

Anàlisi de l'evolució de despreniments a partir de dades LiDAR a l'escarpament de Puigcercós (Pallars Jussà)

Autor: Xabier Blanch Gorriz
Tutora: Marta Guinau i Sellés
Cotutor: Manuel J. Royán Cordero

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics
Especialitat: Riscos Geològics

Juliol 2015



Anàlisi de l'evolució de despreniments a partir de dades LiDAR a l'escarpament de Puigcercós (Pallars Jussà)

Xabier Blanch Gorriz

Tutora: Marta Guinau i Sellés

Cotutor: Manuel J. Royán Cordero

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics 2014 – 2015 (UB-UAB)

Juliol de 2015

Abstract

This paper presents an analysis of the rockfalls that take place in a scarp and they are detected using a LiDAR. The pilot study area, which is located at the Puigcercós cliff (Pallars Jussà), has been scanned since 2007, with these scans we managed to detect 4072 rockfalls. In addition with these detected rockfalls we obtained the relationship between magnitude and frequency. It has allowed to compare with other inventoried movements. Also part of the study is focused on analyzing the rockfalls and the deformation of the areas where there have been large rockfalls before, with the aim of detecting the behavior of the cliff after that they take place. From the intensity data and the RGB data of a photograph we tried to extract lithologies. With these we found which of these are more likely to cause rockfalls. Finally, it has tried to find a seasonal pattern that allows to deduce if the weather has any contribution that accelerate the rockfalls. All these results have been obtained from LIDAR data and have been made with the aims to improve the knowledge about the studied scarp and to explore all the information that LiDAR data provide us.

Keywords: Laser scanner · Monitoring · Rockfall · Lithology · Intensity

Resum

Aquest treball presenta un anàlisi dels despreniments que es produeixen en un escarpament i que són detectats a partir de les dades LiDAR. Per realitzar-ho s'ha escanejat des del 2007 la àrea d'estudi pilot de Puigcercós (Pallars Jussà) on s'han detectat 4072 despreniments. Amb aquests despreniments detectats s'ha obtingut la relació magnitud freqüència que ha permès comparar l'escarpament amb altres moviments inventariats. També s'ha centrat part de l'estudi en analitzar els despreniments i la deformació en les àrees on s'han produït despreniments de grans dimensions, amb l'objectiu de detectar el comportament de l'escarpament després de que aquests es produeixin. A partir de les dades d'intensitat i de les dades d'RGB d'una fotografia s'han extret les litologies alhora que s'ha trobat quines d'aquestes litologies són més propenses a produir despreniments. Finalment, s'ha intentat buscar un patró estacional que permeti deduir si existeix alguna component climàtica que acceleri els despreniments. Tots aquests resultats s'han obtingut a partir de les dades LiDAR i s'han realitzat amb els objectius de caracteritzar millor l'escarpament estudiat i d'explorar tota la informació que ens aporten les dades LiDAR.

Paraules clau: Escàner làser · Monitoreig · Despreniments · Litologia · Intensitat

1. Introducció

L'ús de dades LiDAR en les investigacions de moviments de massa ha crescut de manera considerable al llarg de la darrera dècada (Derron i Jabodeyoff, 2010) esdevenint una nova font de dades de gran valor per a recerques en camps com la geomorfologia, la geoestadística, la teledetecció i els Sistemes d'Informació Geogràfica (Jaboyedoff et al. 2010).

Els escanejos de dades LiDAR es poden realitzar des de mitjans aerotransportats, coneguts per les seves sigles ALS (*Airbone Laser Scanning*) o bé des de la superfície terrestre mitjançant sensors TLS (*Terrestrial Laser Scanning*). Amb aquest darrer tipus d'instrument és amb el que s'ha realitzat el present estudi.

Els sensors TLS permeten obtenir escanejos molt més detallats de les zones amb pendents més elevats (difícilment escanejables pel sensors ALS). Això, juntament amb la possibilitat de poder situar el sensor a distàncies molt més pròximes de les zones a estudiar, i per tant obtenir núvols de punts molt més densos i precisos, ha comportat que el TLS s'hagi acabat emprant per realitzar nombrosos estudis relacionats amb els moviments de massa (Abellan et al. 2014; Oppikofer et al, 2009).

Entre d'altres processos les dades LiDAR serveixen per caracteritzar els desprendiments de roques que es produeixen en els escarpaments. Dins d'aquests processos es poden diferenciar els desprendiments que es produeixen per caiguda de roques (*rock falls*) dels desprendiments produïts per bolcada (*rock topples*) (Varnes, 1978). Els primers estan caracteritzats per ser moviments espontanis que mobilitzen blocs de roca que es separen de la paret a partir de discontinuïtats tals com fractures, plans d'estratificació o juntes. En canvi, en els *rock topples* es produeix una component rotacional en direcció al vessant que acaba desencadenant un desprendiment d'una columna o placa de material. Aquests desprendiments, igual que els *rock falls*, es produeixen al llarg d'una discontinuïtat. (Varnes, 1978)

Aquest darrer tipus de moviment es pot classificar com a *block toppling* o *flexural toppling*. Els primers corresponen a aquells processos que estan ben definits per discontinuïtats basals, on la roca és relativament massiva. Aquests tipus de moviment poden començar produint-se molt lentament però en estats propers a la caiguda la seva deformació s'accelera (Hung et al. 2014). Els moviments de tipus *flexural toppling* es caracteritzen per tenir uns espaiats molt petits, associats a deformacions molt lentes que tendeixen a auto estabilitzar-se, es produeixen a gran escala en materials relativament febles i fissibles. Els desprendiments que es produeixen no estan associats directament a cap pla de discontinuïtat basal (Hung et al. 2014).

Des d'aquesta perspectiva, aquest treball es centra en la caracterització dels desprendiments que es produeixen en un escarpament a partir de les dades LiDAR capturades amb un sensor TLS.

En aquest treball es fan servir metodologies que ja han estat usades amb anterioritat en altres estudis (Abellan et al. 2010 i Royan et al., 2014) ajudant a consolidar l'ús de dades LiDAR per a l'estudi dels processos que es produeixen en els escarpaments. A més a més, la realització d'aquest treball es justifica per la necessitat de seguir analitzant el comportament de l'escarpament de la zona d'estudi seleccionada, amb l'objectiu d'extreure el màxim coneixement possible sobre els desprendiments que es produeixen, millorar les metodologies que s'estan fent servir i sistematitzar els anàlisis per a seguir perfeccionant la detecció i predicció de grans desprendiments.

A més a més, a diferència d'altres treballs realitzats amb dades LiDAR en escarpaments (Oppikofer et al. 2009; Abellan et al. 2010 o Royan et al. 2014 entre d'altres), que estan més centrats en la predicció dels desprendiments, en aquest treball es pretén investigar la relació magnitud freqüència dels desprendiments ocorreguts i els seus possibles condicionants com ara la seva litologia, el període de l'any en que ocorren o la ocurrència de grans desprendiments excepcionals.

Tots els resultats que es presenten responen a la necessitat final de caracteritzar l'escarpament. Analitzant els processos que s'estan duent a terme que han estat detectats a partir del monitoreig de dades LiDAR.

1.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball consisteix en realitzar l'anàlisi de l'evolució de despreniments a l'escarpament de Puigcercós a partir de la comparació multitemporal de dades LiDAR obtingudes mitjançant un TLS. Aquest anàlisi es materialitza a partir dels següents objectius específics.

- a) Anàlisi de la relació magnitud-freqüència dels despreniments.
- b) Anàlisi de la relació dels despreniments generals amb les zones afectades per esdeveniments excepcionals.
- c) Anàlisi de la relació entre els despreniments i la litologia.
- d) Anàlisi temporal dels despreniments (relació estacional).

2. Zona d'estudi

La zona on s'ha realitzat l'estudi es localitza a la conca de Tremp aquesta conca està situada al nord oest de Catalunya, a la província del Pallars Jussà (Fig. 1a). La conca de Tremp, que es troba encaixada entre els relleus que conformen el Prepirineu meridional, forma part de la zona central de la Conca Sudpirinenca d'Avantpaís (Cuevas, 1992).

Geològicament la conca està reblerta d'una seqüència de materials sedimentaris de l'eocè. Aquesta seqüència es troba en disposició subhoritzontal i en l'escarpament estudiat s'alterna en forma de capes de gruix variable de calcàries, gresos i margues grises (Cuevas, 1992).

La zona d'estudi, anomenada l'Espadat, correspon a un escarpament de morfologia semicircular i de longitud aproximada de 200 metres que es troba al turó on va estar situada la població de Puigcercós, actualment, Puigcercós vell (Fig. 1b). Aquest escarpament correspon a la cicatriu de coronació que produí un esclavissament de terres que es

desencadenà la nit del 13 de gener de 1881 (Vidal, 1881), i que comportà l'abandonament i reubicació del poble.

Els mecanismes principals pels quals es produeixen les caigudes de roques és *rock toppling* (Royán et al. 2015) (*block toppling* segons la classificació de Hungr) tot i que també alguns despreniments poden estar controlats per mecanismes de *rock fall* (Fig. 1c). Aquests despreniments estan condicionats per la intersecció subhoritzontal de la estratificació amb un conjunt d'esquerdes de tensió verticals subparaleles a la paret de la roca (Blanchard et al. 2008). Per aquest motiu la grandària i el dinamisme dels blocs inestables i el mecanisme de caiguda dels despreniments més grans estan estretament controlats per la presència de les esquerdes de tensió (Royan et al. 2014).

Concretament la part de l'escarpament que s'ha estudiat correspon a una àrea de 2633,38 m² situada entre l'extrem esquerra i la zona central. Amb una alçada màxima de 27 metres i una longitud de 123 metres (Fig. 1d). Aquesta secció de l'escarpament és la que presenta una major activitat com s'ha demostrat en els treballs realitzats per Abellan et al. (2010) i Royan et al., (2014).

Gràcies a la bona conservació de l'escarpament, a la recurrent activitat que s'observa i a la seguretat amb la que es poden efectuar les captures de dades aquesta zona ha esdevingut en els darrers anys una zona pilot d'estudi. Prova d'això són els diferents estudis que s'han realitzat en aquest escarpament. Entre els més destacats, l'estudi per detectar i predir caigudes de roques a partir de dades LiDAR (Abellan et al. 2010) o els diferents anàlisi de la deformació prèvia al desencadenament del major despreniment detectat a partir, també, de dades LiDAR (Royan et al. 2014, 2015) on es conclou que els despreniments s'acumulen a les zones d'activitat.

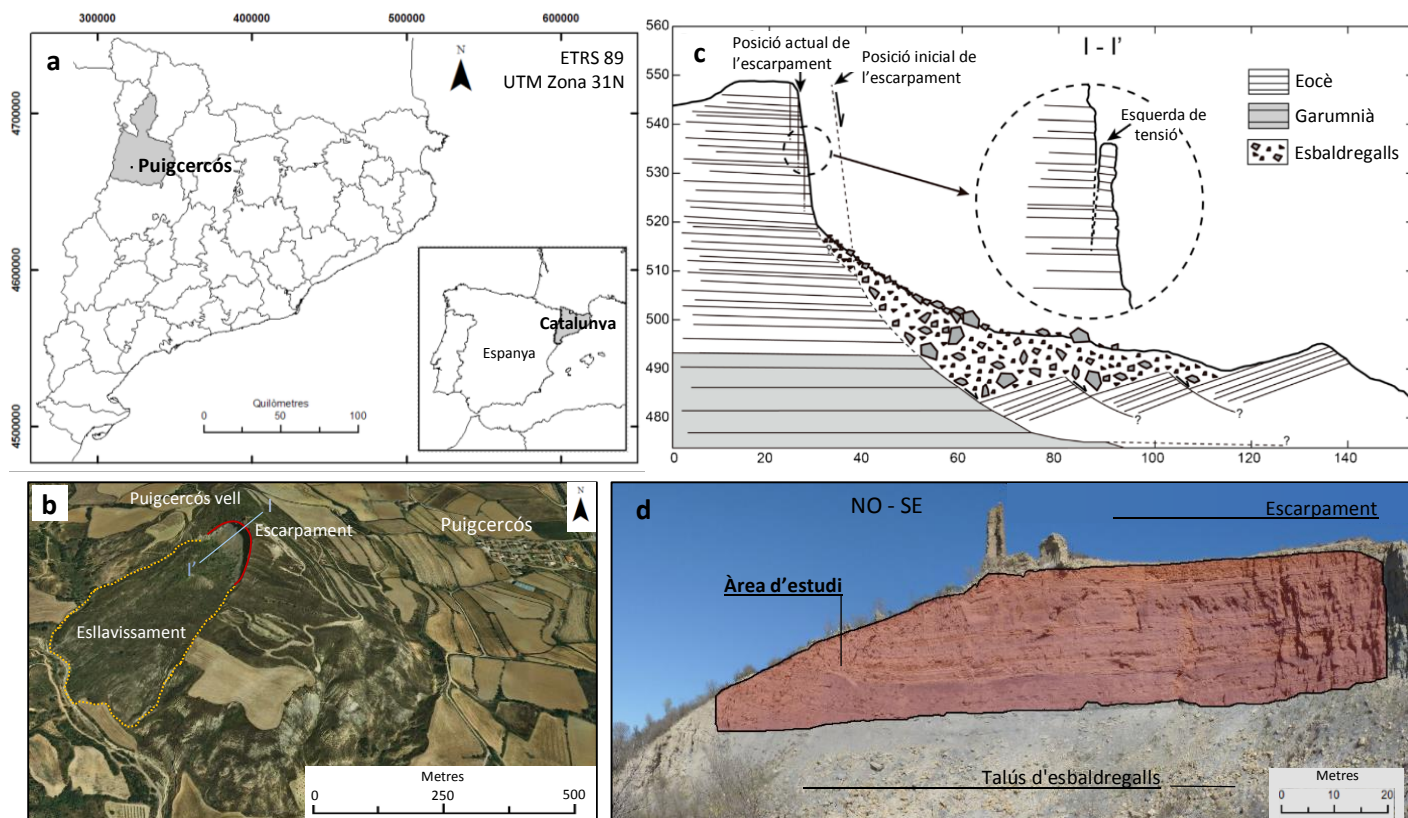


Figura 1 – a) Localització de l'àrea d'estudi (Catalunya). b) Projectió de la fotografia aèria. L'escarpament està indicat amb la línia vermella. c) Perfil transversal esquemàtic I-I' de l'escarpament de Puigcercós. d) Imatge de l'escarpament de Puigcercós. La zona d'estudi està indicada en color vermell.

3. Metodologia

La metodologia que s'ha fet servir en aquest projecte és la que es resumeix en el *workflow* de la figura 2 i s'explica en els següents apartats.

3.1. Tractament i anàlisi de dades LiDAR

3.1.1. Adquisició de dades

L'adquisició de dades s'ha realitzat mitjançant un TLS ILRIS-3D de la companyia *Optech*. Aquest aparell consta d'un dispositiu que actua d'emissor i receptor d'un raig làser d'ona infraroja i un sistema interior de miralls que li permet fer l'escombrat de la paret. De les especificacions tècniques de l'aparell s'extreu que pot assolir una precisió de 7 mil·límetres quan s'escaneja a una distància de 100 metres. El càlcul dels punts es realitza a partir de la posició interna dels miralls i del temps de vol del raig làser des de que surt de l'aparell fins que hi retorna després d'haver rebotat en la superfície escanejada. (Petrie i Toth, 2008). Amb aquestes dades, es poden obtenir les tres coordenades de tots els punts que conformen el núvol de punts de la zona escanejada. A més a

més, també s'emmagatzema la intensitat, que correspon a l'energia amb la que retorna el raig làser a l'aparell.

Per tal de cobrir l'àrea d'estudi es realitzen 2 escanejades amb una superposició del 35%. L'espaiat entre els punts que conformen el núvol de punts està situat entre 3 i 6 cm i la desviació estàndard de l'error instrumental i metodològic calculat és de 1.68 cm (Royan et al., 2014).

Per aquest estudi s'han fet servir un total de 28 captures espaiades en el temps (Fig. 3), compreses des de la captura inicial realitzada el 29 de setembre de 2007 fins l'última captura realitzada el 24 de març de 2015. Al llarg de tot el període de captura de dades s'han fet servir lapses de temps diferents. Essent l'espaiat màxim de 376 dies i el mínim de 25 dies.

3.1.2. Alineació i comparació de núvols de punts

Degut al fet que les captures no estaven georeferenciades s'ha hagut de realitzar l'alineació dels 28 núvols de punts. En aquest cas, el sensor atorga unes coordenades on l'origen (0,0,0) es

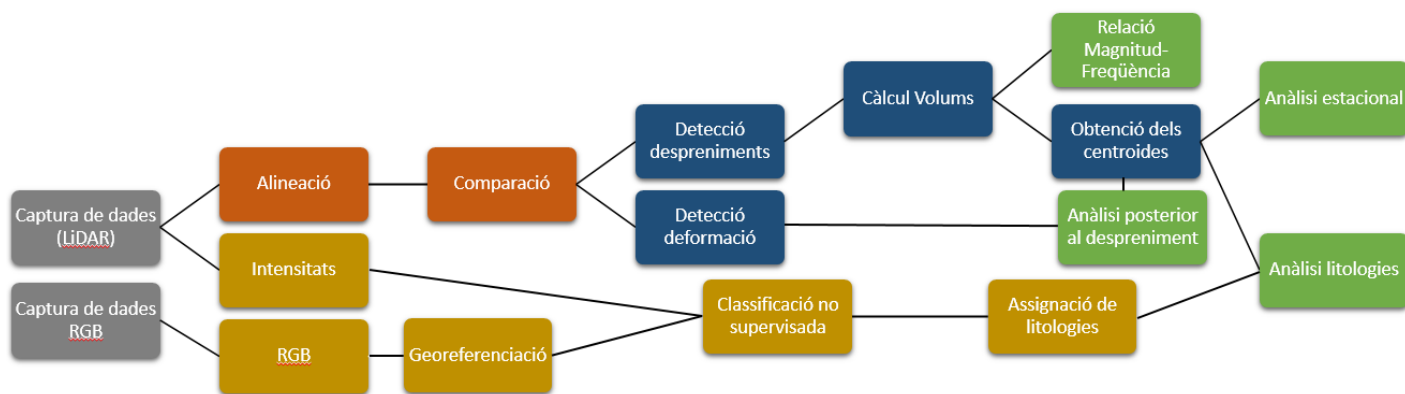


Figura 2 – Esquema amb la metodologia usada. En gris captura de dades; en taronja programari IMInspect; en blau programari Matlab; en groc programari ArcGIS i en verd resultats obtinguts.

2007	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC	2008	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC
2009	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC	2010	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC
2011	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC	2012	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC
2013	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC	2014	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DEC
2015	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL																		

Figura 3 – Mesos en els que s’han realitzat els escanejos a l’escarpament de Puigcercós.

situa en el centre de l’aparell. Per aquest motiu s’ha fet servir el mòdul IMInspect del programari Polyworks (InnovMetrics) per realitzar l’alineació.

El procediment d’alineació s’ha desenvolupat seguint la següent seqüència iterativa: (a) es selecciona el núvol de punts més antic [P0] com a referència; (b) es seleccionen les dades obtingudes en la següent captura [P1] com a dades georeferenciables; (c) s’alineja [P1] respecte [P0]; (d) el núvol de punts [P1] esdevé la referència i les dades obtingudes a la següent captura [P2] són les que s’alineen repetint tota la seqüència fins arribar a la última captura disponible. L’alineació citada en l’anterior apartat (c) es du a terme en dues etapes. Primerament es realitza una alineació per assignació de punts homòlegs que serveix per obtenir una primera aproximació dels núvols de punts. Un cop les dades estan més o menys alineades es refina l’alineació obtenint la georeferenciació final aplicant l’algoritme iteratiu de punts propers ICP (Iterative Closest Point) (Chen and Medioni, 1992). Aquest algoritme aconsegueix atorgar a tots els punts les coordenades que fan mínima la distància entre els dos núvols de punts.

Per a una òptima alineació s’ha seleccionat una àrea d’interès eliminant la vegetació i el talús d’esbaldregalls. A més, al llarg del procés iteratiu d’alineació també s’ha anat ignorant totes les àrees que poden estar subjectes a canvi. Tan per haver-se detectat deformació com per haver-se produït un despreniment.

La comparació, que també es realitza amb el mateix programari, consisteix en el càlcul de la distància entre els escanejos, exportant-se un nou núvol de punts que té les coordenades (X,Y,Z) de l’escaneig de referència al qual se li afegeix com a atributs les diferències entre els escanejos que han estat comparats.

Donada la geometria de l’escarpament i la possibilitat de poder situar el LiDAR de manera que el raig làser incideix amb perpendicularitat a la paret, les comparacions s’han fet només a partir de les distàncies de l’eix Y, que és l’eix perpendicular a l’escarpament. Per aquest motiu el resultat final de la comparació consisteix en un fitxer que té les coordenades (X,Y,Z) i l’atribut dif(Y).

3.1.3. Detecció de despreniments

Amb el resultat anterior s'obtenen les diferències que es produeixen al llarg de l'eix Y entre dues captures consecutives realitzades a l'escarpament. Aquestes diferències s'han interpretat com un despreniment quan el valor de dif(Y) ha resultat positiu i com a deformació quan el valor de dif(Y) ha estat negatiu. Tanmateix, cal remarcar que la comparació d'escanejos ens determina estrictament el guany o pèrdua de material entre dos escanejos. Per aquest motiu en aquest treball els despreniments detectats (pèrdua de material) poden referir-se a despreniments o bé a altres mecanismes que generin pèrdua de material entre dues captures que no siguin estrictament mecanismes de *rock fall* o *block toppling*. De la mateixa manera, el guany de material pot correspondre's amb l'existència de deformació al llarg de l'eix Y en el sentit de la paret cap a l'aparell o bé com acumulació de material.

Les dades obtingudes de la comparació s'han filtrat eliminant els punts on la dif(Y) no superés el llindar de 0.03 m. Aquest valor s'ha pres per eliminar la major quantitat de soroll possible.

Per obtenir el conjunt de punts que representen un despreniment (un clúster) s'ha emprat la metodologia descrita per Tonini i Abellan (2014) que es basa en realitzar a) un filtratge de soroll aplicant l'algoritme de búsqueda de clusters DBSCAN (*Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise*) (Ester et al., 1996) amb l'objectiu d'eliminar tots els punts que no es consideren despreniments. b) Un filtratge manual on s'ha eliminat aquelles agrupacions de punts que malgrat haver superat el procés de filtrat de l'apartat (a) no són despreniments, típicament errors de vora associats a les fractures subverticals. (c) Assignació i identificació de cadascun dels despreniments a partir de l'aplicació, novament, de l'algoritme DBSCAN.

El DBSCAN és un algoritme que a partir dels paràmetres d'entrada (a) "mínim número de punts veïns per a formar un clúster" i (b) "distància màxima on buscar els punts veïns" recorre tot el núvol de punts cercant en cada punt si existeixen

un mínim número de punts veïns (paràmetre a) que estiguin dins de la distància de cerca (paràmetre b). En cas afirmatiu, el resultat és un clúster conformat per tots els punts que compleixen (a) i (b). En la realització d'aquest estudi s'ha pres com a número mínim de punts per formar un clúster: 10 i distància màxima de cerca: 0.10 metres.

Després d'aplicar aquest procés a les 27 comparacions entre escanejos, el resultat que s'ha obtingut és el número total de despreniments que s'han produït al llarg del temps d'observació de l'escarpament.

3.1.4. Càlcul de volums

El volum dels despreniments detectats mitjançant el procediment anterior es calcula a partir de la triangulació de tots els punts que el conformen el despreniment. D'aquesta manera s'ha calculat el volum de tots els prismes triangulars que es poden formar a partir de tots els punts que conformen el clúster detectat. Per tant, mitjançant el programari MATLAB (MathWorks): (a) es realitza una triangulació de tots els punts que representen el despreniment; (b) posteriorment es calcula l'àrea de cadascun dels triangles que s'ha generat. Com que la triangulació dels punts dona com a resultat una superfície (2D) és necessari multiplicar per una alçada per obtenir els prismes triangulars i per tant el seu volum; (c) es multiplica l'àrea obtinguda a (b) per la màxima dif(Y) dels tres punts triangulats; (d) es suma tots els volums obtinguts i s'obté el volum total del despreniment.

A l'hora de multiplicar un triangle per obtenir el prisma triangular s'ha optat per la dif(Y) màxima dels tres punts perquè es considera que, malgrat poder donar en alguns casos volums majors als reals, els resultats s'ajusten molt millor als volums reals.

3.1.5. Obtenció centroides

L'obtenció dels centroides s'ha realitzat per poder reduir a un únic punt qualsevol despreniment, d'aquesta manera els anàlisis basats en la situació espacial es poden realitzar amb molta més facilitat. Tot i així, per no atorgar característiques espacials

un únic punt quan el despreniment ha estat molt gran s'ha descartat calcular el centroide dels esdeveniments que tenen un volum superior a 0.1 m^3 .

El càlcul del centroide s'ha realitzat també amb el programari MATLAB (MathWorks) obtenint un nou núvol de punts on cada punt té com a coordenades (X,Y,Z) la mitja de les coordenades (X,Y,Z) de tots els punts que conformen un despreniment.

3.2. Relació despreniments-litologia

La intensitat és una dada que proporciona l'aparell LiDAR quan es fa l'escaneig d'una zona. Aquesta dada emmagatzema la quantitat d'energia amb la que arriba a l'aparell el raig làser després d'haver rebotat a la paret. Per aquest motiu la intensitat pot veure's alterada per factors com la distància, la reflectivitat del material, l'angle d'incidència, la humitat i les condicions climàtiques. Però el que posa en rellevància l'ús de les dades d'intensitat és la seva independència respecte la il·luminació del lloc. (Pesci et al. 2008)

Altrament, les dades RGB, que s'obtenen mitjançant una càmera fotogràfica, emmagatzemen la resposta energètica del material en l'espectre visible. Aquesta resposta que és una propietat del material i varia segons l'energia (llum) que es reflexa, depèn, entre altres factors, de la humitat o de la rugositat.

Per explotar aquesta capacitat per poder discernir entre diferents materials a partir de les dades d'intensitat i d'RGB s'ha utilitzat la següent metodologia amb la finalitat de trobar les relacions despreniments – litologies existents.

3.2.1. Anàlisi de les dades RGB

Per analitzar les dades RGB s'ha georeferenciat una imatge capturada amb una càmera fotogràfica. Aquesta georeferenciació s'ha fet a partir de la identificació de punts homòlegs presents tant a la imatge fotogràfica com al núvol de punts que s'ha emprat de referència. A partir d'aquesta assignació de punts homòlegs mitjançant l'eina de transformació *spline* de deformació elàstica vectorial del programari ArcGIS (ESRI) s'obté la imatge RGB correctament georeferenciada.

Per obtenir les diferents litologies s'efectua una classificació no supervisada. La finalitat d'aquesta classificació és assignar a cada píxel una classe a la que posteriorment s'associarà una litologia. Amb l'objectiu d'obtenir una classificació que representi les classes de píxels més diferents possibles aquesta classificació aplica un procés iteratiu de *clustering* jeràrquic on es van generant les diferents classes a partir de la màxima distància euclidiana entre els valors de cada píxel.

La finalitat d'utilitzar una classificació del tipus no supervisada respon a l'interès d'intentar objectivitzar els processos, ja que en una classificació no supervisada l'usuari no ha de determinar cap fitxer patró que indiqui quins píxels corresponen a cada classe.

Els paràmetres que s'han introduït per generar la classificació no supervisada han estat: (a) que el número de classes sigui igual a 10 i (b) que el número mínim de píxels que conformen una classe siguin 20.

Un cop s'ha generat la nova imatge ràster on tots els píxels estan classificats en una de les 10 classes obtingudes s'ha efectuat una correlació visual entre la nova imatge ràster i una imatge normal on s'aprecien les diferents capes litològiques. Assignant a cadascuna de les classes el tipus de litologia corresponent.

Per validar el procés, primer s'ha efectuat la classificació no supervisada en una zona petita però representativa del conjunt de l'escarpament i posteriorment, amb les mateixes signatures espectrals, s'ha realitzat una classificació no supervisada d'una zona més gran.

3.2.2. Anàlisi de les dades d'intensitat

Les dades d'intensitat estan emmagatzemades com un atribut en tots i cadascun dels punts que conformen un escaneig LiDAR.

Per procedir anàlogament a la metodologia que s'ha emprat en l'apartat anterior primer ha estat necessari transformar el núvol de punts a una imatge ràster. Per aquest motiu s'ha fet servir el programari ArcGIS (ESRI) aplicant una

transformació *Point to raster*. En aquesta transformació s'ha especificat que cada cel·la del ràster assumeixi el valor d'intensitat del punt que contingui, o bé una mitja aritmètica, si conté més d'un.

A partir de la imatge ràster resultant s'ha fet servir la mateixa metodologia explicada amb anterioritat: (a) s'ha efectuat una classificació no supervisada en una zona petita de l'escarpament. (b) s'ha efectuat una correlació entre classes i litologia; (c) amb les mateixes signatures espectrals s'ha efectuat la classificació d'una zona més gran de l'escarpament; (d) s'han aplicat les mateixes correlacions de l'apartat (b).

4. Resultats

4.1. Despreniments detectats.

En la Taula I es mostren els resultats obtinguts per a cadascuna de les 27 comparacions realitzades.

Al llarg del període d'estudi (2733 dies) s'han detectat un total de 4072 despreniments. D'aquests despreniments, prenen especial rellevància per la seva magnitud, el despreniment identificat en l'escaneig del dia 10 d'abril del 2010 amb 397,13 m³; i el detectat el 22 de desembre de 2013 amb 1095,3 m³ de material després, sent aquest el despreniment de major magnitud detectat.

En total la suma de les àrees d'aquests dos despreniments equival a 1270,16 m² que representen un 42,82% de la zona d'estudi. Aquestes dades posen en rellevància l'activitat que es desenvolupa en l'escarpament ja que gairebé la meitat de la zona d'estudi s'ha després en només dos esdeveniments.

El volum de la resta de despreniments analitzats varia des del volum mínim detectat de 0,00026 m³ (que equival al volum d'una pilota de tennis) fins als 90,54 m³ que correspon al tercer despreniment més gran identificat en el període d'estudi.

L'activitat que es produeix a l'escarpament no és homogènia pel que fa a la magnitud dels despreniments ja que s'ha observat que la majoria de despreniments, un 93 %, tenen un volum

comprès entre el mínim, 0,00026m³ i 0.1 m³ (És a dir, un volum màxim de 50 x 50 x 40 centímetres) (Fig. 4).

Taula I - Resultats obtinguts a partir de cada comparació. La columna volums [m³] fa referència a la suma dels volums de tots els despreniments ocorreguts en un mateix període.

Comparació [mes/any]	Dies	Núm. Despreniments	Volums [m ³]
09/07 al 10/07	59	6	92,42
10/07 al 02/08	76	67	8,12
02/08 al 07/08	163	616	36,10
07/08 al 02/09	203	408	13,46
02/09 al 03/09	47	31	0,86
03/09 al 04/10	376	243	411,47
04/10 al 12/10	248	297	102,97
12/10 al 05/11	142	145	30,49
05/11 al 09/11	147	137	31,82
09/11 al 03/12	180	310	14,11
03/12 al 05/12	58	98	42,74
05/12 al 06/12	36	24	0,34
06/12 al 07/12	29	32	0,25
07/12 al 09/12	52	32	0,24
09/12 al 10/12	35	39	30,07
10/12 al 12/12	49	70	11,58
12/12 al 02/13	69	79	1,60
02/13 al 04/13	52	85	1,16
04/13 al 07/13	89	223	22,39
07/13 al 10/13	92	328	16,36
10/13 al 11/13	49	28	0,69
11/13 al 12/13	25	32	1121,43
12/13 al 02/14	58	180	21,76
02/14 al 04/14	50	90	1,17
04/14 al 06/14	70	44	0,47
06/14 al 11/14	111	180	8,22
11/14 al 03/15	168	248	9,16
Mitjana (any)	101,22	150,81	75,24
Totals	2733	4072	2031,44

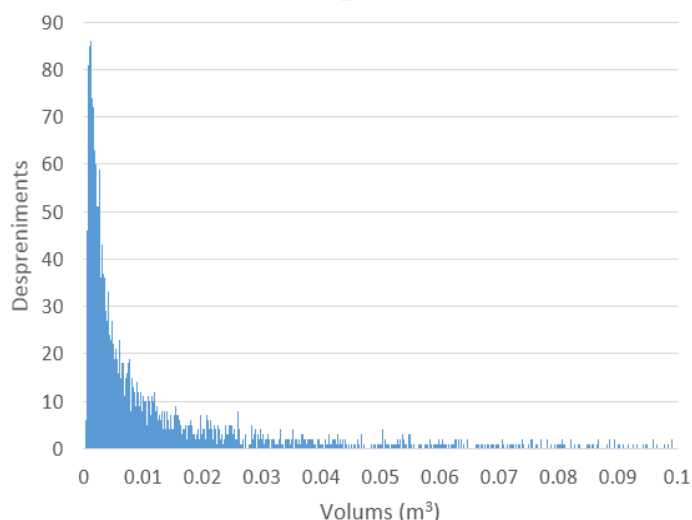


Figura 4 - Histograma dels despreniments. Acotat entre 0 i 0.1 m³. S'està mostrant el 93% dels despreniments.

De la mateixa manera, de l'anterior 93%, un 72,4% correspon a despreniments inferiors a 0.01 m³. Aquestes dades, per tant, ens permeten observar que la magnitud de l'activitat que es desencadena a l'escarpament de Puigercós és inversament proporcional al número de despreniments que s'hi produeixen (Fig. 4).

4.2. Relació Magnitud-Freqüència

La relació magnitud-freqüència acumulada que s'ha trobat després d'analitzar els resultats es pot observar en la figura 5. En aquesta relació s'ha definit la magnitud com el volum en m³ dels despreniments mentre que la freqüència correspon al nombre acumulat de vegades que s'ha produït l'esdeveniment.

L'equació potencial que millor ajusta a les dades és la que és correspon a la següent expressió:

$$y = 53,222x^{-0.686}$$

Esdevenint l'equació que caracteritza la relació magnitud-freqüència de l'escarpament de Puigercós.

En la Figura 5 s'observa una major dispersió dels punts a mesura que la magnitud augmenta. Aquest fet és degut a la menor quantitat de despreniments de grans dimensions que es produeixen.

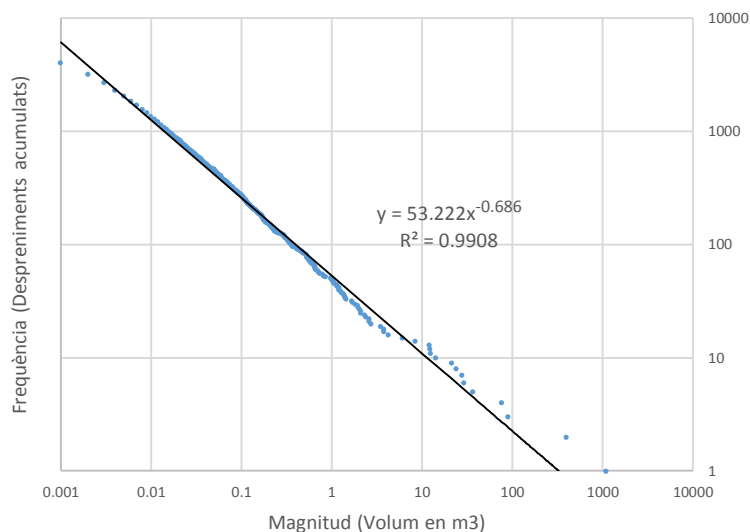


Figura 5 - Relació magnitud-freqüència acumulada.

4.3. Anàlisi en relació als grans despreniments

Els despreniments de roques de petita magnitud, juntament amb la deformació, poden ser indicadors precursors de grans despreniments. Per aquest motiu l'estudi dels despreniments que es produeixen amb anterioritat a un gran despreniment ha pres importància en els darrers anys. A partir de la hipòtesi de que després d'un gran despreniment l'activitat en l'àrea després hauria d'aturar-se (i per tant no haurien d'haver-hi una acumulació de despreniments) es pretén estudiar quin és el comportament que tenen les zones un cop s'ha produït un gran despreniment, ja que els resultats ens poden indicar si s'ha aturat l'activitat o bé s'estan desencadenant els elements precursors d'un nou despreniment, tot indicant que l'activitat segueix present en l'escarpament.

Els grans despreniments que s'han estudiat en aquest apartat corresponen als esmentats en l'inici de l'apartat de resultats. S'han considerat despreniments excepcionals perquè superen en escreix, en un sol despreniment, el volum habitual que es mobilitza al llarg d'un any en tota la zona d'estudi. D'aquesta manera es delimiten per a l'estudi les següents zones: (a) Zona A: Corresponent al despreniment detectat l'abril del 2010, amb una àrea de 353,59 m² i un volum de 397,13 m³; (b) Zona B: Corresponent al

despreniment detectat el desembre de 2013, amb una àrea de 774,04 m² i un volum de 1095,3 m³; i (c) Zona C: Zona de control delimitada per a poder validar els resultats. Té una àrea de 86 m² i no s'hi ha detectat cap despreniment rellevant.

Amb l'objectiu d'ajustar al màxim l'anàlisi i no deixar despreniments que malgrat afectessin al gran despreniment tinguessin el centroid situat fora del perímetre definit s'ha aplicat tan en la Zona A com en la Zona B un *buffer* de 0,5 m al perímetre del despreniment.

Donada l'època en que es produeixen els respectius despreniments en la figura 6 s'evidencia que en la Zona B predominen els despreniments que s'han produït amb anterioritat al gran despreniment mentre que en la Zona A predominen els despreniments posteriors al gran despreniment.

En la Taula II es quantifiquen els resultats que es mostren a la figura 6.

Taula II -Relació dels despreniments detectats abans i després dels grans despreniments. Són les dades corresponent a la figura 6.

Zona	Període	Nº Despr.	Volums [m ³]	Dies
Zona A	Abans	217	3,66	924
	Després	620	73,74	1809
	Total	837	77,40	2733
Zona B	Abans	1399	135,43	2276
	Després	526	31,82	457
	Total	1925	167,25	2733

Per determinar quin és el comportament de l'escarpament, però, es necessita determinar el número de despreniments acumulats en relació a la data d'adquisició. D'aquesta manera es pot observar si es produeix un augment en el número de despreniments. Aquesta representació és la que es mostra en la figura 7 on s'observa que en la Zona A i en la Zona B és produeix un augment continu dels despreniments. En canvi, a la zona de control s'observa que no es produeix cap augment al llarg de tot el període d'estudi.

Taula III - Pendent de les línies d'ajust de la figura 7.

Zona	Abans	Després	Diferència
Zona A	0,2786	0,3586	0.08
Zona B	0,5553	1,0686	0.51
Zona C		0,0138	

A partir de l'estudi de les equacions d'ajust en la Taula III s'observa que en la Zona A el gran despreniment no genera cap variació respecte l'activitat ja que el pendent de les rectes d'ajust no varia considerablement, per contra, en la Zona B a partir del gran despreniment s'observa que la línia d'ajust té un pendent més pronunciat fet que ens indica que l'activitat s'ha incrementat a partir del gran despreniment.

Amb la intenció de trobar alguna variació en el comportament de l'escarpament. També s'ha fet el mateix estudi a partir dels volums. Els resultats es poden veure en la figura 8 i indiquen, igual que en l'apartat anterior, que en les Zones A i B segueix augmentant el volum després del gran despreniment mentre que la Zona C es manté estacionaria. També s'observa que l'acumulació de volum no es produeix de manera lineal sinó que es s'acumula a períodes. Aquest fet ens indica que tan abans com després dels grans despreniments es produeixen altres despreniments que tenen una magnitud rellevant. Aquests despreniments ens indiquen que l'activitat no s'atura i que el que es produeix és una caiguda progressiva que desencadena en despreniments de gran magnitud.

Finalment per justificar l'acumulació de despreniments amb la presència d'activitat en les zones d'estudi s'ha estudiat la deformació existent a partir dels grans despreniments. Per obtenir la deformació en les zones d'estudi s'ha emprat la mateixa metodologia exposada a l'hora d'obtenir els despreniments. L'única diferència recau en el fet que per obtenir els despreniments s'havia filtrat tots els valors inferiors a 0,03 m i en aquest cas per

Llegenda

- Desprendiment anterior
- Desprendiment posterior
- Desprendiment zona de control
- Desprendiments paret

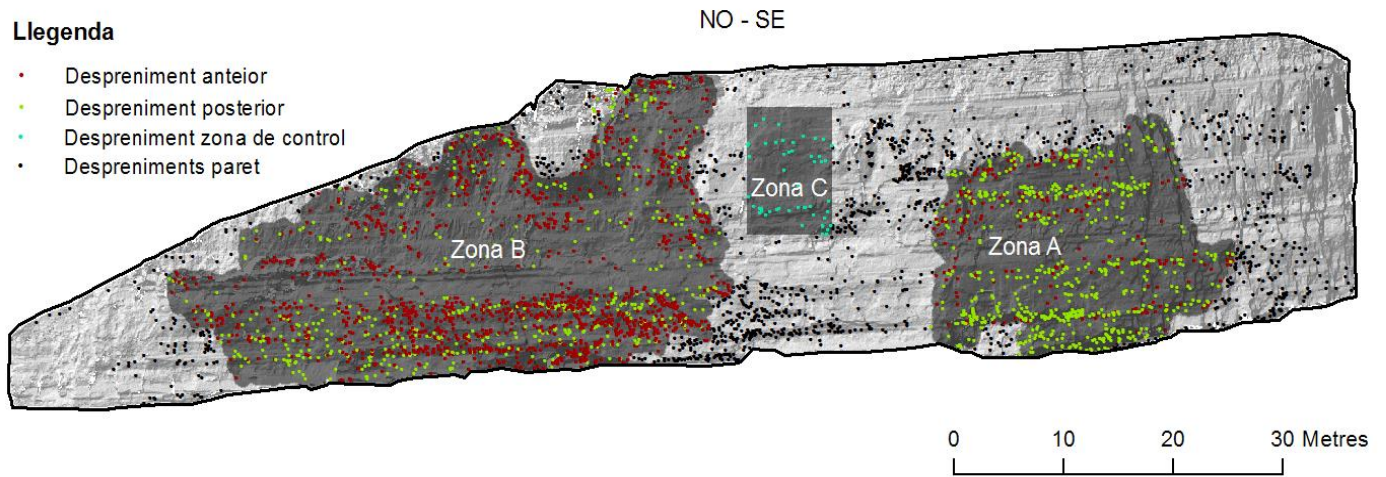


Figura 6 - Zones d'estudi de l'apartat 4.3. En verd els desprendiments posteriors i en vermell els desprendiments produïts amb anterioritat. En blau els desprendiments de la zona de control i en negre la resta de desprendiments.

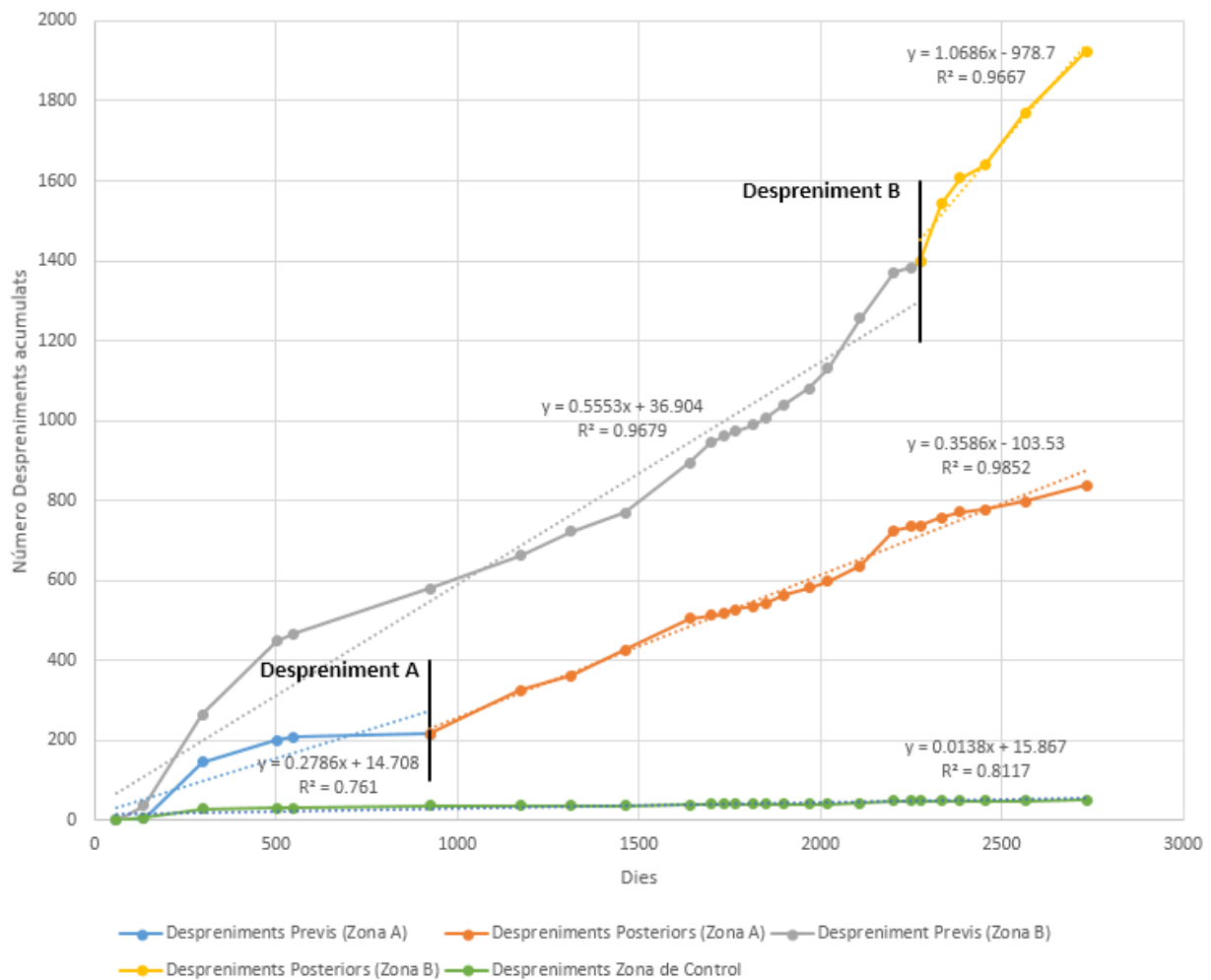


Figura 7 - Representació dels desprendiments acumulats en cada zona d'estudi.

obtenir la deformació s'han filtrat tots els valors que fossin superiors a -0,02 m. D'aquesta manera, en les comparacions realitzades entre diferents escanejos, només s'ha obtingut com a resultat els punts que presenten deformació.

En la figura 9 i la figura 10 es mostren les deformacions que s'han detectat en cada zona d'estudi tan abans dels respectius grans desprendiments com després d'aquests. Com que l'episodi de la zona B s'ha produït recentment, la

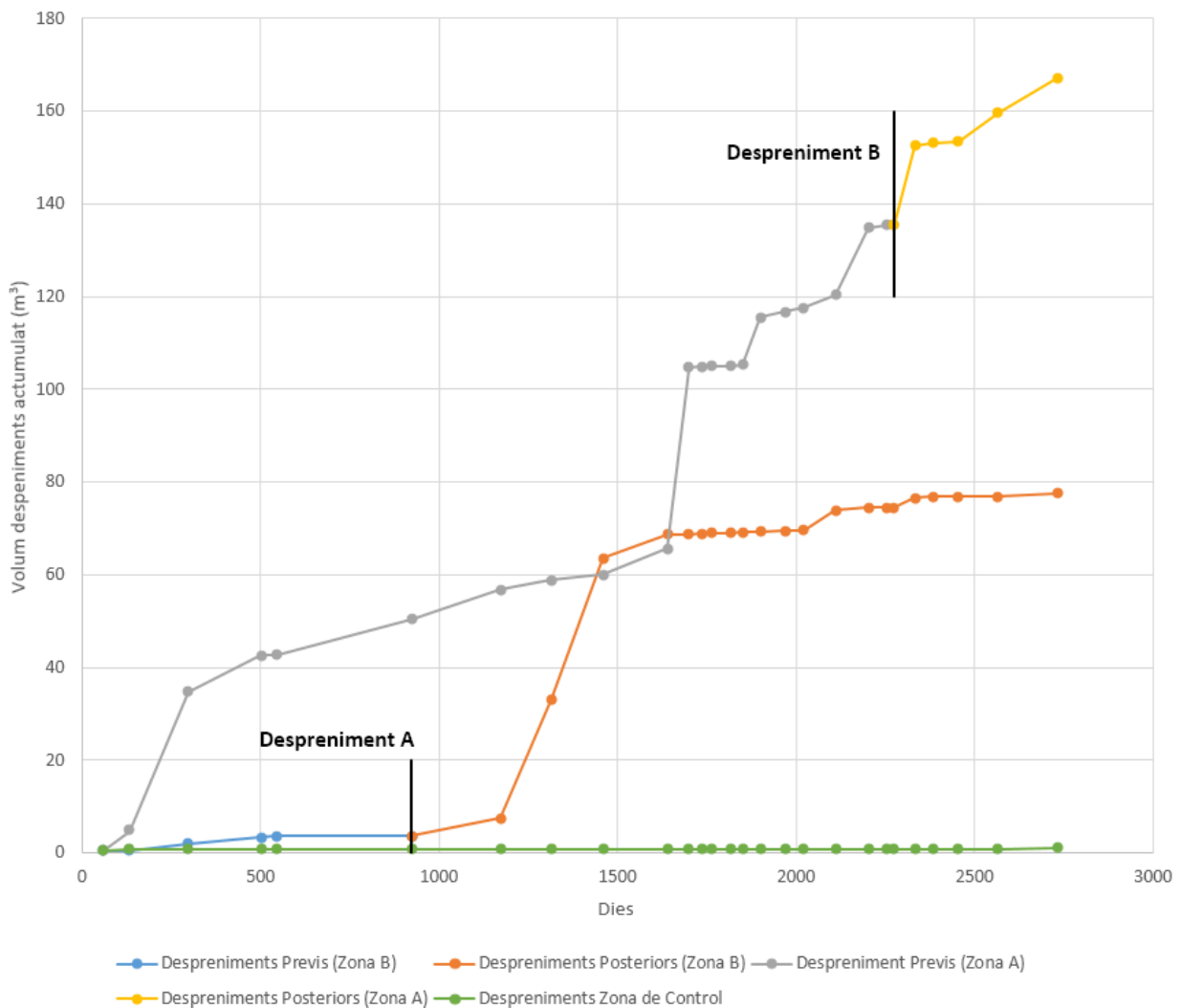


Figura 8 - Representació del volum dels despreniments en cada zona d'estudi.

deformació que es detecta és incipient, però a la Zona A, on el despreniment es desencadena més de 1500 dies abans d'aquest estudi si s'ha observat més deformació. Posteriorment, a la mateixa zona, es detecten dos despreniments de magnitud mitjana, un despreniment va ser detectat el maig de 2011 amb un volum de 21,51 m³ i l'altre es va detectar el setembre del mateix any amb 27,75 m³.

Per aquest motiu la figura 9 mostra la deformació obtinguda en els intervals corresponents.

L'existència de deformació posterior als grans despreniments respon a l'acumulació de despreniments trobada anteriorment dins d'aquestes àrees. Així doncs, s'interpreta que aquestes zones segueixen sent inestables i per tant segueixen estant afectades per la caiguda progressiva de material.

4.4. Relació despreniments - litologia

En aquest apartat es presenten dos resultats, el primer consisteix en la classificació litològica de l'escarpament a partir de l'anàlisi de les dades d'intensitat i de RGB. A partir d'aquest resultat, s'ha analitzat la situació espacial de cada despreniment de manera que finalment s'ha obtingut la relació entre cada despreniment i la seva litologia.

Aquesta part del treball s'ha realitzat sobre dues zones d'estudi. La Zona D consisteix en una zona molt petita de l'escarpament de 178,3 m² (Fig. 11) on les litologies s'observen amb claredat en

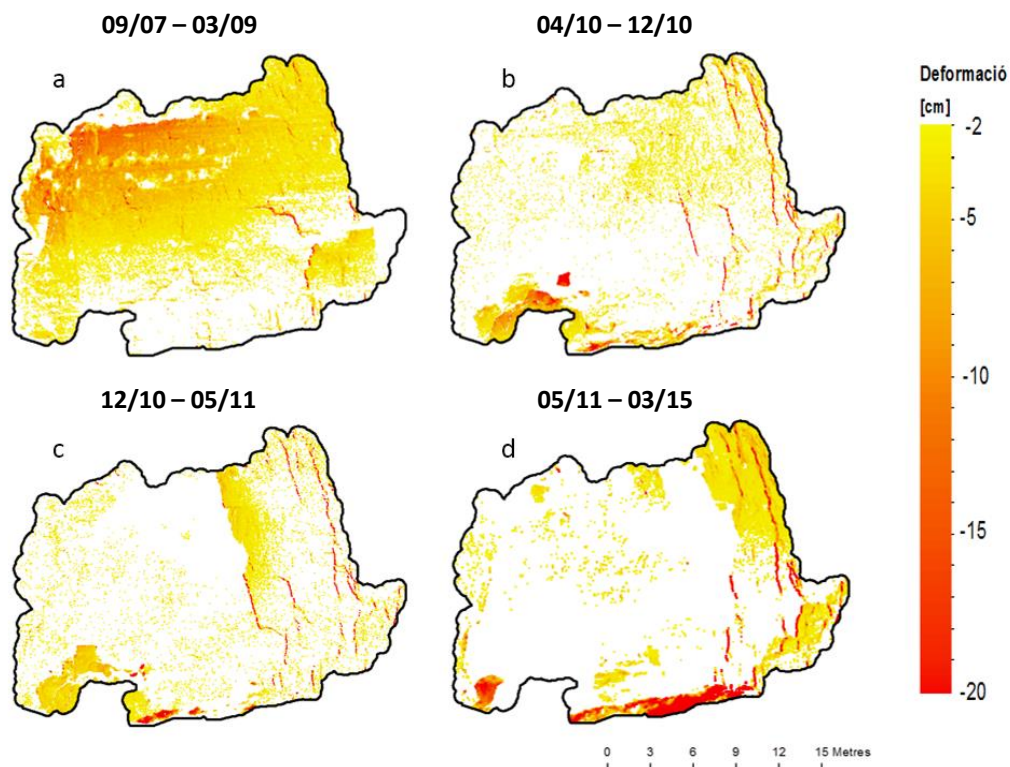


Figura 9 – Zona A: (a) Deformació acumulada prèvia al despreniment. (b) Deformació acumulada entre abril i desembre de 2010. (c) Deformació acumulada entre desembre 2010 i maig 2011. (d) Deformació acumulada entre maig 2011 i març 2015

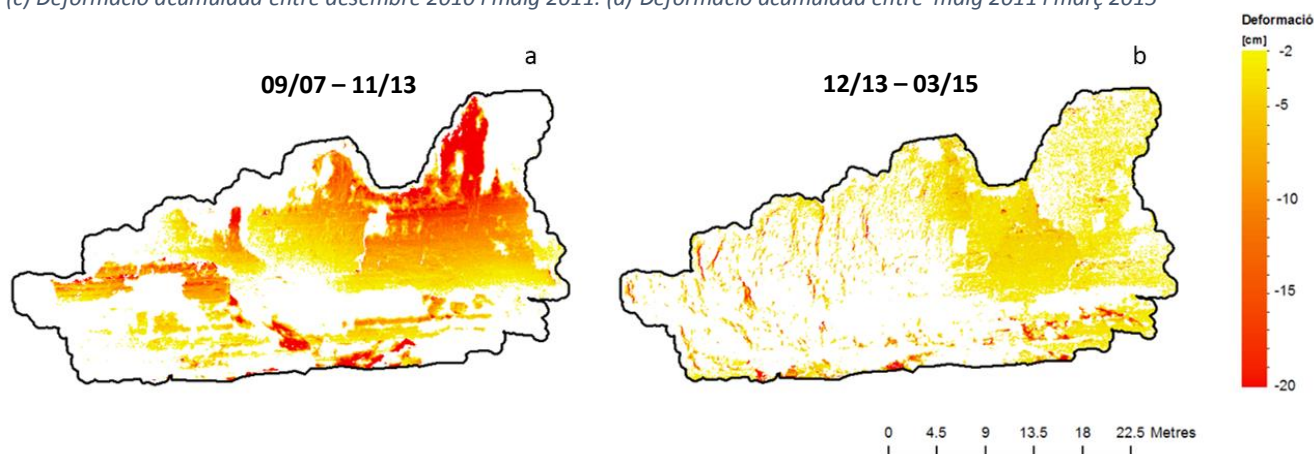


Figura 10 - Zona B: (a) Deformació acumulada prèvia al despreniment. (b) Deformació acumulada després del despreniment.

imatges fotogràfiques. En aquesta zona no es veu cap variació important en el relleu ni s'observen pàtines d'alteració, humitat o zones d'ombra.

La zona E consisteix en una zona més àmplia de la part central de l'escarpament. Té una extensió de 1045,3 m² (Fig. 11). Aquesta zona presenta una major variabilitat d'elements que poden afectar als resultats com per exemple algunes zones d'ombra i una superfície més irregular.

S'ha decidit treballar amb aquestes dues zones per intentar obtenir un resultat el més ajustat possible a la Zona D i traslladar els paràmetres obtinguts a la Zona E.

Els resultats que es mostren en la figura 12 mostren els metres quadrats de cada litologia que s'han obtingut a partir les diferents fonts de dades en les diferents zones d'estudi mentre que en la figura 11 es mostren unes representacions de l'escarpament a partir de les classes litològiques trobades segons les dades d'intensitat (Fig. 11.a) i RGB (Fig. 11.b).

Com s'observa en la figura 12, en els càlculs extrets a partir de les fotografies (RGB) es detecta una litologia (litologia 3) que no es detecta en els resultats extrets a partir de les dades d'intensitat. Aquesta litologia es distribueix en vetes molt primes intercalada entre les capes de la litologia 2.

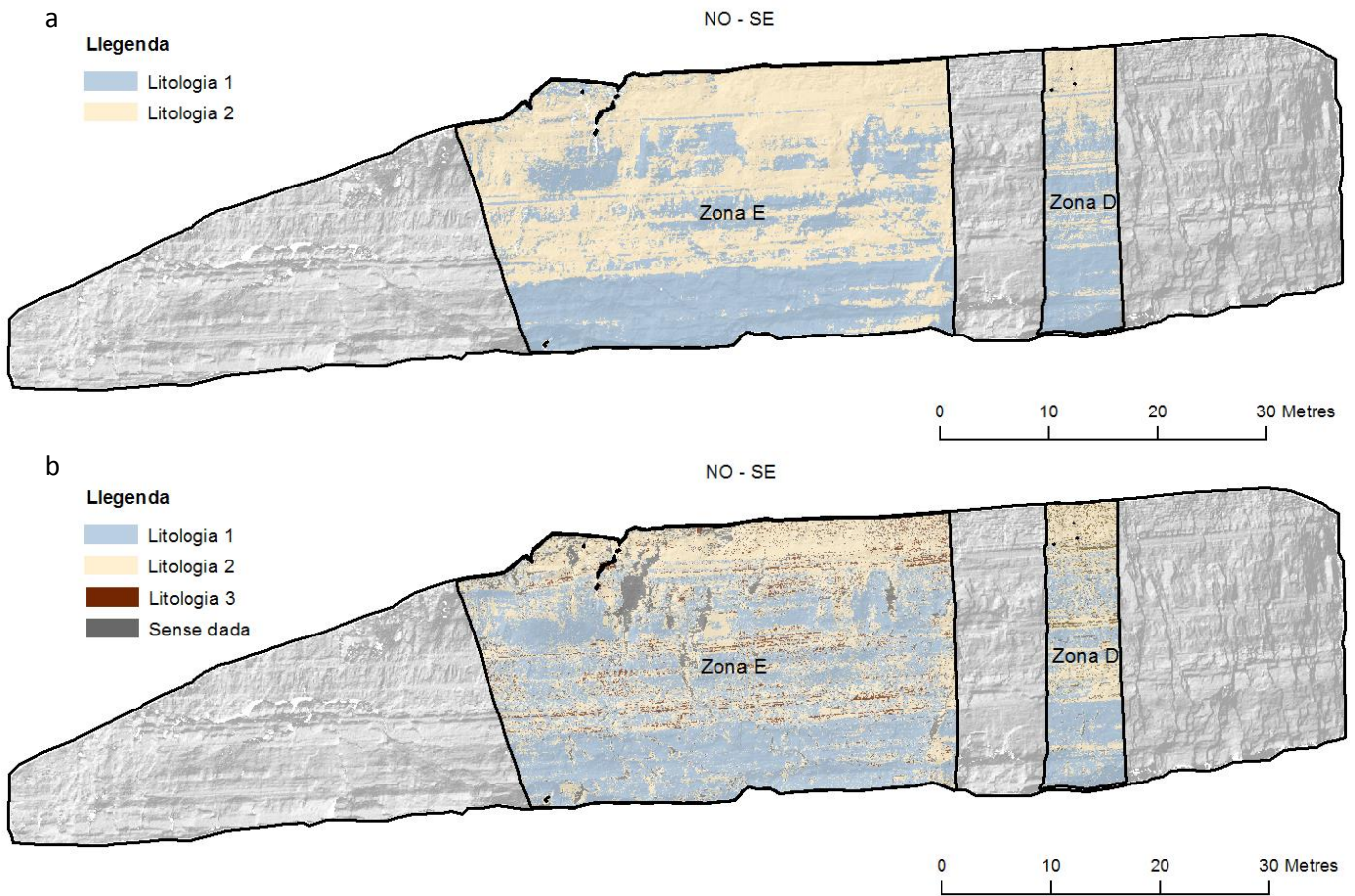


Figura 11 - (a) Resultats obtinguts a partir de les dades d'intensitat. (b) Resultats obtinguts a partir de les dades d'RGB.

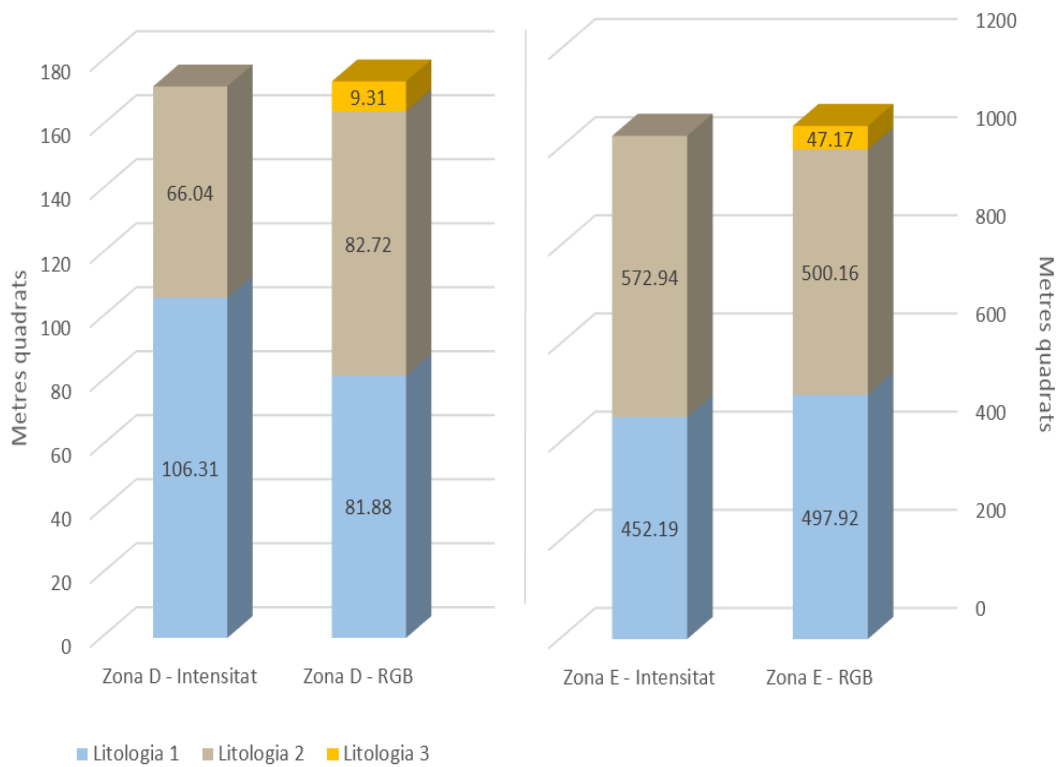


Figura 12 - Número de metres quadrats assignats a cada zona segons la metodologia usada.

Aquest fet denota una manca de contrast entre aquestes dues litologies alhora de ser detectades mitjançant la intensitat. En la zona D és on trobem una major diferència percentual entre els metres quadrats de cada litologia. Això pot ser així perquè al ser una àrea molt petita uns determinats píxels poden haver estat classificats en una classe diferent per culpa de tenir alguna variació en el RGB o en la intensitat fent que el resultat final es vegi afectat. En canvi en la zona E, malgrat existir també alguna zona on es pugui produir alguna classificació errònia, al ser una zona més gran aquests errors queden relativitzats.

El segons resultats que s'han obtingut en aquest apartat s'han extret a partir de combinar els resultats anteriors amb els despreniments obtinguts. D'aquesta manera s'ha pogut assignar a cada despreniment una de les tres litologies detectades.

En la figura 13 es mostra el percentatge de despreniments que s'han detectat en cada litologia. Com es pot observar els despreniments majoritàriament tenen lloc en les zones on s'ha detectat la litologia 1. En les zones de litologia 2 el rang de percentatges de despreniments que s'han detectat va des de l'11,34% fins al 38,07% depenent del mètode i la zona d'estudi. A més a més, cal destacar que, encara que amb petits percentatges, en la litologia 3 detectada mitjançant les dades d'RGB també es detecten despreniments.

Tanmateix, per poder afirmar que la litologia 1 és la litologia on es produeixen el major nombre de despreniments s'ha calculat la densitat de despreniments per a cada litologia.

En aquest cas per calcular la densitat s'ha dividit el número de despreniments que es donen a cada litologia ($N.d$) entre la superfície que ocupa aquesta litologia ($S.l$).

$$Densitat = \frac{N.d}{S.l}$$

D'aquesta manera, com es pot veure en la figura 14 es confirma que a la litologia 1 es on es troba la major densitat de despreniments. A més, els resultats obtinguts mostren que tot i que els

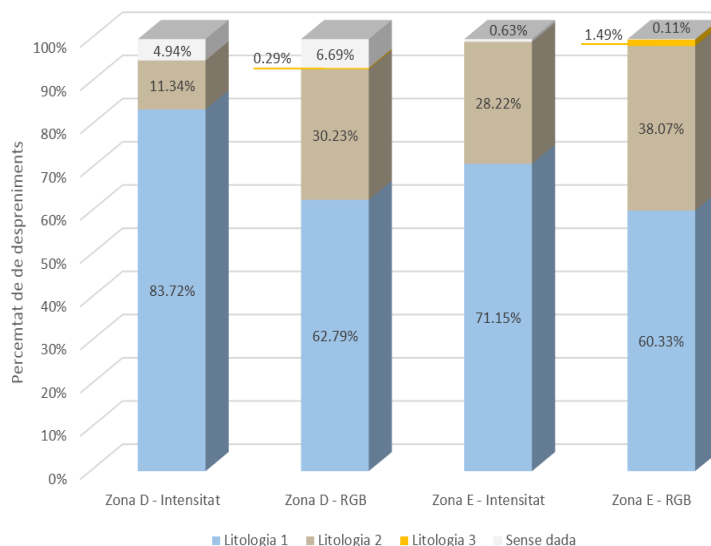


Figura 13 – Percentatge de despreniments segons la litologia, zona d'estudi i metodologia usada.

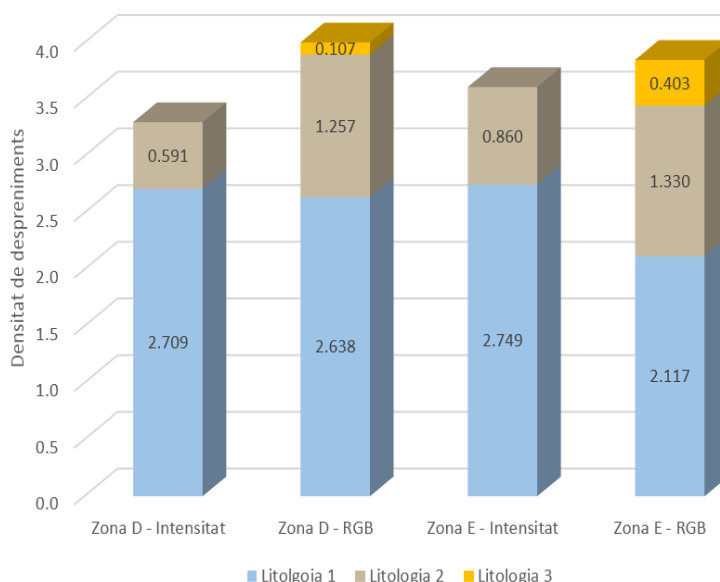


Figura 14 – Densitat de despreniments segons litologia, zona d'estudi i metodologia usada.

resultats de la litologia 1 són molt poc variants entre metodologies i zones d'estudi, els valors de la litologia 2 varien molt depenent del tipus de metodologia usada. En els resultats obtinguts a partir de les dades d'intensitats la densitat és més petita mentre que en les dades obtingudes a partir de les dades d'RGB s'aprecia una densitat sensiblement major.

4.5. Anàlisi temporal dels despreniments

L'anàlisi temporal dels despreniments s'ha efectuat per poder establir una correlació entre les diferents èpoques de l'any i el número de despreniments que es produeixen.

La representació dels resultats s'ha fet a partir de l'agrupació dels mesos corresponents a les estacions de l'any. A més a més, per obtenir els resultats més consistents possibles, s'han triat les sèries de dades que disposaven de millor resolució temporal, és a dir, de major nombre d'escanejos per unitat de temps. Per aquest motiu en les figures 15 i 16 només es representen els despreniments que s'han produït des de l'hivern del 2012 fins a l'estiu del 2014.

Els resultats obtinguts a la figura 15 no ens permeten dir amb claredat que existeixi una estacionalitat. Malgrat sí que s'observa que l'activitat no és regular durant les diferents èpoques de l'any no és possible extreure un patró de comportament amb els resultats obtinguts. De la mateixa manera, la línia de despreniments acumulats ens mostra variacions en el pendent, visualitzant períodes més actius que d'altres, però sense definir un patró repetitiu. Per aquest motiu

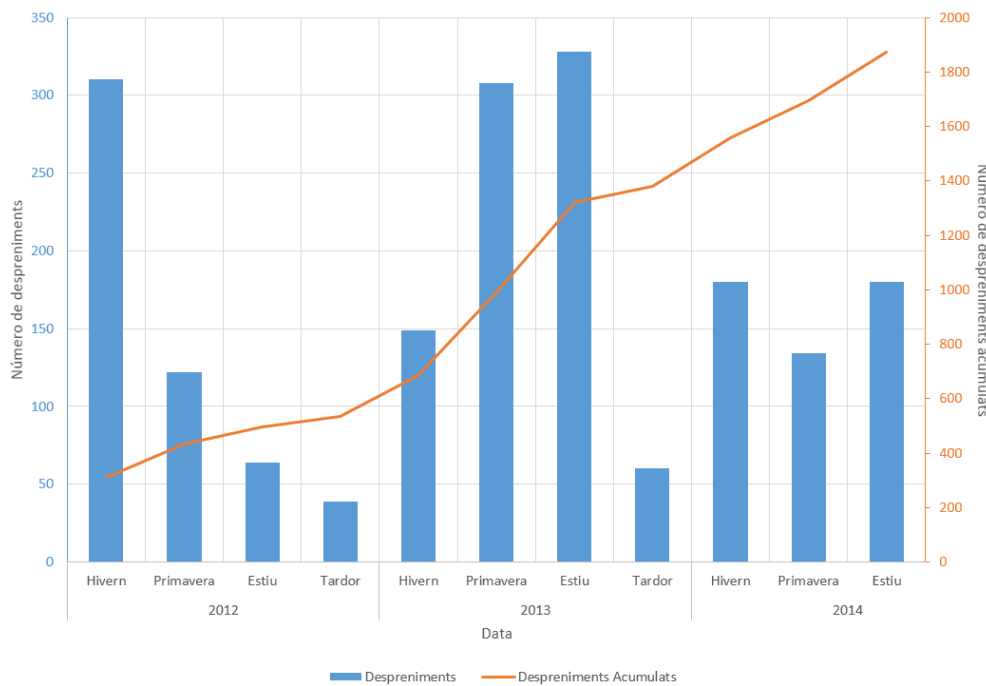


Figura 15 – Relació estacional dels despreniments entre l'hivern del 2012 i l'estiu del 2014

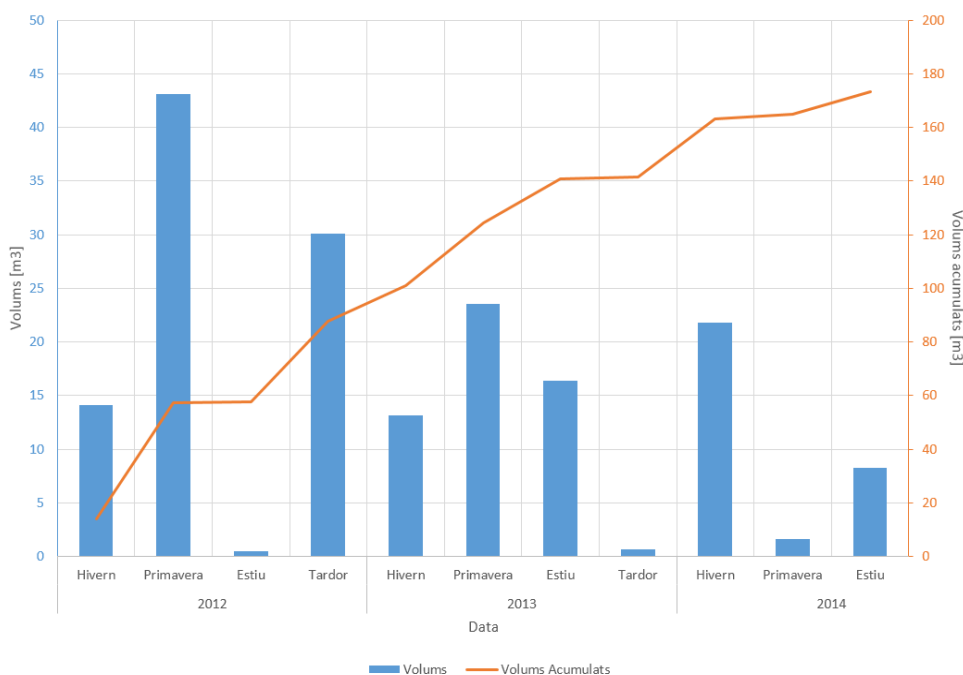


Figura 16– Relació estacional del volum dels despreniments entre l'hivern del 2012 i l'estiu del 2014

no es pot demostrar l'existència d'una component climàtica o estacional que acceleri els despreniments.

De la mateixa manera la figura 16 mostra la relació estacional dels volums dels despreniments. Per poder visualitzar correctament l'existència d'algun cicle estacionari s'ha suprimit el volum després en l'episodi del desembre del 2013.

Amb els resultats que s'observen en la figura 16 tampoc es pot afirmar que existeixi alguna relació entre el volum dels despreniments i les diferents èpoques de l'any ja que no es troba cap patró comú.

5. Discussió

5.1. Detecció i quantificació

Amb els resultats obtinguts es pot observar que la metodologia que s'ha aplicat per detectar els despreniments funciona correctament. A més a més, el posterior càlcul dels volums i de la posició dels despreniments mitjançant el centroide permet extreure més informació dels despreniments detectats.

Tots aquests resultats demostren la capacitat dels instruments TLS per estudiar els despreniments que tenen lloc en els escarpaments. Seguint l'experiència d'Abellan et al. (2010), Tonini i Abellan (2014) o Royan, et al. (2014) d'entre d'altres, s'observa que encara queda camp per recórrer en l'ús de les dades LiDAR per a la caracterització de vessants.

El fet de no georeferenciar *in situ* amb un GPS les dades capturades implica que en el processat posterior s'ha de fer una alineació manual. Malgrat que aquesta alineació està prou automatitzada i que el programari s'encarrega de fer-la (com ja s'ha vist en la metodologia), aquest procediment no deixa d'introduir una variable subjectiva ja que és l'usuari qui ha de determinar quan les dades estan correctament ajustades. A més, l'usuari ha de determinar a criteri propi i previ quines zones poden haver patit una deformació per excloure-les de l'alineació.

La relació magnitud-freqüència representa molt bé la concordança que era esperable trobar entre el nombre de despreniments i el seu volum. Malgrat s'hagi observat que en les magnitud altes la corba representa una major dispersió dels seus punts per manca d'episodis, cal posar en valor que en l'eix d'abscisses, la magnitud dels despreniments, varia dels 0.001 m³ als 1000 m³. És a dir, els volums que s'estan representant varien en 6 ordres de magnitud. Aquest fet demostra que malgrat l'escarpament de Puigcercós és molt ric en despreniments de volums petits, també succeeixen episodis prou rellevants que permeten traçar correctament la corba.

L'ús de la relació magnitud freqüència acumulada es la que usualment es fa servir per caracteritzar un escarpament. Aquesta acumulació es pot representar amb una equació potencial negativa com la que s'expressa a continuació (Brunetti et al. 2009):

$$N_L = r \cdot V_L^{-\alpha}$$

On "N_L" és el número de despreniments acumulats (freqüència), "V_L" el volum del despreniment (magnitud), "α" l'exponent de la llei potencial i "r" una constant (Brunetti et al. 2009).

Comparant el resultat obtingut amb els inventaris de despreniments realitzats per Brunetti et al. (2009) i Van Den Eeckhaut, et al. (2007) s'observa que els paràmetres de la corba potencial obtinguda s'ajusten a la d'altres despreniments inventariats.

Les propietats semblants que caracteritzen aquests moviments de roques inventariats, tan en la tipologia de moviment, com en el número d'episodis, com en la magnitud d'aquests ens porta a la conclusió de que la corba potencial negativa obtinguda per a l'escarpament de Puigcercós està en concordança amb els resultats inventariats d'altres zones que tenen un comportament semblant.

A partir de l'estudi estadístic realitzat per Van Den Eeckhaut, et al. (2007) on es caracteritza els moviments de terra a partir dels valors de la corba potencial obtinguda es pot concloure que en l'escarpament de Puigcercós els grans despreniments detectats no tenen una contribució

important en el total dels despreniments detectats. Aquest fet concorda amb els resultats trobats on s'ha observat que només 2 dels 4072 despreniments tenen una magnitud molt rellevant.

En el càlcul realitzat per a trobar el comportament de l'escarpament abans i després d'un gran esdeveniment s'ha trobat que els resultats no mostren cap canvi de patró. Les dades obtingudes en els resultats ens mostren unes tendències molt ben ajustades (valors d' R^2 molt propers a 1) a les respectives rectes. Tot i variar el pendent a partir del moment que es produeix el despreniment no es presenta un canvi de comportament remarcable. La continuació d'aquesta tendència un cop es produeixen les caigudes de gran magnitud ens permet deduir que en les zones estudiades de l'escarpament es segueix produint una acumulació de despreniments. D'aquesta manera, l'acumulació de despreniments que s'ha observat amb anterioritat als despreniments juntament amb la deformació calculada concorda amb l'ocurrència d'un gran despreniment i per l'altra banda, les acumulacions de despreniments que s'han observat amb posterioritat als grans episodis poden estar indicant que les zones d'estudi han d'ajustar-se produint despreniments fins assolir l'equilibri tensional, o bé, com s'observa a partir de l'anàlisi de deformacions, que a l'escarpament es produeixen noves àrees d'inestabilitat després dels grans episodis. Aquest fet justifica l'existència d'un gran número de despreniments.

Per confirmar aquest darrer punt també ha estat important realitzar l'estudi de la deformació. En aquest estudi s'ha observat com els valors obtinguts són concordants amb els trobats per Royan, et al. (2014) i (2015) on ens mostren l'existència de deformació en la mateixa zona d'estudi abans d'un dels despreniments.

La presència d'aquesta deformació ens permet remarcar l'existència d'activitat en les zones d'estudi i per tant podem seguir creient que l'acumulació de despreniments en una àrea concreta pot estar actuant com a precursor. Esdevenint una informació molt important ja que la detecció d'aquesta acumulació pot actuar com a indicador de futurs grans despreniments.

Un factor rellevant en el moment de fer l'estudi ha estat la variabilitat de la resolució temporal. Per obtenir resultats més consistents caldria millorar la resolució temporal, obtenint de manera periòdica escanejos de la paret. Aquesta demanda es fonamenta en el fet que malgrat tenir informació molt precisa i de molta qualitat en el moment de fer els escanejos, les dades només representen un estat inicial i un final, perdent tots els processos que es produeixen en l'interval no observat. Per aquest motiu és plausible creure que despreniments que s'han comptabilitzat com a únics amb un volum concret en realitat corresponen a diversos despreniments de diferents volums (evidentment inferiors) que s'han produït en un lapse de temps suficientment significatiu, però inferior al període d'escanejos.

Un altre problema de la resolució temporal afecta directament al resultat de l'estudi temporal que s'ha presentat. On s'ha calculat una estacionalitat que tot i centrar-se en les sèries que tenen major resolució temporal no es corresponen d'un any per l'altre. És a dir, en una mateixa estació un any està compost per tres escanejos i un altre any només en té un, i que a més no coincideixen en el mes de captura. Aquest fet és determinant a l'hora d'extreure patrons estacionals ja que amb els resultats que s'han obtingut no es pot assegurar cap relació estació de l'any - despreniments.

5.2. Ús de la intensitat i de l'RGB

A l'hora d'obtenir els centroides s'ha observat que la distribució no és aleatòria sinó que es tendeix a unes alineacions horitzontals i unes altres verticals. Amb la intenció de dotar de sentit les alineacions horitzontals s'ha decidit buscar una correlació a partir de l'estudi de la litologia amb les dades d'intensitat i RGB.

L'ús de la intensitat per a determinar les litologies genera una dicotomia que tinguda en compte pot aportar resultats vàlids. Per una banda els resultats obtinguts demostren una correlació gairebé directa entre les litologies obtingudes a partir de l'anàlisi RGB i les intensitats. En les dues zones d'estudi les diferències que s'han obtingut, malgrat ser detectables no són molt grans. Per aquest

motiu i donat que quan s'ha emprat l'RGB també s'ha vist que és un procediment que no està exempt de problemes es pot considerar que l'ús de la intensitat és un procediment vàlid per obtenir una primera aproximació de les litologies.

La segona part de la dicotomia resideix en el fet que la intensitat varia amb la distància (Pesci, Teza and Ventura, 2008) i per tant a mesura que ens allunyem del sensor obtenim intensitats menors malgrat la litologia segueix sent la mateixa. A més a més, com ja em vist en els resultats un altre dificultat que es presenta quan s'empra la intensitat per determinar les litologies resideix en el poc contrast que pot tenir la metodologia entre dues litologies diferents. En el cas de Puigercós, s'ha trobat que dues litologies aparentment diferents (detectades visualment en una fotografia) quan s'identifiquen a partir de les intensitats no es poden diferenciar. És a dir, diferents litologies responen igual a la intensitat. Per aquest motiu en les gràfiques presentades hi ha una litologia que no es veu representada en les observacions fetes a partir d'intensitats. Aquest fet, a més, es pot veure agreujat quan la superfície de la zona observada pateix pàtines d'oxidació o bé hi circula aigua, produint un augment local de la humitat. En aquests casos, també, la intensitat obtinguda és diferent malgrat la litologia és la mateixa.

Per altra banda, en el moment d'utilitzar les dades RGB per obtenir les litologies ens trobem que aquestes dades (els colors) depenen de la litologia i d'altres factors com la lluminositat i les condicions climàtiques. Per aquest motiu, zones d'ombra a la fotografia, o la presència de zones amb més humitat produeixen una resposta diferent del sensor (en aquest cas, una càmera fotogràfica) obtenint com a dades uns valors d'RGB que poden variar respecte els detectats en altres llocs per a una mateixa litologia.

Per aquest motiu, sempre que es fa un anàlisi litològic a partir de les dades que recull un sensor cal analitzar correctament quina és la capacitat de detecció litològica del sensor i quins processos o mecanismes poden alterar aquests resultats.

En els resultats obtinguts en l'apartat corresponent s'han numerat les litologies detectades com litologia 1, litologia 2 i litologia 3. S'ha emprat aquesta terminologia perquè la metodologia usada no classifica directament els píxels amb una litologia corresponent. Aquesta relació classe-litologia s'ha de realitzar amb una comprovació al camp de tal manera que es pugui assignar a cada classe la litologia real observada.

Tot i així, a partir de la bibliografia i amb la voluntat de discutir uns resultats s'exposa una possible correlació que caldria verificar al camp: (a) La litologia 1 correspon als diversos estrats de margues (b) la litologia 2 correspon als diversos paquets de gresos i (c) la litologia 3 correspon a petites vetes de guix.

La metodologia usada serveix per obtenir una ràpida classificació dels diferents valors de píxel (tant d'intensitat com d'RGB) que s'obtenen de les imatges ràster. La classificació no supervisada utilitzada ofereix la possibilitat de generar classes sense haver d'assignar cap patró d'entrada més que el nombre de classes que es volen obtenir. Aquesta funcionalitat és important quan es desconeix (com ha estat el cas) la litologia a la que correspon cada píxel. Per obtenir resultats més precisos es pot utilitzar una classificació supervisada que s'hauria d'acompanyar amb les signatures espectrals adients, és a dir, s'hauria de determinar prèviament les litologies observades al camp a alguns píxels models.

Aquest darrer motiu explica la manca d'exactitud entre els resultats obtinguts. Tot i així en els resultats s'observa una similitud important entre les àrees detectades de cada litologia segons cada mètode. A més, quan major és la superfície de la zona a estudiar menor tendeix a ser l'error relatiu d'aquestes.

Malgrat les consideracions que s'han fet a l'hora de treballar amb la intensitat els resultats obtinguts en les zones d'estudi indiquen que la variació en la intensitat que es produeix per la variació de la distància entre l'objecte escanejat i el sensor és insuficient per fer variar les litologies assignades.

Pel que fa als resultats obtinguts en la quantificació de desprendiments de cada litologia s'ha observat que en les margues és on es concentren el major nombre de desprendiments.

Malgrat les margues són les predominants en l'escarpament i són les que han presentat un major nombre de desprendiments, és a l'hora de calcular la densitat de desprendiments quan es pot confirmar que és la litologia més propensa a generar caigudes de roca. En el càlcul de les densitats s'han obtingut resultats molt homogenis en les margues i resultats més variats en la litologia de materials gresosos. Tot i així, en totes les zones d'estudi i en totes les metodologies aplicades, sempre en els estrats de margues s'ha produït una major densitat de desprendiments.

No obstant, cal remarcar que tan la litologia com la seva situació dins l'escarpament condicionen aquest fet ja que (a) quan es realitza un escaneig LiDAR i es fa la comparació amb els escanejos anteriors es determina amb molta precisió qualsevol variació espacial del material. En aquest treball s'ha considerat que les diferències positives entre dos escanejos (és a dir, pèrdua de material entre dos escanejos) correspon a un desprendiment però cal posar en rellevància que part d'aquest material que es perd es pot perdre per altres fenòmens erosius. que no són estrictament els desprendiments i que poden afectar a les margues donada la seva poca duresa. (b) L'altre factor que pot condicionar els resultats és la distribució espacial de les capes inferiors (principalment les margues). Ja que generen un sortint que actuant com a cornisa rep els impactes de tots els desprendiments dels estrats superiors. Per aquest motiu, és molt provable que qualsevol desprendiment d'un estrat superior hagi impactat amb les capes inferiors provocant-ne també una pèrdua de material.

6. Conclusions

Aquest estudi ha posat en rellevància l'activitat permanent que es produeix en l'escarpament de Puigcercós; 4072 desprendiments al llarg dels 2733 dies d'estudi remarquen aquest fet. A més a més, aquesta activitat es produeix en un variat rang de

magnituds ja que els desprendiments detectats varien des dels 0.00026 m³ als 1095,3 m³.

Tots aquests desprendiments caracteritzen l'escarpament de Puigcercós de tal manera que a partir dels paràmetres de la relació magnitud-freqüència es pot comparar amb els altres escarpaments estudiats.

En les àrees on s'han produït desprendiments de gran magnitud (superiors als 100 m³) s'ha observat que l'activitat no ha cessat ja que tan el nombre de desprendiments com la deformació han anat augmentant amb el pas del temps.

S'han identificat tres litologies mitjançant diferents fonts de dades. A partir d'aquesta identificació es pot concloure que la litologia que genera més desprendiments són els paquets de margues.

Finalment, en tots aquests desprendiments no s'ha detectat un patró estacional clar, amb els resultats obtinguts no ha estat possible trobar una relació entre els desprendiments i les diferents estacions de l'any.

7. Futurs treballs

Amb els resultats obtinguts i les pertinents discussions realitzades les futures línies de treball han de passar pel seguiment del monitoratge de l'escarpament de Puigcercós amb un augment de la resolució temporal que permeti focalitzar els esforços en utilitzar les dades LiDAR no tan per la seva component espacial sinó pel seu valor temporal. Podent extreure patrons de comportament relacionats amb la climatologia o el període de l'any.

A més a més, en el camp de la detecció de litologies cal seguir investigant la informació que ens proporcionen la intensitat i l'RGB. Amb la finalitat de trobar metodologies que siguin capaces de detectar els tipus de litologia de la manera més ajustada possible.

La possibilitat d'efectuar aquests escanejos georeferenciats amb GPS hauria de permetre obtenir núvols de punts més ajustats en els quals no calgués aplicar tot el procés d'alineació descrit en aquest treball. Obtenint resultats d'igual o millor ajust en un menor temps de postprocés.

8. Agraïments

Aquest treball no hagués estat possible sense el guiatge de la Marta Guinau i el Manuel Royán. Per aquest motiu desitjo que aquestes línies serveixin per agraï'ls-hi tota la dedicació, entrega, ganes i paciència que m'han dedicat. Gràcies per tot el traspàs de coneixements que m'heu fet, per ensenyar a centrar-me i ser més precís en la meua tasca i per ser-hi en tot moment i a tothora.

També vull agrair a tots els companys del departament que en algun moment m'han ajudat amb el treball o m'han fet l'estada més amena. En especial al David Garcia i al Gia Khazaradze per l'acompanyament en la sortida de camp a l'escarpament de Puigercós.

Vull agrair als meus companys de la UPC i del màster que m'hagin facilitat enormement la possibilitat de seguir estudiant 4t d'Enginyeria Geològica mentre cursava el Màster. De la mateixa manera, vull agrair a tots els monitors i joves de l'entitat on treballa per carregar-me les piles d'energia i il·lusió en tots els reptes de la vida.

Finalment, necessito agrair al cercle més íntim l'ajuda que m'han prestat en tot moment i la seva disposició a tot. Gràcies a la meua família i a la meua parella per permetre'm gestionar-me el temps i l'espai tot i sabent que això els repercutia negativament. El seu acompanyament és el més apreciat i necessari de tots.

9. Referències

Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J.M. and Blanchard, J. (2010) 'Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring', *Geomorphology*, no. 119, pp. 162-171.

Abellan, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M. and Lato, M.J. (2014) 'Terrestrial Laser scanning of rock slope instabilities', *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 39, pp. 80-97.

Blanchard, J., Calvet, J., Abellán, A., García, D., Khazaradze, G. and Vilaplana, J. (2008) 'Estudio del escarpe del deslizamiento de Puigercós mediante láser escáner terrestre. Conca de

Tremp, Catalunya.', *Geotemas*, vol. 10, pp. 1389-1392.

Bordonau, J. (n.d) 'Geozona 124. Esllavissada de Puigercós'.

Brunetti, M.T., Guzzetti, F. and Rossi, M. (2009) 'Probability distributions of landslide volumes', *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 16, pp. 179-188.

Chen, Y. and Medioni, G. (1992) 'Object modelling by registration of multiple range images.', *Images Vis Comput*, vol. 10, pp. 145-155.

Corominas, J. (2004) 'Tipos de rotura en laderas y taludes', *Ingeniería del Terreno (Ingeo Ter 4)*, p. 447.

Cuevas, J.L. (1992) 'Estratigrafía del <> de la Conca de Tremp. Prepirineo de Lérida', *Acta Geológica Hispánica*, no. v.27, pp. 95-108.

Derron, M. and Jaboyedoff, M. (2010) 'Preface to the special issue. In: LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization.', *Nat Hazards Earth*, pp. 1877-1879.

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. and 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*.

Hungr, O., Evans, S. and Hazzard, J. (1999) 'Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia', *Can Geotech*, vol. 36, pp. 224-238.

Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L. (2014) 'The Varnes classification of landslide types, an update.', *Landslides*, vol. 11, pp. 167-194.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A. (2010) 'Use of LIDAR in landslide investigation: a review', *Nat Hazards*.

Moreno, Á.L., Garzón, G. and Díez-Herrero, A. (2013) 'Análisis e interpretación geológica del fondo documental FRT sobre eventos de movimientos de ladera en España en el siglo XIX',

VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Junio, pp. 231-242.

Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H. and Metzger, R. (2009) 'Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, no. 9, pp. 1003-1019.

Pesci, A., Teza, G. and Ventura, G. (2008) 'Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy)', *Annals of geophysics*, vol. 51.

Petrie, G. and Toth, C. (2008) 'Introduction to laser ranging, profiling and scanning.', *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing.*, pp. 1-28.

Rosser, N., Lim, M., Petley, D., Dunning, S. and Allison, R. (2007) 'Patterns of precursory rockfall prior to slope failure', *Journal of geophysical research*, vol. 12.

Royan, M.J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J.M. and Calvet, J. (2014) 'Spatio-temporal analysis of rockfall prefailure deformation using Terrestrial LiDAR', *Landslides*, vol. 11, no. 4, pp. 697-709.

Royán, M.J., Abellán, A. and Vilaplana, J.M. (2015) 'Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp. (Catalonia, Spain)', *Landslides*, pp. 585-595.

Tonini, M. and Abellan, A. (2014) 'Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: A clustering approach using R', *Journal of Spatial Information Science*, no. 8, pp. 95-110.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G. and Demoulin, A. (2007) 'Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region', *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 256, pp. 588-603.

Varnes, D. (1978) 'Slope movement types and processes.', *Landslides, analysis and control*, pp. 11-33.

Vidal, L.M. (1881) 'Nota acerca de los hundimientos ocurridos en la Cuenca de Tremp (Lérida) en Enero

de 1881.', *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, no. VIII, pp. 113-129.