

Millora metodològica per a la detecció i caracterització de despreniments amb dades de LiDAR Terrestre a la Muntanya de Montserrat

Miquel Garcia Badal

Tutora: Marta Guinau Sellés

Cotutor: Xabier Blanch Gorriz

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics

Especialitat: Riscos Geològics

Juny 2018



**UNIVERSITAT DE
BARCELONA**



Agraïments

El treball que es presenta a continuació ha estat fruit de moltes hores de dedicació. Tot i les ganes i el temps que he invertit, aquest treball no hauria estat possible sense la col·laboració i dedicació d'un gran nombre de persones que m'han aportat el seu temps, els seus coneixements, la seva companyia i el suport moral per tal de poder presentar aquest projecte a tots aquells que el tingueu a les mans.

En primer lloc m'agradaria agrair en especial per tot el seu esforç i entrega, a la meva tutora la Marta Guinau Sellés. Ella ha estat una de les persones que més s'ha entregat a mi i de qui més coses he pogut aprendre.

En segon lloc m'agradaria agrair al meu cotutor Xabier Blanch Gorriz, totes les hores que m'ha dedicat per formar-me en el programari utilitzat i tot el que m'ha ensenyat per poder extreure i interpretar els resultats. Hem passat molt bons moments junts.

Agrair a la meva família el suport moral que m'han donat en moments difícils. També voldria agrair a l'Andrea Cárdenas Burgos per haver-me animat quan ho veia tot negre i per ajudar-me en tot el que estava a les seves mans.

Gràcies per la dedicació i la paciència del tècnic de LiDAR David García del grup RISKMAT de la Universitat de Barcelona, per ensenyar-me al camp tot el procés d'adquisició de les dades.

Cal fer notar que aquest treball no hagués estat possible sense la col·laboració entre el Grup de recerca RISKMAT i l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, que ha permès l'adquisició de les dades utilitzades en aquest estudi i la realització del monitoratge de desprendiments rocosos en diverses parets de la Muntanya de Montserrat des de l'any 2007 fins a l'actualitat.

Ja que l'ocasió m'ho permet, agrairé a tots els professors de la Universitat que m'han format perquè jo ara pugui estar presentant aquest treball, sense ells mai hagués estat possible.

Amics, companys i professors, a tots us estic molt agraït.

Abstract

In this work we present the results obtained in the implementation of a methodological improvement for the detection and characterization of rockfalls with Terrestrial LiDAR data in the Muntanya de Montserrat (Catalonia).

The studies of detection of rockfalls with TLS carried out until now used a methodology with the Polyworks program, but this one has some important limitations, that are explained in detail in this work. The main constraint is the low accurate calculation of distances between scans, which leads to erroneous distances especially in areas of fracture or surfaces with large irregularities. The proposed new methodology (M3C2) consists of an algorithm that performs the comparison between scans and calculates the mean distance taking into account some neighbor points contained in a cylinder, which fit better with the real distance than with the method described above.

The main objective of the work is to evaluate the implementation of the M3C2 tool with CloudCompare for the analysis of Terrestrial LiDAR (TLS) data with which it is expected to obtain an improvement in the detection, delimitation and calculation of volume of rockfalls on the Degotalls Nord rock cliff in Muntanya de Montserrat.

The 93 rockfalls detected in this study highlight the permanent activity of rockfalls that occur on the wall of Degotalls N in Montserrat. Of these rockfalls, 74,19% have a volume of less than $0,1 \text{ m}^3$, and the 25,81% are blocks of larger volume, easily detectable with other methodologies and even with visual inspection.

The comparison of the results obtained in this study with those obtained in previous works is complex. In this work 55 rockfalls were detected which had not been detected in other studies. In previous works 113 rockfalls were detected, of which only 38 were detected in this study. 75 rockfalls were not detected with the new method but after an accurate inspection of the results they have been considered to be changes in vegetation rather than rockfalls. The volume obtained for 82.06% of the rockfalls detected in this study and also in previous works is higher than the volume previously obtained. The new method leads on a reduction in the volume in only 17.94% of the detected rockfalls. 3 rockfalls with volumes lower than 0.001m^3 were detected, which was the lowest volume detected in the previous studies. In this work the lower threshold of detection was reduced to $0,0004 \text{ m}^3$.

Resum

En aquest treball es presenten els resultats obtinguts en la implementació d'una millora metodològica per a la detecció i caracterització de despreniments amb dades de LiDAR Terrestre a la Muntanya de Montserrat (Catalunya).

Els estudis de detecció de despreniments amb TLS realitzats fins ara utilitzaven una metodologia amb el programa Polyworks, però aquesta presentava un seguit de limitacions importants, que s'expliquen en detall en aquest treball. La limitació més important rau en que el càlcul de distàncies entre escanejos no era precís i s'obtenien distàncies errònies en zones de fractura o superfícies molt irregulars. La nova metodologia proposada (M3C2) consisteix en un algoritme que realitza la comparació entre escanejos trobant la distància mitjana a partir de la posició d'alguns punts veïns continguts dins d'un cilindre. Aquest procés permet obtenir una distància entre escanejos que s'ajusta molt millor a la distància real.

El principal objectiu del treball és realitzar la valoració de l'aplicació de l'eina M3C2 amb CloudCompare per a l'anàlisi de dades de LiDAR Terrestre (TLS) amb la qual s'espera obtenir una millora en la detecció, delimitació i càlcul de volum de despreniments a la paret de Degotalls Nord de la Muntanya de Montserrat.

Els 93 despreniments detectats en aquest estudi posen en rellevància l'activitat permanent de despreniments que es produeixen a la paret de Degotalls N a Montserrat. D'aquests despreniments un 74,19% presenta un volum inferior a $0,1 \text{ m}^3$, l'altre 25,81 % són blocs de volum superior, molt fàcilment detectables amb altres metodologies.

La comparació dels resultats obtinguts en aquest estudi amb els resultats d'altres treballs previs a la zona d'estudi és complexa. En aquest treball s'han detectat 93 despreniments, 55 dels quals no havien estat detectats en altres estudis. Dels 113 despreniments detectats per altres autors, en aquest estudi només se n'han detectat 38. Els altres 75 s'ha considerat que es tractava de falsos despreniments en zones de vegetació. Pel que fa als volums detectats en general hi ha un augment del volum, un 82,06% dels despreniments detectats tant en la bibliografia com en aquest treball presenten un volum superior, i només un 17,94% presenten una reducció del volum calculat, tot i així, s'han obtingut 3 despreniments d'un volum inferior a $0,001 \text{ m}^3$, que era el mínim volum detectat fins ara. En aquest treball el llindar de detecció de despreniments s'ha reduït a $0,0004 \text{ m}^3$.

Índex

1. Introducció:	1
1.1. Antecedents	1
1.2. Objectius	5
1.3. Situació Geogràfica.....	5
1.4. Context geològic.....	6
2. Metodologia:	7
2.1. Obtenció de dades	7
2.2. Alineació	8
2.3. Comparació i detecció de despreniments.....	9
2.4. Càlcul de volums i obtenció de centroides.....	13
3. Resultats	13
3.1. Valors dels paràmetres utilitzats en l'M3C2 i en la detecció de clústers.....	13
3.2. Detecció de despreniments i càlcul de volums	17
3.3. Comparació dels resultats obtinguts amb estudis anteriors i quantificació de la millora metodològica	18
4. Discussions	20
4.1. Canvi metodològic.....	20
4.2. Comparació dels resultats i quantificació de la millora metodològica	21
4.3. Perspectives de futur	23
4. Conclusions.....	23
5. Bibliografia	24

1. Introducció:

Juntament amb aquest treball s'adjunta un CD-R amb els Annexos. Els Annexos 1 - 3 són taules de contingut que fan de suport al text del treball. Els Annexos 4-11 mostren la distribució espacial dels despreniments detectats en cada període estudiat. Els Annexos 13-20 contenen una comparativa entre els despreniments detectats en aquest treball i els despreniments detectats per altres autors, amb exemples característics de cada període on es mostra la repercussió de la nova metodologia i dels criteris d'expert utilitzats per a la detecció de despreniments. Finalment l'Annex 21 conté una taula de comparació dels volums detectats en aquest treball i detectats també per altres autors.

1.1. Antecedents

La tècnica LiDAR (Light Detection and Ranging) consisteix en un aparell emissor/receptor que emet un raig làser d'ona infraroja, que després de rebotar sobre la superfície del terreny retorna a l'aparell que el registra calculant el temps transcorregut des de la seva emissió. A partir d'aquesta dada l'aparell pot calcular la posició de cada punt en coordenades X,Y,Z amb una precisió i resolució centimètriques (Petrie Toth, 2008; Revuelto et al., 2013; Slob i Hack, 2004). Mitjançant un conjunt de miralls l'aparell fa un escaneig de la superfície del terreny adquirint núvols de punts tridimensionals. A més a més, la majoria dels dispositius LiDAR registren un atribut addicional que correspon a la intensitat amb la qual el raig làser retorna a l'aparell, que depèn de les característiques de la superfície a la qual rebota. Aquest atribut facilita la visualització i interpretació dels núvols de punts (Carrea et al., 2016).

En els últims anys la tecnologia LiDAR ha experimentat un gran desenvolupament del qual ha derivat la generalització de la seva utilització en diferents camps d'investigació a dia d'avui, ja sigui per realitzar cartografies geomorfològiques, caracterització de materials d'aflorament geològics, identificació de patrons estructurals, estudi de formes deposicionals, anàlisi de moviments en massa, processos en pendents rocoses i identificació de canvis topogràfics (Abellan et al., 2016). La tècnica LiDAR en la seva modalitat terrestre (Terrestrial Laser Scanner - TLS), amb el dispositiu recolzat al terra amb l'ajuda d'un trípod, presenta grans avantatges a l'hora d'obtenir informació 3D de parets rocoses quasi verticals o amb un fort pendent, ja que l'escaneig es realitza des de la superfície terrestre.

Abellán et al., (2014) i Jaboyedoff et al., (2012) presenten revisions d'articles que tracten sobre l'aplicació del TLS per a la caracterització i monitoratge de pendents rocoses. Segons Abellan et al., (2014) fins al 2014 ja s'havien publicat més de 39 articles científics de l'ús de dades de TLS per a l'estudi de processos dinàmics, com ara per a detectar despreniments de roques i calcular-ne el volum de fins a $0,001\text{m}^3$, detectar deformacions precursors de despreniments rocosos i analitzar discontinuïtats del massís rocós, evitant l'exposició directa sobre la paret rocosa i minimitzant, per tant, l'exposició al fenomen. Aquesta tècnica també permet monitoritzar pendents de roca facilitant la quantificació precisa de les taxes de despreniments de roques i el modelatge espacio-temporal de la deformació de la

paret. A més a més, aquests autors introdueixen les possibles perspectives de futur de cara a la millora de l'aplicació del TLS per a la caracterització i monitoratge de pendents rocoses. Abellán et al. (2016) proposen seguir investigant en el desenvolupament de nous algorismes per tractar les dades de TLS, que permetin l'obtenció de resultats més acurats.

Així doncs, aquest treball se centra en una millora metodològica per a la detecció i caracterització de despreniments a la paret rocosa de Degotalls Nord, a la Muntanya de Montserrat (situada a la Catalunya Central, NE de la península Ibèrica - vegeu apartat 1.2) a partir de dades TLS. La Muntanya de Montserrat és un indret amb un relleu molt característic, molt proper a Barcelona i que acull el Santuari de Montserrat, és per això que s'ha convertit en un dels principals punts turístics de Catalunya, amb una afluència de 2.728.453 visitants l'any 2017 (La Vanguardia, 2018). Aquesta gran afluència turística ha de conviure amb la presència dels diferents fenòmens geològics en el massís, així com despreniments de roca, esllavissades o corrents d'arrossegalls, sovint desencadenats per forts aiguats, característics del clima mediterrani de la zona (Copons, 2008). És precisament per la gran quantitat de persones exposades a aquests fenòmens que el risc és molt elevat en aquest indret, i cal prestar-hi especial atenció per a mitigar-lo.

En aquest massís les inestabilitats de masses de roques que es poden detectar amb inspeccions visuals de les parets rocoses oscil·len entre 0,01 m³ i fins al voltant de 1000 m³ tot i que a les xarxes de retenció de blocs instal·lades s'hi acumulen blocs de dimensions més petites que corresponen a petits agregats o còdols que es desprenen individualment de la paret degut a la meteorització i dissolució de la matriu dels conglomerats que formen les parets rocoses de la zona d'estudi. Es calcula que aproximadament es produeixen 10 despreniments a l'any amb una magnitud de pocs metres cúbics en el massís muntanyenc (Janeras et al., 2017). És per això que en aquest indret s'han realitzat moltes obres de protecció actives i passives, i el 2014 es va iniciar un pla de 3 anys per a la mitigació del risc global (Janeras et al., 2017).

Un dels exemples de grans despreniments ocorreguts en aquest macís és l'esdeveniment del 28 de desembre de 2008, on es van despendre de la paret de Degotalls N dos grans blocs de 883 m³ i 8 m³ (Janeras et al., 2017), amb afectacions importants a la carretera d'accés al monestir i a les vies del tren cremallera, deixant tallats durant dos mesos i mig tots els accessos al Monestir excepte l'aeri (Lopez i Camps, 2009) (Fig. 1).

És per això que el grup de recerca RISKMAT de la Universitat de Barcelona en col·laboració amb l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) han estat desenvolupant estudis de despreniments rocosos amb TLS des del 2007 a la paret de Degotalls N una paret molt propensa a generar despreniments i amb una gran exposició d'elements vulnerables. Com a resultat d'aquests estudis s'han realitzat un seguit d'informes ICGC, (2010, 2011a, 2011b, 2014, 2015, 2016, 2017) on s'han detectat els despreniments ocorreguts en cada període analitzat i s'ha calculat el seu volum, permetent l'anàlisi de la relació magnitud-freqüència que caracteritza aquesta

paret rocosa. Els informes realitzats fins el 2014 utilitzaven les dades de detecció de desprendiments que detectava el Manuel Jesus Royan durant la realització de la seva tesi doctoral (Royán, 2015b). Finalment Blanch et al., (2017) exposa els resultats de 10 anys de monitoratge amb TLS des del 2007 a la paret de Degotalls, la qual es pot separar en dues parets, la paret Est i paret Nord en funció de la seva orientació . En aquest treball es destaca la detecció d'un total de 113 desprendiments a la paret de Degotalls Nord i 126 a Degotalls Est.



Fig. 1: a) Desprendiment produït el 28 de desembre de 2008 de 883 m³ a la paret de Degotalls N. b) Impacte del desprendiment a la carretera . c) Impacte del desprendiment a les vies del tren cremallera. Les elevacions estan en m s.n.d.m. Imatge extreta de Janeras et al., (2017).

L'any 2010 a la paret de Degotalls també es va realitzar un estudi mitjançant TLS combinat amb altres mètodes analítics per a realitzar la caracterització de les zones de sortida de desprendiments (Raquena, 2010).

Des de l'aparició d'aquesta tècnica d'adquisició de dades les metodologies d'anàlisi han anat evolucionant i cada cop permeten obtenir resultats més acurats (Abellan et al., 2016). Inicialment les dades de Degotalls es tractaven amb el programa Polyworks, un programa de llicència privada de la casa InnovMetrics. Amb les eines d'aquest programa es feia una comparació en 2,5D dels núvols de punts consecutius, amb l'objectiu de detectar canvis en la paret rocosa entre una presa de dades i la següent. El núvol de punts inicial s'agafava com a núvol de referència i es comparava amb el núvol de punts més recent. El programa genera una superfície mitjançant la triangulació del núvol de punts de referència i busca la distància mínima des de cada punt del núvol de punts que es vol comparar amb aquesta superfície. Per a cada punt del núvol que es vol comparar, es calcula la distància mínima a la superfície generada.

Mitjançant Polyworks s'aconsegueix obtenir el vector distància que uneix la superfície de referència amb el núvol de punts a comparar. Aquesta distància s'obté amb l'eina "*Compare Data to Reference for all data points*" que calcula la distància més petita entre els punts del núvol de punts a comparar i la superfície de referència respecte els tres eixos. Al ser un programa creat per a treballar amb núvols de punts de peces

mecàniques o edificacions és molt útil per treballar amb superfícies regulars, però presenta força limitacions a l'hora de treballar amb superfícies irregulars.

Janeras et al., (2017), Royan, (2013, 2014, 2015a) o Lato et al., (2009) apliquen aquesta metodologia a Montserrat, a Puigcercós (Conca de Tremp – NE de la Península Ibèrica) i a la província d'Ontàrio (Canada) respectivament, amb els objectius principals de detectar despreniments, calcular-ne el volum i realitzar anàlisis espacio-temporals de la deformació prèvia a la caiguda de roques. Aquesta metodologia també s'ha aplicat a la paret de Degotalls N, al mateix aflorament que s'estudia en aquest treball, per Royan, (2015b) o Janeras et al., (2017).

Aquesta metodologia emprada fins ara presenta una limitació molt important al comparar un núvol de punts amb una superfície generada a partir del núvol de punts de referència. Amb aquest procediment, les distàncies obtingudes poden ser sensiblement menors o majors a la distància real (veure amb més detall a l'apartat 2.3.). A més a més, al calcular la distància en base a una superfície interpolada a partir dels punts del núvol de punts, s'obtenen valors de distància zones d'ombra on realment no hi ha punts reals del LiDAR generant artefactes. Finalment, la cerca de la distància més petita també provoca artefactes en les zones de vora on hi ha un canvi bruscat en la profunditat del terreny ja que el punt més proper a la superfície generada no es correspon amb la distància real.

Lague et al., (2013) desenvolupen un nou mètode anomenat Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2), una aplicació del programa CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2015), de llicència lliure, per a realitzar la comparació de núvols de punts obtinguts amb TLS (vegeu descripció més detallada a l'apartat 2.3). Aquesta metodologia permet resoldre la principal limitació que tenia la metodologia realitzada amb Polyworks, per tant millorar la detecció, la delimitació i el càlcul de volums dels despreniments. Això pot comportar una millora en les anàlisis de magnitud-freqüència i en a la gestió del risc, podent dissenyar millors estratègies de prevenció i defensa contra els despreniments per minimitzar-ne el risc.

Blanch, (2016) Aplica el mètode amb M3C2 i el compara amb l'utilitzat anteriorment amb Polyworks, però ho fa només amb 2 escanejos realitzats a menor distància en una altra paret de Montserrat que no és l'objecte d'estudi en aquest treball. A més a més Blanch, (2016) tampoc quantifica la millora obtinguda de realitzar el mateix anàlisi amb dues metodologies diferents.

1.2. Objectius

El present treball s'ha centrat en la valoració de l'aplicació de l'eina M3C2 amb CloudCompare per a l'anàlisi de dades de LiDAR Terrestre (TLS) amb la qual s'espera obtenir una millora en la detecció, delimitació i càlcul de volum de despreniments a la paret de Degotalls Nord de la Muntanya de Montserrat, respecte els resultats obtinguts fins ara.

Els objectius específics d'aquest treball per tal d'assolir l'objectiu general es poden resumir en els següents punts:

- Analitzar la sèrie de dades de TLS (des de 2007 a 2017) amb l'aplicació M3C2 del programa CloudCompare.
- Determinar quins són els valors més adients dels paràmetres que utilitza l'aplicació M3C2 per a obtenir uns resultats òptims.
- Detectar despreniments i calcular el seu volum.
- Comparar els resultats obtinguts amb els obtinguts fins ara per altres autors.
- Quantificar la millora obtinguda amb la nova metodologia.

1.3. Situació Geogràfica

La Muntanya de Montserrat se situa a la comunitat autònoma de Catalunya, a la meitat septentrional de la serralada prelitoral catalana i al Sud-Est de la depressió central (Fig. 2). Concretament al límit entre les comarques de l'Anoia, el Baix Llobregat i el Bages, a uns 50 quilometres al nord-est de Barcelona. Aquest massís presenta una orientació general NW-SE.

L'aflorament escollit per a realitzar aquest estudi correspon a la paret dels Degotalls, que es localitza aproximadament a 300 m de l'accés a l'aparcament del monestir. Aquest aflorament consta de dos vessants, Est i Nord (Fig. 2), tot i que en aquest treball només s'han utilitzat dades del vessant Nord, pel major volum d'informació disponible. Aquesta paret rocosa de 23.437 m² té el seu punt més alt a 915 m s.n.d.m. i el punt més baix a 735 m s.n.d.m. (Fig. 2).

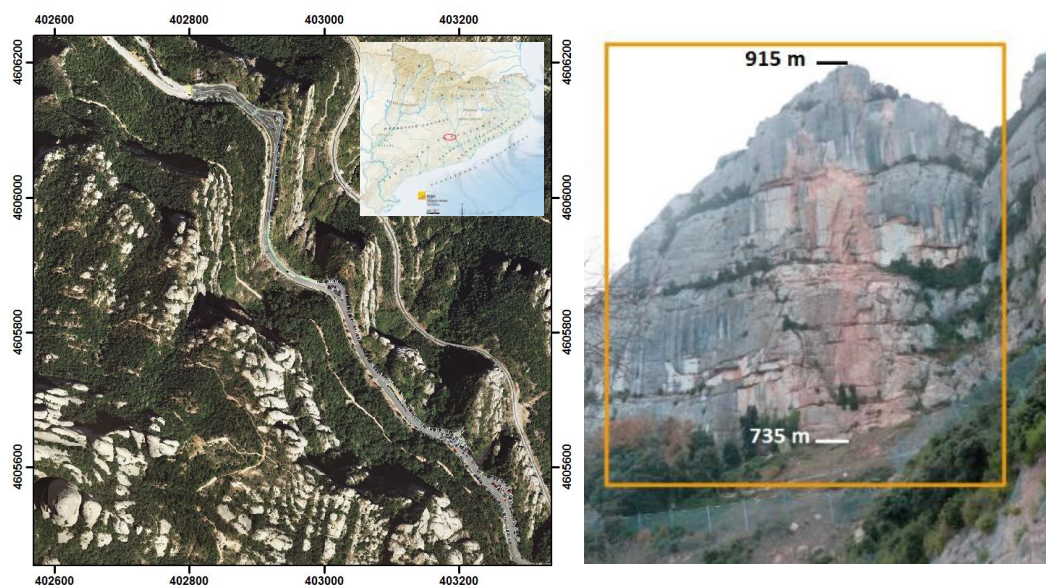


Fig. 2: Situació geogràfica de la zona d'estudi. A) Ortofotografia l'ICGC (subjecta a una llicència de Reconeixement 4.0 Internacional de Creative Commons) de la Paret de Degotalls amb les dues orientacions preferents, Nord i Est, a l'extrem superior esquerra Mapa físic propietat de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya amb la situació de la zona d'estudi. S'indica amb les Sigles "St" la posició del LiDAR Terrestre per a realitzar els escaneigs i la superfície analitzada. B) Imatge de la paret del Degotalls N des de la posició del LiDAR, amb un requadre que mostra l'àrea escanejada (Royan, 2015b).

1.4. Context geològic

El massís de Montserrat es troba alineat amb els relleus de la Serralada Costanera Catalana però geològicament forma part del marge SE de la conca Terciària de l'Ebre avui ocupada per la Depressió de l'Ebre (Busquets i Vilaplana, 2007). Els materials que conformen aquest macís són principalment conglomerats paleògens.

Durant el Bartonian - Priabonian (Eocè) es produïa l'aixecament de la Serralada Costanera Catalana que donà lloc a processos erosius. El material erosionat fou transportat cap al Nord i l'acumulat formant un ventall costaner, origen del massís conglomeràtic que formarà la Muntanya de Montserrat (Fig. 3A) (López-Blanco, 2006). En funció de l'energia dels torrents presents a la zona durant l'Eocè, en direcció S-N, es van dipositar els materials generant uns canvis laterals de fàcies de conglomerats, gresos i lutites (Fig. 3B), que actualment es poden observar en superfície (López-Blanco, 2006).

La morfologia peculiar del relleu de Montserrat es caracteritza per pinacles, agulles i parets quasi verticals (Marquès, 2001), que són el resultat dels processos d'infiltració d'aigua i erosió concentrades en un conjunt de fractures que presenta el massís, produïdes majoritàriament durant el Paleocè-Miocè Inferior (Alsaker, et al., 1996).

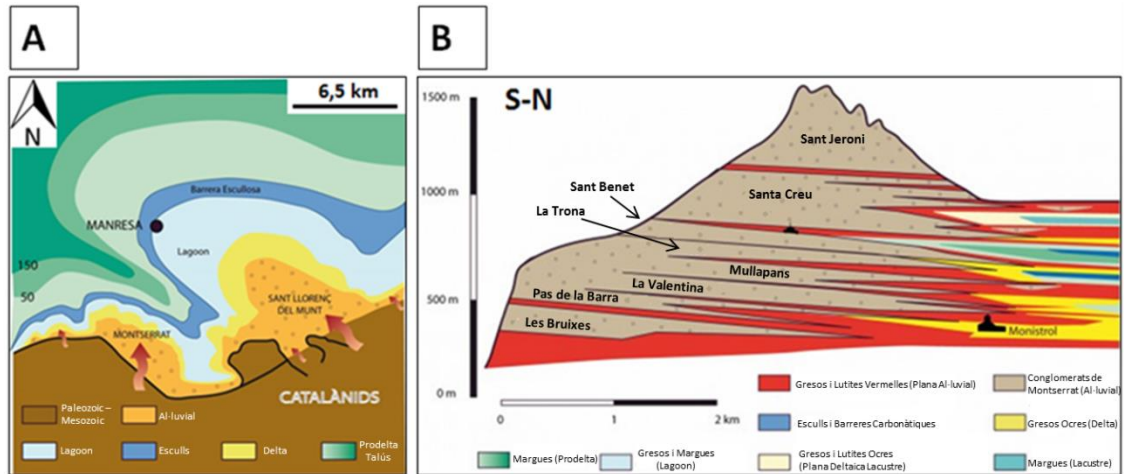


Fig. 3: A) Esquema paleogeogràfic de l'extrem meridional de la conca central catalana durant l'Eocè superior (Priabonià inferior) on es distingeixen els deltes de Montserrat a l'esquerra, i Sant Llorenç de Munt, a la dreta. B) Tall geològic de la muntanya de Montserrat on s'aprecien els canvis de fàcies laterals. (Dibuixos: Eudald Maestro, modificat d'Anadón et al., 1985).

2. Metodologia:

La metodologia que s'ha emprat per a realitzar la detecció de despreniments és la que es pot veure resumida en la Figura 4 i que s'explica en els propers apartats.

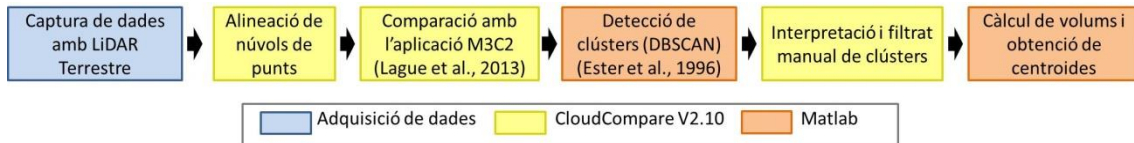


Fig. 4: Flux de treball realitzat per obtenir els despreniments detectats. Amb els programes utilitzats en cada etapa.

2.1. Obtenció de dades

Les dades que s'han utilitzat per a realitzar el present estudi han estat obtingudes amb anterioritat pel grup RISKMAT mitjançant LiDAR Terrestre.

Totes les dades LiDAR utilitzades per a realitzar el present treball s'han obtingut mitjançant un TLS ILRIS-3D de la companyia Optech. Per tal de cobrir l'àrea d'estudi només es realitza un escaneig, que cobreix tota la paret de Degotalls N amb una àrea de 23.437 m²

La densitat de punts de cada escaneig és un dels paràmetres que es configura en l'aparell en funció de la distància entre el LiDAR i l'aflorament escanejat. En aquest cas, els escanejos s'han obtingut des d'una distància mitjana de 235 m, i s'ha determinat que l'espaiat entre els punts que formen el núvol de punts fos d'aproximadament 0,1 m. Tot i això aquest espaiat és irregular, ja que hi ha zones on la densitat del núvol de punts és més alta i per tant l'espaiat entre punts més petit. El nombre de punts que conforma cada núvol de punts i la densitat mitjana obtinguda es mostra a la Annex 1.

El grup RISKNAT ha obtingut 22 captures de dades TLS des del 2007, però donat el gran volum de dades disponibles i el temps limitat per a realitzar aquest estudi només s'han utilitzat 9 captures de dades, una de cada any des del 2007 fins al 2017 amb l'absència de la captura del 2009 que conté errors instrumentals que la fan inviable per a l'anàlisi. S'ha procurat que les captures tinguessin un espaiat entre elles d'un any, tot i que a l'utilitzar dades que ja s'havien adquirit amb anterioritat no ha estat possible en tots els casos, i s'han utilitzat les captures que més s'apropessin a finals d'any (Annex 1).

Per a poder treballar amb les dades obtingudes amb TLS cal transformar el format dels arxius de sortida. Aquesta transformació s'ha realitzat amb l'executable ILRIS Parser (Gmv.cast.uark.edu, 2018), que permet convertir l'arxiu de sortida del TLS (en format .pf) a un fitxer .xyz que conté les coordenades de cada punt, i la intensitat de retorn.

2.2. Alineació

Per tal de poder comparar les diferents captures de dades i detectar els canvis que s'han produït entre una captura i una altra, cal fer una alineació dels núvols de punts. Aquest procés s'ha fet agafant la primera captura (de 2007) com a referència, i la resta s'han anat alineant respecte a aquesta. Per alinear les captures s'ha utilitzat el programa CloudCompare v2.10.. Aquest procés es du a terme en tres etapes per a cada núvol de punts que volem alinear, per tal de desplaçar el núvol de punts de manera que s'apropi cada vegada més la posició del núvol de punts de referència (el del 2007). Aquest desplaçament es va registrant en unes matrius anomenades matrius de transformació.

Pas 1: Alineació mitjançant punts homòlegs

Aquesta alineació es basa en la cerca de punts homòlegs entre els núvols de punts a alinear i serveix per obtenir una primera aproximació de la matriu de transformació del núvol de punts que es pretén alinear. Per a fer-ho s'han de trobar un mínim de 3 punts homòlegs, per evitar que el reposicionament del núvol de punts es produeixi amb una rotació en un eix 2D. En aquest treball s'han utilitzat 4 punts homòlegs, i s'ha tingut en compte un error de localització inferior a 0,1 m per tal de considerar correcte el posicionament dels punts homòlegs.

Pas 2: Millora de l'alineació mitjançant l'algoritme Iterative Closest Point (ICP)

L'algoritme iteratiu de punts propers *Iterative Closest Point* (ICP) (Chen i Medioni, 1992), permet atorgar a tots els punts que formen el núvol que es vol alinear, les coordenades per fer mínima la distància entre els dos núvols alineats.

Pas 3: Refinament de l'alineació mitjançant l'eina Compute Cloud to Cloud Distances

L'opció *Compute Cloud to Cloud Distances* del CloudCompare, permet trobar la distància entre els núvols de punts de manera que es pot discriminar els punts que tenen una major distància en la comparació, alineant els dos núvols de punts considerant només aquells punts que pràcticament no mostren diferències entre escaneig i escaneig, i que per tant es consideren zones sense canvis entre escanejos.

Considerant només aquests punts es torna a aplicar l'algoritme iteratiu ICP al núvol de punts alienat, per tal d'obtenir la matriu de transformació que permet una alineació òptima entre el núvol de punts original amb el que hem iniciat aquest procés i el de referència.

2.3. Comparació i detecció de despreniments

La comparació entre núvols de punts és el pas que permet detectar diferències entre escanejors, que poden correspondre a despreniments o bé a altres canvis que hagi patit la paret com poden ser canvis en la vegetació o pèrdues de material disgregable. Aquesta comparació entre núvols de punts s'ha realitzat amb l'aplicació M3C2 (Lague, et al., 2013) del Programa CloudCompare V2.10.. Pel que fa a les comparacions orientades a la detecció de despreniments, aquestes s'han realitzat entre núvols de punts consecutius amb la finalitat de detectar els esdeveniments ocorreguts entre cada adquisició de dades i evitar així la superposició d'esdeveniments.

La metodologia d'anàlisi emprada en l'M3C2 segons Lague et al., (2013) consisteix a efectuar una comparació entre núvols de punts realitzant els següents passos (Fig. 5):

Pas 1: Es defineix d'un diàmetre de cerca de punts. A cada punt del núvol de punts se li aplica aquest diàmetre de cerca de manera que tots els punts continguts dins d'aquest diàmetre de cerca s'utilitzen per a calcular la normal a cada punt (Fig. 5A-Pas 1).

Pas 2: A continuació el programa genera un cilindre amb origen al punt que es vol comparar, que tindrà el diàmetre igual al diàmetre de cerca definit al Pas 1 i la direcció del vector normal obtinguda al Pas 1 (Fig. 5A-Pas 2).

Pas 3: Finalment el programa calcula la distància mitjana que hi ha entre el punt que es vol comparar i tots els punts del núvol de punts de referència que es troben dins del cilindre Lague, et al., (2013).

A diferència de la metodologia que s'utilitzava fins ara amb el programa PolyWorks, que buscava la distància entre els punts del núvol de punts que es vol comparar i la superfície de referència creada a partir del núvol de punts de referència, i de la metodologia prèvia al M3C2 proposada també per Lague et al., (2013) que consistia en realitzar una comparació punt a punt (Fig. 5B), en aquest cas es busca la distància mitjana entre els dos núvols de punts segons la normal a la superfície analitzada dins d'un diàmetre de cerca (establert per l'usuari) (Fig. 5A). Aquest procés permet obtenir un núvol de punts (X, Y, Z, Diff) que conté les coordenades X, Y, Z, de cada punt i un quart paràmetre (Diff) que conté el valor de la diferència trobada entre els dos núvols de punts. A més a més permet reduir els errors relacionats amb la dispersió de les dades, ja que cada un dels núvols de punts es caracteritza per una dispersió dels punts al voltant de la superfície escanejada (σ_1 i σ_2 en la figura 5), donada majoritàriament per l'error instrumental. I també permet precisar més el valor de les distàncies trobades respecte l'anàlisi que es feia fins ara amb Polyworks, ja que les metodologies de comparació dels núvols de punts estaven influenciades per aquesta dispersió,

donant distàncies màximes o mínimes entre núvols de punts, allunyades de la distància real entre superfícies (Fig. 5B).

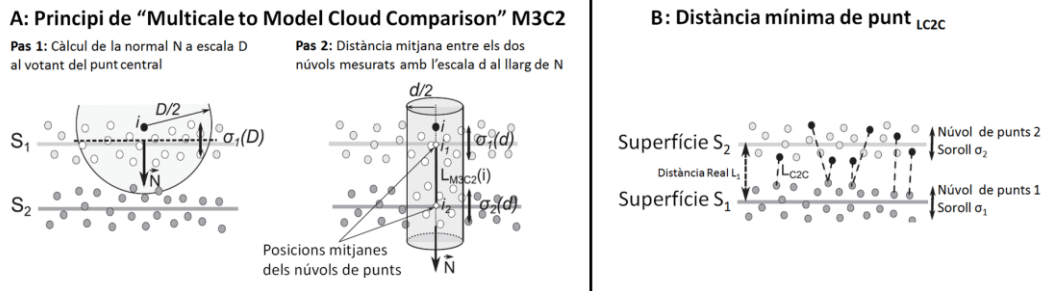


Fig. 5: Metodologies emprades per calcular les distàncies de la comparació dels núvols de punts. A) Descripció de l'algoritme M3C2 i els dos paràmetres definits: D (escala normal) i d (escala de projecció). B) Metodologia de comparació de distància mínima de punt proposada per Lague et al., (2013) prèviament al desenvolupament del M3C2.

Si el LiDAR fos capaç de donar els punts perfectament alineats amb la superfície real, la diferència en els punts que no han patit canvis entre escanejos seria zero. Però degut a que l'error instrumental fa que els núvols de punts tinguin una dispersió al voltant de la superfície escanejada, els valors de diferència trobats estan condicionats per aquesta dispersió i per tant cal aplicar un paràmetre de filtre que permeti eliminar el màxim de punts amb diferències causades per l'error instrumental i no per un canvi real en la superfície escanejada. Aquest valor de filtre es basa en valor mínim de diferència (Diff) a partir del qual la majoria de punts amb valors de Diff inferiors a aquest llindar no corresponguin a desprendiments o canvis reals en la paret sinó a canvis lligats a l'error instrumental. Quan es disminueix molt el valor de filtre s'observa una concentració de punts amb Diff causada per l'error instrumental en bandes, facilitant la definició del valor de Diff llindar que fixarà el valor de filtre (Fig. 6).

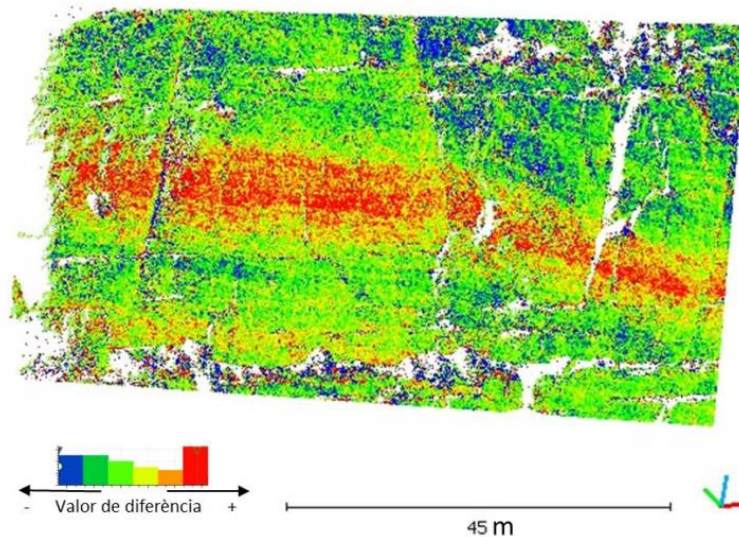


Fig. 6: Franges relacionades amb l'error instrumental que apareixen amb un valor del paràmetre filtre de 0,02 i que permet determinar el valors mínim de Diff associat a canvis reals en la paret.

Per tant, un cop fixat el valor de filtre, tots els punts amb valors de Diff inferiors a aquest valor es consideren punts que tenen diferències que podrien ser generades per l'error instrumental i no per canvis reals en la paret. No obstant és possible que també estiguem eliminant punts que podrien formar part d'alguns despreniments detectats. En el cas de la metodologia aplicada amb PolyWorks, el llindar de detecció era de 3 cm, però en el cas de la metodologia proposada en aquest treball aquest llindar s'ha aconseguit reduir a 2,5 cm. Això fa que cada despreniment estigui format per un major número de punts millorant per tant la seva delimitació i el càlcul del seu volum.

Un cop eliminats els punts amb un valor de Diff inferior al valor de filtre s'obté un núvol de punts que conté només aquells punts que tenen diferències significatives. Si aquests punts corresponen a un despreniment estaran necessàriament envoltats d'altres punts amb diferències significatives, formant una agrupació de punts. Per tal de detectar els despreniments cal doncs aïllar agrupacions de punts que podrien correspondre a despreniments. Aquestes agrupacions, que s'anomenen clústers es defineixen aplicant l'algoritme Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise (DBSCAN) (Ester, et al., 1996). Aquest algoritme s'aplica al núvol de punts (X, Y, Z, Diff) amb MatLab i permeten definir agrupacions de punts que compleixin uns requisits prèviament definits que són: un nombre mínim de punts veïns (MinPts) per definir una agrupació i una distància màxima entre el punts que formin l'agrupació (Eps) (Figura 7).

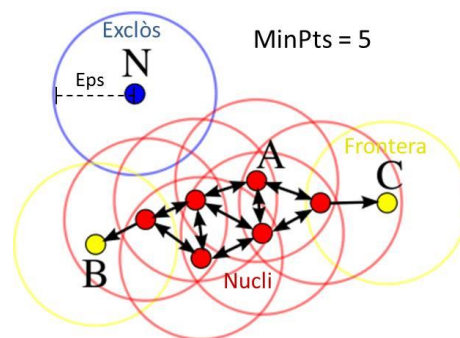


Fig. 7: Representació de l'algoritme DBSCAN. En vermell i groc els punts que compleixen la condició d MinPTS = 5 i Eps = Radi de cerca, en vermell els punts que formen part del centre del clúster i en groc els que formen part de la vora. En blau, el punt que queda exclòs del clúster. Modificat de <https://es.wikipedia.org/wiki/DBSCAN>.

El DBSCAN és un algoritme que recorre tot el núvol de punts cercant, per a cada punt, si existeix un MinPts que estigui dins d'un Eps. Els paràmetres MinPts i Eps són fixats per l'usuari. En el present treball s'han utilitzat diferents valors de MinPts i Eps per determinar quins proporcionen un resultat òptim (veure apartat 3.1).

Aplicant l'algoritme DBSCAN s'ha obtingut un seguit de clústers per a cada comparació i per als diferents valors dels paràmetres descrits anteriorment. Tots aquests clústers compleixen que el valor de Diff entre un núvol de punts i l'altre es negativa, és a dir, el recorregut del làser fins a la paret augmenta entre núvols de punts consecutius. Tot i que teòricament compleixen tots els paràmetres descrits anteriorment per a ser considerats despreniments, la realitat resulta molt més complexa, i per això s'ha de

realitzar un filtratge manual aplicant el criteri geològic d'un expert, per discriminar clúster per clúster si es tracta realment d'un desprendiment, o de vegetació que ha desaparegut, o si és producte d'un error instrumental durant l'escaneig, produït pel mateix LiDAR, que hagi superat el paràmetre filtre aplicat.

El filtratge manual es realitza tenint en compte els següents criteris: per una banda s'observa amb CloudCompare la distribució de valors de Diff dels diferents punts que formen un clúster amb una escala de colors (Fig. 8A). Donat que a Montserrat els desprendiments generalment tenen un gruix inferior a les vores que al centre, la representació d'aquestes distàncies ha de mostrar una variació gradual del centre cap a les vores amb diferència uns valors majors de Diff al centre del clúster. La vegetació en canvi, té una morfologia irregular que es pot identificar amb la visualització 3D dels núvols de punts i a més es veu reflectida per una distribució dels valors de Diff molt més caòtica que en el cas dels desprendiments (Fig. 8B). La Figura 8 mostra un exemple de la distribució de valors de Diferències (Diff) en el cas d'un desprendiment (Figura 8A) i de la distribució caòtica de punts corresponents a un arbust que es pot identificar clarament separat de la paret rocosa (Figura 8B). Als annexos 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 i 20 mostren altres exemples com els representats a la Figura 8.

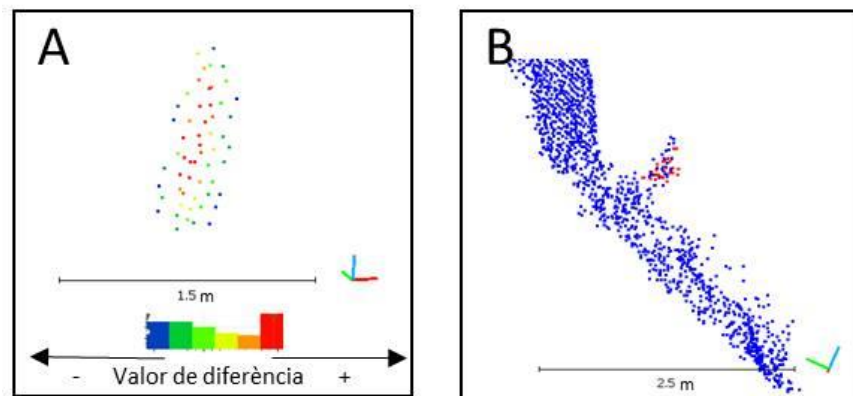


Fig. 8: Exemples de la visualització de clústers detectats per l'algoritme DBSCAN. A) Clúster corresponent a un desprendiment, on s'observa que els valors Diff més elevats en concentren al centre del clúster i la mínima a les vores. B) En blau s'ha representat un segment del núvol de punts estudiat, i en vermell un clúster corresponent a vegetació que engloba punts flotants separats de l'aflorament amb una distribució caòtica.

El valor de la intensitat del retorn del làser és representa en diferents tons de gris que van del negre (0) al blanc (250). Aquest valor també ajuda en la discriminació de si es tracta o no d'un desprendiment, ja que la vegetació tendeix a donar uns valors d'entre 0 i 100 mentre que l'aflorament rocós dona uns valors d'entre 100 i 250.

Tot i això cap dels criteris anteriors per a realitzar el filtratge manual és determinant i s'han de considerar en conjunt per tal de determinar si els clústers detectats corresponen a desprendiments o no.

2.4. Càlcul de volums i obtenció de centroides

El volum dels despreniments es calcula a partir de la triangulació dels punts que formen cada un dels clústers identificats, fet que permet convertir els conjunts de punts en figures geomètriques, a partir de les quals es pot calcular el seu volum. La triangulació es du a terme amb el programa MATLAB (MathWorks), en el qual s'aplica un algoritme que realitza els passos següents: 1) Triangulació de tots els punts que formen cada un dels clústers; 2) Càlcul de l'àrea de cada un dels triangles generats; 3) Multiplicació de l'àrea obtinguda en cada triangle pel valor màxim de la diferència (Diff) assignat als punts que formen el vèrtex del triangle; 4) Suma de tots els volums dels prismes triangulars obtinguts (Fig. 9).

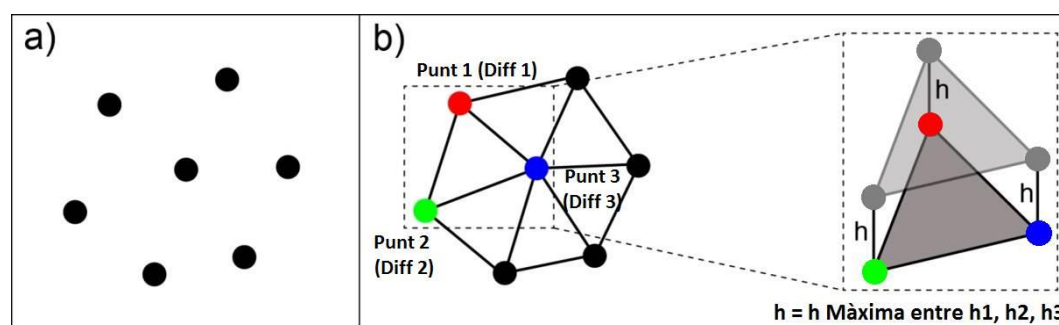


Fig. 9: Esquema de la metodologia per al càlcul del volum a partir de les agrupacions de punts. a) Agrupació de punts imaginària; b) Triangulació dels punts i indicació dels valors de Diff assignats a cada vèrtex dels triangles (Diff1, Diff2, Diff3) i reconstrucció en 3D considerant el valor d'alçada de cada prisma triangular (h) el valor de Diff més gran dels assignats a cada vèrtex del triangle.

Per tal de facilitar la representació de la distribució espacial dels despreniments, s'han obtingut els centroides de cada un, que és el punt que defineix el centre geomètric de cada clúster considerat despreniment. Aquest procés s'ha dut a terme amb el programa MATLAB per a poder reduir a un únic punt qualsevol despreniment, d'aquesta manera podem representar la posició dels despreniments en una imatge de la paret de Degotalls N evitant solapament de dades.

3. Resultats

3.1. Valors dels paràmetres utilitzats en l'M3C2 i en la detecció de clústers

- M3C2

En aquest treball s'han provat dos valors per al diàmetre de cerca per trobar la normal a cada un dels punts del núvol de punts comparat (0,1 m i 0,25 m) per tal de trobar quin és el valor més adient. Aquests valors s'han escollit en funció de la distància mitjana entre els punts dels escanejos (0,1 m). Finalment s'ha escollit el valor de 0,25 m, ja que la distància mitja entre els punts dels escanejos és de 0,1 m per tant, per a calcular la normal s'utilitzaran entre 7 i 8 punts de l'escaneig, que són suficients per evitar una influència massa gran de la dispersió de punts donada per l'error

instrumental sense arribar a perdre el detall de la rugositat real de la superfície estudiada (Fig. 10).

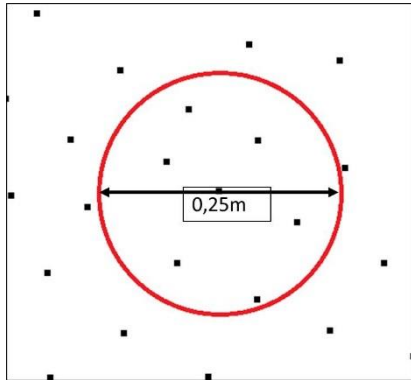


Fig. 10: Representació de l'espaiat entre els punts, i un cercle de diàmetre 0,25 m que engloba una mitja de 7 punts al seu interior, els quals seran utilitzats per a calcular la normal de cada punt del núvol de punts amb l'aplicació M3C2 del programa CloudCompare.

- **Detecció de clústers**

Pel que fa a la distància màxima entre punts veïns, aquesta ha de ser lleugerament més gran que l'espaiat entre els punts per a la correcta detecció dels clústers. És per això que s'ha observat l'espaiat que hi ha entre els punts dels diferents escanejos, i a partir d'aquesta observació visual s'ha determinat que la distància mitjana entre ells és de 0,1 m aproximadament i que Eps ha de ser superior a aquesta distància però sense excedir-se, ja que sinó es detectarien més clústers dels desitjats, portant a interpretacions errònies. Donat aquest espaiat s'ha considerat un valor de 0,2 m per a la distància màxima entre punts veïns.

Per tal de definir el valor de MinPts i el valor del filtre de diferències que doni uns resultats més acurats, s'ha realitzat un anàlisi comparatiu entre els clústers resultants variant aquests paràmetres. Prèviament a aquest anàlisi s'han obtingut els clústers resultants de variar aquests paràmetres i per a cada valor atorgat s'han obtingut mitjançant un filtratge manual el nombre de punts que formen els clústers i que es considera que formen part de possibles despreniments, i per altre banda el nombre de punts que formen clústers que s'han considerat vegetació. Per a fer aquest procés s'han utilitzat les dades de 2010-2011 i de 2012-2013, ja que realitzar aquest procés amb totes les dades resultava una inversió de temps excessiva, de manera que s'han determinat els valors dels paràmetres a partir de dos períodes. El nombre mínim de veïns que han de contenir els clústers (MinPts) s'ha determinat utilitzant els valors 10, 9, 8, 7 i 6, i per al paràmetre filtre s'han utilitzat els valors de 0,04, 0,035, 0,03, 0,025 i 0,02.

A la Figura 11 es pot veure com el nombre de punts que considerem que formen part d'un possible despreniment incrementa molt lleugerament a mesura que es redueix el nombre de veïns, fet que s'accentua quan més baix el paràmetre filtre, ja que aquest salt implica la incorporació de punts que possiblement no formen part de despreniments. No es detecta cap punt d'inflexió que determini clarament quin és el valor òptim per aquesta anàlisi, però en el cas del 2010-2011 es detecta una petita variació positiva en el nombre de punts detectats, i per tant s'ha escollit el valor de MinPts de 8 com a valor a utilitzar en totes les anàlisis.

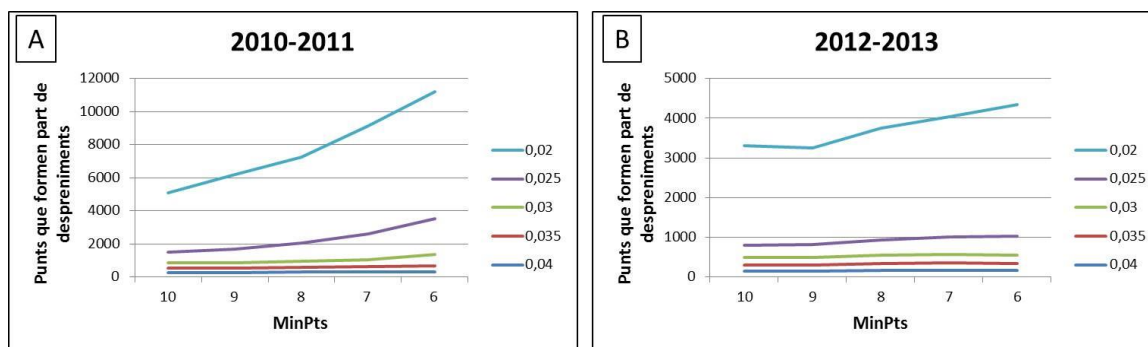


Fig. 11: Gràfics que mostren la relació entre el nombre de punts detectats que formen part de possibles despreniments en funció del nombre de veïns i del paràmetre filtre de la comparació entre els anys 2010-2011 i 2012-2013.

Els resultats obtinguts es mostren a l'Annex 2 i a la figura 12, i com es pot apreciar, el nombre de punts formadors de clústers i considerats despreniments és bastant similar utilitzant valors de 0,04; 0,035 i 0,03 per al paràmetre de filtre de diferències (Diff) amb una lleugera tendència a incrementar a mesura que disminueix aquest valor de filtre. Es detecta un canvi considerable quan el valor de filtre utilitzat és de 0,025 m tant en el període 2010-2011 com en el període 2012-2013. Un altre augment molt més important que l'anterior es produeix quan es considera el valor de filtre 0,02, també detectat en els dos períodes.

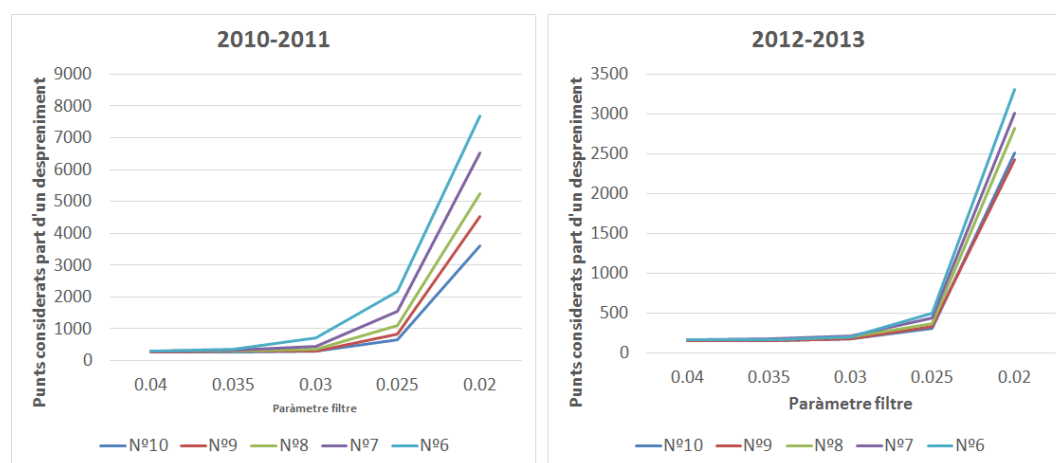


Fig. 12: Gràfiques on es representen el nombre d punts que s'han detectat com a clúster i que s'han considerat part de despreniments després d'un filtratge manual, en funció del nombre mínim de veïns que han de tindre els clústers i del paràmetre filtre a partir del qual les distàncies inferiors es consideren soroll.

Aquests augments es produeixen per la incorporació en els clústers de punts que realment no formen part dels despreniments ja que són punts on la dispersió de les dades obtinguda amb el LiDAR, supera el paràmetre filtre i passen a formar part del clúster que tenen a la vora (si el tenen).

Amb aquesta primera prova de valors del paràmetre filtre no s'ha acabat de detectar quin es el valor òptim, però s'han observat canvis importants en la utilització dels paràmetres 0,03 m, 0,025 m i 0,02 m. És per això que s'ha realitzat una segona prova de detecció, aplicant el procés anterior a tota la sèrie de dades però aquest cop utilitzant només els valors de 0,03 m, 0,025 m i 0,02 m i un nombre de veïns fix de 8.

Amb aquest pas s'ha establert que el valor del filtre de diferències més idoni és de 0,025 m ja que permet obtenir clústers amb un major número de punts sense incorporar un excessiu nombre de punts corresponents a l'error instrumental. Els clústers obtinguts aplicant un valor de filtre de 0,02 m incorporen un gran nombre de punts corresponents a l'error instrumental. No obstant, la concentració de punts amb diferències causades per l'error instrumental en franges facilita la interpretació dels clústers que realment són despreniments per a un valor de paràmetre filtre de 0,025. Els resultats obtinguts es mostren a l'Annex 3.

Per acabar de confirmar que el valor del paràmetre filtre d 0,025 m és correcte s'ha observat la desviació estàndard associada a la dispersió de les dades (error instrumental). Per a fer-ho s'ha seleccionat una zona que es considera sense deformació ni despreniments formada per 185.513 punts que representen aproximadament 1350 m² de paret i s'hi ha aplicat l'algoritme M3C2. La desviació Standard obtinguda és de 0,0083 m obtenint l'histograma que s'observa en la figura 13. Com es pot observar el valor de 0,025 m és adient, ja que la majoria de punts de l'escaneig es concentren en valors de 0 m i els punts amb un valor superior a 0,025 m són els valors que possiblement formen part d despreniments.

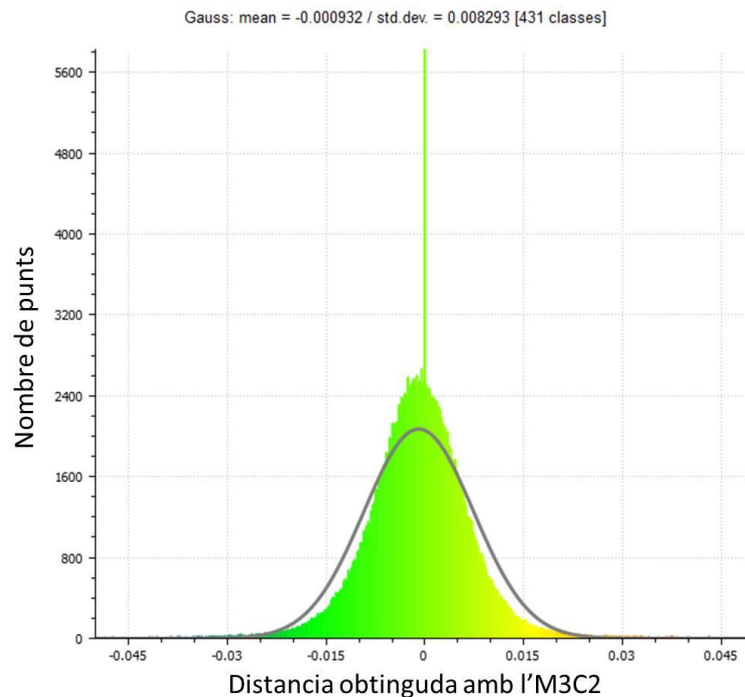


Fig. 13: Histograma del resultat de la comparació entre els dos núvols de punts d'una zona que es considera sense moviment.

3.2. Detecció de despreniments i càlcul de volums

Els despreniments detectats des del 2007 fins al 2017 s'han representat en la Fig. 14, i també s'han representat en els Annexos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 i 11 per a cada interval temporal estudiat.

El llistat de despreniments amb el seu volum calculat es mostren a la Annex 12. En total s'han detectat 93 despreniments. En general s'observa una tendència a disminuir el nombre de despreniments a mesura que ens apropem a l'actualitat, per tant no presenten una activitat homogènia al llarg del temps.

Cal destacar la gran abundància de despreniments detectats en el període comprès entre el 2007 i el 2010, amb un total de 50 despreniments, alguns de gran magnitud, en comparació amb la resta de períodes analitzats. Cal destacar els despreniments de 1121,5482 m³ (despreniment nº40 de la Annex 12), 22,6327 m³ (despreniment nº28 de la Annex 12), 17,1546 m³ (despreniment nº43 de la Annex 12), 3,4031 m³ (despreniment nº1 de la Annex 12), 2,4672 m³ (despreniment nº26 de la Annex 12) i 1,3998 m³ (despreniment nº21 de la Annex 12). La resta de despreniments detectats en aquest estudi tenen magnituds molt més baixes i estan compresos entre 0,7678 i 0,0004 m³ (aquest darrer equivalent a les dimensions d'una mandarina) valors que es discuteixen a l'apartat 4 d'aquest treball.

La suma total dels volums despresos detectats correspon a 1.184,0847 m³.

Un 87,1% dels despreniments detectats es troben per sota de 0,5 m³ i un 74,19% ho fa amb un volum inferior a 0,1 m³, per aquest motiu, podem determinar que la majoria de despreniments que es produeixen en aquest escarpament són de magnitud baixa, exceptuant el període de 2007 a 2010, on podríem considerar que ha ocorregut un episodi de magnitud mitjana – alta, considerant magnitud alta els valors superiors a 1000 m³.

La localització dels despreniments detectats en general presenten una tendència a concentrar-se en una franja pràcticament vertical i a l'extrem inferior dret de la paret, coincidint amb la direcció de les diàclisis principals i amb la zona més fracturada. En la Figura 14 es representen els despreniments utilitzant el centroide de cada un. En aquesta representació no s'ha establert la mida del centroide proporcionalment al volum de cada despreniment per tal de no saturar la imatge de la paret amb despreniments que en alguns casos se solaparien.

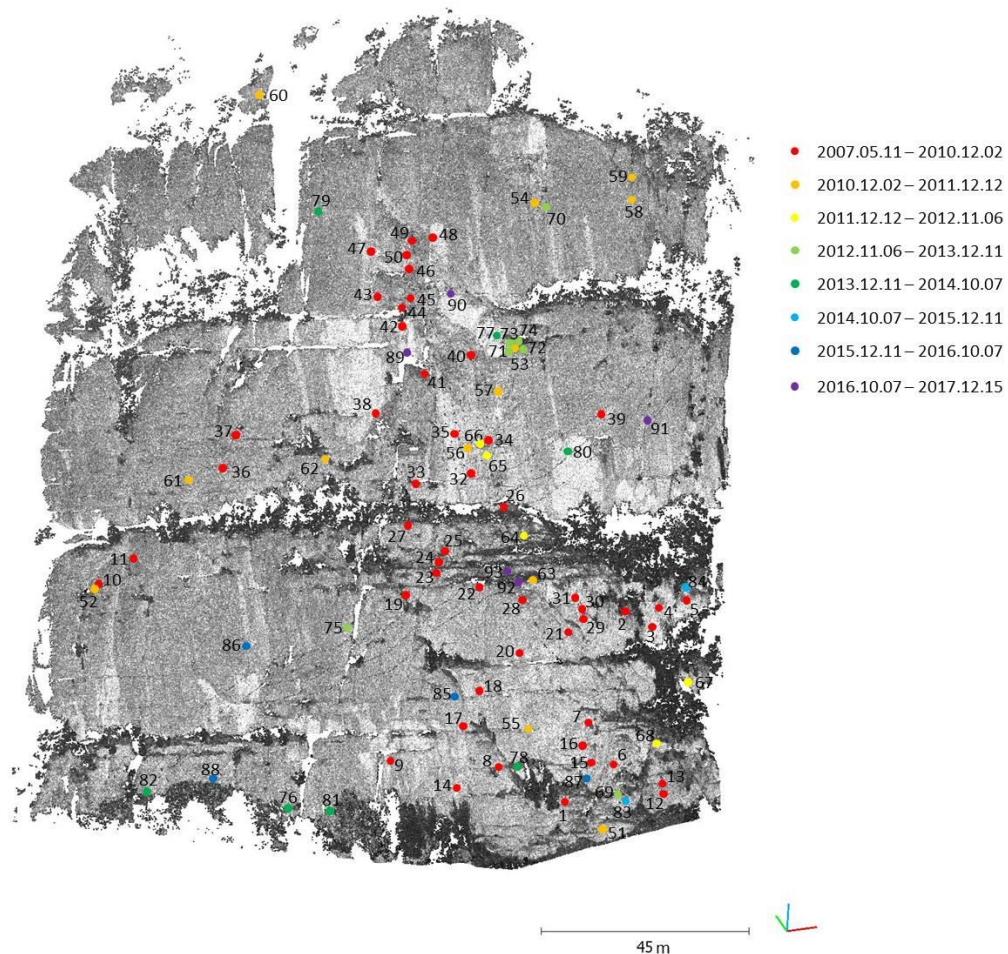


Fig. 14: Representació espacial dels centroides dels desprendiments detectats a la paret de Degotalls N. Aquesta representació no té relació amb el volum detectat.

3.3. Comparació dels resultats obtinguts amb estudis anteriors i quantificació de la millora metodològica

Els desprendiments obtinguts amb la metodologia proposada en aquest treball a la paret de Degotalls s'han comparat amb els obtinguts en treball previ i publicats a la tesi de Manuel Jesus Royán amb un període d'estudi que va des del 2007 al 2014 (Royan, 2015b), també publicats per ICGC, (2011b, 2014) i del 2014 al 2017 publicats per ICGC, (2015, 2016, 2017) (Annex 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 i 20)

A la paret de degotalls, consultant la bibliografia citada anteriorment s'havien detectat un total de 113 desprendiments. En aquest treball, utilitzant les mateixes dades i la nova metodologia proposada se n'han detectat 93 (Fig. 14, Annex 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11). D'aquests 93 desprendiments, n'hi ha 55 que s'han detectat i no s'havien detectat en estudis previs. Del total de desprendiment detectats, un 74,19% tenen volums inferiors a $0,01 \text{ m}^3$ i un 25,81% són de volum superior (en algun cas fins a $22,6727 \text{ m}^3$) que són objecte de discussió en l'apartat 4. Dels 113 desprendiments detectats en estudis previs, només 38 han estat considerats com a tals en aquest estudi (Taules 1 i 2), per tant 78 dels desprendiments detectats en estudis previs no s'han considerat com a tals en

aquest treball. Això es deu a la subjectivitat a l'hora d'aplicar el criteri expert per a determinar què es considera despreniment o no. Un nombre tant elevat de falsos despreniments detectats en altres treballs és motiu de discussió, la qual es realitza en l'apartat 4 d'aquest treball.

Taula 1: Comparació entre els despreniments detectats en aquest estudi i despreniments detectats prèviament a la bibliografia.

	Detectats	Bibliografia	Detectats pero no a la bibliografia	No detectats pero si a la bibliografia	Detectats i presents a la bibliografia
2007 a 2010	50	35	27	12	23
2010 a 2011	13	24	9	20	4
2011 a 2012	5	18	3	16	2
2012 a 2013	7	8	4	5	3
2013 a 2014	7	6	3	2	4
2014 a 2015	2	19	2	18	1
2015 a 2016	4	5	2	3	2
2016 a 2017	5	2	5	2	0
Total:	93	117	55	78	39

Taula 2: Taula resum de la quantitat de despreniments detectats a la bibliografia dels quals també es detecta el clúster en aquest estudi i dels quals no. I d'aquests quants es considerarien despreniments i quants vegetació.

Anys d'estudi	Despreniments detectats a la bibliografia	Detecto o no el clúster		Són vegetació	Són despreniments
2016-2017	2	Si	1	1	0
		No	1	1	0
2015-2016	5	Si	5	3	2
		No	0	0	0
2014-2015	18	Si	14	13	1
		No	4	4	0
2013-2014	6	Si	5	1	4
		No	1	1	0
2012-2013	8	Si	8	5	3
		No	0	0	0
2011-2012	18	Si	12	10	2
		No	6	6	0
2010-2011	24	Si	13	9	4
		No	11	11	0
2007-2010	32	Si	30	7	23
		No	2	2	0

Cal esmentar que en aquest treball 25 clústers dels 113 detectats en estudis previs, no han estat detectats. Amb l'observació detallada d'aquests clústers es pot determinar que això es conseqüència directe de l'aplicació de la metodologia M3C2. Com s'ha explicat anteriorment, aquesta metodologia permet reduir l'error en la comparació dels núvol de punts i per tant evitar en gran part la generació d'artefactes que es poden confondre com a despreniments, sobretot en zones de fractures, zones de vora o vaumes.

En la comparació volumètrica entre els despreniments detectats en aquest estudi i els detectats en estudis anteriors (Annex 21) s'obté generalment un increment en el volum dels despreniments amb la nova metodologia.

Dels despreniments detectats tant en aquest estudi com en treballs previs en un 82,06% en aquest treball s'ha obtingut un volum lleugerament superior que en estudis

previs (Annex 21). Només hi ha tres casos on el volum obtingut amb la nova metodologia augmenta extremadament, que serien el cas del despreniment 1 que augmenta $3,3871 \text{ m}^3$, el 26 que augmenta $1,7352 \text{ m}^3$ i els 40, 41, 42, 43, 44, 45 (Annex 21) (en la bibliografia només s'havien considerat com a dos únics despreniments A i B) que augmenten junts 258.5384 m^3 . Hi ha 7 casos on el volum obtingut és inferior que el descrit en la bibliografia, que són el cas del 2, 9, 49, 50, 67, 72 i 79 (Annex 21) que redueixen el volum menys de $0,01 \text{ m}^3$, a excepció del 49 que el redueix fins a $0,0526 \text{ m}^3$.

4. Discussions

4.1. Canvi metodològic

La metodologia utilitzada en altres estudis realitzats a la paret de Degotalls es basava en la utilització del programa Polyworks per a obtenir les diferències entre núvols de punts. Per a fer-ho comparava cada un dels punts, amb una superfície generada pel mateix programa a partir del núvol de punts de referència. Es desconeix en que es basava el programa per a definir-la, ja que al ser un programa de llicència privada no s'ha pogut accedir al codi que realitza aquesta acció. La limitació més important d'aquesta metodologia és que al comparar un núvol de punts amb una superfície les distàncies obtingudes són susceptibles de ser afectades per la distribució aleatòria dels punts, calculant distàncies que són sensiblement menors o majors a la distància real del pla. A més a més, al calcular la distància en base a una superfície interpolada a partir dels punts, s'obtenen valors de distància en llocs on realment no hi ha punts reals del LiDAR generant artefactes en zones d'ombra. Finalment, la cerca de la distància més petita també provoca artefactes en les zones de vora on hi ha un canvi bruscat en la profunditat del terreny ja que el punt més proper a la superfície generada no es correspon amb la distància real. Per intentar millorar els resultats obtinguts, Lague et al, (2013), planteja un nou mètode anomenat "Closest Point Distance" (LC2C) (Figura 5B). Aquest realitza una comparació punt a punt i per tant deixant d'utilitzar la superfície que generava Polyworks. No obstant, aquest mètode seguia tenint limitacions, ja que els núvols de punts presenten una dispersió dels punts respecte la posició real de la superfície escanejada (σ_1 i σ_2 a Fig. 5B) que es una combinació de la dispersió de les dades relacionada amb l'error instrumental i la rugositat real de la superfície escanejada. Donada aquesta dispersió es desconeix si la distància entre punts corresponia a la distància entre punts més propers, entre punts més allunyats o bé entre punts amb posicions intermèdies (Fig. 5B). És per això que aquests mateixos autors acaben plantejant el mètode utilitzat en aquest treball, el M3C2, que també realitza una comparació punt a punt però utilitzant punts propers als punts comparats per a obtenir una distància mitjana entre ells i obtenir una distància més ajustada a la realitat.

4.2. Comparació dels resultats i quantificació de la millora metodològica

Revisant i comparant les dades dels despreniments publicats prèviament a aquest estudi (Royán, 2015b) i ICGC, (2011b, 2014, 2015, 2016, 2017) s'ha observat que hi han diferències importants entre els despreniments detectats.

En els anteriors treballs s'havien detectat fins a 25 clústers que havien estat interpretats erròniament com a despreniments i que no s'han detectat en aquest treball. Això és degut a que la metodologia emprada fins ara (amb Polyworks) localitzava els punts més propers entre núvols de punts, donant errors importants en zones de vora o en fractures, i això produïa que es generessin un seguit d'artefactes que poden arribar a confondre l'expert que està tractant les dades i considerar com a despreniment aquests artefactes. La inspecció visual de les zones on es troben aquests casos ha permès corroborar que la millora metodològica redueix la detecció d'aquests artefactes, i per tant redueix l'aparició de "falsos" despreniments.

En aquest treball s'han detectat 55 nous despreniments que no havien estat detectats en altres estudis. Aquesta millora en la detecció és deu a que el càlcul de les distàncies entre punts es molt més ajustat a la realitat, això permet que es detectin despreniments que amb altres metodologies no es detectaven per que possiblement utilitzaven distàncies menys pròximes als valors reals. A més a més la nova metodologia ha permès reduir encara més els valors de filtre sense incorporar en el resultat els errors instrumentals, ja que el càlcul de les distàncies al ser més precís oscil·la entre valors més petits que en els que ho feia amb la metodologia utilitzada fins ara.

El mínim volum detectat amb la metodologia amb Polyworks era de $0,001 \text{ m}^3$, en aquest estudi amb la metodologia aplicada s'han obtingut 3 despreniments (un 3,23% dels 93 despreniments detectats), amb un volum inferior a aquest (Annex 12). Aquests volums ($0,0004\text{-}0,0008 \text{ m}^3$) són molt petits (equivalents a les dimensions d'un ou de gallina), i és convenient posar en dubte si realment aquesta metodologia ens permet detectar despreniments amb aquest volum o cal considerar-ho un error de detecció donada la densitat i precisió dels núvols de punts. Tenint en compte la observació dels clústers corresponents a aquests despreniments s'ha pogut veure que estan localitzats en zones on els núvols de punts tenen una densitat de punts superior a la mitjana. A més, tenint una especial cura amb els criteris utilitzats per al filtratge manual dels despreniments, aquests s'han considerat totalment vàlids. Això implica un gran avenç per a la realització d'estudis de risc de despreniments, ja que amb aquets nou mètode es pot arribar a detectar volums de fins a $0,0004 \text{ m}^3$, reduint el llindar de detecció de $0,001 \text{ m}^3$ obtingut en treballs previs.

Durant el procés de càlcul de volums, l'àrea dels triangles obtinguts de la triangulació dels punts de cada clúster es multiplica pel màxim valor de la diferència (Diff). La consideració d'aquest valor màxim, en comptes d'un valor mig o del valor mínim fa que s'obtinguin volums lleugerament superiors. En la realitat els punts triangulats

tenen 3 valors de Diff diferents, però s'ha decidit multiplicar pel valor màxim, ja que és un criteri conservador que donarà volums màxims, establint un marge de seguretat a l'hora de dissenyar estratègies de mitigació del risc. El dia d'avui encara ningú ha desenvolupat i publicat un codi de programació, capaç de calcular el volum real que defineixen els triangles, tot i que s'hi està treballant.

Cal destacar que de tots els despreniments detectats prèviament, n'hi ha 78 dels quals en aquest treball s'ha detectat el clúster, però no s'han considerat despreniments, ja que tots aquests per la seva localització i característiques de l'escaneig s'han considerat vegetació, i per tant s'han considerat falsos despreniments. Aquestes característiques que demostren que són vegetació s'han recollit en els annexos 13-20 on es poden veure clarament molts exemples de falsos despreniments. L'explicació de per què s'havien detectat aquests clústers com a despreniment quan realment són vegetació la podem trobar en l'ús d'una aplicació anomenada Canupo del programa CloudCompare, que s'havia aplicat en algunes de les comparacions d'estudis previs. Aquest filtre elimina els punts que considera vegetació en funció de les relacions texturals de l'escaneig definides prèviament, és a dir, els punts que són vegetació tenen una firma concreta en la seva representació, ja que es troben molt dispersos en les tres dimensions, en canvi els que formen part d'un aflorament rocós en general només mostren gran dispersió en dos dimensions i això és el que els diferencia. Al eliminar la vegetació (no tota, però la que el programa considera, en funció dels paràmetres introduïts) s'està eliminant un dels criteris que en cas de dubte ens ajudava a determinar si eren o no despreniments, a partir dels punts flotants de la vegetació, i molt possiblement sigui un dels errors que es van cometre en estudis publicats prèviament.

Un dels factors claus per explicar les diferències obtingudes en el nombre de despreniments és el criteri geològic de l'expert que tracta aquestes dades. Aquest factor té una gran importància, ja que és el principal responsable de que 78 despreniments dels citats en la bibliografia s'hagin considerat vegetació en aquest estudi. L'altre factor és el metodològic, també molt important, ja que és el responsable de que en aquest estudi no es detectessin 25 clústers que s'havien considerat despreniments per a altres autors.

La comparació dels resultats té certes febleses que cal discutir. En primer lloc s'estan comparant els resultats obtinguts amb comparacions realitzades considerant únicament un escaneig per any, mentre que els resultats de la bibliografia han estat obtinguts comparant més escanejos (Annex 1), en alguns casos fins a 3 per any. S'ha detectat que en un cas un despreniment considerat com a una única entitat d'un volum determinat està citat a la bibliografia com a dos despreniments molt propers. És el cas del despreniment núm. 5 Taula 1. Aquest és un clar exemple de com afecta el tractament de les dades amb llargs períodes de temps. No té el mateix pes dos despreniments d'unes dimensions relativament petites que un de més gros que sumi els dos volums.

En dos casos però passa el contrari, com és el cas del gran despreniment del 2008, que tractant purament les dades obtingudes amb TLS dona com a resultat que està format per 6 despreniments en total (núm. 40 al 45). A mesura que disminuïm el paràmetre filtre augmenten els punts que formaran part dels clústers, ja que estem donant més marge per a la detecció (és a dir considerem que la dispersió dels punts produïda per l'error instrumental és més baixa) i per tant punts que tenen un valor de diferència més baix poden arribar a entrar a formar part d'un clúster. En aquest cas no ha sigut prou baix per unir els 6 clústers detectats en un de sol. Tot i això, si s'haguessin utilitzat imatges fotogràfiques de l'esdeveniment, possiblement el més encertat hauria sigut unir els 5 despreniments en un de sol, per tant cal destacar la utilitat de tenir imatges de l'aflorament d'alta qualitat cada cop que es fa l'escaneig per facilitar la interpretació.

L'augment del nombre de punts detectats que poden formar part d'un despreniment en reduir el valor del paràmetre filtre de 0,03 a 0,025 m és important. Però, tenint en compte que s'està treballant amb un nombre aproximat de 3.000.000 de punts per escaneig, l'augment de 150 no és rellevant. En canvi sí que ho comença a ser en el pas de 0,025 a 0,02 m del paràmetre filtre on l'augment és d'aproximadament d'uns 2000 punts, ja que s'incorporen molts punts corresponents a l'error instrumental.

Com es pot veure a l'Annex 13B un gran bloc que s'ha detectat com a despreniment en aquest estudi (despreniment numero 28 amb un volum de 22.63279 m³) no ha sigut catalogat pels altres autors que han estudiat els despreniments d'aquest aflorament, això ens porta a interpretar que en els resultats publicats anteriorment no es tenien en compte les roques i blocs despresos antròpicament per accions de saneig del talús.

L'augment extrem del volum dels despreniments 1, 26 i del 40 al 45 podria ser conseqüència per tant de què s'ha sanejat la zona per evitar despreniments en un futur, i al no disposar d'aquesta informació per a realitzar aquest treball, els blocs despresos antròpicament s'han detectat com a despreniments, molt possiblement sumant-se al volum d'un despreniment real de volum menor en el mateix punt.

4.3. Perspectives de futur

Aquest treball obre dues línies de futur molt diferenciades. En primer lloc per a quantificar millor la millora metodològica s'hauria d realitzar un anàlisi comparatiu clúster a clúster per veure si augmenta el nombre de punts que formen cada clúster. S'hauria de quantificar aquest augment i observar si millora la definició dels despreniments. En segon lloc s'hauria de realitzar una corba magnitud-freqüència comparant la obtinguda en estudis previs i amb els resultats d'aquest mateix treball per a detectar com la millora metodològica pot influir en aquesta corba.

5. Conclusions

En la sèrie de dades de TLS (des de 2007 a 2017) de la paret de Degotalls, a la Muntanya de Montserrat, s'han detectat un total de 93 despreniments amb l'aplicació M3C2 del programa CloudCompare.

Els paràmetres definits per a obtenir aquests resultats són: El diàmetre del cercle que defineix el cilindre que genera l'M3C2 de 0,025 m, el paràmetre filtre de diferències de 0,025 m, la distància màxima entre punts veïns en un clúster (Eps) de 0,2m i el nombre mínim de punts per formar un clúster (MinPts) de 8.

En general els despreniments detectats tenen volums petits, per sota de 0,5 m³ (87,1%) tot i que predominen els despreniments amb un volum inferior a 0,1 m³ el (74,19%), exceptuant tres blocs de grans dimensions, detectats com a despreniment núm. 28, 40 i 43, amb un volum de 22,63 m³, 1121,54 m³ i 17,15 m³ respectivament.

En aquest estudi s'han detectat 55 nous despreniments que no s'havien detectat en estudis previs. Dels 113 despreniments citats en la bibliografia n'hi ha 25 que no s'han detectat en aquest estudi, i s'ha comprovat que realment no eren despreniments, conseqüència directa de la millora metodològica ja que s'ha disminuït la detecció d'artefactes que porten a interpretacions errònies. Cal destacar que hi ha 75 despreniments detectats per altres autors que en aquest treball no s'han considerat com a tals, en funció del criteri d'expert.

En la comparació volumètrica s'observa que amb la metodologia utilitzada en aquest treball, en general, s'obté un augment del volum dels despreniments, un 82,06% dels despreniments detectats tant en la bibliografia com en aquest treball presenten un volum superior, i només un 17,94% presenten una reducció del volum calculat, menys en 3 casos on el volum obtingut ha sigut molt superior, molt possiblement com a conseqüència de la suma de despreniments ocasionats amb el saneig realitzat a l'aflorament després de l'episodi del 2008.

Per tant, l'aplicació de la nova metodologia M3C2 del programa CloudCompare, per a la anàlisi de dades obtingudes amb TLS, ha permès obtenir una millora en la detecció delimitació i càlcul de volums dels despreniments de la Muntanya de Montserrat respecte als obtinguts fins ara, ja que ha permès obtenir les distàncies de la comparació entre núvols de punts de forma molt més fidel a la realitat, permetent baixar el paràmetre filtre de l'error instrumental i minimitzant la detecció d'artefactes generats en fractures i zones de vora.

6. Bibliografia

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N., Lim, M., Lato, M., (2014). Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 39, 80-97, doi: 10.1002/esp.3493
- Abellan, A., Derron, M. and Jaboyedoff, M. (2016). "Use of 3D Point Clouds in Geohazards" Special Issue: Current Challenges and Future Trends. *Remote Sensing*.
- Alsaker, E., Gabrielsen, R. i Roca, E., (1996). The significance of the fracture pattern of the Late-Eocene Montserrat fan-delta, Catalan Coastal Ranges (NE Spain). *Tectonophysics*, Issue 266, pag. 465-491.
- Anadón, P., Marzo, M. i Puigdefabregas, C. (1985). The Eocene fan-delta of (SE Ebro basin, Spain). IV European Regional Meeting of International Association of Sedimentologists. Pag. 109-146.
- Blanch, X., (2016). Caracterització geomorfològica i estructural de zones de sortida de blocs a partir de dades LIDAR, en una paret rocosa afectada per despreniments. Treball Final de Grau. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Blanch, X., Royán, M.J., Guinau, M., García-Sellés D., Vilaplana J.M., (2017). 10 Years of rockfall analysis in Montserrat (NE Spain). 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection. 22 – 24 maig 2017, Barcelona.
- Busquets, P. i Vilaplana, M., (2007). Geozona 224 Montserrat. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Direcció General del Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

Millora metodològica per a la detecció i caracterització de despreniments amb dades de LiDAR Terrestre a la Muntanya de Montserrat

- Carrea, D., Abellan, A., Humair, F., Matasci, B., Derron, M. and Jaboyedoff, M. (2016). Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren–Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 113, pp.17-29.
- Chen, Y. i Medioni, G., (1992). Object modelling by registration of multiple range images.. *Images Vis Comput*, Volum 10, pag. 145-155.
- Copons, R., (2008). El risc d'esllavissades a Catalunya.
- En.wikipedia.org. (2018). DBSCAN. [En línia] Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/DBSCAN> [Accedit l'1 de Juny de 2018].
- Ester, M., Kriegel, H.P., Sander, J. i Xu, X., (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*.
- Girardeau-Montatut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G., 2005. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3), 30-35.
- Gmv.cast.uark.edu. (2018). Optech ILRIS-3D Parser: Pre-Processing Scan Data | Geospatial Modeling & Visualization. [online] Available at: <http://gmv.cast.uark.edu/scanning/hardware/optech-ilris-3d/checklist-optech-ilris-3d/optech-ilris-parser-pre-processing-scan-data/> [Accessed 14 Jun. 2018].
- ICGC, (2010). Caracterització i seguiment dels despreniments de roques a la muntanya de Montserrat: aplicacions LiDAR. 1a Fase. AP-083/10, Barcelona.
- ICGC, (2011a). Realització tractament 3D de 3 escàners amb lidar terrestre de les parets que dominen el Monestir de Montserrat. AP-070/11, Barcelona.
- ICGC, (2011b). Localització i caracterització amb lidar terrestre d'un despreniment a la paret de degotalls. AP-071/11, Barcelona.
- ICGC, (2014). Anàlisi de les aplicacions LiDAR (TLS) en la detecció de despreniment de roques a Montserrat. AP-088/14, Barcelona.
- ICGC, (2015). Aplicacions LiDAR (TLS) en l'estudi de despreniments de roques a Montserrat (any 2015). AP-0082/15, Barcelona.
- ICGC, (2016). Inventari de despreniments de roques i detecció de deformacions premonitòries a la Muntanya de Montserrat amb LiDAR Terrestre (any 2016). AP-0095/16, Barcelona.
- ICGC, (2017). Inventari de despreniments de roques i detecció de deformacions premonitòries a la Muntanya de Montserrat amb LiDAR Terrestre (any 2017). AP-0092/2017, Barcelona.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R. i Pedrazzini, A., (2012). Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61(1):5–28, doi: 10.1007/s11069-010-9634-2.
- Janeras, M., Jara, J., Royán, M., Vilaplana, J., Aguasca, A., Fàbregas, X., Gili, J. i Buxó, P. (2017). Multi-technique approach to rockfall monitoring in the Montserrat massif (Catalonia, NE Spain). *Engineering Geology*, 219, pag.4-20.
- La Vanguardia, (2018). Montserrat bate el rècord de turistes y llega a los 2,7 millones de visitantes. [online] Available at: <http://www.lavanguardia.com/local/bages/20180105/434079122035/montserrat-record-turistas-llega-27-millones-visitantes.html> [Accessed 12 Jun. 2018].
- Lague, D., Brodu, N. i Leroux, J., (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS J. Photogramm.* doi:10.1016/j.isprs.2013.04.009.
- Lato, M., Hutchinson, J., Diederichs, M., Ball, D. i Harrap, R. (2009). Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(3), pag.935-946.

- Lopez i Camps, J., 2009. Crònica d'una esclavissada. Butlletí del Santuari, Volum 83.
- López-Blanco, M., (2006). Stratigraphic and tectonosedimentary development of the Eocene Sant Llorenç del Munt and Montserrat fan-delta complexes (Southeast Ebro basin margins Northeast Spain). *Contribution to Science*, Volum 3, pag. 125-148.
- Marquès, M.A., (2001). Impacto en el medio físico de unas lluvias extremas en el macizo de Montserrat. *Tecnología del Agua*, any XXI, num. 2013. pp 42-50.
- Petrie, G. i Toth, C.K., (2008). Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. 1-28.
- Raquena, G., (2010). Caracterització de les zones de sortida de desprendiments de la paret de Degotalls (Montserrat). Treball Final de Grau. Universitat de Barcelona i Universitat Politècnica de Catalunya.
- Revuelto, J., López-Moreno, J., Azorín-Molina, C., Arguedas, G., Vicente-Serrano, S. i Serreta, A. (2013). Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de procesos geomorfológicos dinámicos: el manto de nieve y heleros en áreas de montaña. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39(2), p.335.
- Royán, M., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J. and Calvet, J. (2013). Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, 11(4), pag.697-709.
- Royán M.J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J.M. i Calvet, J., (2014). Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides* 11:697–709.
- Royán, M., Abellán, A. i Vilaplana, J., (2015a). Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp (Catalonia, Spain). *Landslides*, 12(3), pag.585-595.
- Royán, M., (2015b). Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- Slob, S., Hack, R., (2004). 3D Terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. In: Hack, R., Azzam, R., Charlier, R. (Eds.), *Engineering geology for infrastructure planning in Europe SE – 22*, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer, Berlin Heidelberg, Pag. 179–189. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_22.

Annexos

Annex 1:

Data d'escaneig	Punts totals	Densitat (punts/m²)
2007/05/11	3.784.485	96,3
2010/12/02	2.723.099	69,3
2011/05/12	-	-
2011/12/12	3.309.753	84,2
2012/03/28	-	-
2012/06/22	-	-
2012/11/06	3.790.189	96,4
2013/12/11	3.182.712	81,0
2014/07/23	-	-
2014/10/07	3.737.292	95,1
2015/02/13	-	-
2015/03/27	-	-
2015/04/28	-	-
2015/06/29	-	-
2015/09/08	-	-
2015/12/11	3.113.880	79,2
2016/07/12	-	-
2016/07/22	-	-
2016/10/07	3.339.291	84,9
2017/07/12	-	-
2017/12/15	3.413.281	86,8

Annex 1: Escanejos disponibles de la paret de Degotalls N, amb la data de l'escaneig, el nombre de punts de cada núvol de punts i nombre de punts per m². En blanc són els escanejos disponibles però que no s'han utilitzat per a fer aquest treball.

Annex 2:

Nombre mínim de Veïns	Paràmetre filtre	2012-2013		2010-2011	
		Punts considerats part d'un despreniment	Punts considerats vegetació	Punts considerats part d'un despreniment	Punts considerats vegetació
10	0.04	151	1819	264	1716
10	0.035	153	2347	270	1868
10	0.03	182	3270	299	2119
10	0.025	316	4730	660	2638
10	0.02	2514	6976	3612	3033
9	0.04	151	2397	263	1970
9	0.035	153	3176	280	2187
9	0.03	182	4369	291	2395
9	0.025	333	5948	838	2827
9	0.02	2431	8899	4538	3571
8	0.04	169	3425	285	2611
8	0.035	171	4256	295	2820
8	0.03	209	5730	366	3172
8	0.025	374	7659	1087	3650
8	0.02	2827	10376	5230	4834
7	0.04	169	4763	304	3228
7	0.035	181	5752	314	3556
7	0.03	219	7135	438	4010
7	0.025	443	9198	1550	4749
7	0.02	3014	12768	6519	6171
6	0.04	169	6198	304	4452
6	0.035	171	7361	342	4756
6	0.03	198	9201	716	5375
6	0.025	497	11719	2161	6231
6	0.02	3313	15462	7691	8411

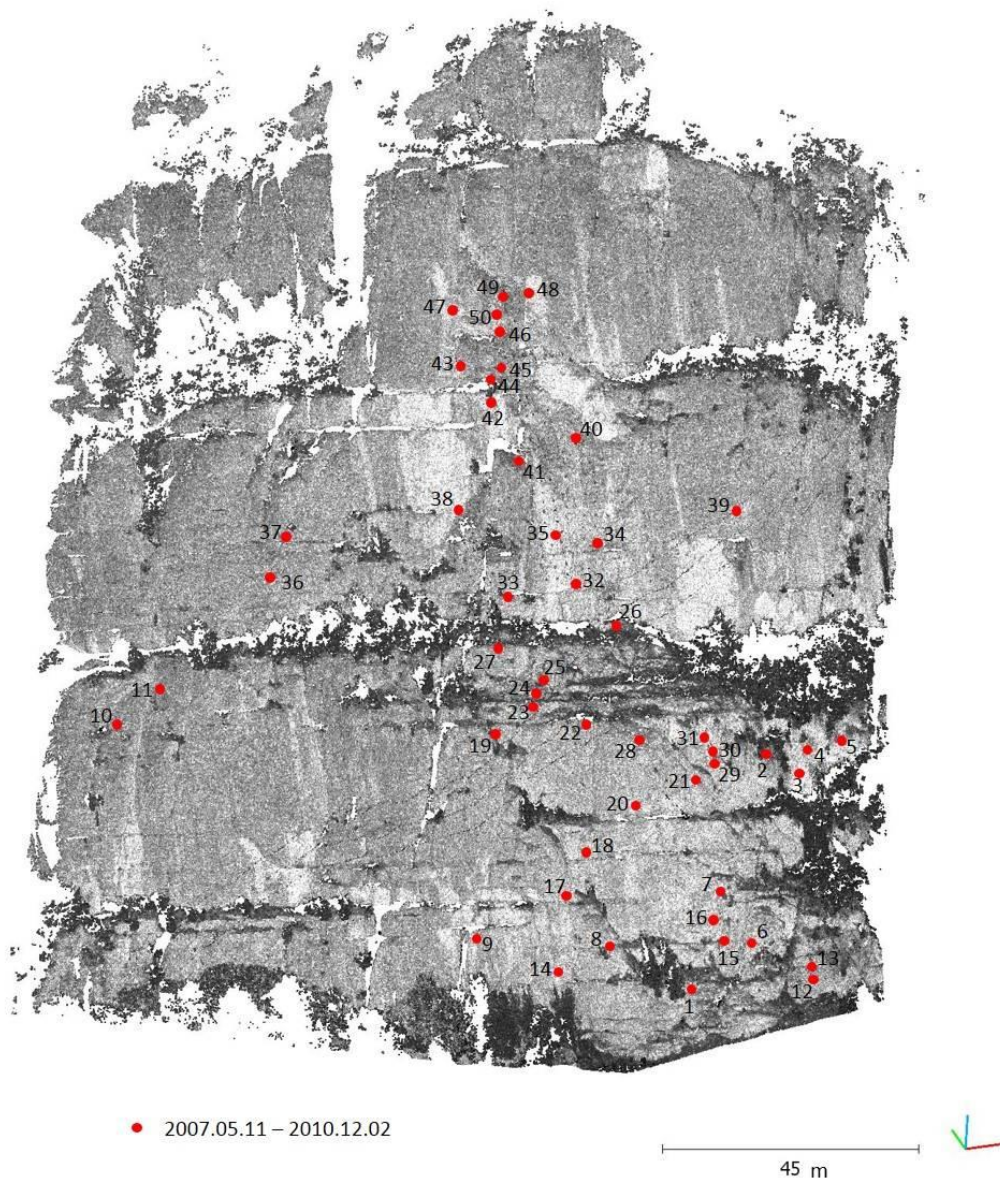
Annex 2: Taula on es mostra el nombre de punts detectats com a clústers i que formen part de despreniments o de vegetació (després de passar el filtratge manual dels diferents clústers), en funció del nombre mínim de veïns i del paràmetre filtre, per a les comparacions entre 2010-2011 i 2012-2013.

Annex 3:

Distància dels veïns	Nombre de veïns	Anys comparats	Parametre filtre	Nombre de despreniments	Punts corresponents a despreniments	Punts corresponents a vegetació
			0.03	50	46932	78804
		2007 a 2010	0.025	50	47496	103901
			0.02	51	47981	148804
			0.03	8	373	15311
		2010 a 2011	0.025	13	564	24251
			0.02	29	1091	52911
			0.03	4	108	24601
		2011 a 2012	0.025	5	131	33814
			0.02	8	191	57890
			0.03	6	206	21996
		2012 a 2013	0.025	7	232	28034
0.2	8		0.02	14	344	41866
			0.03	5	411	24339
		2013 a 2014	0.025	7	661	27263
			0.02	10	763	33157
			0.03	2	38	74401
		2014 a 2015	0.025	2	41	82593
			0.02	3	59	94644
			0.03	3	132	18639
		2015 a 2016	0.025	4	150	23070
			0.02	7	204	35558
			0.03	4	362	26535
		2016 a 2017	0.025	5	400	32904
			0.02	8	457	43467

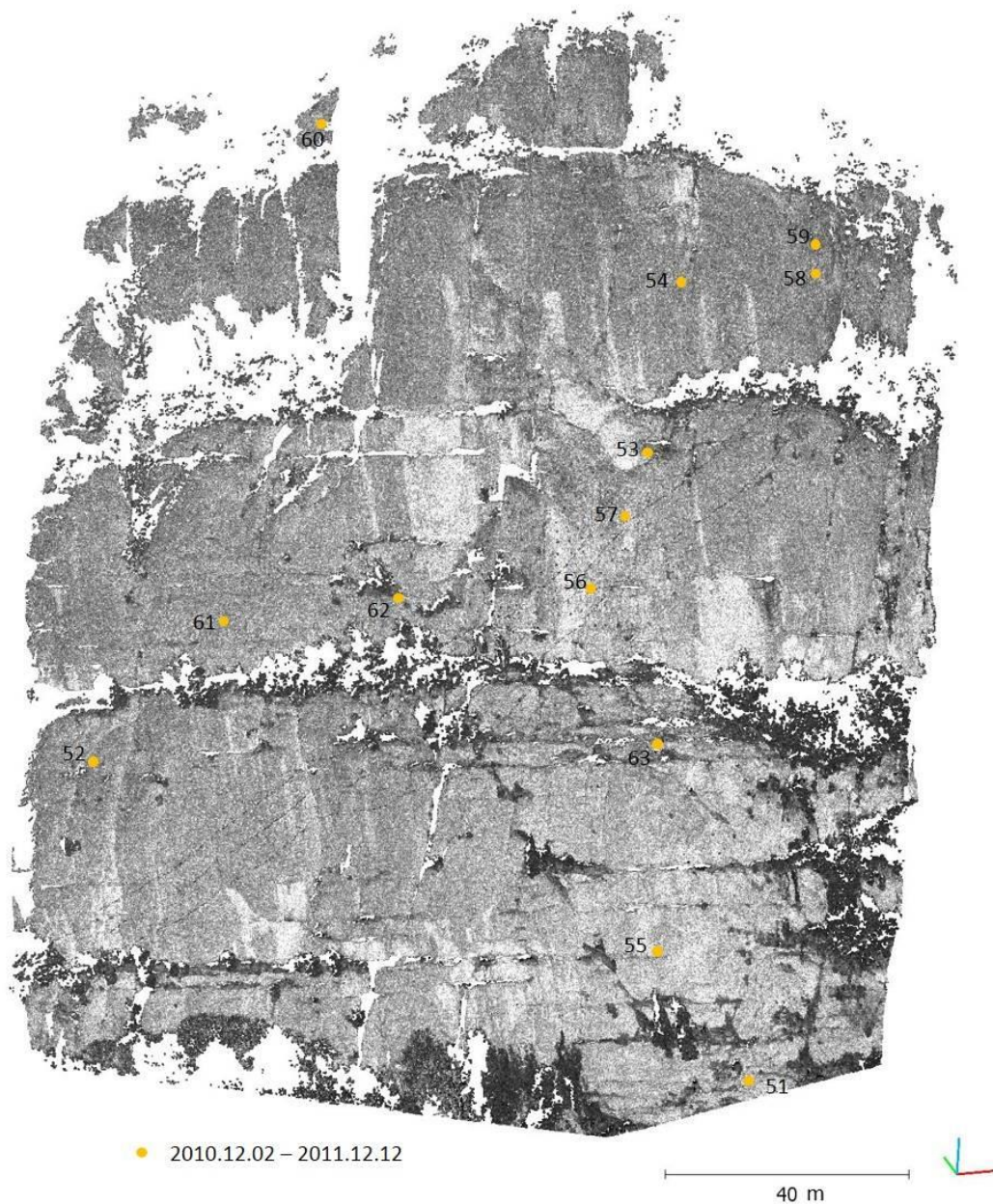
Annex 3: Taula on es mostra el nombre de punts detectats com a clústers i que formen part de despreniments o de vegetació (després de passar el filtratge manual dels diferents clústers), en funció del paràmetre filtre, per a les comparacions entre tots els anys analitzats.

Annex 4:



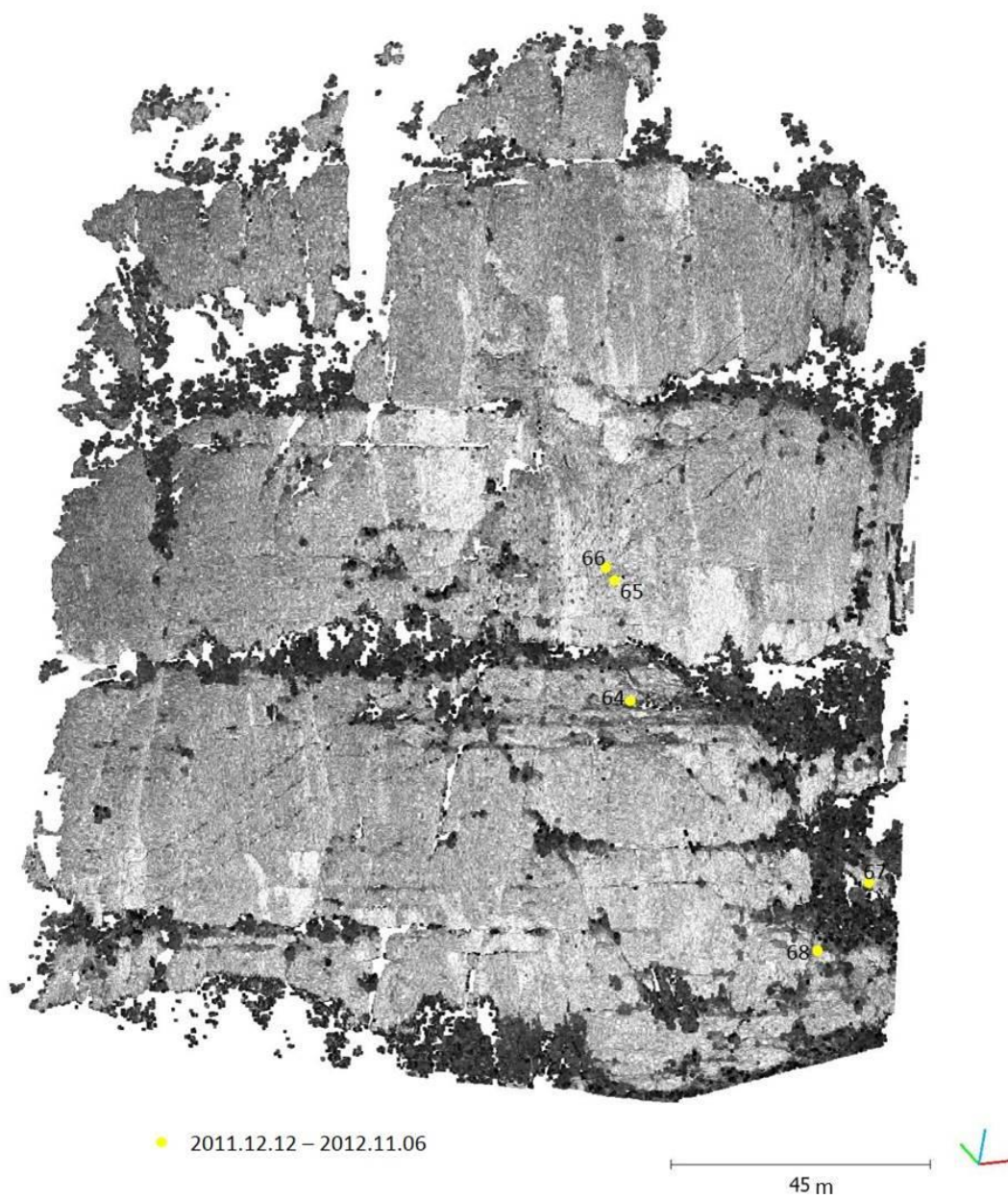
Annex 4: Despreniments detectats en el període 2007.05.11 – 2010.12.02.

Annex 5:



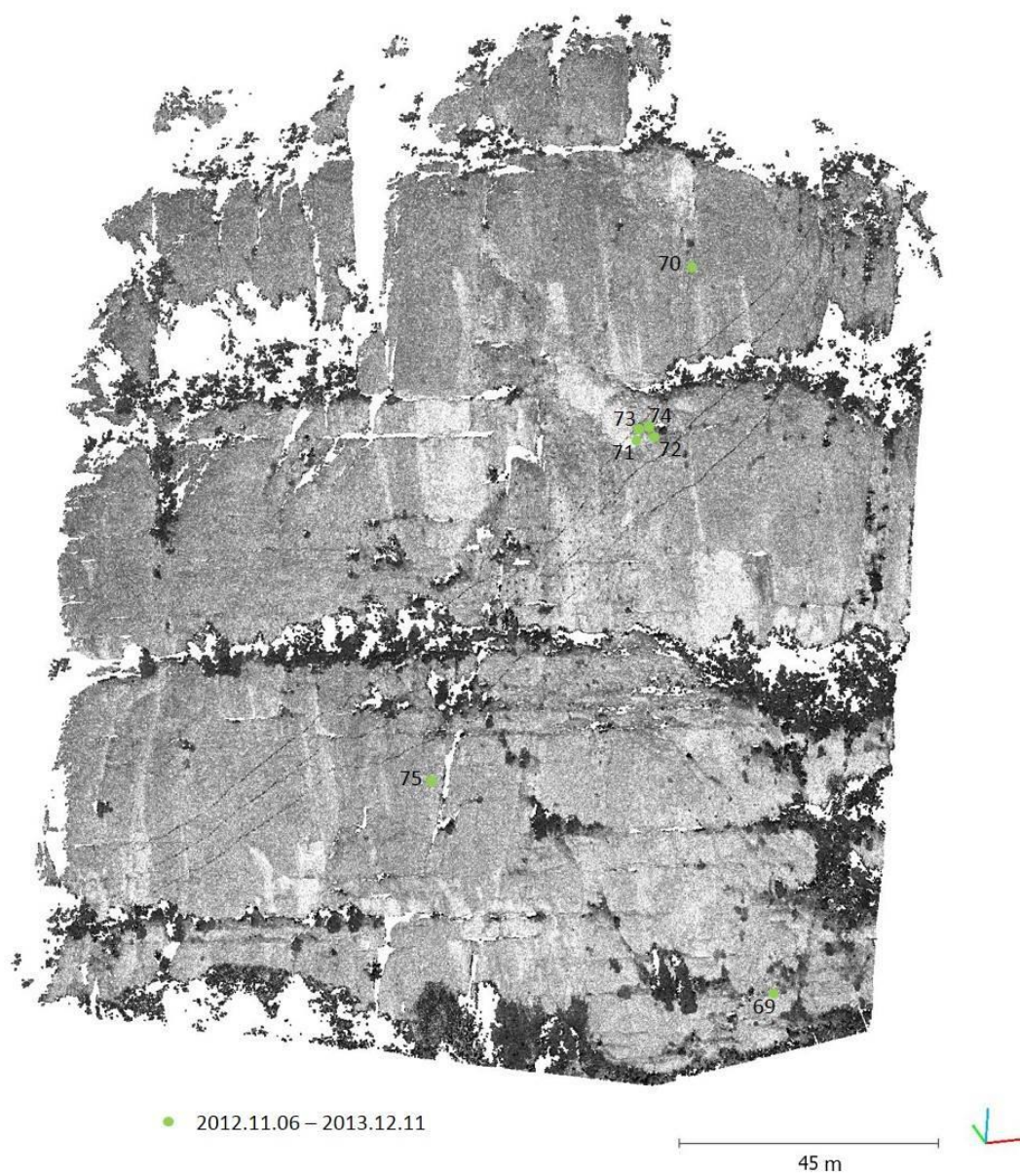
Annex 5: Despreniments detectats en el període 2010.12.02 – 2011.12.12.

Annex 6:



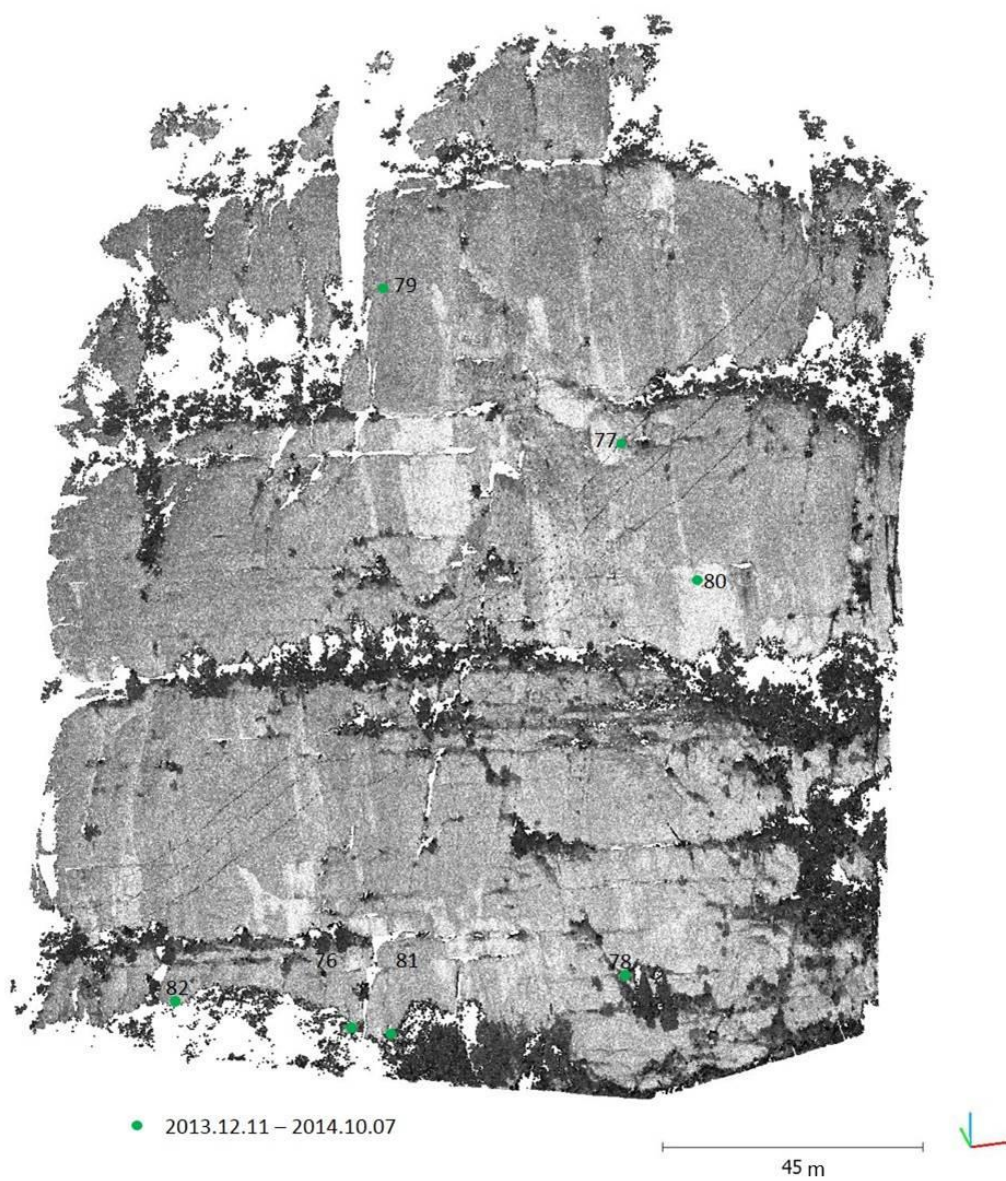
Annex 6: Despreniments detectats en el període 2011.12.12 – 2012.11.06.

Annex 7:



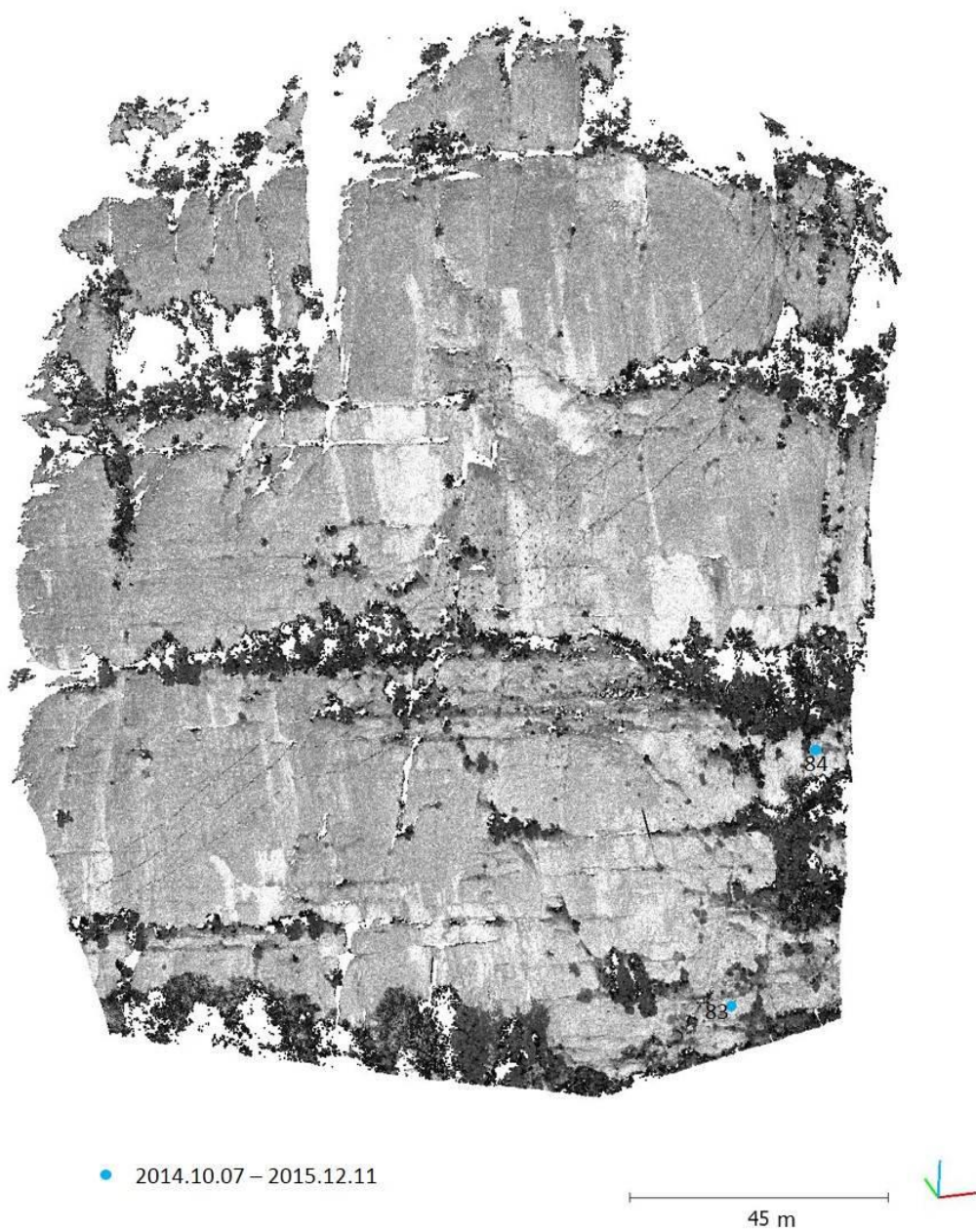
Annex 7: Despreniments detectats en el període 2012.11.06 – 2013.12.11.

Annex 8:



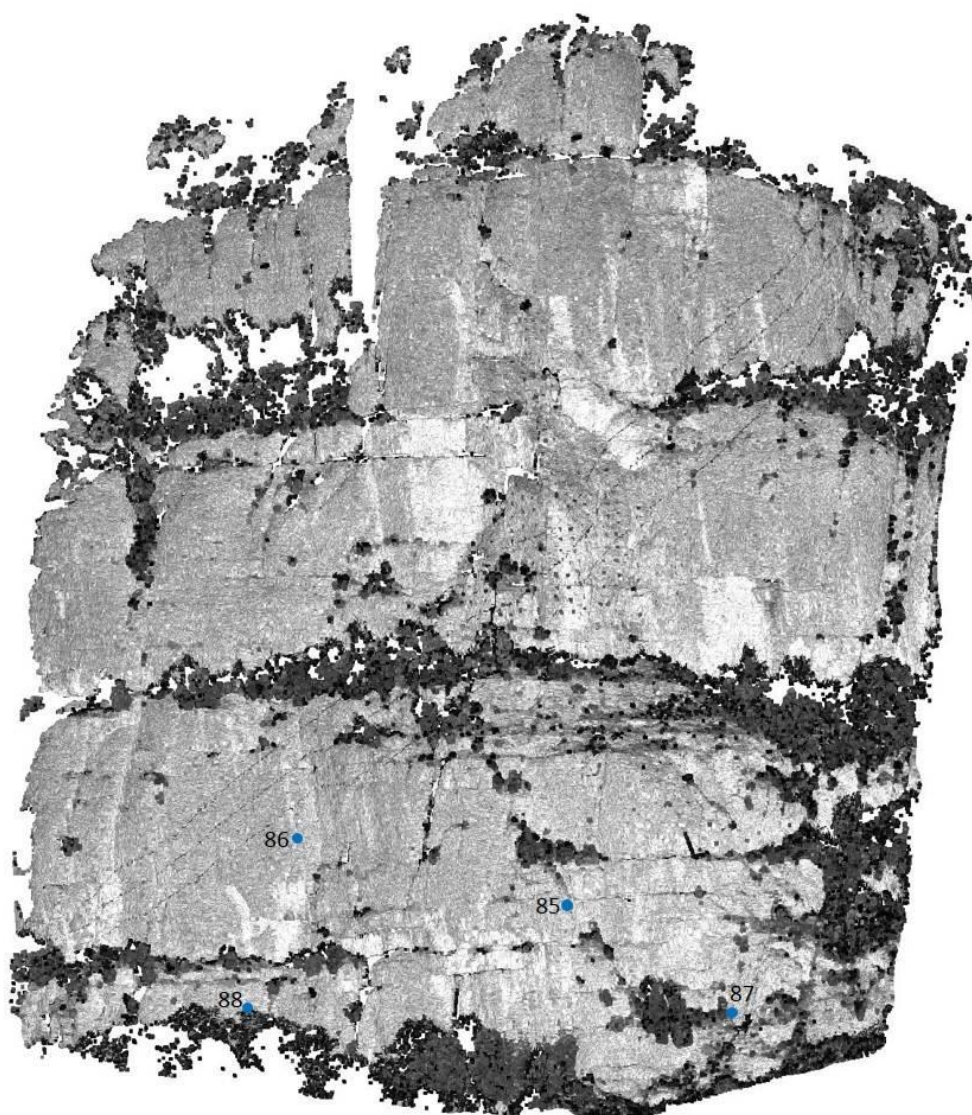
Annex 8: Despreniments detectats en el període 2013.12.11 – 2014.10.07.

Annex 9:



Annex 9: Despreniments detectats en el període 2014.10.07 – 2015.12.11.

Annex 10:

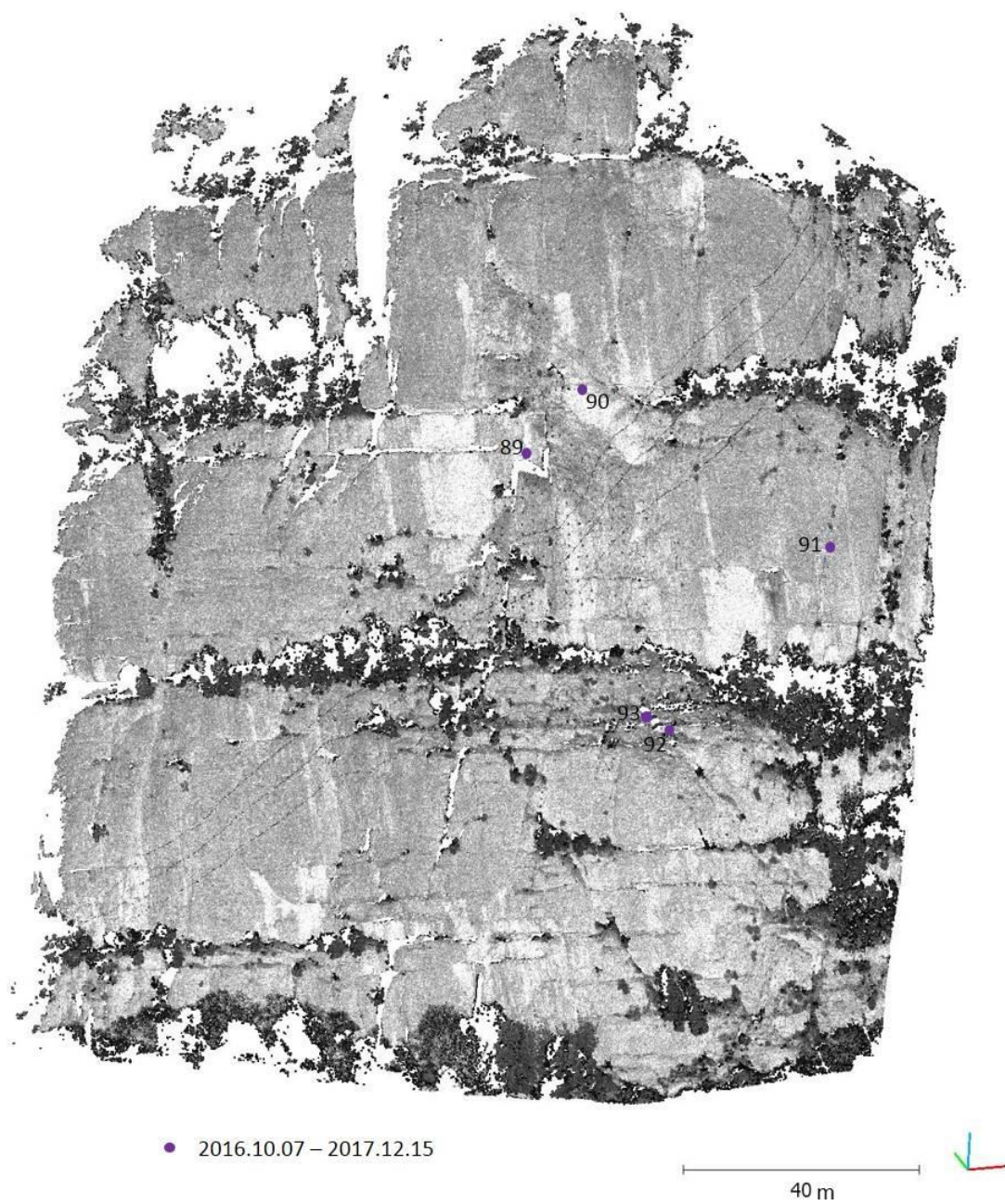


• 2015.12.11 – 2016.10.07

45 m

Annex 10: Despreniments detectats en el període 2015.12.11 – 2016.10.07.

Annex 11:



Annex 11: Despreniments detectats en el període 2016.10.07 – 2017.12.15.

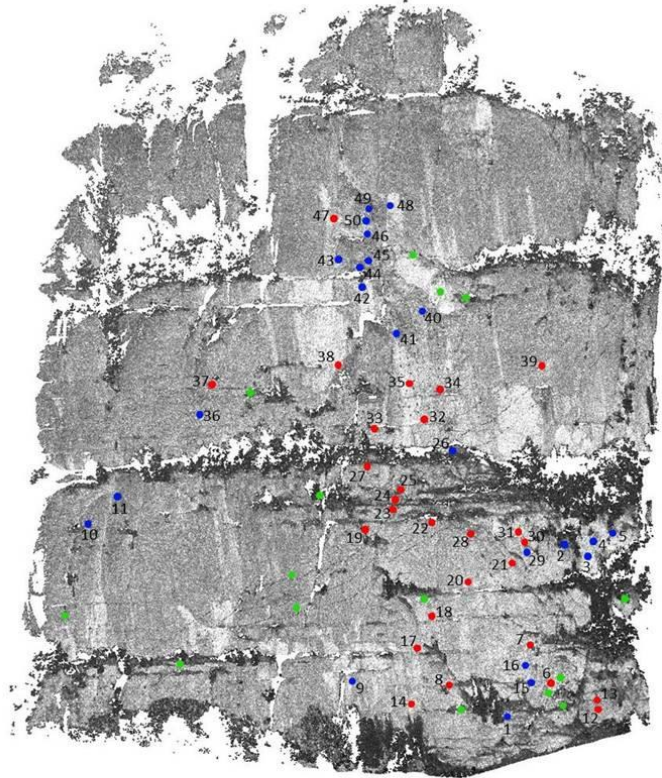
Annex 12:

Període	Miquel 0.025		Període	Miquel 0.025		Període	Miquel 0.025	
	Despreniment	Volum (m3)		Despreniment	Volum (m3)		Despreniment	Volum (m3)
2007-2010	1	3.4031	2007-2010	43	17.154699	2015-2016	85	0.0008
	2	0.0096		44	0.7678		86	0.0032
	3	0.0612		45	0.7281		87	0.0213
	4	0.0288		46	0.1484		88	0.022
	5	0.1146		47	0.0101	2016-2017	89	0.0012
	6	0.0216		48	0.0342		90	0.0032
	7	0.0573		49	0.0784		91	0.0183
	8	0.0033		50	0.0199		92	0.1321
	9	0.0016		51	0.0052		93	0.0725
	10	0.3976	2010-2011	52	0.0062			
	11	0.0202		53	0.0051			
	12	0.0062		54	0.0115			
	13	0.0422		55	0.0078			
	14	0.0007		56	0.0028			
	15	0.0189		57	0.0213			
	16	0.0164		58	0.0078			
	17	0.1081		59	0.0186			
	18	0.0419		60	0.0296			
	19	0.0261		61	0.0138			
	20	0.0018		62	0.0291			
	21	1.3998	63	0.5532				
	22	0.4806	2011-2012	64	0.0043			
	23	0.179		65	0.0053			
	24	0.5739		66	0.0172			
	25	0.0529		67	0.0088			
	26	2.4672	68	0.0004				
	27	0.0812	69	0.0024				
	28	22.632799	2012-2013	70	0.003			
	29	0.0095		71	0.0041			
	30	0.005		72	0.1726			
	31	0.0152		73	0.0172			
	32	0.0395		74	0.0548			
	33	0.01	75	0.0011				
	34	0.0027	2013-2014	76	0.1181			
	35	0.1189		77	0.0108			
	36	0.0533		78	0.1142			
	37	0.0033		79	0.0077			
	38	0.0175		80	0.0042			
	39	0.0027		81	0.1486			
	40	1121.548218		82	0.0396			
	41	4.8312	2014-2015	83	0.0011			
	42	4.5084		84	0.007			

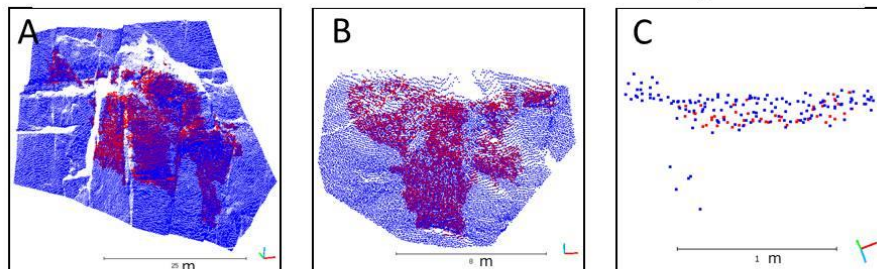
Annex 12: Relació entre els despreniments detectats i el seu volum. En vermell s'han marcat els despreniments detectats amb un volum inferior al llindar de detecció de la metodologia utilitzada per altres autors de 0,001.

Annex 13:

Degotalls N, comparació dels resultats 2007-2010 amb Royan, (2015b)



- 2007.05.11 – 2010.12.02 Miquel
- 2007.05.11 – 2010.12.02 Royan, (2015b)
- 2007.05.11 – 2010.12.02 Miquel i Royan, (2015b)



A) Gran despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 40 i detectat per Royan, (2015b). Vista en frontal.

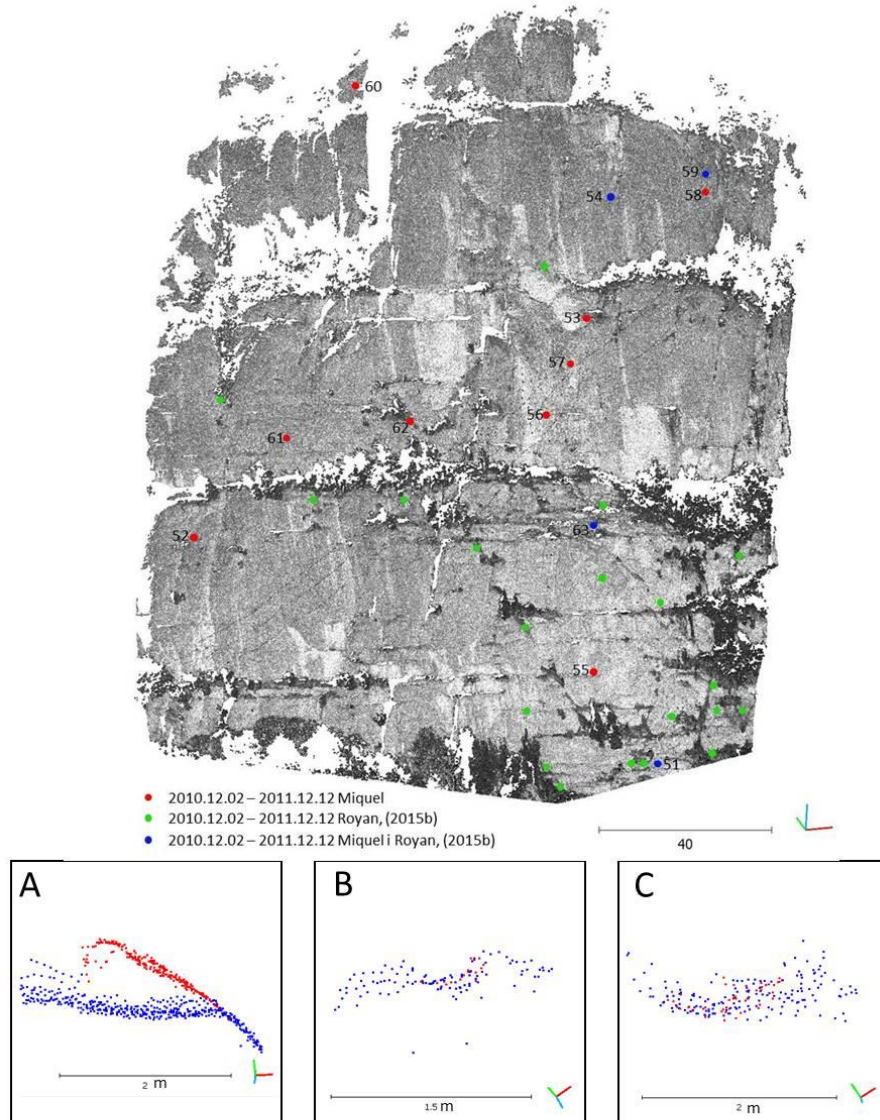
B) gran despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 28. No detectat per Royan, (2015b), ja que possiblement es tracti d'un bloc després antropícament per sanejar aquest aflorament i per tant Royan, (2015b) no el va considerar com a tal.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment.

Annex 13: Comparació dels despreniments detectats en el període 2007.05.11 – 2010.12.02 i els detectats per **Royan, (2015b)** i **ICGC, (2010)**.

Annex 14:

Degotalls N, comparació dels resultats 2010-2011 amb Royan, (2015b)



A) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 63 i detectat per Royan, (2015b). Vista en planta.

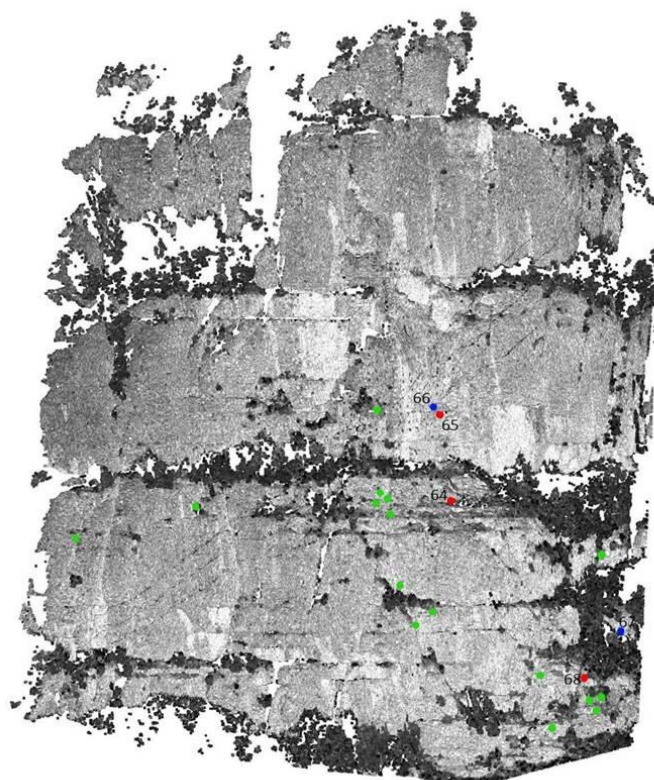
B) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment.

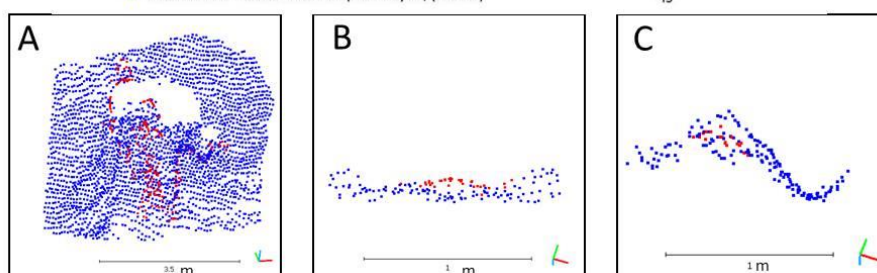
Annex 14: Comparació dels despreniments detectats en el període 2010.12.02 – 2011.12.12 i els detectats per **Royan, (2015b)** i **ICGC, (2011)**.

Annex 15:

Degotalls N, comparació dels resultats 2011-2012 amb Royan, (2015b)



- 2011.12.12 – 2012.11.06 Miquel
- 2011.12.12 – 2012.11.06 Royan, (2015b)
- 2011.12.12 – 2012.11.06 Miquel i Royan, (2015b)



A) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). Es pot apreciar un error de vora, característic de l'antiga metodologia utilitzada fins ara. Gràcies a la nova metodologia (M3C2) s'ha evitat aquest error i s'ha descartat el possible despreniment. Vista Frontal.

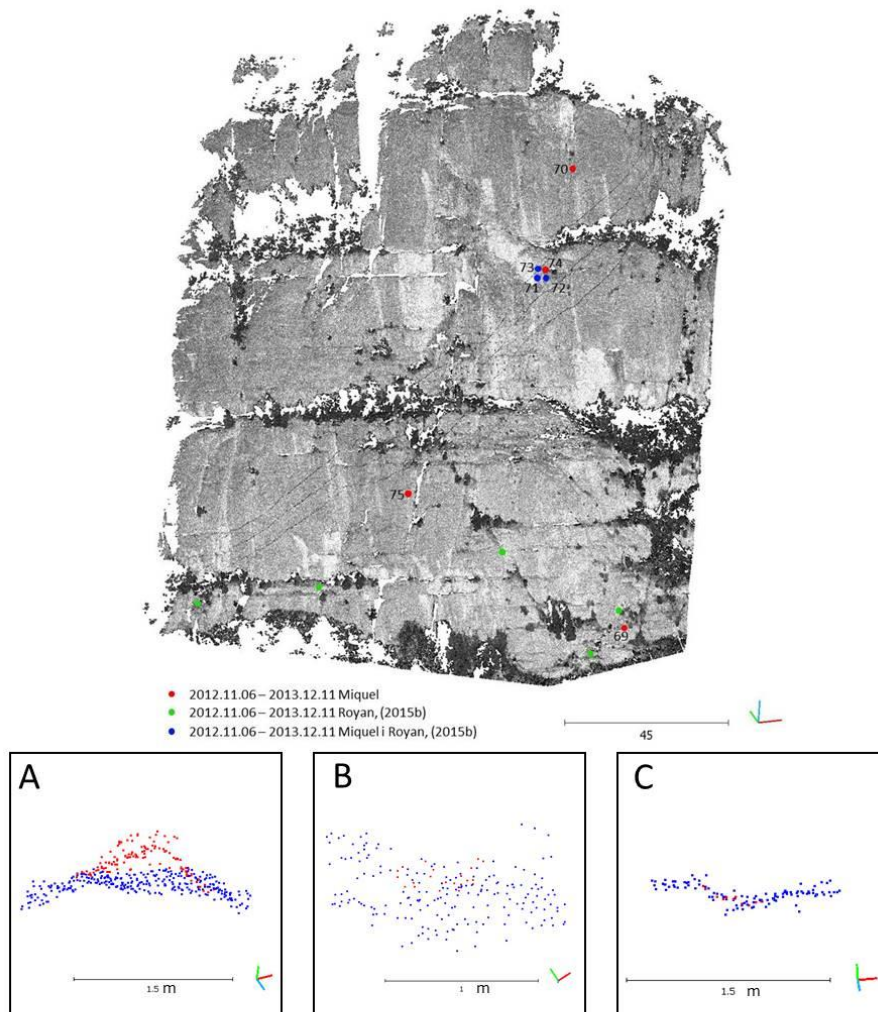
B) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 66 i detectat per Royan, (2015b). Vista en planta.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació a la zona. Vista en planta.

Annex 15: Comparació dels despreniments detectats en el període 2011.12.12 – 2012.11.06 i els detectats per **Royan, (2015b)** i **ICGC, (2012)**.

Annex 16:

Degotalls N, comparació dels resultats 2012-2013 amb Royan, (2015b)



A) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 72 i detectat per Royan, (2015b). Vista en planta.

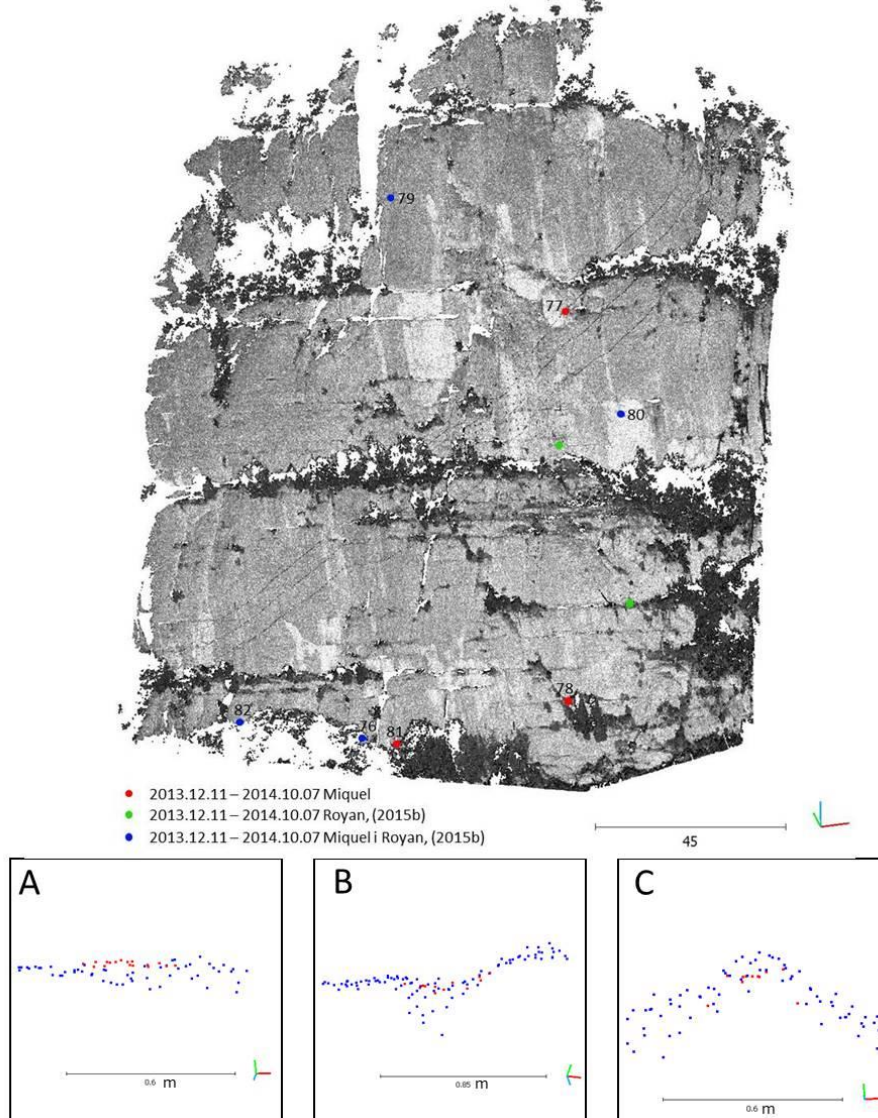
B) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment. Vista en planta.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment. Vista en planta.

Annex 16: Comparació dels despreniments detectats en el període 2012.11.06 – 2013.12.11 i els detectats per **(Royan, 2015b) i ICGC, (2013)**.

Annex 17:

Degotalls N, comparació dels resultats 2013-2014 amb Royan, (2015b)



A) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 80 i detectat per Royan, (2015b). Vista en planta.

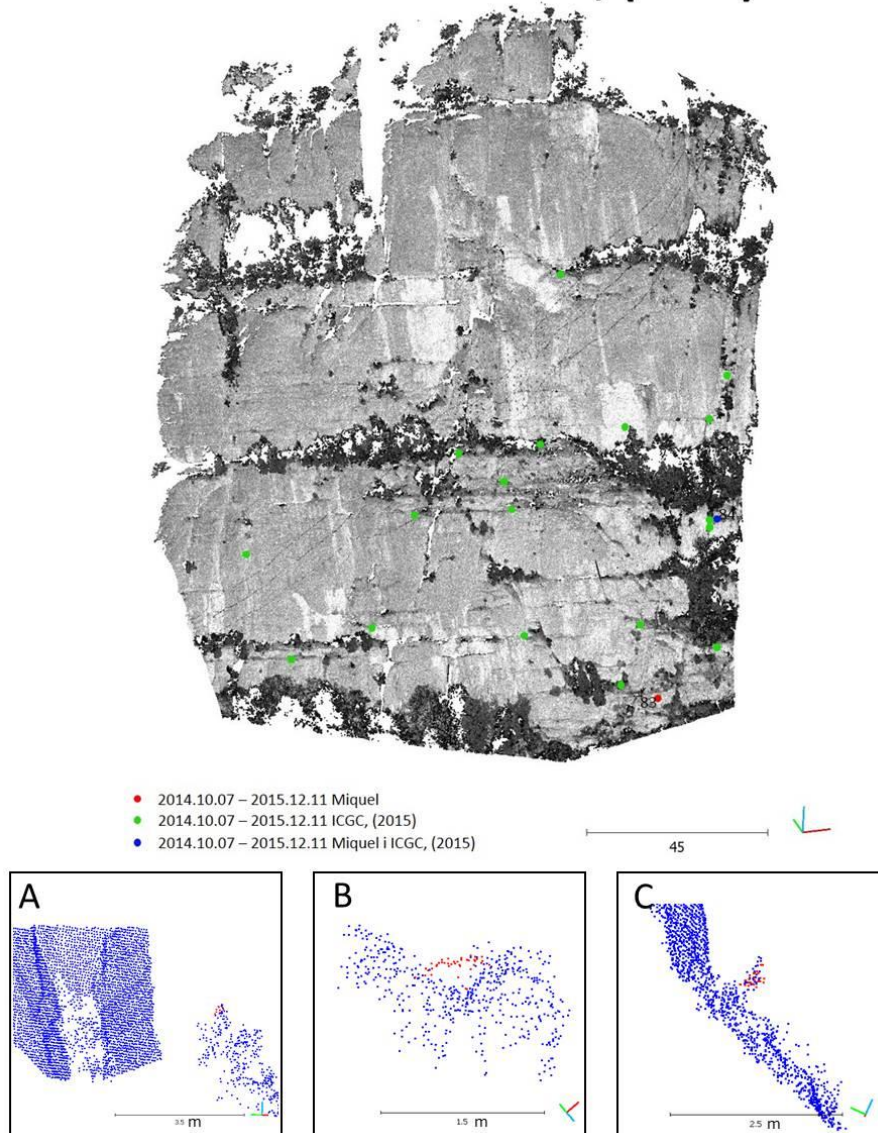
B) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per Royan, (2015b). S'ha descartat per localitzar-se en una zona de vauma i perquè els punts que defineixen el despreniment haurien d'estar més lluny i estan més a prop, per tant es tracta d'un error de l'antiga metodologia emprada. No s'ha detectat aquest clúster emprant la nova metodologia (M3C2).

Annex 17: Comparació dels despreniments detectats en el període 2013.12.11 – 2014.10.07 i els detectats per **Royan, (2015b)** i **ICGC, (2014)**.

Annex 18:

Degotalls N, comparació dels resultats 2014-2015 amb ICGC, (2015)



A) Hipotètic desprendiment detectat per ICGC, (2015), no considerat en aquest informe, ja que es troba separat de la paret rocosa en forma de punts flotants, indicadors de vegetació. Vista de perfil obliqua.

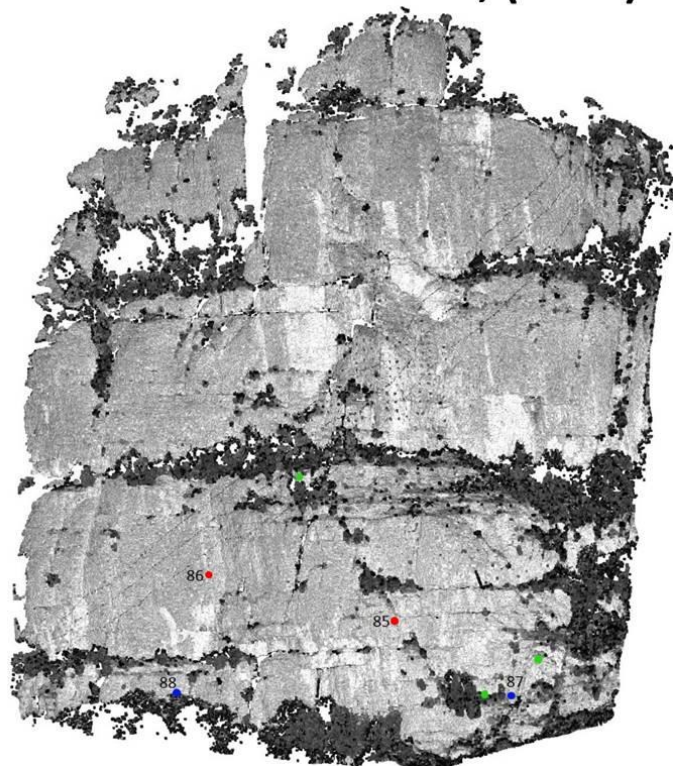
B) Hipotètic desprendiment detectat per ICGC, (2015), no considerat en aquest informe, a causa de la presència de punts flotants, indicadors de vegetació en aquesta zona. Vista en planta.

C) Hipotètic desprendiment detectat per ICGC, (2015), no considerat en aquest informe, ja forma part de punts flotants, indicadors de vegetació. Vista de perfil.

Annex 18: Comparació dels desprendiments detectats en el període 2014.10.07 – 2015.12.11 i els detectats per **ICGC, (2015)**.

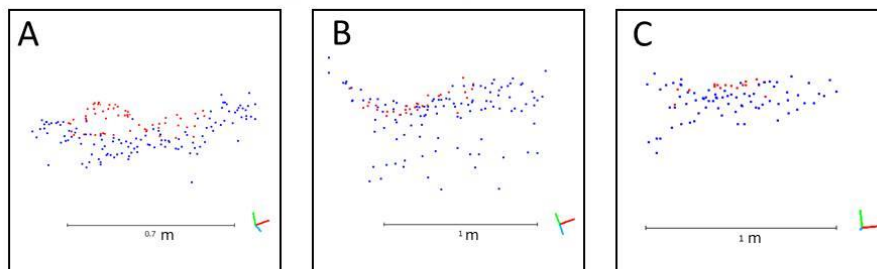
Annex 19:

Degotalls N, comparació dels resultats 2015-2016 amb ICGC, (2016)



- 2015.12.11 – 2016.10.07 Miquel
- 2015.12.11 – 2016.10.07 ICGC, (2016)
- 2015.12.11 – 2016.10.07 Miquel i ICGC, (2016)

45



A) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 87 i detectat per ICGC, (2016). Vista en planta.

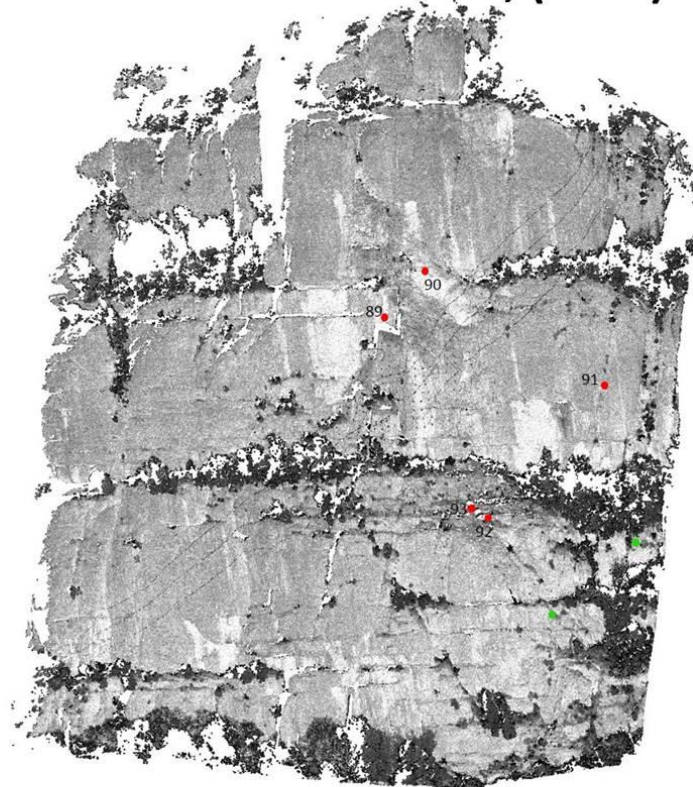
B) Hipotètic despreniment detectat per ICGC, (2016), no considerat en aquest informe, a causa de la presència de punts flotants, indicadors de vegetació en aquesta zona i de la poca definició com a despreniment. Vista en planta.

C) Hipotètic despreniment detectat per ICGC, (2016), no considerat en aquest informe, a causa de la presència de punts flotants, indicadors de vegetació en aquesta zona i de la poca definició com a despreniment. Vista en planta.

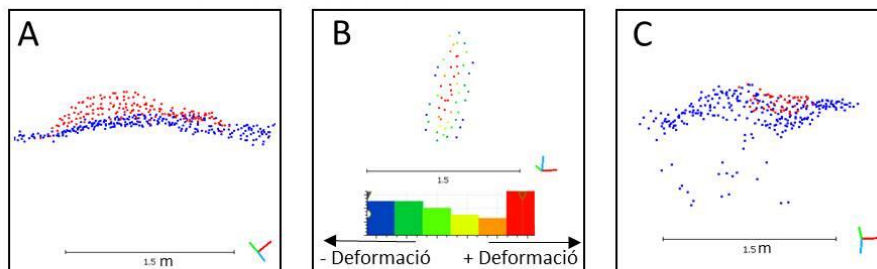
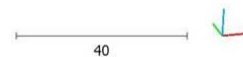
Annex 19: Comparació dels despreniments detectats en el període 2015.12.11 – 2016.10.07 i els detectats per **ICGC, (2016)**.

Annex 20:

Degotalls N, comparació dels resultats 2016-2017 amb ICGC, (2017)



- 2016.10.07 – 2017.12.15 Miquel
- 2016.10.07 – 2017.12.15 ICGC, (2017)
- 2016.10.07 – 2017.12.15 Miquel i ICGC, (2017)



A) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 92. No detectat per ICGC, (2017). Vista en planta.

B) Despreniment detectat en aquest informe, catalogat com a despreniment 91. No detectat per ICGC, (2017). Es pot observar com la deformació màxima es troba al centre del despreniment i la mínima en les vores. Vista en Alçat.

C) Despreniment no detectat en aquest informe, però catalogat per ICGC, (2017). S'ha descartat per la presència de punts flotants, possibles indicadors de vegetació abundant a la zona i per la poca precisió definint un hipotètic despreniment.

Annex 20: Comparació dels despreniments detectats en el període 2016.10.07 – 2017.12.15 i els detectats per **ICGC, (2016, 2017)**.

Annex 21:

	Despreniments detectats		Despreniments de la bibliografia			Diferència de volum obtinguda (m ³)
	Despreniment	Volum (m ³)	Despreniment	Volum (m ³)	Font	
2007-2010	1	3.4031	24	0.016	Royan, (2015b) i ICGC, (2014)	3.3871
	2	0.0096	28	0.012		-0.0024
	3	0.0612	30	0.039		0.0222
	4	0.0288	29	0.012		0.0168
	5	0.1146	31	0.024		0.0906
			32	0.008		-0.008
	9	0.0016	5	0.002		-0.0004
	10	0.3976	12	0.311		0.0866
	11	0.0202	2	0.014		0.0062
	15	0.0189	22	0.003		0.0159
	16	0.0164	21	0.016		0.0004
	26	2.4672	18	0.732		1.7352
	29	0.0095	19	0.002		0.0075
	36	0.0533	14	0.05		0.0033
	40	1121.5482	Despreniment 2008 A i B	883 (A) + 8 (B)		258.5384
	41	4.8312				
	42	4.5084				
	43	17.1547				
	44	0.7678				
	45	0.7281				
46	0.1484	10	0.065	0.0834		
48	0.0342	11	0.022	0.0122		
49	0.0784	8	0.131	-0.0526		
50	0.0199	9	0.021	-0.0011		
2010-2011	51	0.0052	53	0.005	Royan, (2015b) i ICGC, (2014)	0.0002
	54	0.0115	57	0.007	0.0045	
	59	0.0186	37	0.012	0.0066	
	63	0.5532	47	0.325	0.2282	
2011-2012	66	0.0172	67	0.006	Royan, (2015b)	0.0112
	67	0.0088	73	0.01	i ICGC, (2011b)	-0.0012
2012-2013	71	0.0041	77a	0.003	Royan, (2015b)	0.0011
	72	0.1726	78	0.179	i ICGC, (2014)	-0.0064
	73	0.0172	77b	0.01	0.0072	
2013-2014	76	0.1181	82	0.103	Royan, (2015b) i ICGC, (2014)	0.0151
	79	0.0077	83	0.008		-0.0003
	80	0.0042	85	0.002		0.0022
	82	0.0396	81	0.031		0.0086
2014-2015	84	0.007	4a	0.004	ICGC, (2015)	0.003
2015-2016	87	0.0213	4	0.01=<RF<0.1	ICGC, (2016)	X
	88	0.022	5	0.01=<RF<0.1		X

Annex 21: Comparació dels volums dels despreniments detectats i dels publicats prèviament a la bibliografia.