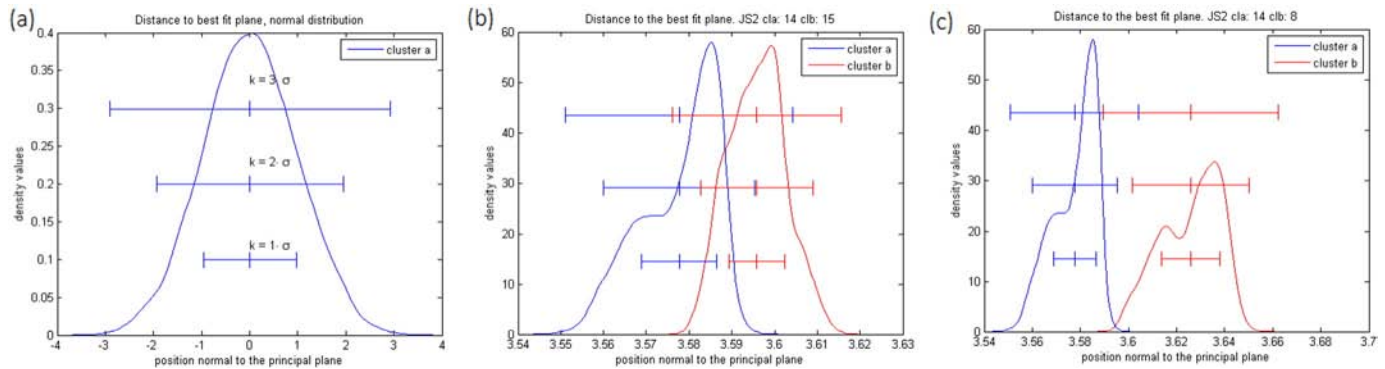
where:

- σ_a is the standard deviation of the cluster a ;
- σ_b is the standard deviation of the cluster b ;
- D_a is the location parameter (Eq. (1)) of the cluster plane a , equal to μ_a ;
- D_b is the location parameter (Eq. (1)) of the cluster plane b , equal to μ_b ; and
- k is the parameter which controls how close the two distributions must be to be considered as the same cluster.

Eq. (A.1) evaluates the intersection of the two density functions (i.e., the overlap between the sigma lines of both considered density functions in terms of σ ; Appendix Fig. A.1a). Low k values indicates that a high overlap between both density functions is needed in order to consider that the two clusters have the same position in the space (i.e., they are the same plane). The value of $k \cdot \sigma$ depends on the accuracy of the point cloud, but experience shows that values of $k = 1$ usually offer reasonable results.

Finally, if this test establishes that two clusters belong to the same discontinuity, the parameter D_b of the cluster b is then redefined as equal to the value of the parameter D_a . In other words, at this step we perform an adjustment of the position of the plane.

This adjustment should be applied for planar discontinuities. When the clusters are too big or very wavy, the standard deviation and the length of the segment $2k\sigma$ are very high. Therefore, different clusters could be considered members of the same discontinuity. Additionally, if spacing between discontinuities is of the same level of magnitude than the instrumental error this adjustment should not be applied, i.e., in foliated rock masses when using standard terrestrial LiDAR.



Appendix Fig. A.1. Density functions of the distance point to the best fit plane: (a) Normal distribution of points to plane distance, where the first segment lengths two sigmas, the second four sigmas and the third six sigmas; (b) Two clusters very close, two sigma lines overlap; (c) Two separated clusters, only three sigma lines overlap. The three horizontal lines are centered in the mean value of each distribution. Each line lengths $2 \cdot k \cdot \sigma$ ($k = 1$ bottom, $k = 2$ middle, $k = 3$ upper). Note that the lines overlap depending on how close are the center of the distribution (μ) and the dispersion of the points (σ).

References

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M., Lato, M.J., 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surf. Process. Landf.* 39, 80–97.
- Bieniawski, Z., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Civ. Eng. S. Afr.* 15, 335–344.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons.
- García-Sellés, D., Falivene, O., Arbués, P., Gratacos, O., Tavani, S., Muñoz, J.A., 2011. Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Comput. Geosci.* 37, 1584–1594.
- Gigli, G., Casagli, N., 2011. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LiDAR point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 187–198.
- Haneberg, W.C., et al., 2007. Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In: Eberhardt, E., Stead, D., Morrison, T. (Eds.), *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, pp. 101–106.
- ISRM, 1977. The description of rock masses for engineering purposes: report by the Geological Society Engineering Group Working Party. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 10, 355–388.
- 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: Francis, T. (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, 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. *Nat. Hazards* 61, 5–28.
- Kemeny, J., Post, R., 2003. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Comput. Geosci.* 29, 65–77 (URL: <http://geol.queensu.ca/faculty/harrap/RockBench/downloads/files/2003%20-%20Kemeny.pdf>).
- Khoshelham, K., Altundag, D., Ngan-Tillard, D., Menenti, M., 2011. Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 1215–1223.
- Lato, M.J., Vöge, M., 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D LiDAR and photogrammetry models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 54, 150–158.
- MATLAB, 2013. Version 8.1.0.604 64 bit (win64) (R2013a). The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Olariu, M.I., Ferguson, J.F., Aiken, C.L., Xu, X., 2008. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. *Geosphere* 4, 247–259.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.H., Metzger, R., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1003–1019.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M.H., Blikra, L.H., 2011. Detailed DEM analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 116. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JF001807> (n/a–n/a. doi: 10.1029/2010JF001807).
- Palmstrom, A., 2001. *Measurement and Characterization of Rock Mass Jointing*. A.A. Balkema Publishers.
- Piteau, D., 1970. Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock. *S. Afr. Inst. Min. Metall.* 33–53.
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Springer.
- Priest, S., Hudson, J., 1976. Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp. 135–148.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68, 38–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014> (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300414000740>).
- Silverman, B., 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, Taylor & Francis (URL: <http://books.google.es/books?id=e-xsrjsL7WkC>).
- Slob, S., 2010. *Automated Rock Mass Characterisation Using 3-D Terrestrial Laser Scanning* (Ph.D. thesis), TU Delft, Delft University of Technology (URL: <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oi:tudelft.nl:uuiid:c1481b1d-9b33-42e4-885a-53a6677843f6>).
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., Kemeny, J., 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. *Transp. Res. Rec.* 1913, 187–194.
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009a. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.* 106, 163–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004> (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000556>).
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009b. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., Elmo, D., 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Eng. Geol.* 119, 96–111.
- Terzaghi, R.D., 1965. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique* 15, 287–304.
- Umili, G., Ferrero, A., Einstein, H., 2013. A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model. *Comput. Geosci.* 51, 182–192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026> (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002695>).
- Viero, A., Teza, G., Massironi, M., Jaboyedoff, M., Galgaro, A., 2010. Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: the Cinque Torri case (north-eastern Italian Alps). *Geomorphology* 122, 191–204.

“Characterization of rock slopes through Slope Mass Rating (SMR) using 3D point clouds: a review of practical issues through cases study

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, artículo en revisión. Referencia: IJRMMS-D-14-00541R1; ISSN: 1365-1609”

Adrián J. Riquelme, R. Tomás, A. Abellán

9

Artículo en revisión 3: Characterization of rock slopes through Slope Mass Rating (SMR) using 3D point clouds: a review of practical issues through cases study

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1 Characterization of rock slopes through Slope Mass
2 Rating (SMR) using 3D point clouds: a review of
3 practical issues through cases study

4 Adrián J. Riquelme^{a,1}, Roberto Tomás^a, Antonio Abellán^b

5 ^a*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, Spain*

6 ^b*Risk Analysis Group, Institut des sciences de la Terre (ISTE), Facult des Goscience et de
7 l'Environnement, Universit de Lausanne, Unil-Mouline, Geopolis, 1015 Lausanne, Switzerland*

8 **Abstract**

9 Rock mass classification systems are widely used tools for assessing the sta-
10 bility of rock slopes. Their calculation requires the prior quantification of sev-
11 eral parameters during conventional fieldwork campaigns, such as the orientation
12 of the discontinuity sets, the main properties of the existing discontinuities and
13 the geomechanical characterisation of the intact rock mass, which can be time-
14 consuming and often risky tasks. Conversely, the use of relatively new remote
15 sensing data for modelling the rock mass surface by means of 3D point clouds is
16 changing current investigation strategies in different rock slope engineering appli-
17 cations. In this paper, we review the main practical issues for the application of
18 Slope Mass Rating (SMR) for the characterization of rock slopes from 3D point
19 clouds through three cases of study from a end-user point of view. To this end,
20 the SMR adjustment factors, calculated from different sources of information pro-
21 cessed using different softwares, are compared with those calculated using con-
22 ventional fieldwork data. In the presented analysis, special attention is paid to

Email addresses: adririquelme@gmail.com, ariquelme@ua.es (Adrián J. Riquelme),
For print submitted to Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences April 27, 2015
roberto@unil.ch (Roberto Tomás), antonio.abellan@unil.ch (Antonio
Abellán)

URL: <http://personal.ua.es/en/ariquelme> (Adrián J. Riquelme),
<http://personal.ua.es/en/roberto-tomas> (Roberto Tomás),
<http://www.3d-landslide.com> (Antonio Abellán)

23 the differences between the SMR indexes derived from 3D point cloud and con-
24 ventional field work approaches, the main factors that condition the quality of the
25 data and some recognized practical issues. Finally, the reliability of Slope Mass
26 Rating for the characterization of rocky slopes is highlighted.

27 *Keywords:* Geo-mechanical classifications Slope Mass Rating 3D point clouds
28 3D laser scanner photogrammetry failure mechanism

29 **1. Introduction**

30 Rock mass classification systems are well known tools for characterizing rock
31 mass properties in order to assign an 'index of quality' for stability purposes.
32 These tools are worldwide used by geomechanical engineers in design or pre-
33 design stages of civil or mining projects. These classification systems analyse
34 the most significant parameters influencing the behaviour of a given rock mass
35 and provide a quantitative rating from qualitative observations. The main advan-
36 tage of these classification systems is the use of straightforward (even simplistic)
37 arithmetic algorithms for quantifying the rock mass quality. Since they have been
38 widely applied before through a plethora of case studies, the use of rock mass
39 classification systems constitutes an effective way of representing the quality of
40 the rock mass [1].

41 Rock Mass Rating (RMR) [14, 15] is one of the most used rock mass classifi-
42 cations systems. This classification was initially developed for tunnels. However,
43 it has been also applied to rock slopes and foundations although in these cases
44 it is not easy to apply as there is no exhaustive definition for the selection of the

45 correction factors [16]. Slope Mass Rating (SMR) provides adjustment factors to
46 RMR system [3], which depend on the geometrical relationship between the rock
47 mass discontinuities and the slope.

48 The parameters required for rock mass characterization are usually acquired
49 through time-consuming field investigation techniques, such as the use of com-
50 pass for obtaining discontinuity orientations, tape measurements for discontinu-
51 ities normal spacing and persistence and roughness analysis by local examination.
52 Sometimes, fieldwork campaigns can be affected by several restrictions, such
53 as safety issues in active rockfall areas, possible access limitations and intensive
54 work requirements in highly fractured rock masses. More recently, several at-
55 tempts have been performed for deriving rock mass quality using remote sensing
56 data [17, 18] or digital pictures [19]. Indeed, the use of remote techniques such
57 as 3D laser scanner and digital photogrammetry allows the acquisition of three
58 dimensional information of the terrain with high accuracy and high spatial reso-
59 lution. Three-dimensional datasets coming from both techniques are widely used
60 for landslide investigations [20, 21], and the scientific community is showing an
61 exponentially growing interest in the study of the extraction of several parameters
62 influencing rock slope stability, including rock mass discontinuity orientations
63 [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] and other rock mass parameters such as
64 the spacing between discontinuities [33, 22], discontinuity persistence [34, 26, 35]
65 and roughness [36, 34, 37, 19].

66 In this work, we review the practical issues for the characterization of rock
67 slopes by means of Slope Mass Rating (SMR) using 3D point clouds through

68 three cases of study where the SMR [3, 38] is calculated using 3D point clouds
69 combined with information acquired with traditional methods. Basic RMR is cal-
70 culated using fieldwork data. Nevertheless, the main contribution of this work is
71 the analysis of SMR adjustment factors and how the use of different sources of
72 information affects SMR values and thus the slope characterization. To do so, we
73 have developed an open source tool programmed in MATLAB which is able to
74 calculate the SMR correction parameters, including the auxiliary angles and their
75 graphical interpretation.

76 The paper is organised as follows: (a) an explanation of the used methodology
77 is included in §2; (b) a description of the three case studies in which the method
78 is applied §3; (c) an application to the three case studies is presented at §4; and
79 finally, (d) a summary of the results along with a discussion of the developed
80 approach is presented at §5 and §6, respectively.

81 **2. Methodology Proposed approach**

82 *2.1. General overview*

83 The methodology presented in figure 1 uses 3D point clouds (here in after
84 PC) acquired by remote imaging techniques (i.e. 3D laser scanner or digital pho-
85 togrammetry) and the basic RMR parameters obtained by means of conventional
86 field surveys as input data. The calculation of SMR is performed through three
87 main steps: (a) 3D data acquisition, (b) extraction of geometrical information, and
88 (c) computation of SMR value, as follows:

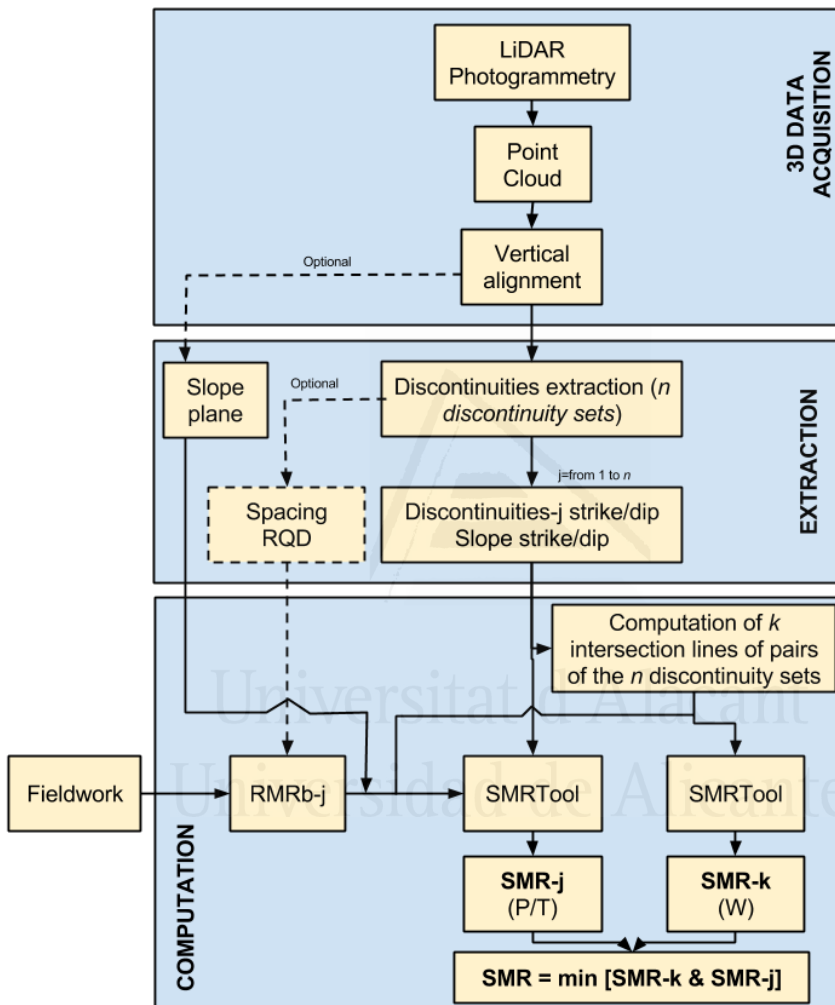


Figure 1: Flowchart of the methodology used. P: planar failure; T: Toppling failure; W: wedge failure.

89 Step 1. 3D data acquisition: First, the studied rock slope is geometrically mod-
90 elled by means of a 3D PC which can be acquired by means of 3D laser
91 scanner or digital photogrammetry techniques [39, 40]. Then, the PC is
92 vertically aligned to the global reference system in order to correctly ex-
93 tract the orientation of the discontinuity planes. PC can also be properly
94 oriented to the north, although this last step is not mandatory when work-
95 ing on a relative slope-discontinuities reference system.

96 Step 2. Parameters extraction: the PC is analysed by an accepted and reliable
97 method to extract the discontinuity sets. Then each point from the PC
98 is classified into its corresponding mean orientation or discontinuity set
99 (herein after DS) and plane, if it has not been previously discarded. Other
100 geomechanical parameters can also be derived either from the PC, such
101 as discontinuities spacing, roughness and persistence, and from the rock
102 mass, such as the Rock Quality Design (RQD). In this step, the slope
103 orientation (dip and dip direction) is also derived from the 3D PC fitting
104 a representative plane of the slope. Although, the orientation of the slope
105 can also be measured during fieldwork by using a geological compass,
106 it is recommended to derive the slope plane from the 3D PC in order to
107 have both the slope and the discontinuities referred to the same reference
108 system.

109 Step 3. SMR computation: a kinematic analysis is performed for each DS and/or
110 for each pair of discontinuities extracted in step 2. This information al-
111 lows the computation of SMR for each discontinuity set or combination

112 of discontinuities by means of SMRTool [41], which provides a graphical
113 interpretation of the potential failure mechanisms, the outputs of the SMR
114 value and the recommendations proposed by Romana [3].

115 2.2. *Extracting discontinuity and slope orientation*

116 Although different approaches and software products can be used at this stage
117 (e.g. PlaneDetect, SplitFX, PCM, DiAna or Coltop3D), the open source software
118 Discontinuity Set Extractor (DSE, available on <http://personal.ua.es/en/ariquelme/>)
119 [32] was used to complete this work. This software semi-automatically extracts
120 DS, assigns a DS to each point and extracts different planes for each DS (here-
121 inafter cluster). Finally in this work, the orientation and the position of each clus-
122 ter are calculated. As in this work we analyse the application of 3D PC to SMR
123 calculation, DSE results are compared with those obtained with PlaneDetect soft-
124 ware.

125 The slope plane (i.e. the mean excavation surface) can be also extracted from
126 the 3D point cloud fitting a plane. Alternatively it can be measured in the field or
127 defined when the slope has not been still excavated as during design states.

128 2.3. *Slope Mass Rating (SMR) computation*

129 SMR index is calculated by applying four adjustment factors to the RMR_b :
130 F_1 , F_2 , F_3 and F_4 . These factors depend both on the slope excavation method and
131 on the geometrical relationships that exist between the slope and the discontinu-
132 ities affecting the rock mass [3]. The SMR index is computed by means of the

133 following expression:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

134 Where:

135 RMR_b RMR basic parameter in the RMR geomechanical classification [15]. The
136 maximum value that RMR_b can reach is 100, meaning a high quality rock
137 mass from a rock mechanics perspective. As a reminder, basic RMR is
138 computed by means of the following expression:

$$RMR_b = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (2)$$

139 where X_1 to X_5 assign a value which depends on the characteristics of the
140 rock or the discontinuities. The maximum values that these factors (X_i) can
141 reach, jointly with their relative weights and the possible data sources for
142 obtaining these parameters, are shown in table 1.

143 F_1 parameter depends on the angular relation between the dip direction of the
144 considered discontinuity and the slope (see parameter A in table 2).

145 F_2 parameter depends on the failure mechanism, as follows: (a) for a planar
146 failure mechanism along a single discontinuity, F_2 depends on the dip of
147 the discontinuity; (b) for a wedge failure mechanism between two given
148 discontinuities, F_2 depends on the plunge of the line of intersection of the
149 discontinuities; (c) finally, for toppling failure mechanism the parameter F_2

Table 1: Basic RMR parameters and their plausible data sources.

Parameter (eq. (2))	Weight	Acquisition	Data source
X_1 : Strength of intact rock material	15	PLT, Uniaxial compressive strength	Field, laboratory
X_2 : Drill core Quality RQD	20	Drill core, geometric analysis	Field, 3D
X_3 : Spacing of discontinuities	20	Drill core, geometric analysis	Field, 3D
X_4 : Condition of discontinuities:	30		
- Discontinuity Length	6	Geometric analysis	Field, 3D
- Separation (aperture)	6	Geometric analysis	Field, 3D
- Roughness	6	Geometric analysis	Field, 3D
- Infilling (gouge)	6	Geometric analysis	Field, images
- Weathering	6	Visual inspection	Field, images
X_5 : Ground water	15	Visual inspection	Field

150 adopts a unitary value. For planar and wedge mechanisms, F_2 is related to
 151 the discontinuity shear strength [38].

152 F_3 parameter also depends on the failure mechanism, as follows: (a) for planar
 153 and toppling failure mechanism, F_3 depends on the angular relation existing
 154 between the slope dip and the dip of the discontinuity (see parameter C in
 155 table 2); (b) for wedge failure mechanism, this parameter can be calculated
 156 as the existing angle between the slope dip and the plunge of the intersec-
 157 tion line between the two considered discontinuities. This parameter, which
 158 expresses the probability of discontinuity outcropping on the slope face [38]
 159 and varies from 0 to 60 points.

160 F_4 parameter depends on the method of excavation used on the studied slope
 161 (see table 2).

162 Consequently, the adjustment factors F_1 , F_2 and F_3 can be deduced from the
 163 following geometrical data: (a) strike (or alternatively dip direction) of the slope

Table 2: Correction parameters for SMR. P: planar failure; T: toppling failure; W: wedge failure. α_j : dip direction of the discontinuity; α_s : dip direction of the slope; α_i : trend of the intersection line of two sets of discontinuities; β_s : slope dip; β_j : discontinuity dip; β_i : plunge of the intersection line of two sets of discontinuities.

Type of failure		Very favorable	Favorable	Normal	Unfavorable	Very unfavorable	
P	A=	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	30 – 20°	20 – 10°	10 – 5°	
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W		F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B=	β_j or β_i	$< 20^\circ$	20 – 30°	30 – 35°	35 – 45°	$> 45^\circ$
P/W			F_2	0.15	0.40	0.70	0.85
T			1.00				
P	C=	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	10 – 0°	0°	0 – (-10)°	$< (-10)^\circ$
W		$\beta_i - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$					
P/T/W		F_3	0	-6	-25	-50	-60
Excavation method (F_4)							
Natural slope			+15	Blasting or mechanical		0	
Presplitting			+10	Deficient blasting		-8	
Smooth blasting			+8				

164 and each DS; (b) dip of each DS and dip of the slope. Furthermore, (c) when
 165 a wedge failure mechanism can occur, trend and plunge of the intersection line
 166 between the two planes are also required [42].

167 The calculation of the above described geometrical parameters requires a pre-
 168 vious interpretation of the relative position of the discontinuity planes and the
 169 slope for a planar failure mechanism, and the line of intersection between two
 170 planes in the case of a wedge mechanism. Then, the failure mode which is ac-
 171 tually compatible with the existing relative geometry between the slope and the
 172 discontinuities is determined. Subsequently, the SMR parameters are calculated
 173 following table 2.

174 For a systematical computation of the SMR adjustment factors, the different
 175 failure mechanisms are determined considering the following general geometrical

176 conditions:

- 177 • For planar failure: $|\alpha_j - \alpha_s| < 90^\circ$
- 178 • For wedge failure: $|\alpha_i - \alpha_s| < 90^\circ$
- 179 • For toppling failure: $|\alpha_j - \alpha_s| > 90^\circ$

180 where α_j and α_s are the dip direction of the discontinuity and of the slope,
181 respectively, and α_i is the dip direction of the intersection line of the wedge.

182 2.4. *SMRTool description*

183 We have implemented the geometrical conditions for the computation of the
184 SMR index (see figure 2) in an open source software called SMRTool [41] (avail-
185 able on <http://personal.ua.es/en/ariquelme/>). The inputs of this software are the
186 orientations of the slope, the discontinuities and their corresponding RMR_b values.
187 Wedges are automatically calculated, indicating the pair of intersecting disconti-
188 nuities. The SMRtool shows the angular relations between the discontinuities
189 and the slope as well as a graph to visualize them. Finally, adjustment factors
190 using discrete and continuous functions and Romana's recommendations are au-
191 tomatically displayed. This software aids users to interpret the calculation of the
192 adjustment factors and all auxiliary angles in an intuitive, analytical and graphical
193 mode.

194 3. Case studies

195 The proposed methodology was applied to the three different case studies,
196 which are described in this section. This analysis aims to highlight the main ad-

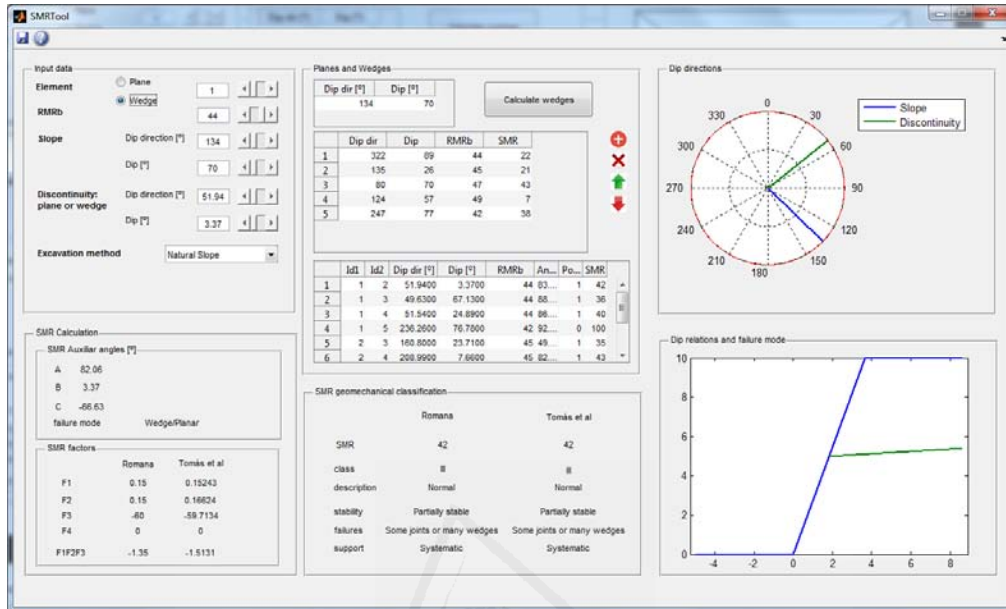


Figure 2: Screenshot of the SMRTool [41] (freely available on the [author's website](#)).

197 vantages and shortcomings of using 3D PC for evaluating geomechanical quality
 198 of rocky slopes through SMR.

199 *3.1. Case study I: Rockbench repository, Kingston (Canada)*

200 The main aim of this first case study is to calculate the SMR factors of a
 201 rock slope using different sources of information and different analysis approaches
 202 [31] to analyse their main practical advantages and drawbacks. The source data
 203 consists of a 3D point cloud from a rock slope on a highway road near Kingston,
 204 Canada, which is available on the online repository Rockbench [40].

205 This outcrop consists of granites with very well defined planes of discontinu-
 206 ity. This outcrop was already analysed by means of traditional compass measure-

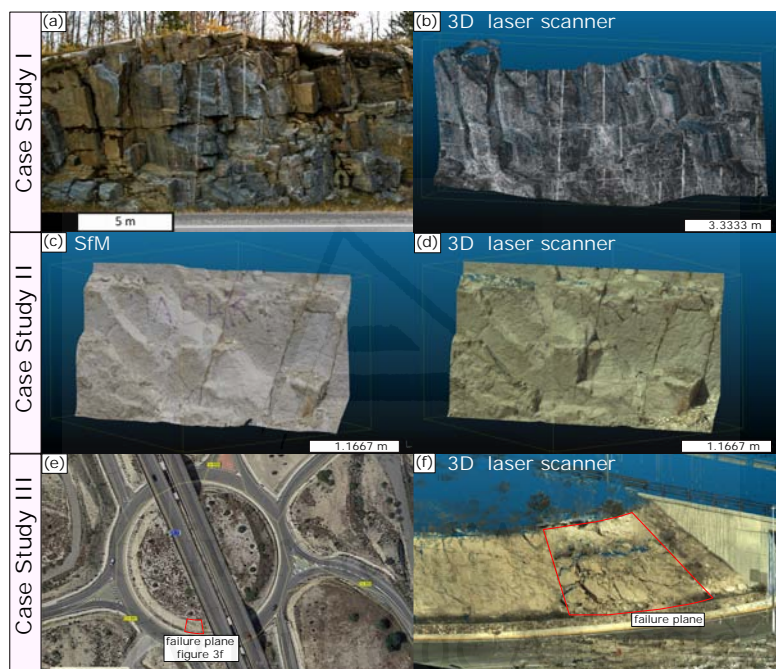


Figure 3: Case Study I: (a) Picture of the rock slope, Kingston (Canada); (b) Section of the previous picture showing the analysed 3D PC; case study II: (c) 3D PC acquired by digital photogrammetry; (d) 3D point cloud acquired by 3D laser scanner; case study III: (e) Orthographic image (Google Earth, imagery date: June 30th, 2013); (f) 3D PC view

207 ments and by using PlaneDetect software [31] . This slope can be divided into
208 three separated sectors with different orientations. Since any RMRb value is pub-
209 licly available for this case study, the comparison among different methods has
210 been performed in terms of the SMR adjustment factors. To do so, we utilized
211 both discontinuities extracted in [31] and the discontinuities detected in this work
212 (see section 4).

213 3.2. Case study II: Application of the methodology to compute SMR to an urban 214 rock slope.

215 The second case study aims to calculate SMR from 3D PC for a slope that
216 was acquired by two different surveying techniques: 3D laser scanning and multi-
217 image photogrammetric techniques (SfM). This information is complemented with
218 data acquired from fieldwork (e.g. weathering, roughness, infilling, aperture,
219 spacing and persistence) to compute basic RMR.

220 The slope is located in Alicante (SE Spain) and composed of marls, argilla-
221 ceous limestones and calcareous limestones. This rock mass presents some prac-
222 tical difficulties for its characterization for three main reasons: (a) most of the dis-
223 continuity surfaces are smoothed by weathering; (b) the strata is slightly folded
224 and eventually affected by several normal faults and (c) the sub-horizontal sur-
225 faces are partially (or even completely) covered by debris due to the progressive
226 degradation of the materials located at the upper part of the slope. Consequently,
227 a representative outcrop of the rock mass has been selected to minimize these
228 mentioned effects that can mask the true discontinuities surfaces. . The slope was

229 excavated by mechanical methods.

230 The pictures acquired for the application of the SfM were performed using
231 a Canon EOS 550D digital camera on June 6th, 2014. Then, the 3D PC was
232 generated using Agisoft Photoscan software and ground control points were taken
233 from a previous registered 3D laser scanner dataset acquired on August 2nd, 2012.
234 In order to avoid some of the inconveniences mentioned in the previous paragraph
235 (i.e. a and b), a 3x2 meter sector was studied (figure 3 c and d) and is defined by
236 835752 points (a point density of $14 \times 10^4 \text{ pts/m}^2$). The second model was acquired
237 by a laser scanning survey carried out the March 28th, 2015 with a Leica C10
238 laser scanner. In order to reduce shadow areas, it was carried out in three separate
239 stations and the point cloud was registered using data from a digital map (SIGNA
240 <http://signa.ign.es/signa/>). The studied sector was subsampled obtaining a point
241 cloud with 301089 points (a point density of $8 \times 10^4 \text{ pts/m}^2$).

242 3.3. Case study III: Application of the methodology to a roundabout slope on A-7 243 highway (Alicante, Spain)

244 The last case study focuses on the slope stability of a roundabout excavation
245 in which the slope strike varies from 0° to 360° (see figure 3 e and f). The
246 roundabout is located in the road CV-8502 intersection with CV-847 in Alicante
247 (SE Spain) under the A-7 highway. The lithology of the studied slopes consists of
248 Paleogene marly limestones [45]. The south slope of this roundabout was affected
249 by a planar failure after its excavation (see figure 3 e and f). .

250 In this case study the discontinuities are derived from the 3D PC obtained by

251 means of a 3D laser scanner, and the roundabout slope is modeled by a synthetic
252 3D point cloud. Data was acquired by means of a 3D laser scanner Leica Scansta-
253 tion C10 by three scans on November 4th, 2014 with a density of 5223 pts/m^2 (see
254 figure 3f).

255 As the SMR adjustment factors vary depending on the DS orientations (i.e. dip
256 and dip direction) and the basic RMR is considered constant for each DS, thus,
257 in this case, the SMR index only varies depending on the slope plane orientation.
258 Therefore, we have generated a synthetic slope surface excavation which assigns
259 a constant slope dip direction and a variable dip for each point of this synthetic
260 surface to calculate the SMR. Note that the slope's PC has not been generated
261 from the 3D laser scanner but from the known parametric surface. This process is
262 defined in a similar way to those of earlier design stages in which the slope had
263 not been excavated but its orientation was defined by the project.

264 **4. Results**

265 *4.1. Results of case study I*

266 The 3D PC from this slope was analysed by means of DSE software [32]
267 extracting the discontinuity sets shown in figure 4a and computing the wedges
268 generated by the intersection of pairs of planes. Then, the results have been com-
269 pared with those derived from 3D PC using other methods (PlaneDetect software,
270 3D laser scanning datasets and digital photogrammetry datasets) and conventional
271 field surveys. The results of the intercomparison are summarized in the following
272 table 3 and a basic statistical analysis is shown in figures 5. Figures 5 a, b and

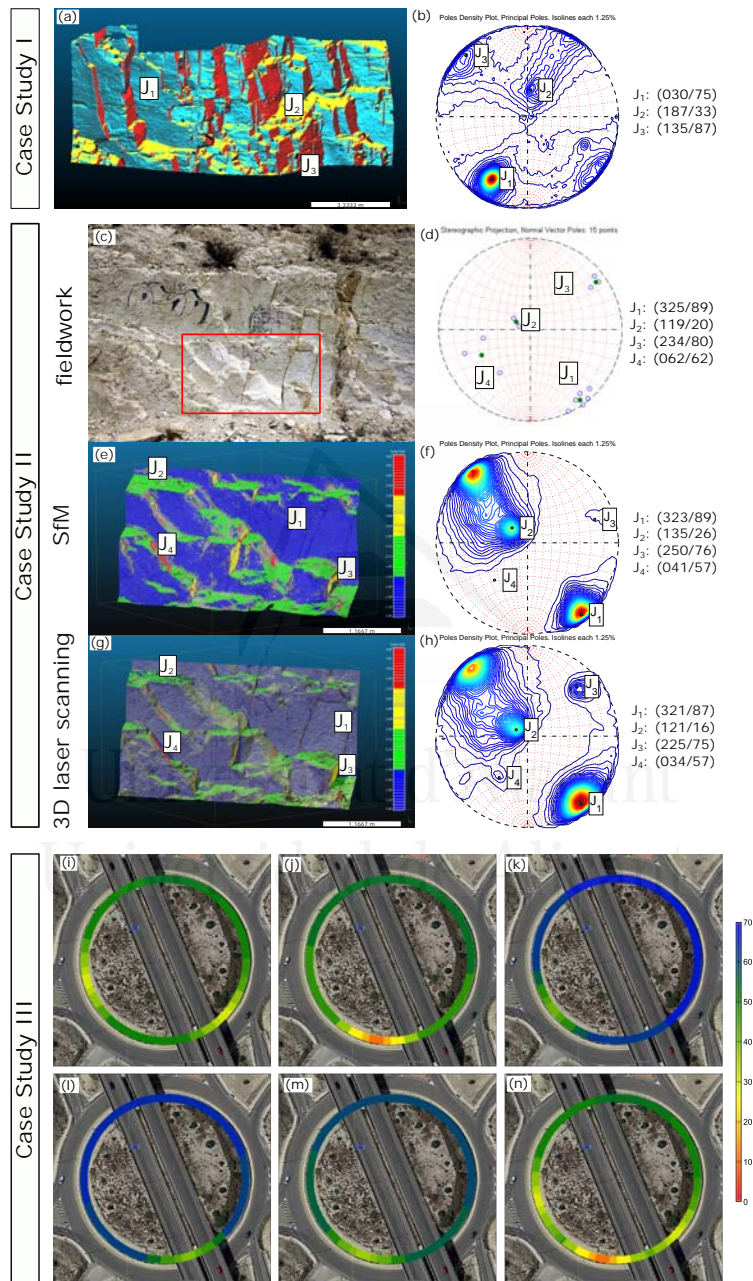


Figure 4: Case study I. (a) Classified point cloud, one colour per DS; (b) Normal vector poles' density. Case study II: (c) Picture of the slope; (d) compass measurements and mean planes; (e) SfM classified point cloud; (f) Normal vector poles' density; (g) 3D laser scanner classified point cloud; (h) Normal vector's point density; Case study III: Orthographic view of the slope acquired from Google Maps, imagery date: June 6th, 2013; (i) Envelope of minimum SMR associated to wedge failure mechanism; figures (j) to (m) SMR values of each point of the conical frustum corresponding to both planar and toppling failure mechanisms; (n) envelope of the minimum SMR values.

Table 3: Case study I. Calculation of the SMR correction factors ($F_1xF_2xF_3 + F_4$) of the studied rock slope by means of the proposed methodology from different data acquisition methods (i.e. geological compass, LiDAR and photogrammetry) and techniques of analysis (i.e. Plane detect and DSE).

		J_1	J_2	J_3	W_{12}	W_{13}	W_{23}
dip direction / dip	Manual Geological Compass	(028/76)	(307/86)	(205/30)	(021/76)	(117/01)	(219/29)
	Plane Detect LiDAR	(029/75)	(308/89)	(198/32)	(034/75)	(117/06)	(218/30)
	Plane Detect Photogrammetry	(029/76)	(309/90)	(194/34)	(039/76)	(117/08)	(219/31)
	DSE LiDAR	(030/75)	(135/87)	(187/33)	(055/73)	(116/12)	(223/28)
Slope 1: (008/88)	Manual Geological Compass	-24,00	-7,50	-4,20	-42,00	0,00	0,00
	Plane Detect LiDAR	-24,00	-0,90	-17,50	-24,00	0,00	0,00
	Plane Detect Photogrammetry	-24,00	-0,90	-21,25	-9,00	0,00	0,00
	DSE LiDAR	-24,00	-3,75	-25,00	-9,00	0,00	0,00
Slope 2: (162/77)	Manual Geological Compass	-3,75	-3,75	-3,60	0,00	-1,35	-3,60
	Plane Detect LiDAR	-3,75	-3,75	-6,30	0,00	-1,35	-6,30
	Plane Detect Photogrammetry	-3,75	-3,75	-6,30	0,00	-1,35	-6,30
	DSE LiDAR	-3,75	-2,40	-16,80	0,00	-1,35	-3,60
Slope 3: (186/88)	Manual Geological Compass	-10,00	-3,75	-16,80	0,00	-1,35	-3,60
	Plane Detect LiDAR	-10,00	-3,75	-29,40	0,00	-1,35	-6,30
	Plane Detect Photogrammetry	-10,00	-3,75	-35,70	0,00	-1,35	-6,30
	DSE LiDAR	-10,00	-7,50	-42,00	0,00	-1,35	-3,60

273 c show the comparison between the SMR term $F_1xF_2xF_3 + F_4$ which was cal-
274 culated using fieldwork data and 3D point clouds for each slope. Figures 5 d, e
275 and f summarizes the info in a box plot, in which it is observed that previous term
276 varies significantly for certain planes depending on the source of information and
277 the applied approach.

278 4.2. Results of case study II

279 In this case study we have calculated SMR using fieldwork measurements, as
280 well as 3D laser scanner and SfM data sets analysed by means of DSE software
281 [32]. In both cases we obtained five discontinuity sets but one of them was dis-
282 carded as it was a surface generated as a result of weathering processes. Figures 4
283 e and g show the classified point cloud and figures 4 d, f and h show their respec-
284 tive normal vector's pole density and the extracted discontinuity sets. The slope

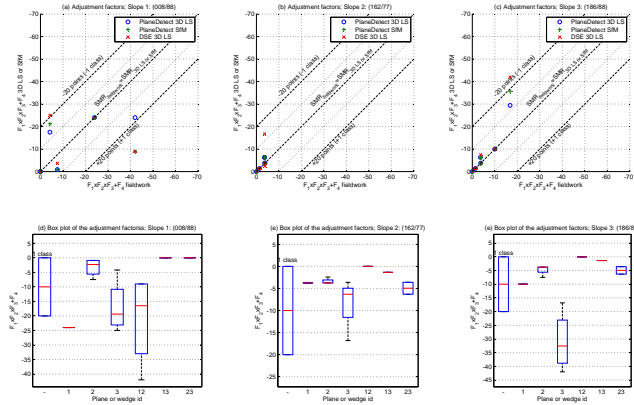


Figure 5: Case study I. (a) to (c) Comparison of adjustment factors obtained with fieldwork data versus those obtained with 3D point clouds for each slope. (d) to (f) Box whisker plot for all sources of information and each slope.

285 plane was extracted by its best fit plane (133/72). Finally, all wedges were calcu-
 286 lated and only those whose trend and slope's dip direction formed an angle lower
 287 than 90° were selected as potential wedges.

288 In this case study, RMRb values were computed from data acquired at field.
 289 Their values are summarized in tables 4, 5 and 6. All SMR values were cal-
 290 culated using the software SMRTool. Figure 6a shows the comparison between
 291 SMR computed from fieldwork and SMR computed from 3D point clouds. Ad-
 292 ditionally, the results were compared for each plane or wedge in a box plot (see
 293 figure 6).

Table 4: Case study II. SfM dataset: SMR Calculations of all discontinuity sets and wedges.

plane/wedge id	dip dir [°]	dip [°]	RMR_b	A [°]	B [°]	C [°]	failure	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Class
J_1	323	89	44	10	89	161	Toppling	0.70	1.00	-25	0	26	IV
J_2	135	26	45	2	26	-46	Planar	1.00	0.40	-60	0	21	IV
J_3	250	76	42	63	76	148	Toppling	0.15	1.00	-25	0	38	IV
J_4	41	57	47	88	57	129	Toppling	0.15	1.00	-25	0	43	III
W_{12}	53	4	44	80	4	-68	Wedge	0.15	0.15	-60	0	42	III
W_{14}	51	57	44	82	57	-15	Wedge	0.15	1.00	-60	0	35	IV
W_{23}	166	23	42	33	23	-49	Wedge	0.15	0.40	-60	0	38	IV
W_{24}	114	24	45	19	24	-48	Wedge	0.70	0.40	-60	0	28	IV

Table 5: Case study II. 3D laser scanning dataset: SMR Calculations of all discontinuity sets and wedges.

plane/wedge id	dip dir [°]	dip [°]	RMR_b	A [°]	B [°]	C [°]	failure	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Class
J_1	321	87	44	8	87	159	Toppling	0.85	1.00	-25	0	22	IV
J_2	121	16	45	12	16	-56	Planar	0.70	0.15	-60	0	38	IV
J_3	225	75	42	88	75	147	Toppling	0.15	1.00	-25	0	38	IV
J_4	34	57	47	81	57	129	Toppling	0.15	1.00	-25	0	43	III
W_{12}	51	6	44	82	6	-66	Wedge	0.15	0.15	-60	0	42	III
W_{14}	46	56	44	87	56	-16	Wedge	0.15	1.00	-60	0	35	IV
W_{23}	139	15	42	6	15	-57	Wedge	0.85	0.15	-60	0	34	IV
W_{24}	113	16	45	20	16	-56	Wedge	0.70	0.15	-60	0	38	IV

Table 6: Case study II. Fieldwork dataset: SMR Calculations of all discontinuity sets and wedges.

plane/wedge id	dip dir [°]	dip [°]	RMR_b	A [°]	B [°]	C [°]	failure	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Class
J_1	325	87	44	12	87	159	Toppling	0.7	1.00	-25	0	26	IV
J_2	119	20	45	14	20	-52	Planar	0.7	0.15	-60	0	38	IV
J_3	234	83	42	79	83	155	Toppling	0.15	1.00	-25	0	38	IV
J_4	62	62	47	71	62	-10	Planar	0.15	1.00	-60	0	38	IV
W_{12}	55	9	44	78	9	-63	Wedge	0.15	0.15	-60	0	42	III
W_{14}	49	61	44	84	61	-11	Wedge	0.15	1.00	-60	0	35	IV
W_{23}	146	18	42	13	18	-54	Wedge	0.70	0.15	-60	0	35	IV
W_{24}	142	19	45	9	19	-53	Wedge	0.85	0.15	-60	0	37	IV
W_{34}	145	12	42	12	12	-60	Wedge	0.70	0.15	-60	0	35	IV

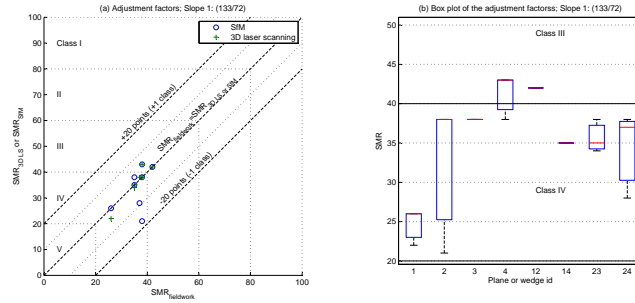


Figure 6: Case study II. (a) Comparison of adjustment factors obtained with fieldwork data versus those obtained with 3D point clouds; (b) box whisker plot for the three sources of information: fieldwork, SfM and 3D laser scanner.

Table 7: Case study III. SMR Calculations of all discontinuity sets and wedges at the failure plane (190/50).

plane/wedge id	dip dir [°]	dip [°]	RMRb	A [°]	B [°]	C [°]	failure	F1	F2	F3	F4	SMR	Class
J_1	190	45	54	0	45	-5	Planar	1.00	0.85	-50	0	11	V
J_2	52	73	66	42	73	123	Toppling	0.15	1.00	-25	0	62	II
J_3	343	85	85	27	85	135	Toppling	0.40	1.00	-25	0	75	II
J_4	20	83	60	10	83	133	Toppling	0.70	1.00	-25	0	42	III
W_{12}	133	28	54	57	28	-22	Wedge	0.15	0.4	-60	0	50	III
W_{13}	255	23	54	65	23	-27	Wedge	0.15	0.4	-60	0	50	III
W_{14}	109	9	54	81	9	-41	Wedge	0.15	0.15	-60	0	52	III

294 4.3. Results of case study III

295 For this case study, two different approaches were followed: (a) On the one
 296 hand, three discontinuity sets were detected through classical fieldwork: (J_1 , J_2
 297 and J_3). ; (b) On the other hand, when investigating the 3D PC using DSE soft-
 298 ware, an additional discontinuity set was extracted (J_4). The RMRb was calcu-
 299 lated during fieldwork from the manually collected data and in a complementary
 300 way, from the information extracted from the DSE (see table 7).

301 In this case study, the slope orientation varied around the roundabout adopting

302 different dip directions from 0 to 360° and a constant dip. SMR was calculated
303 for all orientations of the roundabout, assuming that the slope of the roundabout
304 defined a conical frustum whose angle was equal to the slope dip (i.e. 50°).

305 First of all, SMR computation for planar failure mechanisms was carried out.
306 Figures 4 i to n show the result of SMR calculation, where the values for each
307 slope sector are depicted in a different colour according to the colour bar scale
308 (0 and 70 for the lowest and highest values, respectively). Figures 4 j, k, l and
309 m show the SMR values of the discontinuity sets J_1 , J_2 , J_3 and J_4 , being the
310 figure 4n the minimum envelope of all the SMR values calculated for the different
311 DS. This last figure shows that the lowest SMR value is 11, which corresponds
312 to a very bad (Class V) and 'completely unstable' slope according to Romana's
313 classification system [38]. The SMR from this specific location is calculated in
314 detail in table 7.

315 Additionally, a wedge failure mechanism was also analysed following the pre-
316 viously described procedure. The minimum values of the SMR were 30 in the
317 W and SE parts of the slope (figure 4i). Thus, when analysing the different SMR
318 computations we can observe that the minimum value of SMR was computed at
319 the sector of the slope in which a planar slide had occurred (see figure 3). There-
320 fore, this case study highlights the usefulness and reliability of SMR to map areas
321 of lower geomechanical quality, in which failures are more likely to occur.

322 5. Discussion

323 The SMR geomechanical classification has been applied to three cases of study
324 using information derived from 3D point clouds and compared with fieldwork data
325 when available. This work focuses on how the SMR adjustment factors change
326 depending on the used source of information and method, and in the analysis
327 of the main practical issues of the exploitation of 3D PC for calculating SMR,
328 through three different cases of study. For the studied cases, first, we extract the
329 different discontinuity sets using different approaches and then we complement
330 this information with the qualitative and quantitative information of the rock mass
331 involved on the determination of the basic RMR. Finally, the SMR is calculated
332 through the geometric interpretation of the different failure mechanisms, including
333 planar, wedge or toppling potential failures. The straightforward calculation of the
334 auxiliary angles and the SMR geometric parameters are automatically performed
335 using the SMRTool software.

336 The first case of study demonstrates that rocky slopes can be characterized
337 using different 3D PC analysis approaches (PlaneDetect [31] and DSE [32]) as an
338 alternative to time-consuming conventional techniques which sometimes present
339 important difficulties to be applied (e.g. due to the existence of a river in front
340 of the slope, safety restrictions, etc.). The current study found that, considering
341 RMR_b as an independent variable, the use of 3D laser scanner data combined with
342 DSE software can cause the variation of SMR. The comparison of obtained results
343 using DSE LiDAR with manual compass datasets showed a variation of 31 units
344 in slope 1 combined with W_{12} . This evidences a difference in the slope's stability

345 depending on the used approach. More significant variations were found in J_3
346 combined with the three slopes.

347 In order to explain in detail the observed significant SMR variation we focus
348 on slope 1 and J_3 . The highest difference is found between manual geological
349 compass source data and 3D laser scanner analysed by DSE software. Obtained
350 planes are (205/30) and (187/33) respectively, and the angle between their normal
351 vectors is 9.8° . Despite this angle difference is acceptable for a mean plane, its
352 combination with the slope 1 causes that A auxiliary angle varies from 17° to
353 1° and therefore F_1 increases from 0.7 to 1. Moreover, dip values play a key role
354 in this case. C auxiliary angle is equal to 118° for the first case, but it varies to
355 121° (only 3°), and thus F_3 dwindles from -6 to -25. As a result, the product
356 $F_1 \times F_2 \times F_3$ varies from -4.2 to -25, varying one SMR class. Slightly better re-
357 sults are obtained if the adjustment factors are calculated through the continuous
358 functions [12], as this value varies from -2.5 to -19.2. Since the 3D PC from this
359 case study is available in a public repository [40] the results of our research can
360 be verified by other peers in order to validate our analysis and conclusions.

361 The second case study utilizes information derived from digital photogram-
362 metry, 3D laser scanner and traditional methods. It is observed a good correlation
363 between SMR calculated through fieldwork and 3D laser scanner data and a dis-
364 crepancy with those calculated through SfM data. Nevertheless, these results must
365 be interpreted with caution as the point cloud's quality acquired through SfM sig-
366 nificantly depends on the used camera, number and quality of pictures, acquisition
367 strategy, used ground control points and vertical and horizontal alignment of the

368 raw 3D PC. The results comparison can be summarized as follows for the different
369 discontinuity sets:

370 J_1 When using 3D laser scanning dataset the SMR is equal to 22 but when
371 using SfM of fieldwork collected data SMR is equal to 26. A possible ex-
372 planation for this fact might be that despite its normal vectors are reason-
373 ably parallel, the slope's plane makes that small variations in the orientation
374 of the DS implies SMR variations that can even change its geomechanical
375 class.

376 J_2 SfM analysis shows a SMR value of 21 while laser scanning and fieldwork
377 shows SMR values of 38. The most likely cause of the observed difference
378 is that when using SfM data, the A angle (see table 2) is equal to 2° and
379 thus $F_1 = 1$, but using fieldwork and laser scanning dataset this angle is
380 higher than 10° so F_1 is 30% minor (see tables 4, 5 and 6). In this case, the
381 dip angle of J_2 is small, so its dip direction varies easily if the source data
382 are inaccurate. This is the case of this sub-horizontal planes for which SfM
383 was inaccurate because of digital pictures were taken with bias (horizontal
384 line of sight and sub-horizontal DS). Moreover, these DS subhorizontal ori-
385 entation favour the accumulation of debris (some of them are partially or
386 even completely covered) due to the progressive degradation of the material
387 located at the upper part of the slope. Consequently, the 3D model does not
388 modelize correctly this flat surface.

389 J_3 The results of this calculation did not show any deviation.

390 J_4 It was found a difference of 5 SMR units between fieldwork and 3D data,
391 which is caused by the angle difference between their dip direction up to
392 20°. This deviation may be explained by the insufficient number of orien-
393 tations measurements, which is due to the following reasons. On the one
394 hand, fieldwork campaign conditions are an important factor of this devia-
395 tion because J_4 orientations were difficult to measure. On the other hand,
396 the surface of exposed planes was small. These factors explain the fact
397 that this DS had insufficient measurements to calculate the mean orienta-
398 tion with accuracy. Nevertheless, the use of 3D PC datasets have increased
399 the number of point measurements.

400 W_{ij} Wedges also show differences, as they are defined by the intersection of
401 previous pair of planes and then are affected by the same sources of error.

402 The third case study applies the methodology in a singular rock slope, a circu-
403 lar roundabout excavation in which the slope direction varies at different sectors
404 of the slope. Firstly, the discontinuity sets are extracted from a 3D laser scan-
405 ning dataset using the DSE software and the slope is modelled by means of a
406 synthetic 3D point cloud. Later, SMR has been computed for the different recog-
407 nized DS and the wedges derived from their combination and, then, the minimum
408 SMR evolve has been selected as representative for the different orientations of
409 the roundabout. The minimum computed SMR values, in which a high proba-
410 bility of failure exists, show a precise spatial coincidence with an existing planar
411 rock slide (see figures 3 e and f and 4n), which allows to validate the proposed

412 approach, also demonstrating the reliability of SMR.

413 **6. Conclusions**

414 Nowadays, the use of 3D PC for estimating mean plane orientations has be-
415 come a hot topic. The most significant findings to emerge from this study are the
416 following:

417 Different methods for extracting DS and different sources of informations can
418 lead to different values of mean plane orientations, as was shown in case study I.
419 Interestingly, these variations lead to higher or lower SMR values than those com-
420 puted using conventional field methods. It was also shown that results strongly
421 depend on the surface of information when the quantity of measurements is not
422 enough (such as when rock slopes are unaccessible or fieldwork is risky) as was
423 shown in case study II. Additionally, accordingly with case study I it has been ev-
424 idenced that in some cases, when orientations are affected by small variations the
425 SMR results can vary significantly and thus the class can change. This fact points
426 out the importance of a solid background in rock mechanics. Finally, this study
427 has shown the reliability of SMR for predicting possible occurrence of failures, as
428 it was shown in case study III.

429 Summarizing, the main advantages of SMR calculation (i.e extraction of ori-
430 entations on inaccessible or risky areas, quick calculation of the SMR adjustment
431 factors, objectivity and reproducibility of the calculations, and reliability of this
432 rock mass classification) using a remote acquisition technique lead us to think that
433 this approach will be widely used in the forthcoming years.

434 **7. Acknowledgements**

435 This work was partially funded by the University of Alicante (vigrob-157
436 Project), the Generalitat Valenciana (Projects GV/2011/044 and ACOMP/2014/136),
437 the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (MINECO) and EU FEDER
438 under Project TEC2011-28201-C02-02. The 3D laser scanner used in this work
439 for the 3D point cloud acquisition was acquired under the framework of the Pro-
440 grama Objetivo FEDER 2007-2013 Generalitat Valenciana - Unin Europea - Uni-
441 versidad de Alicante. Mr Javier Soler provided the pictures from the San Blas rock
442 slope and the computer processing facilities. Finally, we would like to acknowl-
443 edge Mr. Christopher Ward for the English language revision and correction of
444 this manuscript, their help being kindly appreciated .

445 **8. References**

- 446 [1] J. A. Hudson, J. P. Harrison, ENGINEERING ROCK MECHANICS PART
447 2: ILLUSTRATIVE WORKED EXAMPLES: ILLUSTRATIVE WORKED
448 EXAMPLES, Elsevier, 2001.
- 449 [2] M. Selby, A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with
450 tests from antarctica and new zealand, Zeitschrift für Geomorphologie 24 (1)
451 (1980) 31–51.
- 452 [3] M. Romana, New adjustment ratings for application of bieniawski classifi-
453 cation to slopes, in: International symposium on the role of rock mechanics,
454 Zacatecas, 1985, pp. 49–53.

- 455 [4] A. Robertson, Estimating weak rock strength, in: Proceedings of the SME
456 Annual Meeting, Phoenix, Arizona, Society of Mining Engineers, no. 88-
457 145, 1988, pp. 1–5.
- 458 [5] D. Laubscher, A geomechanics classification system for the rating of rock
459 mass in mine design, *JS Afr. Inst. Metall* 90 (10) (1990) 267–273.
- 460 [6] A. Haines, P. Terbrugge, G. Carrieri, et al., Preliminary estimation of
461 rock slope stability using rock mass classification systems, in: 7th ISRM
462 Congress, International Society for Rock Mechanics, 1991.
- 463 [7] Z. Chen, et al., Recent developments in slope stability analysis, in: 8th ISRM
464 Congress, International Society for Rock Mechanics, 1995.
- 465 [8] T. Shuk, Key elements and applications of the natural slope methodology
466 (nsm) with some emphasis on slope stability aspects, in: Proceedings of the
467 4th South American Congress on Rock Mechanics, Vol. 2, 1994, pp. 955–
468 960.
- 469 [9] E. Unal, Modified rock mass classification: M-rmr system, Milestones in
470 rock engineering. The Bieniawski Jubilee Collection. Balkema, Rotterdam
471 (1996) 203–223.
- 472 [10] P. Lindsay, R. Campbell, D. Fergusson, G. Gillard, T. Moore, Slope stability
473 probability classification, waikato coal measures, new zealand, *International*
474 *Journal of Coal Geology* 45 (2) (2001) 127–145.

- 475 [11] Z. Şen, B. H. Sadagah, Modified rock mass classification system by contin-
476 uous rating, *Engineering Geology* 67 (3) (2003) 269–280.
- 477 [12] R. Tomás, J. Delgado, J. Serón, Modification of slope mass rating (smr) by
478 continuous functions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining*
479 *Sciences* 44 (7) (2007) 1062–1069.
- 480 [13] L. Pantelidis, An alternative rock mass classification system for rock slopes,
481 *Bulletin of engineering geology and the environment* 69 (1) (2010) 29–39.
- 482 [14] Z. Bieniawski, Engineering classification of jointed rock masses, *CIVIL EN-*
483 *GINEER IN SOUTH AFRICA* 15 (12) (1973) 335–344.
- 484 [15] Z. T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications: a complete manual*
485 *for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering,*
486 *John Wiley & Sons, 1989.*
- 487 [16] C. Irigaray, T. Fernández, J. Chacón, Preliminary rock-slope-susceptibility
488 assessment using gis and the smr classification, *Natural Hazards* 30 (3)
489 (2003) 309–324.
- 490 [17] F. Andrea, G. Andrea, M. Giuseppe, Rock slopes failure susceptibility anal-
491 ysis: from remote sensing measurements to geographic information system
492 raster modules, *American Journal of Environmental Sciences* 6 (6) (2010)
493 489.
- 494 [18] A. Filipello, G. Mandrone, L. Bornaz, [Structural data treatment to de-](#)
495 [fine rockfall susceptibility using long range laser scanner](#), in: G. Lollino,

- 496 D. Giordan, K. Thuro, C. Carranza-Torres, F. Wu, P. Marinos, C. Del-
497 gado (Eds.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6,
498 Springer International Publishing, 2015, pp. 721–724. doi:10.1007/
499 978-3-319-09060-3_129.
500 URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_129
- 501 [19] P. Alameda, Aplicación de nuevas metodologías de adquisición de datos para
502 el análisis de estabilidad de taludes: casos de estudio en materiales foliados
503 de la cordillera bética, Ph.D. thesis, University of Granada, Spain (2014).
- 504 [20] M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, A. Abellán, M.-H. Derron, A. Loye, R. Met-
505 zger, A. Pedrazzini, Use of lidar in landslide investigations: a review, Natural
506 hazards 61 (1) (2012) 5–28.
- 507 [21] A. Abellán, T. Oppikofer, M. Jaboyedoff, N. J. Rosser, M. Lim, M. J. Lato,
508 Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities, Earth Surface Processes
509 and Landforms 39 (1) (2014) 80–97.
- 510 [22] S. Slob, B. van Knapen, R. Hack, K. Turner, J. Kemeny, Method for au-
511 tomated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser
512 scanning, Transportation Research Record: Journal of the Transportation
513 Research Board 1913 (1) (2005) 187–194.
- 514 [23] M. I. Olariu, J. F. Ferguson, C. L. Aiken, X. Xu, Outcrop fracture characteri-
515 zation using terrestrial laser scanners: Deep-water jackfork sandstone at big
516 rock quarry, arkansas, Geosphere 4 (1) (2008) 247–259.

- 517 [24] M. Sturzenegger, D. Stead, Quantifying discontinuity orientation and per-
518 sistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial
519 remote sensing techniques, *Natural Hazards and Earth System Science* 9 (2)
520 (2009) 267–287.
- 521 [25] A. Ferrero, G. Forlani, R. Roncella, H. Voyat, [Advanced geos-
522 tructural survey methods applied to rock mass characterization](#), *Rock Mechanics and Rock*
523 *Engineering* 42 (4) (2009) 631–665. doi:10.1007/s00603-008-0010-4.
524 URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-008-0010-4>
- 525 [26] M. Sturzenegger, D. Stead, D. Elmo, Terrestrial remote sensing-based esti-
526 mation of mean trace length, trace intensity and block size/shape, *Engineer-*
527 *ing Geology* 119 (3) (2011) 96–111.
- 528 [27] M. Jaboyedoff, R. Metzger, T. Oppikofer, R. Couture, M.-H. Derron, J. Lo-
529 cat, D. Turmel, New insight techniques to analyze rock-slope relief using
530 dem and 3d-imaging cloud points: Coltop-3d software, in: T. . Francis (Ed.),
531 *Rock mechanics: Meeting Society’s challenges and demands. Proceedings*
532 *of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada,*
533 *May 27-31, 2007, Vol. 1, 2007, pp. 61–68.*
- 534 [28] D. García-Sellés, O. Falivene, P. Arbués, O. Gratacos, S. Tavani, J. A.
535 Muñoz, Supervised identification and reconstruction of near-planar geo-
536 logical surfaces from terrestrial laser scanning, *Computers & Geosciences*
537 37 (10) (2011) 1584–1594.

- 538 [29] K. Khoshelham, D. Altundag, D. Ngan-Tillard, M. Menenti, [Influence of](#)
539 [range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces](#)
540 [using terrestrial laser scanning](#), International Journal of Rock Mechanics
541 and Mining Sciences 48 (8) (2011) 1215–1223.
542 URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911001456)
543 [S1365160911001456](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911001456)
- 544 [30] G. Gigli, N. Casagli, Semi-automatic extraction of rock mass structural data
545 from high resolution lidar point clouds, International Journal of Rock Me-
546 chanics and Mining Sciences 48 (2) (2011) 187–198.
- 547 [31] M. J. Lato, M. Vöge, Automated mapping of rock discontinuities in 3d lidar
548 and photogrammetry models, International Journal of Rock Mechanics and
549 Mining Sciences 54 (2012) 150–158.
- 550 [32] A. J. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, M. Jaboyedoff, [A new ap-](#)
551 [proach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3d](#)
552 [point clouds](#), Computers & Geosciences 68 (0) (2014) 38 – 52.
553 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>.
554 URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300414000740)
555 [S0098300414000740](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300414000740)
- 556 [33] T. Oppikofer, M. Jaboyedoff, L. Blikra, M.-H. Derron, R. Metzger, Charac-
557 terization and monitoring of the åknes rockslide using terrestrial laser scan-
558 ning, Natural Hazards and Earth System Science 9 (3) (2009) 1003–1019.

- 559 [34] M. Sturzenegger, D. Stead, [Close-range terrestrial digital photogram-](#)
560 [metry and terrestrial laser scanning for discontinuity characteriza-](#)
561 [tion on rock cuts](#), *Engineering Geology* 106 (34) (2009) 163 – 182.
562 [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004](http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004).
563 URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000556)
564 [S0013795209000556](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000556)
- 565 [35] G. Umili, A. Ferrero, H. Einstein, [A new method for automatic](#)
566 [discontinuity traces sampling on rock mass 3d model](#), *Com-*
567 [puters & Geosciences 51 \(0\) \(2013\) 182 – 192. \[doi:http:\]\(http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026\)
568 \[//dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026\]\(http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026\).
569 URL \[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/\]\(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002695\)
570 \[S0098300412002695\]\(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002695\)](#)
- 571 [36] W. C. Haneberg, et al., [Directional roughness profiles from three-](#)
572 [dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds](#), in: E.
573 Eberhardt, D. Stead, & T. Morrison (eds.), *Rock Mechanics: Meeting*
574 *Society's Challenges and Demands*, 2007, pp. 101–106.
575 URL [http://www.haneberg.com/downloadables/roughness_](http://www.haneberg.com/downloadables/roughness_preprint.pdf)
576 [preprint.pdf](http://www.haneberg.com/downloadables/roughness_preprint.pdf)
- 577 [37] T. Oppikofer, M. Jaboyedoff, A. Pedrazzini, M.-H. Derron, L. H. Blikra,
578 [Detailed dem analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding](#)
579 [surface of active rockslides](#), *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*

- 580 116 (F2) (2011) n/a–n/a. doi:10.1029/2010JF001807.
581 URL <http://dx.doi.org/10.1029/2010JF001807>
- 582 [38] M. Romana, A geomechanical classification for slopes: slope mass rating,
583 Comprehensive rock engineering 3 (1993) 575–599.
- 584 [39] M. J. Lato, G. Bevan, M. Fergusson, Gigapixel imaging and photogramme-
585 try: Development of a new long range remote imaging technique, Remote
586 Sensing 4 (10) (2012) 3006–3021.
- 587 [40] M. Lato, J. Kemeny, R. Harrap, G. Bevan, [Rock bench: Estab-](#)
588 [lishing a common repository and standards for assessing rock-](#)
589 [mass characteristics using lidar and photogrammetry](#), Comput-
590 ers & Geosciences 50 (0) (2013) 106 – 114, benchmark prob-
591 lems, datasets and methodologies for the computational geosciences.
592 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.014>.
593 URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002099)
594 [S0098300412002099](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412002099)
- 595 [41] A. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, [SMRTool beta. A calculator for deter-](#)
596 [mining Slope Mass rating \(SMR\).](#), Online (June 2014).
597 URL <http://personal.ua.es/en/ariquelme/smrtool.html>
- 598 [42] R. Anbalagan, Landslide hazard evaluation and zonation mapping in moun-
599 tainous terrain, Engineering geology 32 (4) (1992) 269–277.

- 600 [43] J. Becker, C. Stewart, R. J. Radke, Lidar inpainting from a single image, in:
601 Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009 IEEE 12th Interna-
602 tional Conference on, IEEE, 2009, pp. 1441–1448.
- 603 [44] M. Lato, J. Hutchinson, M. Diederichs, D. Ball, R. Harrap, Engineering
604 monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile
605 terrestrial lidar, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 9 (3) (2009) 935–946.
- 606 [45] G. Leret Verdú, A. Lendínez González, I. Colondrón Gómez, M. del
607 Olmo W., [Magna 50 \(2 serie\) - Mapa Geològico de España a escala](#)
608 [1:50.000, hoja 871, Elda., online \(1978\).](#)
609 URL [http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/
610 magna50.asp?hoja=871&bis=](http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=871&bis=)
- 611 [46] A. Palmstrom, Characterization of jointing density and the quality of rock
612 masses, Tech. rep., Internal report, AB Berdal, Norway (1974).
- 613 [47] D. U. Deere, D. W. Deere, Rock quality designation (rqd) after twenty years.,
614 Tech. rep., DTIC Document (1989).
- 615 [48] R. Tomás, J. Valdes-Abellan, A. Tenza-Abril, M. Cano, [New](#)
616 [insight into the slope mass rating geomechanical classification](#)
617 [through four-dimensional visualization](#), *International Journal of*
618 *Rock Mechanics and Mining Sciences* 53 (0) (2012) 64 – 69.
619 [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.04.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.04.002).

620 URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160912000688)
621 [S1365160912000688](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160912000688)



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

“Rock slope discontinuity extraction and stability analysis from 3D point clouds: application to an urban rock slope

Vertical Geology Conference 2014. University of Lausanne, Switzerland”

Adrián J. Riquelme, A. Abellán, R. Tomás, M. Jaboyedoff

10

**Otros resultados de la investigación:
Congreso Vertical Geology 2014.
Lausanne, Suiza**

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Rock slope discontinuity extraction and stability analysis from 3D point clouds: application to an urban rock slope

Adrian Riquelme¹, Antonio Abellán², Roberto Tomás¹, Michel Jaboyedoff²

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, Spain

² Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Switzerland

Abstract

This paper presents an application of a recently developed methodology for the identification and analysis of flat surfaces affecting rock masses using 3D LiDAR point clouds (Riquelme et al., 2013 submitted). The used methodology has been applied to calculate the algebraic equations of the different discontinuities of a rock slope through a methodology based on next three steps: (a) local curvature calculation; (b) statistical analysis of the poles and (c) clustering analysis. Once the discontinuities have been identified, their orientations have been employed for evaluating the local stability of different failure mechanisms (wedge and planar) through a classical kinematic analysis.

Key words: 3D point cloud; LiDAR; Discontinuity extraction; Stability analysis

1. Introduction

The recent development of new remote sensing techniques allows the acquisition of Earth surface datasets in an accurate and quick way. Among these remote sensing techniques, Light Detection and Ranging (LiDAR) technique provides accurate 3D geometries of natural scenes at different scales. The use of terrestrial sensors is especially well adapted for vertical slopes, since the data density is maximized when the Line-of-Sight (LOS) is perpendicular to the scanned topography. Rock slope stability is clearly controlled by several rock parameters as rock strength, discontinuity orientation and dip, persistence, etc. Some of these parameters were recently successfully derived from Terrestrial Laser Scanner (TLS) point clouds. Some approaches calculate the orientation for each node in the triangulated irregular network, TIN (KEMENY & POST, 2003; LATO *et al.*, 2009; SLOB *et al.*, 2005; VÖGE *et al.*) Other authors (GARCÍA-SELLÉS *et al.*, 2011; JABOYEDOFF *et al.*, 2007) proposed the calculation of the local curvature for every point and its coplanar neighbors using the principal component analysis method (hereinafter PCA). Finally, other approaches are based on the searching of volumetric pixels (voxels) and on the subsequent calculation of the planar orientation (GIGLI & CASAGLI, 2011).

PCA, Kernel Density Estimation and clustering analysis to the extraction of the main sets of discontinuities that intersect a pilot study area located in the urban area of the city of Alicante (SE Spain). Despite the recent advances performed by different research groups on this challenging subject, we consider that still some work have to be done on the extraction of discontinuity sets from 3D point clouds for rock slope stability analysis. For instance, although our algorithm (and most of the scripts appeared in the literature) are normally tested under “ideal” conditions (non-folded surfaces, high enough exposure, datasets acquired from a single station or point of view, reduced or nonexistent sampling biases, etc.). Hence, we considered interesting to test its applicability under more complex conditions as shown in Fig.1 (several stations, several scans, non-planar surfaces, slight folding of the geological layers, etc.).



Fig.1: Picture of the study area.

In this manuscript we show the application of a new method for 3D point cloud treatment (RIQUELME *et al.*, 2013 submitted) based on

2. Study area

2.1 Situation

The studied rock slope is located in the district of San Blas, Alicante (SE Spain; 38°21'33.83"N / 0°30'32.06"W). The rocky slope extends along the Via Parque urban road, one of the main roads of the city of Alicante, and consists of two subvertical slopes (aprox. 80°) separated by a 4 m horizontal berm with a total height up to 10 m and an orientation N30°E dipping towards the east. The slope is composed of slightly weathered calcareous marls with a uniaxial compressive strength of 30-32 MPa (Fig.2).

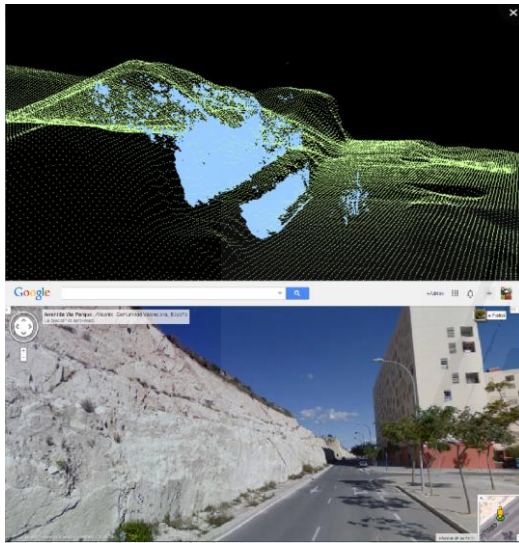


Fig.2: (Above) LiDAR data superimposed to a DEM. (Below) Picture of the study area extracted from Google Street View.

2.2 3D data acquisition and pre-processing steps

Fieldwork campaign was developed in summer 2012. The dataset has been built from 10 scans acquired from five different stations. Data pre-processing (vegetation filtering, alignment and merging) has been performed using Polyworks software.

3. Method for discontinuity characterization

The method is based on three main steps: calculation of the local curvature, statistical analysis of the plane poles and clustering analysis.

3.1 Local curvature calculation

The obtainment of the local curvature for each point was performed through three next stages:

(a) Searching the Nearest Neighbours through 'knnsearch' function (Matlab 2013a); (b) Performance of a coplanarity test for a fixed number of neighbours and (c) adjustment of the best fit planes using Principal Component Analysis (PCA) and calculation of the normal vector to this plane.

3.2 Statistical analysis of the plane poles

Once all the normal vectors were calculated, we converted all plane poles to stereographic projection. In order to check the statistical significance of each discontinuity set, we calculated the Kernel Density Estimation (KDE) function for each region of the stereographic projection; finally, we calculated the local maxima of the KDE in order to semi-automatically identify the discontinuity sets that affect the rock mass. Each of these maximum values were related to a single family of discontinuities and their associated normal vectors were determined.

3.3 Cluster analysis

After the recognition of each of the poles associated to a given DS, we applied a spatial aggregation technique (DBSCAN) for clustering the points belonging to the same discontinuity. The points belonging to a single discontinuity were grouped in order to compute the best fit plane using the PCA. Finally, we performed a tolerance test in order to test if the fitting error was higher than the considered tolerance.

4. Results: Structural analysis

4.1 Visual analysis

A previous visual analysis was performed on the raw data (Figure 4). This analysis showed the existence of four different discontinuity sets:

- A subvertical discontinuity set that corresponds to the bedding, which is orthogonal to the TLS LOS, and hence, overrepresented in our TLS dataset.
- A subhorizontal discontinuity set, parallel to the LOS.
- Two subvertical discontinuity sets, nearly orthogonal to the bedding plane, also parallel to the LOS.

4.2 Statistical analysis

The statistical analysis allowed the identification of four discontinuity sets (DS) as shown in Fig.3.

- J1: sub vertical DS showing a huge density function, due to the high number of points members of this set. This DS shows a high pole dispersion in the stereonet.
 - J2: sub horizontal DS. Since the orientation of this family is parallel to J1, its density function may be masked by J1.
 - J3 and J4: sub vertical DS which exposure is much reduced; hence, these families are less represented than previous ones.
- Dip vector values are shown in Table 1.

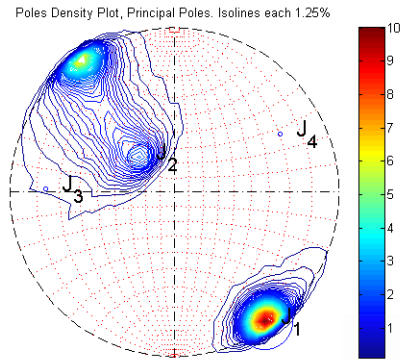


Fig.3: Density data contouring plot of the LiDAR derived normal vector poles.

DS	ω : azimuth °	β : dip °	Density value
J1	325	87	10.15
J2	135	33	2.28
J3	91	76	0.15
J4	241	72	0.05

Table 1 : Dip vectors of the principal poles.



Fig.4: Plot of the discontinuity sets identified by the LiDAR.

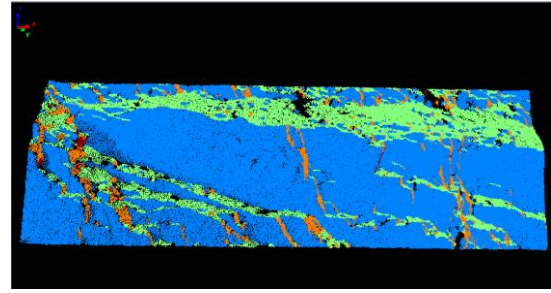


Fig.5: DS derived from LiDAR assigned to each point. J1 in blue, J2 in green, J3 in orange and J4 in brown.

4.3 Cluster analysis

For each cluster, the algebraic plane equation has been calculated. Table 2 shows the statistic of the distance of each point to its assigned cluster plane. The most important fact is that the standard deviation of each DS (σ) has a value between 2 and 8 centimeters. Considering the fact that the area seems slightly folded this is an acceptable result.

DS	Nr of points	ε (cm)	σ (cm)
1	119,757	1.90^{-4}	8.64^{-2}
2	35,628	4.72^{-5}	4.27^{-2}
3	10,740	-1.17^{-5}	2.64^{-2}
4	765	5.99^{-7}	1.75^{-2}
Tot	166,890	1.46^{-4}	7.61^{-2}

Table 2 : Error fitting analysis. ε : error; σ : standard deviation of the error.

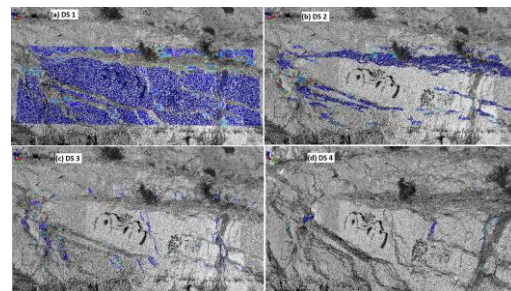


Fig.6: Clusters derived from LiDAR for each discontinuity set.

5. Classical approach using a geological compass

Because the analyzed surface is inaccessible, the discontinuities data acquisition by means of a geological compass has been only performed for the road level slope. The later statistical analysis has allowed the identification of three main sets

of discontinuities whose orientations are shown in Table 3.

DS	ω : azimuth °	β : dip °
J1'	140	77
J2'	346	10
J3'	242	74

Table 3 : Orientations of the recognized discontinuities by means of a classical approach.

Comparing Tables 1 and 3 we can see that the classical approach results are very similar to the LiDAR derived values. Note that the proposed methodology automatically detected four DS, while the classical approach result detected just three of them. This fact is due to several factors, being the most important:

- The classical approach depends critically on the user abilities.
- It is possible that some outcrops do not show clear discontinuity patterns, so the user does not identify them as DS.

6. Discussion and conclusions

We presented a case study on the application of a recently developed algorithm (Riquelme et al., 2013 submitted) for the analysis and extraction of rock slope discontinuities. The method allowed us: a) to analyze sets of discontinuities affecting a rock masses in areas of difficult access and b) to identify discontinuity sets not recognizable from fieldwork analysis through a classical approach using geological compass.

In this case study, several sections of the slope were tested in order to analyze the proposed method for discontinuity extraction. When using too big areas, the density function of the J1 DS poles was so high and masked other poorly represented DS (e.g. J2). Our experience showed that a previous user-selection of smaller areas yielded into more accurate results. The classical analysis performed using the geological compass required a user's detection of the DS.

The sampling bias (Lato *et al.*, 2010) appeared in those small enough areas (compared to point density). Furthermore, the extension of the most represented sets should not be excessively larger than the rest. This fact may mask the existence of other DS in the statistical analysis, which should be taken into account in fieldwork planning.

Acknowledgements: This research was funded by the Generalitat Valenciana (project GV/2011/044) and the Swiss National Science Foundation (FNS-138015 and FNS-144040 projects).

References

- GARCÍA-SELLÉS, D., FALIVENE, O., ARBUÉS, P., GRATACOS, O., TAVANI, S., AND MUÑOZ, J. A. (2011), *Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning*. Computers & Geosciences, v. 37, no. 10, p. 1584-1594.
- GIGLI, G., AND CASAGLI, N., (2011), *Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, no. 2, p. 187-198.
- JABOYEDOFF, M., METZGER, R., OPPIKOFER, T., COUTURE, R., DERRON, M., LOCAT, J., AND TURMEL, D., *New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software*, in Proceedings Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands: Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada2007, Volume 27, p. 31.
- KEMENY, J., AND POST, R. (2003), *Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces*. Computers & Geosciences, v. 29, no. 1, p. 65-77.
- LATO, M., DIEDERICHS, M. S., HUTCHINSON, D. J., AND HARRAP, R. (2009), *Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 46, no. 1, p. 194-199.
- LATO, M. J., DIEDERICHS, M. S., AND HUTCHINSON, D. J. (2010), *Bias correction for view-limited Lidar scanning of rock outcrops for structural characterization*. Rock mechanics and rock engineering, v. 43, no. 5, p. 615-628.
- RIQUELME, A., ABELLÁN, A., TOMÁS, R., AND JABOYEDOFF, M. (2013) submitted, *A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from LiDAR data*. Computers & Geosciences.
- SLOB, S., VAN KNAPEN, B., HACK, R., TURNER, K., AND KEMENY, J. (2005) *Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1913, no. -1, p. 187-194.
- VÖGE, M., LATO, M. J., AND DIEDERICHS, M. S., *Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data*. Engineering Geology, no. 0.

