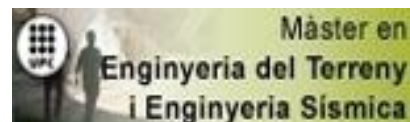


TREBALL FINAL DE MÀSTER



TÍTOL

**CARACTERITZACIÓ DE LA FRAGMENTACIÓ EN ELS
DESPRENIMENTS ROCOSOS**

AUTOR

ROGER RUIZ CARULLA

TUTOR

JORDI COROMINAS

ESPECIALITAT

ENGINYERIA DEL TERRENY

DATA

DESEMBRE 2013



Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica
E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Agraïments:

Vull agrair al director de la tesi, Dr. Jordi Corominas, la oportunitat d'emprendre treballs d'aquestes característiques sota el paraigües del Departament d'Enginyeria del Terreny, envoltant d'un grup d'investigador rigorosos, amb inquietuds i amplies aptituds personals i humanes.

En aquest sentit, vull agrair el suport rebut per la Dr. Olga Mavrouli durant tot el procés d'elaboració del treball, tant en les laborioses tasques de camp amb moltes hores de viatge i de mesura de blocs, com en els debats sobre el fenomen de la fragmentació.

Vull agrair l'esforç, les llargues converses, discussions i aportacions personals amb el Dr. José Moya, que m'ha aportat en molts moments d'inflexió aquell impuls en la direcció que calia.

També vull agrair-li al Dr. Jordi Corominas l'ajut i l'esforç en les tasques de camp i sobretot, la visió amb perspectiva del treball d'investigació amb la capacitat per dirigir, escoltant sempre totes les propostes per reconduir-les i aprofitar-les per obtenir el millor resultat.

A nivell més personal, vull agrair a la meva família, Montserrat, Robert, Martí i Roseta, el seu suport incondicional, entenent sempre les meves necessitats i ajudant-me per poder desenvolupar-me en tots els àmbits, tant acadèmics com personals. I sobretot, agrair a la meva parella, l'Aina, tot el suport que m'ha donat, tant durant la carrera com en el màster i durant l'elaboració d'aquests treball. Gràcies.

Finalment, no vull oblidar-me dels companys, amb els que hem debatut infinitat de vegades sobre els temes acadèmics i personals, aportant el seu punt de vista, enriquint el meu treball i la meva persona. Entre d'altres, m'agradaria anomenar en Sjædric Moreno, en Joan Sahún, en Pau Mercadé i l'Ivan Alberich, així com tot l'equip del baloneta: Angels, Rotman, Nuria, Laura, Sandra, Joel, Gemma, Albert, Albert Carles, Ricard, David, Carme, Paula, Genís i tots amb els que compartim els millors moments d'humanitat, inquietuds i angoixes, debats i socialització durant el dia a dia a la nostre segona, o primera, casa.

RESUM

Els despreniments rocosos són fenòmens molt freqüents en àrees de muntanya amb conseqüències socioeconòmiques creixents per la major freqüentació i exposició. La fragmentació és un dels mecanismes presents als despreniments. Es defineix com la separació de la massa rocosa en blocs més petits com a conseqüència de l'impacte de la mateixa sobre la superfície topogràfica, fent que els blocs segueixin trajectòries independents vessant avall.

La definició del volum inicial de despreniment és fonamental per a les anàlisis de trajectòries, el càlcul de les energies d'impacte, per al disseny de les proteccions i l'avaluació quantitativa del risc.

La fragmentació és un mecanisme complex, pobrament entès i difícil de modelar en el que intervenen entre d'altres: la resistència de la roca matriu, la presència de discontinuïtats als blocs que cauen, l'espaiat i persistència de les mateixes, l'energia d'impacte, o la rigidesa de la superfície d'impacte. El present treball està centrat en **l'estudi, la comprensió i l'anàlisi del procés de fragmentació de blocs rocosos al llarg del seu recorregut en despreniments i la distribució de blocs rocosos que en resulta.**

En concret, s'ha estudiat el cas d'un despreniment rocós de grans dimensions amb els objectius de: **a) estimar el volum de material afectat** pel despreniment i **b) obtenir la distribució de volums de blocs a la paret rocosa** (abans del despreniment) així com la **distribució de volums de blocs propagats** (una vegada ocorregut el despreniment i els blocs s'han propagat i fragmentat) per finalment **c) observar les variacions de les distribucions de volums de blocs** abans i després del despreniment.

Per obtenir la distribució de volums de blocs propagats, després del despreniment, s'ha realitzat un exhaustiu treball de camp on s'han mesurat més de 1.500 blocs. Per a l'obtenció de la distribució de volums de blocs a la paret rocosa, abans del despreniment, s'ha generat un model digital de l'escarpament mitjançant tècniques fotogramètriques, sobre el que s'han caracteritzats les famílies de discontinuïtats que finalment s'ha utilitzat per tallar un volum de control i generar una mostra representativa dels volums de blocs de la paret rocosa.

S'ha obtingut una distribució volums de blocs propagats, al dipòsit, que s'ajusta a una llei potencial, mentre que la distribució de volums de blocs in situ, a la paret rocosa, segueix una llei exponencial. Comparant les distribucions es pot observar una reducció en el nombre de blocs de volums superiors al metre cúbic i un fort augment en el nombre de blocs de volums inferiors al metre cúbic, producte de la fragmentació dels blocs majors d'un metre cúbic entre d'altres.

De cara a la comprensió del fenomen de la fragmentació i a l'elaboració de lleis de fragmentació, es considera fonamental la observació de la naturalesa del fenomen i l'obtenció de dades de qualitat que reflecteixin la fragmentació dels blocs rocosos al propagar-se. Tals lleis, es podrien utilitzar per a la millora de la caracterització de la perillositat dels despreniments rocosos, incorporant la fragmentació i la seva influència sobre la redistribució de volums de blocs i per tant, sobre les velocitats, les energies d'impacte i les trajectòries d'aquests.

ABSTRACT

In mountain zones, the rockfalls are a frequent phenomena, with increasing socio-economical consequences because of the increasing exposition of the population. Fragmentation of the rock masses is a fundamental mechanism in rockfalls. It consist of splitting the initial rockmass into small blocks due to the impact of the ground surface. The resultant blocks follow independent paths downhill.

The definition of the initial volume of the rockfall is fundamental to develop the trajectographic analysis, the calculation of the impact energies, the design of the protection systems and to carry out a quantified risk assessment.

Fragmentation is a complex mechanism, poorly understood and hard to be modeled. Several parameters governs the fragmentation such as rock strength, spacing and persistence of each set of discontinuities, impact energy and ground stiffness. **This work is focused on the study, the understanding and the analysis of the fragmentation process of rock blocks during their paths in rockfalls, and their resultant distribution of block volumes.**

Specifically, it has been studied a large rockfall event, with the main goals of: **a) estimate the volume of rock mass affected** in this rockfall case and **b) obtain the block volume distribution at the rock face** (before the fall), and the **volume distribution of the propagated blocks** (after fall, when the blocks has been propagated and fragmented), to finally **c) analyze the variations between the volumes blocks distributions obtained**, before and after the propagation and the fragmentation of the blocks.

To obtain the volume distribution of the propagated blocks, in the deposit, more than 1500 blocks have been measured and georeferenced in the field. To obtain the volume distribution of in situ blocks, in the cliff, it has been generated a digital model of the cliff based in photogrammetric techniques. The main joint sets have been characterized using the digital model of the cliff then, it has been used to cut a control volume to generate a volume distribution, representative of the blocks in the cliff.

It has been obtained a volume distribution of the propagated blocks, that it can be fitted with a power law, while the **volume distribution of in situ blocks, can be fitted with a exponential law**. Comparing the obtained distributions, it is observed **a reduction of the number of blocks above the cubic meter, and a sharp increase in the number of blocks with volumes smaller than a cubic meter.**

In order to understand the phenomena of fragmentation and to define fragmentation laws, it is considered essential to observe the nature of the phenomena, and obtain a high quality data reflecting the fragmentation of the blocks when propagated. Such laws could be used to improve the characterization of the rockfall hazard, incorporating the fragmentation and its effect on the generation of block volumes, and therefore its influence on the speed of the blocks, the impact energies and the new trajectories.

Índex

1. Introducció:	12
2. Antecedents:	14
2.1 Antecedents en l'estudi de desprendiments rocosos	14
2.2 Antecedents en distribucions potencials i lleis fractals	16
2.3 Antecedents en la definició de distribucions de volums de blocs	17
2.4 Antecedents en l'estudi de la fragmentació	19
3. Plantejament del problema i objectius	20
3.1 Plantejament del problema	20
3.2 Objectius	27
4. Despreniment al Cap de la Fesa, Serralada del Cadí.....	29
5. Metodologia.....	35
5.1 Plantejament del treball.....	35
5.2 Obtenció i definició de les distribucions de volums de blocs (IBSD i PBSB).....	35
5.2.1 Conceptes de distribucions potencials.....	36
5.2.2 Metodologia proposada per a l'obtenció de la PBSB	37
5.2.3 Tècniques disponibles per a la obtenció de la IBSD	42
5.2.4 Metodologia proposada per a l'obtenció de la IBSD	49
6. Treball realitzat	50
6.1. Mesures de camp per a l'obtenció de la PBSB	50
6.1.1 Mesura de blocs puntuals (BP).....	51
6.1.2 Mesura de blocs en parcel·les de mostreig, Sampling Plots (SP).	56
6.1.3 Estimació del volum del despreniment en base als blocs mesurats.....	63
6.2 Caracterització de la paret rocosa per a l'obtenció de la IBSD	65
6.2.1 Model digital de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques	65
6.2.2 Caracterització de les famílies de discontinuïtats.....	71
6.2.3 Identificació automàtica de les famílies de discontinuïtats	73
6.2.4 Identificació i modelació manual de les famílies de discontinuïtats	77
6.2.5 Estimació del volum del despreniment i tall del volum de control.	86
7. Resultats	91
7.1 Distribució de volums de blocs obtinguda dels Blocs Puntuals mesurats.....	91
7.2 Distribució de volums de blocs obtinguda dels Sampling Plots.....	94
7.3 Construcció de la PBSB representativa de tot el dipòsit.....	100
7.4 Truncament de la PBSB en base a un volum màxim de bloc	103
7.5 Construcció de la IBSD representativa del la zona afectada pel despreniment.....	105

7.6 Comparativa de la IBSD i la PBSB	109
8. Resum i Conclusions.....	114
9. Futures línies d'investigació.....	117
10. Referències bibliogràfiques.....	120
11. Annexos	124
11.1 Annex 1: Fitxes de camp.....	124

Índex de figures:

Fig. 1: Exemple de desprendiment rocós a la carretera d'accés a la població de Vilaverd (extret de la web de Vilaweb).	13
Fig. 2: Mapa d'energies cinètiques de desprendiments obtingut amb el programa Hy-Stone. Estudi dut a terme per l'empresa Geovert a la localitat de Christchurch a Nova Zelanda (extret de la pàgina web del CARE)	15
Fig. 3: Esquerra: Mapa obtingut amb un anàlisi probabilístic. Dreta: el mateix cas amb un anàlisi basat en un model físic de simulació de caiguda de blocs. Imatge extreta de (Volkwein et al., 2011).	16
Fig. 4: Patró de creixement geomètric fractal: corba de Koch.	17
Fig. 5: Esquema del CAS 1: Un bloc in situ sense discontinuïtats preexistents que es trenca al caure. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.	20
Fig. 6: Blocs fragmentats a diferents velocitats de deformació extret de (Whittles et al., 2006).	21
Fig. 7: Fragments obtinguts en un model de ruptura de blocs de roca realitzat amb DEM extret de la publicació (Whittles et al., 2006).	21
Fig. 8: Modelitzacions de patrons de fractura de blocs mitjançant DEM extret de (Estay et al., 2013).	22
Fig. 9: Imatge d'un bloc fragmentat en una caiguda controlada en el treball (Giacomini et al., 2009).	22
Fig. 10: Esquema CAS 2: Conjunt de blocs in situ que al caure es disgreguen sense noves ruptures. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.	23
Fig. 11: Esquema CAS 3: Conjunt de blocs in situ que al caure es disgreguen i es trenquen. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.	24
Fig. 12: Cartografia de blocs, les seves trajectòries i impactes en el desprendiment d'octubre de 2012 a la població d'Omells de Na Gaia.	25
Fig. 13: Resultats de la simulació de caiguda de blocs amb (imatge esquerra) i sense fragmentació (imatge dreta), amb el programa HY-STONE, extreta de (Wang, 2009), vista amb perspectiva.	26
Fig. 14: Resultats de la simulació de caiguda de blocs amb (imatge esquerra) i sense fragmentació (imatge dreta), amb el programa HY-STONE, extreta de (Wang, 2009), vista zenital.	26
Fig. 15: Esquema de plantejament del segon objectiu de la present tesina. Obtenció de les distribucions de volums de blocs abans i després del desprendiment rocós per avaluar la fragmentació que es produeix.	27
Fig. 16: Situació de la zona d'estudi, Serralada del Cadí, nord de Catalunya, (Institut Cartogràfic de Catalunya).	29
Fig. 17: Mapa geològic de la zona d'estudi on es pot observar el material acumulat cartografiat com quaternari i l'important encavalcament que fa d'aquest un punt estructuralment dèbil (Institut Cartogràfic de Catalunya).	29
Fig. 18: Cartografia topogràfica a escala 1:5000 de la zona d'estudi.	30
Fig. 19: Fotografies cedides per Albert de Gràcia: Comparativa abans (esquerra) i després (dreta) del desprendiment de Novembre del 2011, objecte d'estudi de la present tesina.	31
Fig. 20: Ortofotos de la zona d'estudi obtingudes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya dels anys 2011 (esquerra) i 2012 (dreta).	32
Fig. 21: Zona de sortida dels blocs, afectada pel desprendiment. Ortofotos del 2011 i 2012 obtingudes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya.	33
Fig. 22: Fotografia de la zona d'estudi on es pot observar bé la cicatriu del gran desprendiment i el dipòsit generat al seu peu. Fotografia realitzada el mes de Desembre de 2011, poc després del desprendiment.	34
Fig. 23: Probabilitats o freqüències de diferents conceptes i versemblança del seu ajust a una distribució potencial de 4 mostres de dades empíriques extret de (Clauset et al., 2009).	36
Fig. 24: Mostra de la fitxa de camp utilitzada per a la realització de l'inventari de blocs puntuals. Tota la informació obtinguda es traspassa a una base de dades connectada a un Sistema d'Informació Geogràfica.	38
Fig. 25: Fitxa de camp pel registre de dades referents a impactes de blocs sobre el terreny.	39
Fig. 26: Part de la fitxa de camp per registrar els diferents punts que units formen la trajectòria que ha seguit un bloc després.	39
Fig. 27: Fotografia de la tartera retallada (imatge esquerra) i delimitació dels contorns dels blocs amb el programa Split-FX per obtenir-ne una distribució de volum a partir de la distribució d'àrees (imatge dreta).	40
Fig. 28: Esquema del plantejament metodològic per a l'obtenció de la distribució de volums de blocs propagats (PBSD) en base a la mesura de blocs en parcel·les de mostreig (Sampling Plots), extrapolar aquesta informació sobre la zona representativa de cada mostreig i afegir la distribució obtinguda de la mesura de blocs puntuals.	41
Fig. 29: Esquemes de sistemes de fractures obtinguts mitjançant simulacions de Monte Carlo per obtenir distribucions de volums de blocs, extretes de (Elmoultie & Poropat, 2011).	42
Fig. 30: Models realitzats amb 3DEC per (Kim et al., 2006) per a l'obtenció de la distribució de volums de blocs que es generen amb un conjunt de famílies de discontinuïtats (imatge esquerra) i imposant certa desviació aleatòria sobre la orientació dels plans (imatge dreta).	43

Fig. 31: Discontinuitats identificades mitjançant scanline, laser scan i fotogrametria digital en un aflorament de roca diorítica (a), (b) i (c), i en una pissarra (d), (e) i (f), extret de (M. Sturzenegger, 2009).....	44
Fig. 32: Esquema representatiu de oclusió o de zones d'ombra que impedeix la correcta captura de dades extret de (M. Sturzenegger, 2009).	45
Fig. 33: Esquema d'identificació de la posició d'un punt des de dos punts de vista diferents (imatge esquerra), i relació entre la mida de píxel del sensor i la mida de píxel sobre el terreny (extret de la pàgina web d'Adam Technologies). 46	46
Fig. 34: Captura de pantalla del programa <i>Sirovision</i> , que permet obtenir un model tridimensional a partir de fotografies, així com la caracterització de discontinuitats realitzada per (Haneberg et al., 2006).	47
Fig. 35: Captura de pantalla d'una caracterització semiautomàtica d'orientacions i falques d'un aflorament rocós realitzada per (Haneberg et al., 2006).	47
Fig. 36: Anàlisi d'estabilitat (vectors desplaçament obtinguts) de blocs inestables a la mina de Carrara, Itàlia, basat en la caracterització geomètrica de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques i analitzat mitjançant <i>Discrete Elements Methods</i> , extret de (Firpo et al., 2011)	48
Fig. 37: Esquema de plantejament de la metodologia prevista per a l'obtenció de la IBSD.	49
Fig. 38: Fotografia de la mesura d'un bloc mitjançant una cinta mètrica.	51
Fig. 39: Localització dels 275 blocs puntuals mesurats, superposats a la ortofoto i la topografia a escala 1:5000 de la zona d'estudi. La grandària del símbols que representa cada bloc és proporcional al seu volum.	52
Fig. 40: Fotografia d'un conjunt de bloc dipositats al canal del costat oest de la tartera.	53
Fig. 41: Fotografia d'un bloc puntual mesurat enmig de la tartera ja que té unes dimensions molt majors als blocs del seu entorn més pròxim.	53
Fig. 42: Fotografia d'un dels blocs puntuals mesurats amb una de les cares que el delimiten definida per un pla de falla amb estries fortament marcades.	54
Fig. 43: Fotografia d'un dels blocs puntuals mesurats on es pot observar molt bé un pla de falla amb estries que delimita una de les cares del bloc.	54
Fig. 44: Fotografia d'un bloc amb una junta preexistent i un conjunt de noves fractures fruit dels impactes que ha rebut.	55
Fig. 45: Fotografia del mateix bloc que a la fotografia anterior però separant els diferents fragments que el formen, on es podria distingir entre disgregació per la junta preexistent i fragmentació amb les fractures noves.	55
Fig. 46: Localització dels Sampling Plots realitzats i cartografia de la zonificació de la tartera.	57
Fig. 47: Zonificació de la tartera i localització dels Sampling Plots i dels blocs puntuals mesurats sobre un model digital d'elevacions de la zona d'estudi amb l'ortofoto superposada.	58
Fig. 48: Col·locació de la cinta mètrica per mesurar i definir una de les arestes d'una parcel·la de mostreig, en concret del SP5.	59
Fig. 49: Fotografia presa just des del peu de la paret rocosa mirant cap aquesta.	60
Fig. 50: Fotografia presa des del peu de la paret rocosa mirant cap a la tartera.	60
Fig. 51: Imatge del conjunt de blocs del SP2 mirant cap a l'escarpament rocós.	61
Fig. 52: Imatge dels blocs del SP2 mirant tartera avall.	61
Fig. 53: Imatge de la zona on es va dur a terme el SP1 mirant cap a l'escarpament.	62
Fig. 54: Cartografia del treball de camp realitzat per a l'estimació del volum del desprendiment i per obtenir la PBSB.	64
Fig. 55: Esquema de posicionament i orientació de la càmera per prendre les fotografies adientment.	65
Fig. 56: Parella de fotografies utilitzades per generar un model digital tridimensional de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques.	66
Fig. 57: Captura de pantalla del programa AgiSoft StereoScan on es pot observar la interpretació de la posició i orientació de les fotografies que s'utilitzen.	67
Fig. 58: Malla tridimensional basada en el núvol de punts obtingut de la correlació entre píxels de les dues fotografies. Realitzada mitjançant el programa <i>Agisoft StereoScan</i>	68
Fig. 59: Model digital de la paret rocosa amb la imatge corregida projectada sobre seu.	68
Fig. 60: Procés d'escalat i georeferenciació del model digital de la paret rocosa amb base a punts de coordenades conegudes i de la topografia existent a escala 1:5000.	69
Fig. 61: Error quadràtic mitjà i matriu de transformació que el programa <i>CloudCompare</i> calcula per escalar i posicionar correctament el núvol de punts de la paret rocosa.	70
Fig. 62: Model digital de la paret rocosa carregat en el programa <i>Rhinoceros</i> on es poden observar algunes zones d'ombra o d'occlusió sense informació.	70
Fig. 63: Identificació de les discontinuitats visibles en una fotografia de la paret rocosa d'estudi.	71
Fig. 64: Identificació de discontinuitats per famílies sobre una fotografia de la paret rocosa.	72
Fig. 65: Pla ajustat al pla de falla sobre el núvol de punts de la paret rocosa.	73
Fig. 66: Selecció de la zona afectada pel desprendiment en el núvol de punts de la paret rocosa.	74

Fig. 67. Paràmetres d'ajust de plans al núvol de punts utilitzats per obtenir un ajust automàtic.....	74
Fig. 68: Plans ajustats al núvol de punts de la zona de sortida de forma automàtica amb el programa <i>CloudCompare</i>	75
Fig. 69: Representació en projecció estereogràfica dels plans identificats automàticament amb el programa <i>CloudCompare</i> sobre el model digital de la zona de sortida de blocs.	76
Fig. 70: Diagrama de densitat de pols dels plans identificats automàticament amb el programa <i>CloudCompare</i> sobre el model digital de la zona de sortida de blocs.	76
Fig. 71: Representació estereogràfica de les famílies de discontinuïtats identificades de forma automàtica.	77
Fig. 72: Model digital de la paret rocosa amb els punts acolorits en funció de la rugositat entesa com la coplanaritat d'un punt en vers els del seu entorn més pròxim. Colors vermells, taronges i grocs menor coplanaritat, verd i finalment blau major coplanaritat.	78
Fig. 73: Vista frontal del model digital de la paret rocosa identificant en diferents colors el cabussament de la superfície entre 45° i 90°.	79
Fig. 74: Model digital de la paret rocosa en colors en funció de l'angle de cabussament amb les famílies identificades i modelades manualment: Família F1 (imatge esquerra); Família F2 (imatge dreta).	80
Fig. 75: Vista frontal del model digital de la paret rocosa amb les famílies F1 i F2, on es pot observar la tipologia rombic dels blocs que forma la intersecció d'aquestes dues famílies.....	81
Fig. 76: Vista zenital del model digital de la paret rocosa on s'identifiquen bé les famílies F3 i F5.	81
Fig. 77: Vista zenital del model digital de la paret rocosa amb les famílies F3 (imatge esquerra) i F5 (imatge dreta).	82
Fig. 78: Vista zenital del model digital de la paret rocosa amb la família F4 identificada i modelada.	82
Fig. 79: Vista frontal de la paret rocosa amb les juntes modelades (imatge esquerra) i vista zenital (imatge dreta). ...	83
Fig. 80: Representació estereogràfica de les 5 famílies identificades i modelades sobre la paret rocosa.	83
Fig. 81: Imatge estreta del programa <i>Rhinoceros</i> en el procediment per mesurar espaiats de les discontinuïtats modelades de la família F3 en aquest cas.	84
Fig. 82: Representació dels espaiats mesurats de cada una de les famílies identificades i modelades.	84
Fig. 83: Volum del desprendiment estimat amb el model digital de la paret i la cartografia topogràfica a escala 1:5000.	86
Fig. 84: Procediment fallit de tall del volum de control amb les famílies F1 i F2.	87
Fig. 85: Estat final aconseguit en reiterades ocasions en el tall del volum de control generat amb la topografia.	87
Fig. 86: Vista frontal del model digital de la paret amb el volum de control de 10.000 m ³ utilitzat per obtenir la IBSD.	88
Fig. 87: Volum de control utilitzada per a l'obtenció de la IBSD a partir del tallat d'aquest amb les 103 juntes identificades i modelades sobre el model digital de la paret rocosa (imatge esquerra).	89
Fig. 88: Juntes que tallen el volum de control delimitades dins seu.	90
Fig. 89: Ampliació de les juntes que tallen el volum de control a la seva part central.	90
Fig. 90: Histograma per classes dels volums de blocs puntuals (BP) mesurats.	91
Fig. 91: Distribució de volums dels blocs puntuals mesurats.	92
Fig. 92: Distribució de volums dels blocs puntuals sense classificar per classes.	93
Fig. 93: Resum de les distribucions de volums de blocs obtingudes en els Sampling Plots.	94
Fig. 94: Distribució de volums de blocs al SP1 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	95
Fig. 95: Distribució de volums de blocs al SP2 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	95
Fig. 96: Distribució de volums de blocs al SP3 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	96
Fig. 97: Distribució de volums de blocs al SP4 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	96
Fig. 98: Distribució de volums de blocs al SP5 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	97
Fig. 99: Distribució de volums de blocs al SP6 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.	97
Fig. 100: Distribucions de volums de blocs dels Sampling Plots, filtrades i ajustades amb lleis potencials.	98
Fig. 101: Exponents de les lleis potencials ajustades a les distribucions de volums de blocs obtingudes a les parcel·les de mostreig, abans i després de filtrar els valors de volums mínims.	99
Fig. 102: Coef. de correlació de les lleis potencials ajustades a les distribucions del sampling plots abans i després de filtrar-ne les dades.	99
Fig. 103: Distribucions de volums de blocs mesurades en parcel·les de mostreig i blocs puntuals amb la PBSB obtinguda.	101
Fig. 104: PBSB: Propagated Block Size Distribution obtinguda sencera, amb els valors extrems que s'han filtrat. ..	102
Fig. 105: PBSB obtinguda i PBSB amb els valors extrems ajustada amb una llei potencial truncada.	104
Fig. 106: Volum de control de 10.000 m ³ (esquerra), volum de control tallat amb 4 famílies (central) i tallat amb 5 famílies (dreta).....	105
Fig. 107: Volum de control de 5.000 m ³ (esquerra), tallat amb 5 famílies de discontinuïtats (dreta).....	106

Fig. 108: Distribucions de volums de blocs a la paret rocosa (IBSD) amb volums de control de 5.000 m ³ i 10.000 m ³ utilitzant 4 o 5 famílies de discontinuïtats (4f i 5f, respectivament).....	106
Fig. 109: IBSD amb la distribució de volums obtinguda a partir dels blocs puntuals mesurats.	107
Fig. 110: IBSD obtingudes i distribució de volums de blocs puntuals un a un.	108
Fig. 111: IBSD (paret rocosa) i PBSB (dipòsit) obtingudes i distribució de volums dels blocs puntuals mesurats. ..	109
Fig. 112: Ajustos amb lleis potencials i exponencials a les distribucions IBSD i PBSB obtingudes.	110
Fig. 113: IBSD, PBSB, distribució de blocs puntuals i extrem de la PBSB associada als volums màxims.	111
Fig. 114: Nombre de blocs de cada classe de volum definida de les distribucions IBSD (paret rocosa) i PBSB (dipòsit del desprendiment).....	112
Fig. 115: Vehicle aeri no tripulat (VANT) model S800 de la marca DJI, amb una càmera SONY NEX.	118

Índex de Taules:

Taula. 1: Visites de camp realitzades i nombre de blocs mesurats com a blocs puntuals (BP) i en Sampling Plots (SP).	50
Taula. 2: Dates, dimensions i nombre de blocs mesurats en les parcel·les de mostreig (Sampling Plots).	56
Taula. 3: Relacions entre la superfície real dels Sampling Plots realitzats i la regió que representen sobre la tartera. .	63
Taula. 4: Resum de volums calculats per regions i volum total del despreniment en base als blocs mesurats.	63
Taula. 5: Espaiats mesurats sobre cada una de les famílies modelades en el model digital de la paret rocosa.	85
Taula. 6: Resum de les mesures d'espaiats de les famílies de discontinuïtats identificades i modelades.	85
Taula. 7: Dades estadístiques dels volums dels blocs puntuals mesurats.	92
Taula. 8: Resum de dades estadístiques de cada una de es parcel·les de mostreig.	94
Taula. 9: Valors d'ajust de les lleis potencials ajustades abans i després del filtrat dels volums mínims.	98
Taula. 10: Extrapolació de les mesures de blocs en parcel·les de mostreig per a la construcció d'una única distribució de volums de blocs representativa del dipòsit del despreniment.	100
Taula. 11: Nombre de blocs i freqüència acumulada per classes de la IBSD obtinguda.	108
Taula. 12: Lleis potencials i exponencials ajustades a la IBSD i la PBSB.	110

1. Introducció:

La present tesina s'emmarca dins l'estudi i avaluació del risc associat a desprendiments de blocs i cornises rocoses. Els desprendiments rocosos són fenòmens molt freqüents en àrees de muntanya amb conseqüències socioeconòmiques creixents per la major freqüentació i exposició. Dins els fenòmens d'inestabilitat de vessants en el nostre entorn geogràfic, els desprendiments rocosos són de llarg els més calamitosos. En són clars exemples els 13 morts a l'hostal dels Esplovins a l'Alt Urgell el 1894; la vintena de morts al ferrocarril a l'Ametlla de Mar el 1926 i 3 més al Garraf el 1981; els 9 morts a la muntanya de Montjuïc el 1963 (Llasat i Corominas, 2010); els impactes recents a edificis de localitats com La Clua, Pessonada, o Juncosa; el desprendiment de Vilaverd (Fig. 1); els accidents amb víctimes a platges i camins de ronda com a Palafrugell, Lloret, Blanes; o els costosos treballs de reparació i protecció dels cremalleres de Núria i de Montserrat (Janeras et al. 2013).

La fragmentació és un dels mecanismes presents als desprendiments. Es defineix com la separació de la massa rocosa en blocs més petits com a conseqüència de l'impacte de la mateixa sobre la superfície topogràfica, fent que els blocs segueixin trajectòries independents vessant avall (Evans & Hunr, 1993). Normalment, la fragmentació i la pèrdua d'energia té lloc després dels primers impactes (Wang & Tono, 2010; Giani et al. 2004).

La definició del volum inicial de desprendiment és fonamental per a les anàlisis de trajectòries, el càlcul de les energies d'impacte, per al disseny de les proteccions i l'avaluació quantitativa del risc. La importància del nombre i mida dels blocs en els desprendiments ha estat discutida per Jaboyedoff et al. (2005). No tenir en compte la fragmentació dels desprendiments fa que es sobrevalori les energies d'impacte, l'abast dels blocs i la previsió de trajectòries, el que resulta en una incorrecta definició del perill i en el disseny de les proteccions com les pantalles dinàmiques i les galeries. Malgrat ésser la fragmentació un mecanisme conegut, gairebé no hi ha hagut avenços en la seva determinació.

La fragmentació és un mecanisme complex, pobrament entès i difícil de modelar en el que intervien entre d'altres (Chau et al 2002, Zhang et al. 2000): la presència de discontinuïtats als blocs que cauen, l'espaiat i persistència de les mateixes, l'energia d'impacte, o la rigidesa de la superfície d'impacte. La fragmentació dels desprendiments ha estat incorporada en algun programa de simulació de trajectòries com és el software Hy-stone (Crosta & Agliardi, 2003) que inclou una xarxa neuronal per determinar la massa i velocitat dels fragments després dels impactes. No obstant, el model té dificultats per reproduir la distribució de fragments observada en realitat. Alternativament, s'han proposat altres procediments a partir de dades empíriques (Dussage et al. 2003; Corominas et al .2012), basant-se en la influència de les discontinuïtats presents en el massís sobre la distribució de fragments després dels impactes.

En aquest sentit, el projecte de recerca en el que està emmarcada la present tesina està centrat en **l'estudi, comprensió i anàlisi del procés de fragmentació dels desprendiments al llarg del seu recorregut i la distribució de blocs rocosos que en resulta**, així com l'avaluació del volum potencial de masses rocoses inestables a les parets rocoses que podrien produir grans desprendiments. **La present tesina es centrarà en analitzar la influència de l'espaiat de les discontinuïtats en la fragmentació d'una massa rocosa després de impactar sobre el terreny i en l'obtenció de les distribucions de volums de blocs produïts**

L'anàlisi de la fragmentació es farà estudiant un cas concret. És un despreniment de grans dimensions que va succeir el mes de Novembre del 2011 al vessant nord de la Serralada del Cadí. L'estudi es planteja des de dues aproximacions:

- (a) A partir de la caracterització de la fracturació al massís rocós abans del despreniment per obtenir la distribució volumètrica dels blocs limitats per discontinuïtats (blocs in situ). Aquesta tasca s'ha realitzat fent servir models digitals tridimensionals de la paret rocós generats a partir d'imatges fotogràfiques mitjançant tècniques fotogramètriques, permetent obtenir les famílies de fractures i els seus espaiats amb programes de modelat 3D;
- (b) El reconeixement i descripció del despreniment recent, mesurant els blocs del dipòsit per obtenir els seus volums, la seva distribució espacial i finalment la distribució volumètrica dels blocs caiguts. Aquesta tasca s'ha dut a terme realitzant sis visites de camp a la zona d'estudi.

Una vegada obtingudes les distribucions de volums de blocs abans i després del despreniment es podran comparar i fer-ne la interpretació corresponent, així com la identificació i quantificació del fenomen de fragmentació.

L'estudi de la fragmentació pot aportar nova informació vital pel disseny de les estructures de defensa davant d'aquest risc. Les pantalles dinàmiques i els murs de defensa es dissenyen en funció de l'energia d'impacte que es preveu que arribarà a la zona de l'estructura de defensa, i aquesta depèn directament de la massa que impacta i de la seva velocitat. En aquest sentit és de gran rellevància entendre l'evolució dels volums durant la propagació d'un despreniment. Una vegada comprès millor el fenomen de la fragmentació es poden dissenyar elements de mitigació del risc que es basin en fragmentar els blocs despresos durant la seva propagació amb l'objectiu de dissipar energia i reduir la massa i volum dels blocs per facilitar-ne la seva captació i millorar l'eficiència de les pantalles dinàmiques i altres estructures de defensa.



Fig. 1: Exemple de despreniment rocós a la carretera d'accés a la població de Vilaverd (extret de la web de Vilaweb).

2. Antecedents:

2.1 Antecedents en l'estudi de desprendiments rocosos

Els desprendiments rocosos són esdeveniments molt ràpids que es desenvolupen en molt pocs segons o minuts, i en el que la massa mobilitzada pot recórrer grans distàncies amb energies d'impacte elevades que poden generar grans desperfectes i un elevat risc per la població exposada. En aquest sentit, quan succeeix un despreniment no hi ha temps per prendre decisions o per realitzar accions de protecció (Volkwein et al., 2011). En aquest sentit, entre les mesures de mitigació del risc associat als desprendiments rocosos hi ha la reducció del perill intentant reduir les probabilitats d'ocurrència mitjançant l'estabilització de la paret rocosa o mirar d'interceptar els blocs rocosos en el seu recorregut amb pantalles dinàmiques o altres tipologies d'elements de protecció (Joughin et al., 2011). Aquestes mesures de mitigació es dissenyen en funció de les energies d'impacte dels blocs que són producte de la massa dels blocs i de la seva velocitat de propagació, i per aquest motiu és tant important l'estudi de les distribucions de volums que poden intervenir en un despreniment i la seva evolució al llarg de la propagació del despreniment deguda a la fragmentació.

Des de la visió de la gestió i avaluació del risc associat als desprendiments rocosos es treballa la caracterització de les zones actives o susceptibles a provocar desprendiments així com la zonificació del territori que es pot veure afectat per cada despreniment en concret. Les zones de sortida de desprendiments rocosos estan fortament influenciades per les característiques geomecàniques del massís rocós, on les famílies de discontinuïtats, els seus espaiats i persistències i la seva interacció geomètrica o espacial influeixen en gran part la caiguda o no dels blocs rocosos així com la seva distribució de volums. Tot i això, la previsió o pronosticar quin serà el volum inicial involucrat en cada despreniment és un dels grans problemes a l'hora d'estudiar la propagació del despreniment i el perill que suposa.

Es pot classificar l'estudi dels desprendiments rocosos en quatre apartats: (a) l'anàlisi del potencial de ruptura, de forma qualitativa o quantitativa; (b) la caracterització de l'àrea font de sortida de blocs; (c) la simulació o modelació de trajectòries des d'un punt de vista físic i/o probabilístic; (d) i el disseny de contramesures de mitigació com les pantalles dinàmiques o les estructures de defensa i contenció com murs o falsos túnels.

En l'anàlisi del potencial de ruptura de blocs o parets rocoses, així com en general en l'anàlisi de risc, és interessant ressaltar la diferència entre les avaluacions qualitatives on es jerarquitzava el risc en nivells definits pels experts, i l'avaluació quantitativa on es defineixen valors numèrics associats a les magnituds físiques del fenomen i probabilitats a tots els factors que intervenen per obtenir uns valors finals que són probabilitats associades a determinades circumstàncies (Corominas et al., 2013). En aquest sentit, la definició de la magnitud de la massa potencialment inestable agafa una important rellevància per a l'avaluació precisa del risc de forma quantitativa.

Es poden realitzar diferents aproximacions del potencial de ruptura, des d'un punt de vista probabilístic en funció dels desprendiments anteriors i dels inventaris de desprendiments obtenint relacions entre els volums de despreniment i la seva freqüència o probabilitat d'ocurrència (Dussauge-Peisser et al., 2002). En aquesta tipologia d'avaluacions també es poden incorporar conceptes de la modelació física per a millorar la precisió espacial de la predicció amb models de simulació de caiguda de blocs (Frattini et al. 2008). Aquesta combinació de

L'avaluació del risc que combina l'estudi des d'un punt de vista estadístic i l'avaluació del comportament amb models de propagació amb una base física poden aportar informació de molt alta qualitat i precisió.

Pel que fa als **models de simulació de la propagació en caiguda de blocs** es pot trobar un ampli ventall de programes i codis que van millorant tots els aspectes que intervenen per aconseguir cada vegada pronòstics de major certesa. Alguns dels factors més rellevants que intervenen en aquests models són: la massa/volum de sortida, la posició de sortida, les característiques del terreny sobre el que impacta el bloc, la forma del bloc, com impacte el bloc sobre la superfície del terreny, la vegetació o els boscos que poden atenuar les energies i la modelació de les possibles mesures de mitigació per analitzar-ne l'eficàcia. Un dels grans passos de desenvolupament ha sigut la creació **de models de simulació tridimensionals** (com el *Rotomap* (Geo&Soft, 2003) o el *RockyFor* (EcorisQ, 2012)), ja que els models bidimensionals consideraven les trajectòries en el pla del perfil topogràfic que s'hagués decidit, i com s'observa a la natura, les trajectòries tenen una forta component tridimensional. Alguns d'aquests models més interessants són el programa STONE (Guzzetti et al., 2002), així com alguns models que incorporen paquets per l'estudi dels impactes amb anàlisis estocàstics (Bourrier et al., 2009) i programes de simulació tridimensional com el Hy-Stone que per primera vegada incorpora un paquet que considera el procés de fragmentació dels blocs durant la propagació mitjançant un sistema de xarxes neuronals per predir la nova distribució de volums (Agliardi & Crosta, 2003). A la Fig.2 es mostra una dels mapes resultat de fer un anàlisi amb el model Hy-Stone. Tot i així, aquest últim model no acaba de predir correctament les distribucions de volums després de la fragmentació que s'observen a camp.

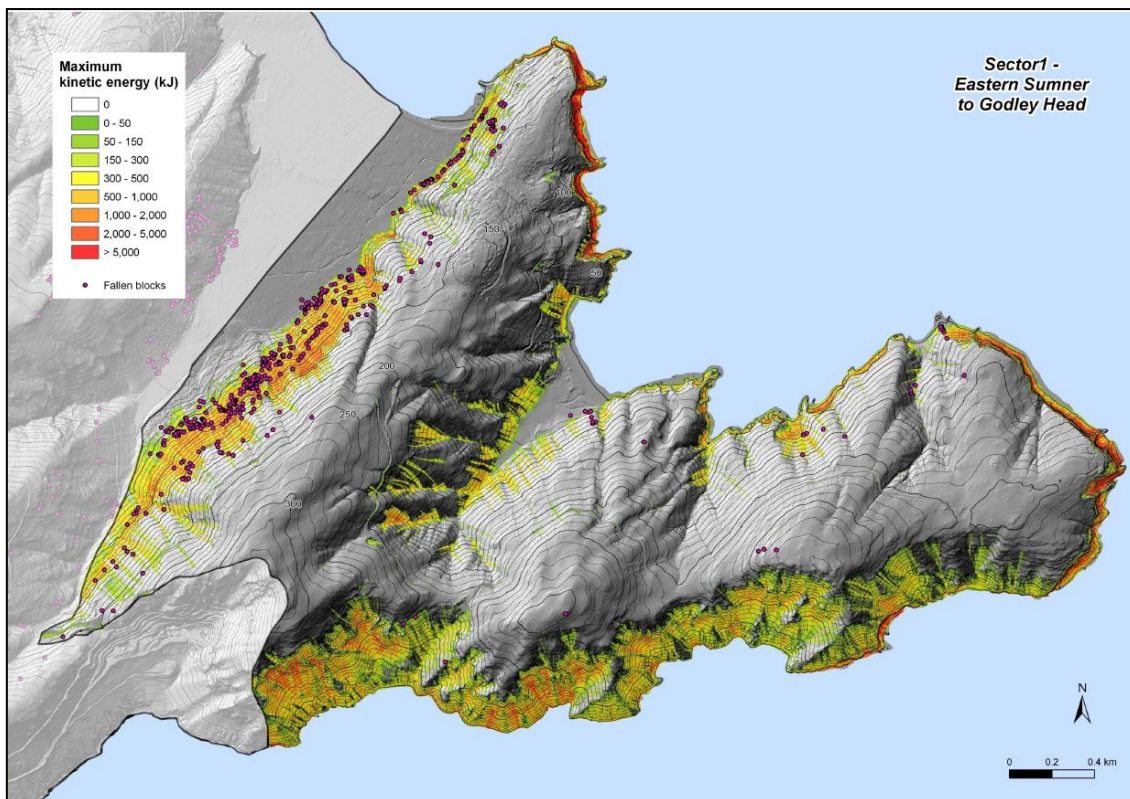


Fig. 2: Mapa d'energies cinètiques de desprendiments obtingut amb el programa Hy-Stone. Estudi dut a terme per l'empresa Geovert a la localitat de Christchurch a Nova Zelanda (extret de la pàgina web del CARE).

A la Fig. 3 es mostra la diferència entre els mapes resultants d'un estudi probabilístic, a l'esquerra, i un estudi basat en un model físic de simulació de caiguda de blocs.

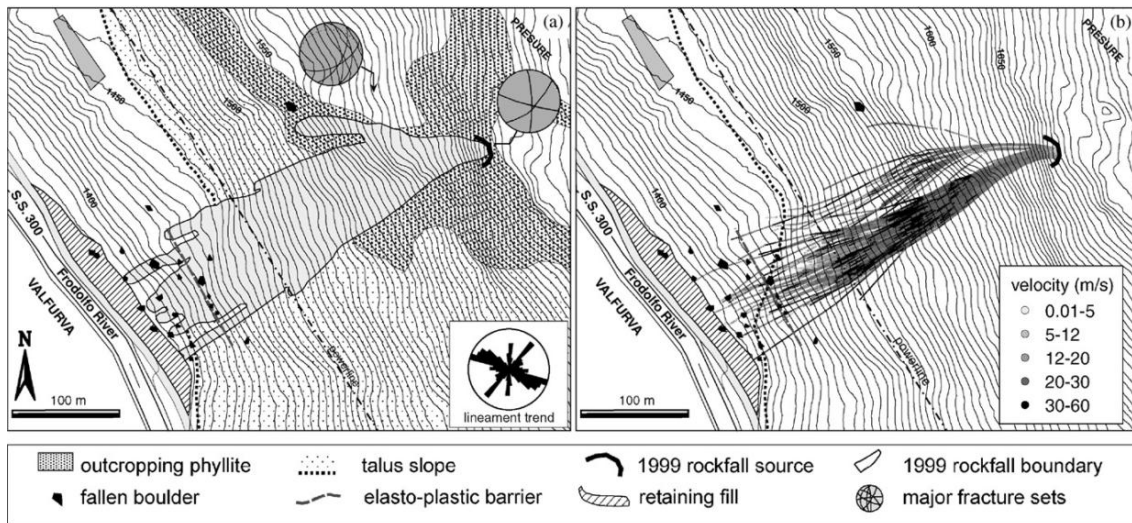


Fig. 3: Esquerra: Mapa obtingut amb un anàlisi probabilístic. Dreta: el mateix cas amb un anàlisi basat en un model físic de simulació de caiguda de blocs. Imatge extreta de (Volkwein et al., 2011).

Així doncs, es pot considerar de gran rellevància l'estudi del procés de fragmentació per a la incorporació de lleis de fragmentació en els programes de simulació de caiguda de blocs per millorar-ne els resultats.

2.2 Antecedents en distribucions potencials i lleis fractals

A la natura, en economia, en sociologia, i en molts altres camps apareixen les distribucions potencials (Power-law) o com també se les coneix, distribució de Pareto en honor al sociòleg Vilfredo Pareto. Aquesta distribució estadística és del tipus : $y = ax^{-b}$, on a i b són dos paràmetres d'ajust. Al llarg de la tesina es desenvoluparà més les diferents expressions de la distribució i les diferents interpretacions que se'n deriven, però a nivell d'antecedents cal indicar dos aspectes importants: per una banda alguns estudis estadístics interessants sobre els problemes d'ajust d'aquest tipus de distribucions estadístiques en funció del mostreig i els errors típics que es produeixen (Pickering et al., 1995) i (Clauset et al., 2009).

Per altra banda cal fer referència a la gran quantitat d'estudis de la naturalesa que utilitzen la **teoria fractal** que es veu directament implicada en aquest tipus de distribucions estadístiques.

Fractal és el nom que el matemàtic Benoit Mandelbrot va adjudicar al 1975 a tot un grup d'objectes geomètrics que fins aleshores no eren ben encabits a la resta de la geometria. La paraula fractal prové del llatí *fractus*, que vol dir fragmentat, fracturat, trencat. La característica bàsica d'aquests objectes és que la seva dimensió mètrica no és un numero enter. Alguns dels conceptes més rellevants dels objectes geomètrics fractals és que sovint estan composts d'una sèrie de còpies **autosimilars** o autosemblants, és a dir, que es poden descomposar o crear en

processos iteratius que reproduïxen un mateix esquema una vegada i una altra a diferents escales. A la Fig. 4 es mostra un típic exemple d'una seqüència de creixement geomètric fractal anomenat *la corba de Koch*, que es base en partir un segment en tres trams i al tram central generar dos nous segments inclinats de forma iterativa per a cada segment.



Fig. 4: Patró de creixement geomètric fractal: corba de Koch.

Són molts els antecedents que es poden trobar al voltant de la **caracterització geomètrica de materials geològics** (rugositats i formes de juntes), morfologies superficials (morfologies deltaïques, fluvials, volcàniques, etc...) o caracterització de patrons de fractura (sistemes de fractures o estructures geològiques) en base a definicions fractals (Turcotte 2007). En aquest sentit cal remarcar estudis de caracterització geomecànica en base a la utilització de la dimensió fractal (Pal & Chakravarty, 2003) i (Bagde et al., 2002), així com la utilització de geometries fractals per a la caracterització d'estructures geològiques complexes (Kruhl, 2013).

També es poden trobar estudis més dirigits a l'anàlisi del comportament de la generació i propagació de fissures des d'un punt de vista de la mecànica de roques i de la mecànica de fractures que utilitzen una caracterització fractal per desenvolupar els **models geomecànics** pertinents (Xie et al., 2001), (Xie, 1995) i (Khezzadeh, 2006).

Un dels treballs més interessants en relació a l'objecte d'estudi de la present tesina és la **definició d'un model fractal per a la caracterització del procés de fragmentació** de sòls i roques proposat per E.Perfect (Perfect, 1997). En aquest treball es proposa un model que pronostica els volums de blocs que surten d'un conjunt definit amb una dimensió fractal i un valor inicial de partició, així com un volum inicial i on cal definir les probabilitats de ruptura per a cada iteració o pas que es realitzi. Un model com aquest es podria utilitzar si s'obtingués de forma empírica una gran quantitat de dades sobre el comportament real de la fragmentació en diferents condicions litològiques, estructures, topogràfiques i energètiques amb les que es poguessin calibrar tals probabilitats de ruptura per a cada una de les iteracions del procés.

També cal citar els treballs on s'obtenen distribucions potencials interpretades com a lleis fractals, sobre dades referents a la caracterització de mides de bloc de materials geològics fragmentats o sobre les relacions magnitud freqüència de terratrèmols (Turcotte, 1990), així com distribucions potencials sobre dimensions i freqüència d'ocurrència d'esllavissades (Malamud et al., 2004), que també s'han observat en desprendiments rocosos (Dussauge et al., 2003).

2.3 Antecedents en la definició de distribucions de volums de blocs

A la literatura es troben diferents aproximacions per a l'**estimació de distribucions de blocs in situ** com per exemple, utilitzant una tècnica basada en simulacions de Monte Carlo on a més dels espaiats, orientacions i cabussaments de les famílies de discontinuïtats, es dona una important rellevància a la caracterització de la persistència de les juntes per a la estimació de la distribució de blocs in situ (**IBSD**: In situ Block Size Distribution) com fan (Elmoultie &

Poropat, 2011). Una de les conclusions interessants d'aquest últim treball és la rellevància de la persistència de les juntes sobretot als blocs de grans mides.

Un altre treball interessant és el de (Kim et al., 2006), on també es remarca la importància de la persistència de les famílies de discontinuïtats a l'hora d'obtenir distribucions de blocs in situ a partir de formulacions que consideren tres famílies de discontinuïtats, les seves orientacions i cabussaments, els seus espaiats i la seva persistència. En aquests treballs es reitera la importància de la persistència de mides de blocs grans, mentre que en mides petites no sembla tant rellevant. En aquests cas es realitzen simulacions de sistemes de discontinuïtats mitjançant programes d'elements discrets de l'empresa Itasca, com el UDEC i el 3DEC. Es simulen una sèrie de famílies de discontinuïtats per estudiar-ne les combinacions que donen. Tot i així, i donat que per a realitzar un bon anàlisi de sensibilitat paramètrica els casos a estudiar són molts, decideixen treballar amb famílies ortogonals per minimitzar el nombre d'experiments virtuals a realitzar.

Per dur a terme la **caracterització de les diferents famílies de discontinuïtats** d'una paret rocosa es poden utilitzar diferents tècniques. La primera i més utilitzada és la mesura manual de les diferents discontinuïtats aflorants en una zona o un segment de mostreig com el scanline (Priest & Hudson, 1981) i (Priest, 1993). Aquestes tècniques es basen en obtenir una mostra suficientment representativa de les diferents famílies, mesurant absolutament totes les juntes en un segment o en una zona de la paret rocosa.

Però no sempre es factible arribar fins a la zona d'estudi o d'interès en concret, i fins i tot en el cas de poder-hi accedir, sovint els riscs és suficientment elevat com per desistir. En aquest cas es poden utilitzar tècniques més modernes com el **LIDAR** o les **tècniques fotogramètriques** per obtenir un escanejat de tota la paret rocosa. Existeix molta literatura sobre les diferents tècniques i la comparativa d'aquestes per a la decisió d'utilitzar una o altra en funció de les necessitats de cada estudi (Sturzenegger, 2009) i (Haneberg et al., 2006). També es poden trobar treballs interessants en la línia de la utilització de les tècniques fotogramètriques per a la creació d'un model geomètric per analitzar l'estabilitat en models d'elements discrets (Firpo et al., 2011).

Tant la utilització del LIDAR com de tècniques fotogramètriques, donen com a resultat un **núvol de punts en 3D** que permeten recrear de forma virtual la paret rocosa, i a partir d'aquesta estudiar-ne els sistemes de discontinuïtats. Alguns dels programes d'anàlisi de discontinuïtats sobre núvols de punts i malles tridimensionals són el *Sirovision* i el *3DManalyst* entre d'altres.

En funció dels programes de tractament de dades (núvols de punts i malles tridimensionals) dels que es disposi, els processos d'obtenció d'informació i caracterització de les famílies de discontinuïtats es poden dur a terme de forma més o menys automatitzada i amb majors o menors graus de precisió. Aquestes eines s'engloben en el que es coneix com *Outcrop modelling*.

2.4 Antecedents en l'estudi de la fragmentació

Pel que fa a l'estudi de la fragmentació es poden trobar alguns treballs molt interessants sobre la caracterització dels volums de blocs fragmentats (Corominas et al., 2013), així com alguns treballs amb aproximacions estadístiques de distribucions de blocs mesurades en diferents escenaris de desprendiments i les seves repercussions en la dinàmica dels desprendiments (Dussauge et al., 2003).

També existeixen alguns treballs experimentals interessants en els que s'intenta observar la influència de les anisotropies de la roca que controlen el procés de fragmentació. Per una banda es poden trobar assaigs de laboratori col·locant mostres de roca amb una estratificació clara en diferents orientacions per observar la importància de l'angle d'impacte, o orientació (Tavallali & Vervoort, 2010), així com assaigs a gran escala en pedreres en els que es deixen caure blocs amb diferents anisotropies per observar-ne el comportament (Giacomini et al., 2009).

En aquest sentit, i com ja s'ha comentat, el programa de simulació de caiguda de blocs Hy-Stone és l'únic que incorpora un paquet de càlcul que permet definir la fragmentació dels blocs durant la propagació del desprendiment mitjançant un model de xarxes neuronals, que tot i tenir un bon plantejament encara té importants problemes per oferir resultats que s'ajustin correctament a les observacions empíriques amb les que es contrasten els resultats.

Al capítol 1 de la present tesina ja s'ha citat una de les propostes més interessants que planteja un model fractal per a la caracterització de la fragmentació de sòls i roques en diferents circumstàncies, proposat per (Perfect, 1997).

Ja de forma molt específica i propera, cal citar el treball fet a la pròpia Escola Tècnica Superior de Camins Canals i Ports de Barcelona, com a tesina de final de màster d'Isaac Montero, en la que es simula mitjançant el programa *Rotomap*, un conjunt de desprendiments en els que a cada impacte, i sota criteris energètiques, s'imposa una nova distribució de volums originades a partir de la fragmentació d'un bloc, utilitzant un inventari de desprendiments realitzat per R.Copons al Solà d'Andorra per ajustar el model (Copons, 2004).

També cal fer referència a la gran quantitat de treballs realitzats per una banda per Turcotte al voltant de la caracterització de distribucions de probabilitats, geometries i altres aspectes al voltant de l'estudi d'esllavissades i desprendiments de roca en base a teories fractals (Malamud et al., 2004), (Turcotte, 1990), (Guzzetti et al., 2002), i per altra banda treballs realitzats per Heping Xie, al voltant de l'estudi i caracterització de materials geològics amb teories fractals (Xie et al., 2001) així com la generació i propagació de fissures en impactes dinàmics en roques (Xie, 1995).

3. Plantejament del problema i objectius

3.1 Plantejament del problema

Per interpretar els treballs realitzats fins ara cal tenir en compte els conceptes i criteris de definició per a paraules com bloc, massa inestable, disgregació o fragmentació. En un massís rocós es poden identificar masses rocoses inestables, amb certa probabilitat de ruptura provocant una caiguda de blocs. Tot seguit es mostren alguns casos conceptuals per exemplificar el fenomen.

CAS 1: En el primer dels casos plantejats es té una **massa inestable** a la paret rocosa que està formada per **només un bloc**, és a dir, en base a les discontinuïtats existents a la paret rocosa, només es delimita un volum que és anomenat **bloc in situ**. Aquest bloc té cert volum, i la freqüència en la que cauen blocs d'aquest volum en una paret en concret és coneguda, o no. Al caure, el bloc pot no trencar-se, i ni la magnitud ni la freqüència es veuran afectades. Però **si el bloc es trenca, generant nous blocs, el que s'obté és una distribució de volums de blocs**, tots ells de magnituds o volums menors que el bloc in situ. Com que no hi havia discontinuïtats en el bloc in situ, els blocs nous són tots delimitats per noves ruptures de la roca fresca. Aquest és el cas de la fragmentació d'un bloc, esquematitzat a la Fig. 5.

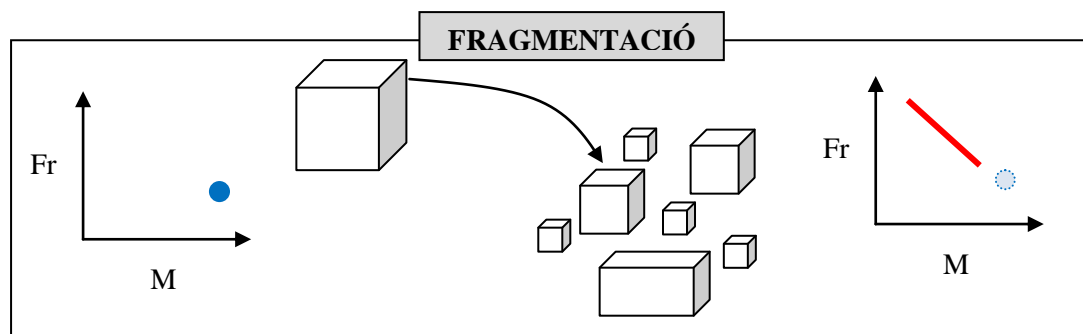


Fig. 5: Esquema del CAS 1: Un bloc in situ sense discontinuïtats preexistents que es trenca al caure. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.

En aquest cas ja existeix certa confusió sobre quines són les relacions de freqüències i magnituds que s'haurien d'utilitzar per a la realització d'un anàlisi quantitatiu del risc, ja que a priori es desconeix si el bloc es fragmentarà o no, i per tant és difícil conèixer quins volums s'han d'utilitzar per a l'anàlisi del risc. A més, la fragmentació fa variar les trajectòries dels blocs i les seves energies.

Aquest cas seria per exemple, el cas d'un massís granític amb un sistema de diaclasat que delimita molt bé els blocs, però que dins de cada bloc la roca es mostra intacta.

La fragmentació d'un bloc de roca s'ha estudiat des d'un punt de vista de la mecànica de roques, sota impactes dinàmiques. Existeixen treballs amb assaigs de laboratori on es quantifiquen el nombre de fragments que genera una mostra de roca amb diferents velocitats de deformació imposada (Whittles et al., 2006).

La fragmentació del bloc depèn de l'energia, o de la velocitat de la càrrega que se li pot aplicar a laboratori, però també depèn lògicament de les seves resistència a compressió i a tracció

i la seva anisotropia. Les anisotropies mineralògiques de la roca i la distribució de tensions pel bloc acaben determinant vies preferents de ruptura i per tant acaben determinant els volums i les formes dels blocs resultants.

Algun d'aquests estudis és el de (Whittles et al., 2006), on s'analitzen els nombres de blocs i les seves mides al aplicar diferents velocitats de càrrega a mostres de roca de diferents litologies. A la següent Fig. 6 es mostra una fotografia amb mostres trencades a diferents velocitats de deformació.



Fig. 6: Blocs fragmentats a diferents velocitats de deformació extret de (Whittles et al., 2006).

Aquests assaigs s'utilitzen per calibrar models físics que en general utilitzen DEM (Discrete Elements Methods) per modelar el comportament físic de la roca, la seva distribució de tensions i la propagació de les fissures. A la següent Fig. 7 es mostren dues mostres modelades amb DEM a la mateixa publicació de (Whittles et al., 2006):

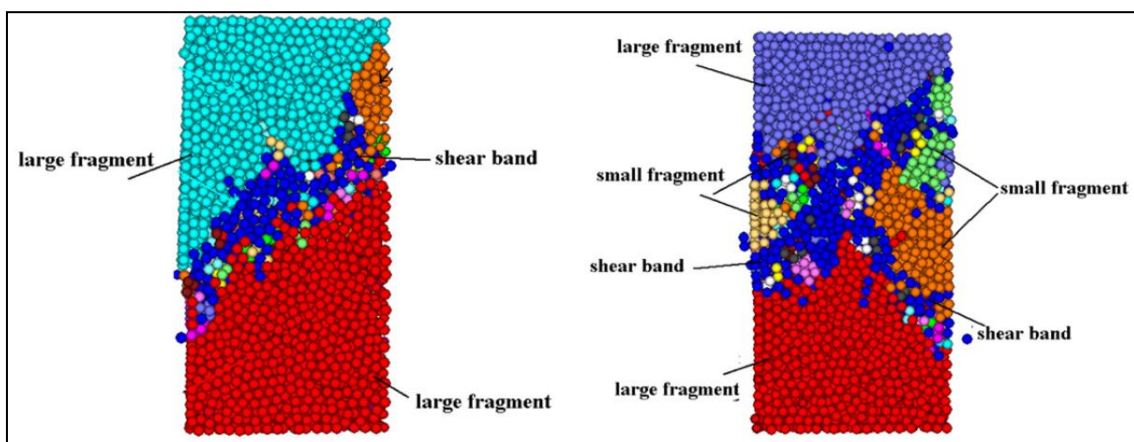


Fig. 7: Fragments obtinguts en un model de ruptura de blocs de roca realitzat amb DEM extret de la publicació (Whittles et al., 2006).

Altres publicacions, en la mateixa línia d'investigació, busquen els patrons de fractura en blocs de roca en funció de la forma inicial del bloc i de l'orientació de l'impacte, que modifica fortament la resposta i el patró de ruptura com es mostra a la següent Fig. 8 extreta de la publicació de (Estay et al., 2013):

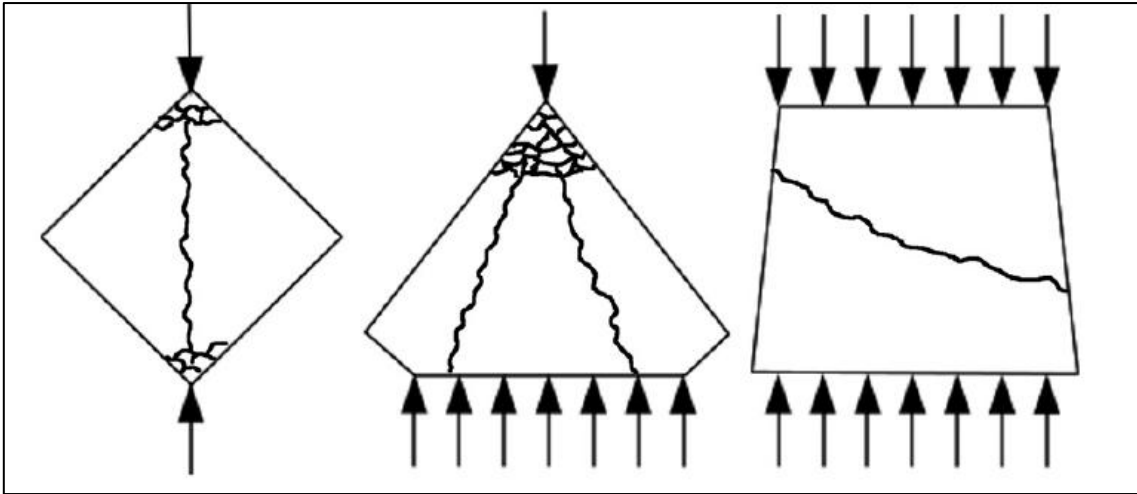


Fig. 8: Modelitzacions de patrons de fractura de blocs mitjançant DEM extret de (Estay et al., 2013).

Altres treballs interessants són aquells en els que es realitzen assaigs de camp per observar el nombre de blocs que resulten al llençar blocs en una pedrera des d'una altura coneguda (Giacomini et al., 2009). A la següent Fig. 9 es mostra un dels blocs utilitzats en l'estudi citat on s'observa com s'ha fragmentat utilitzant l'anisotropia que suposen els plans d'estratificació que esdevenen plans preferencials de ruptura del blocs.



Fig. 9: Imatge d'un bloc fragmentat en una caiguda controlada en el treball (Giacomini et al., 2009).

Així doncs, cal tenir clar que en aquest primer cas, on és fragmenta un bloc de roca massiva, els factors que controlen la fragmentació són **l'energia d'impacte**, per tant l'altura del salt i el terreny sobre el que impacte, i **la litologia de la roca**, on s'engloben característiques com la seva resistència i la seva anisotropia que controlen també el patró de fracturació del bloc. A més, cal tenir en compte factors més estocàstics com **la direcció de la força d'impacte en relació a l'orientació de l'anisotropia de la roca**.

CAS 2: En el segon cas, la massa inestable de la paret rocosa està formada per un **conjunt de blocs predefinitos pel sistema de juntes del massís**. Així doncs, els blocs in situ formen part d'una **distribució de volums de blocs in situ**. Al caure, els blocs poden **disgregar-se**, és a dir, **separar-se entre ells a partir de les juntes ja existents**. En molts casos, i quan la persistència de les juntes no és infinita, cal una despesa energètica menor per acabar de propagar una junta preexistent que no pas per generar-ne una de nova. Si és així, **si els blocs només es disgreguen en base a les juntes preexistents, sense noves ruptures, la distribució de volums de blocs abans i després del desprendiment serà exactament la mateixa** (Fig. 10).

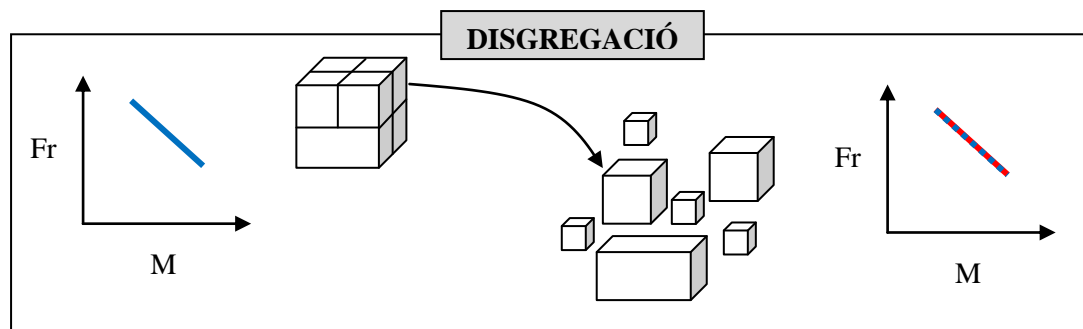


Fig. 10: Esquema CAS 2: Conjunt de blocs in situ que al caure es disgreguen sense noves ruptures. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.

Aquest cas podria assimilar-se a un desprendiment de poca altura i per tant amb poca energia, insuficient per generar noves ruptures, amb una massa inestable de roca fracturada a priori i una resistència de la roca matriu suficient per no trencar-se. Seria el cas d'un desprendiment de poca altura d'una roca prou resistent per no trencar però amb una família de discontinuïtats suficientment dèbil per disgregar la massa, per exemple amb un reblert d'argiles enlloc d'una cimentació o una recristal·lització dins de la junta que podria donar-li una major cohesió i resistència a ser separada.

En aquestes circumstàncies, la xarxa de discontinuïtats controla completament el procés de disgregació. Sovint s'utilitzen les sigles DFN (Discrete Fracture Network) per fer referència aquest conjunt de discontinuïtats que caracteritzen la roca mitjançant codis i formulacions que permeten la seva caracterització d'una forma molt realista. A més, com que les famílies de discontinuïtats no tenen unes dimensions infinites, el paper de la persistència de les juntes i dels ponts de roca, que és la part de roca que no queda tallada per la junta, prenen un paper fonamental en la caracterització de la DFN i en el comportament de la roca.

Per aquest motiu existeixen molts estudis al voltant de la caracterització de la xarxa de discontinuïtats d'un massís, la caracterització i identificació de cada una d'elles i la seva persistència així com la seva resistència a tracció i a tall. Els treballs més importants en aquest sentit són sobretot els de (Elmoultie & Poropat, 2011), (Cai, 2004) i (Kim et al., 2006) que s'explicarà breument a l'apartat de metodologia.

Per altra banda, també existeixen molts estudis basats en la teoria fractal per a la caracterització dels sistemes de fractures de massissos rocosos com ja s'ha citat, entre els quals cal destacar la feina feta per (Bagde et al., 2002)

CAS 3: El tercer cas és la suma dels casos anterior, amb una **massa inestable a la paret rocosa formada per un conjunt de blocs in situ delimitats per les famílies de juntes preexistents** del massís rocós. Si al caure, no només es disgreguen en base als volums ja existents, sinó que a més a més els blocs pateixen unes energies d'impacte suficient, **es trenquen generant nous blocs**. Aquest nous blocs poden estar delimitats en part per juntes preexistents i poden formar-se propagant juntes de persistència limitada, i també poden estar generant cares completament noves (fresques) sobre la roca matriu en alguna de les seves cares.

Per exemple, un bloc in situ, predefinit per juntes preexistents, que es parteix perfectament per la meitat durant el desprendiment, generarà dos blocs, els quals tindran (en el cas més senzill) 5 de les seves 6 cares preexistents i tan sols una de nova o fresca. en aquest cas, la distribució de volums de blocs al dipòsit del desprendiment serà una barreja de blocs predefinitos que conserven la distribució in situ i blocs amb una distribució deguda a la ruptura, amb blocs nous que com a mínim tindran una cara de roca fresca (Fig. 11).

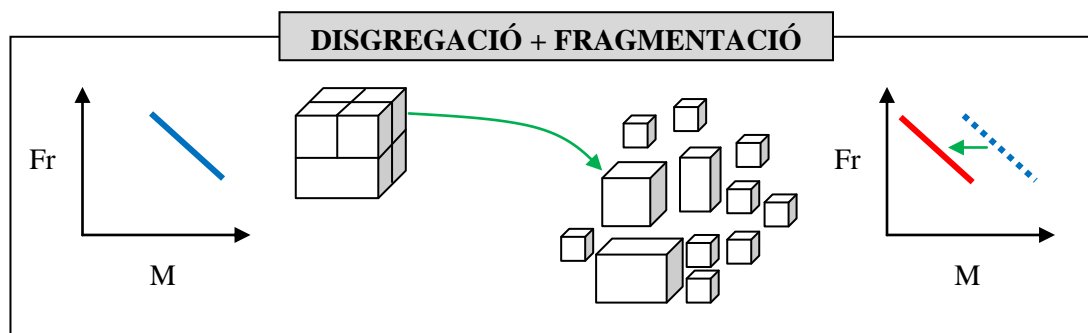


Fig. 11: Esquema CAS 3: Conjunt de blocs in situ que al caure es disgreguen i es trenquen. Distribució de volums on M és la magnitud representada pel volum, i Fr és la freqüència relativa de cada magnitud o volum.

En aquest tercer cas, la distribució de volums de blocs es veu afectada per la fragmentació, és a dir, la generació de nous blocs, fet que implica un major nombre de blocs després del desprendiment que el nombre de blocs in situ que formaven la massa inestable afectada pel desprendiment.

La transformació de la distribució de volums de blocs in situ, al massís, a la distribució de volums de blocs propagats, una vegada el desprendiment ha ocorregut, no és un fenomen trivial.

Un fenomen molt semblant, i que ha estat molt estudiat, és la fragmentació en processos de voladures per a la mineria o en la fragmentació de roques en excavacions subterrànies amb tuneladores. En aquest sentit, seria interessant definir lleis de fragmentació com les que s'utilitzen en aquests casos però adaptant els criteris energètics que es deriven de la quantitat d'explosius que s'utilitzen per fer una voladura o la velocitat i pressió que s'utilitza en el capçal d'una tuneladora, als criteris energètics que es donen en desprendiments rocosos que es deriven de l'estudi cinemàtic de les trajectòries i dels impactes dels blocs sobre el terreny.

El fenomen de la fragmentació en un impacte durant la propagació d'un bloc vessant avall en un desprendiment comporta modificacions en la massa i volum del bloc que es veu repartida en diferents blocs, modificant també la velocitat de cada un dels blocs resultants i la seva direcció, modificant les trajectòries que seguiran cada un dels blocs després de la ruptura i per tant el seu abast i l'energia final d'impacte sobre un element exposat.

A més, les freqüències associades a diferents volums de blocs es veuen afectades ja que al augmentar el nombre de blocs i disminuir el seu volum es redueix el nombre de volums de majors mides i s'augmenta el de mides menors.

La dispersió dels blocs i els canvis de trajectòries fruit de la fragmentació per impactes en desprendiments rocosos es pot observar en alguns inventaris de desprendiments. Un clar exemple és el desprendiment d'octubre del 2012 a la població d'Omells de Na Gaia, a Lleida, Catalunya, on hem realitzat un inventari dels blocs, les seves trajectòries i els punts d'impactes just el dia després del desprendiment.

La cartografia realitzada es mostra a la Fig. 12 on es pot observar com després d'alguns impactes hi ha fragmentació, punt d'impacte d'on surten més d'un bloc, fet que s'ha pogut discernir a partir de la reconstrucció de les trajectòries. També s'observen impactes on sembla que no hi ha hagut fragmentació. En aquest cas en concret, la roca inicial era un gres d'un volum d'uns 5 m^3 . Si el bloc sencer de 5 m^3 no s'hagués fragmentat, hauria trencat sense cap problema les barreres que com es veu a la cartografia van ser trencades per blocs molt menors de 0.1 a 0.2 m^3 , i hauria pogut acabar afectant amb major contundència les vivendes que es troben just a sota, però per sort, el bloc es va fragmentar en molts impactes reduint l'energia dels blocs.

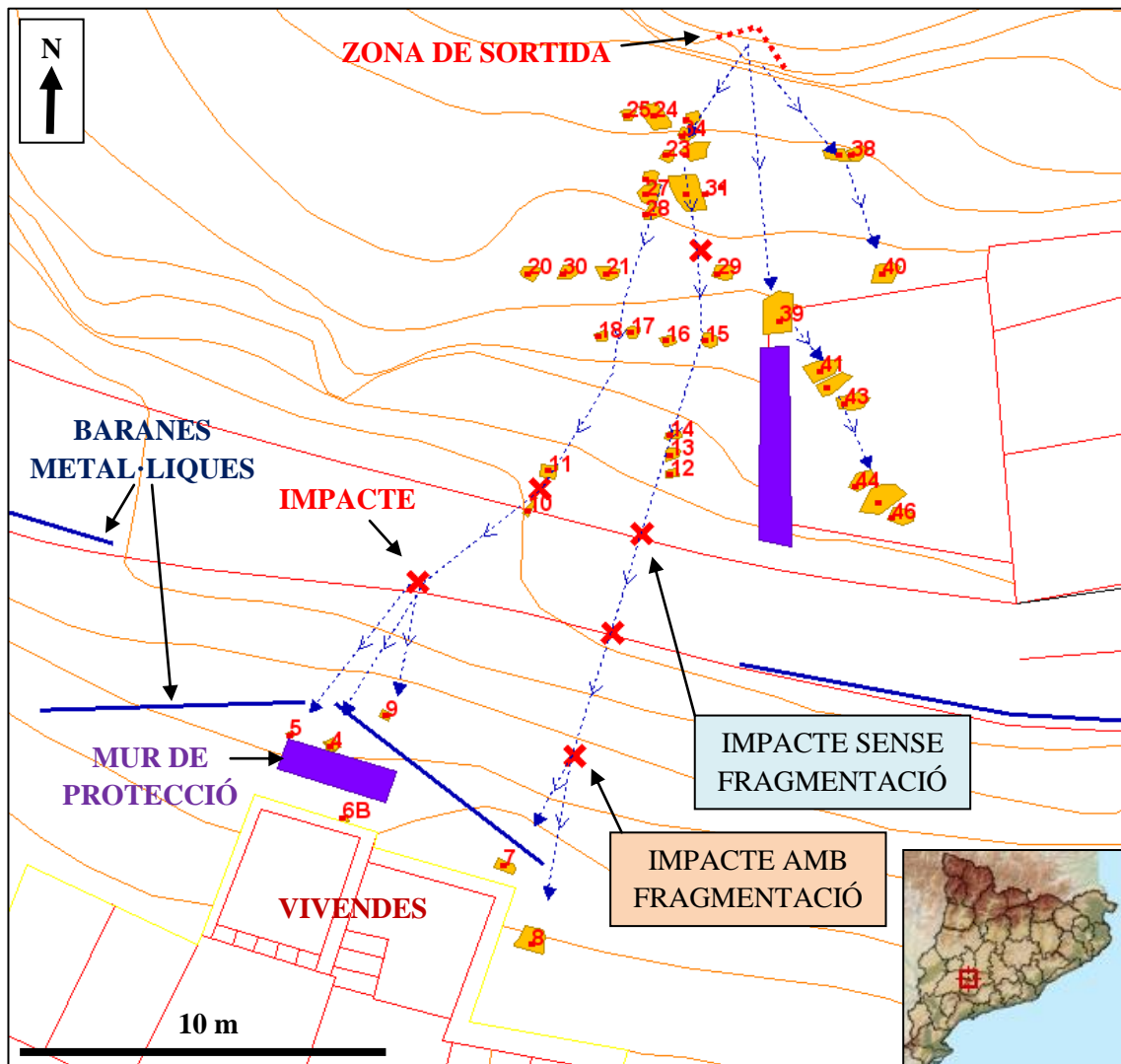


Fig. 12: Cartografia de blocs, les seves trajectòries i impactes en el desprendiment d'octubre de 2012 a la població d'Omells de Na Gaia.

El fenomen observat és de difícil modelació. Com ja s'ha citat anteriorment, només el simulador de caiguda de blocs HY-STONE té un mòdul de fragmentació de blocs per impacte que intenta modelar el fenomen de la fragmentació en desprendiments rocosos. A la Fig. 13 es mostren els resultats obtinguts amb el programa HY-STONE comparant una solució amb el mòdul de fragmentació i sense aquest, extret de la tesi doctoral de Yuannian Wang, autor del mòdul de fragmentació implementat al HY-STONE, (Wang, 2009). Es pot observar la gran variació en les trajectòries i també en el dipòsit final considerant o no la fragmentació dels blocs.

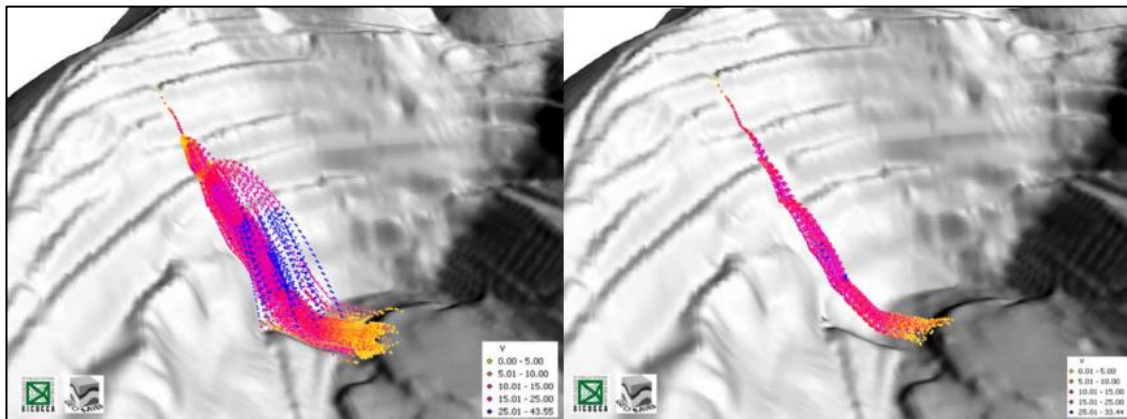


Fig. 13: Resultats de la simulació de caiguda de blocs amb (imatge esquerra) i sense fragmentació (imatge dreta), amb el programa HY-STONE, extreta de (Wang, 2009), vista amb perspectiva.

A la Fig. 14 es mostra una vista zenital de la mateixa modelació on es pot observar molt bé la diferència entre els dipòsits resultants amb i sense el mòdul de fragmentació. Cal dir que el model actual utilitza un sistema de xarxes neuronals per calcular la fragmentació, i que encara ara té certes deficiències per obtenir resultats semblants als dipòsits observats en la realitat tot i les calibracions que s'han anat realitzant com es mostra a la tesi doctoral de Wang.

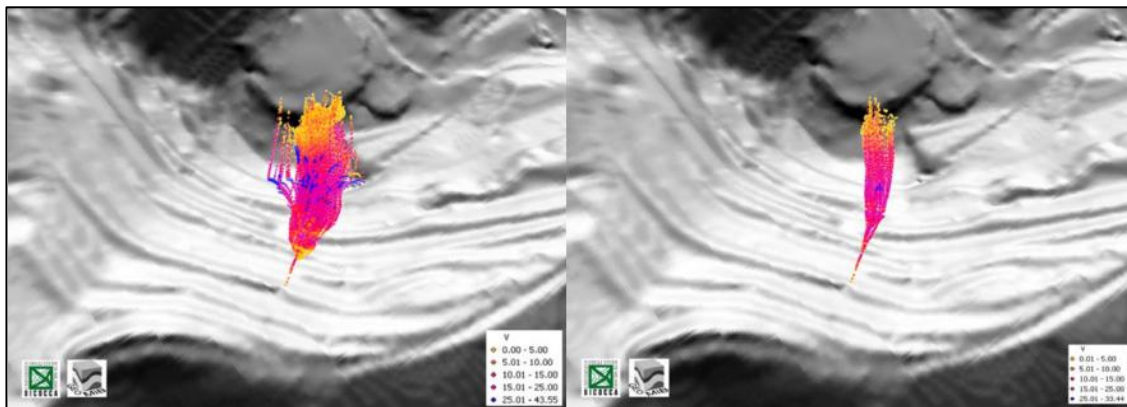


Fig. 14: Resultats de la simulació de caiguda de blocs amb (imatge esquerra) i sense fragmentació (imatge dreta), amb el programa HY-STONE, extreta de (Wang, 2009), vista zenital.

Caldrà doncs, seguir investigant en la definició de lleis de fragmentació de blocs rocosos en desprendiments. Més enllà de la present tesina, caldrà obtenir les lleis de fragmentació en base a treballs d'inventariat de desprendiments rocosos com la present tesina, i utilitzar formes com les lleis de fragmentació existents per voladures en explotacions mineres i/o models com els basats en teoria fractal com la proposada per Perfect (Perfect, 1997).

3.2 Objectius

La present tesina té com objecte d'estudi el desprendiment rocós del Cap de la Fesa, a la Serralada del Cadí, que es va produir el mes de Novembre del 2011. S'utilitzarà aquest desprendiment per a l'estudi de la fragmentació de blocs en desprendiments ja que és un desprendiment molt recent considerant que aquest treball es va iniciar just després de la caiguda, i es poden distingir amb facilitat els blocs que són nous i frescos, relacionats amb aquest esdeveniment, dels blocs d'esdeveniments anteriors. A més a més, el gran volum de material afectat fa que el nombre de blocs sigui molt elevat, i tot i que dificulta les tasques de caracterització d'aquests, en fa un bon grup de mostreig des d'un punt de vista estadístic.

El present treball es centrarà en com mesurar o avaluar el fenomen de la fragmentació en un desprendiment de roques, fixant-se en la metodologia necessària per avaluar la variació de les distribucions de volums de blocs. En aquest sentit, tot i que l'objectiu final es poder estudiar el procés de fragmentació dels blocs, la present tesina es basa en l'obtenció de les corbes que descriuen la distribució de volums dels blocs. Així doncs, els objectius del present treball són:

- 1. Estimar el volum de material afectat en el desprendiment.** A partir de la diferència de volums observada per comparació de la geometria de la paret abans i després del desprendiment, i alternativament, estimar el volum del desprendiment en base als volums mesurats al dipòsit.
- 2. Obtenir les distribucions de volums de blocs abans i després del desprendiment.**

En el següent esquema (Fig. 15) es mostra la idea fonamental de l'estudi. En un gràfic on es representi la **frequència acumulada** (ordenades) de cada **mida de bloc** (abscisses) es pot caracteritzar una distribució de volums de blocs per una corba o línia recta (utilitzant escales logarítmiques ambdós eixos). Conceptualment, els blocs caiguts, degut a la fragmentació, mostraran una distribució de volums de blocs de menor mida, traslladant la distribució.

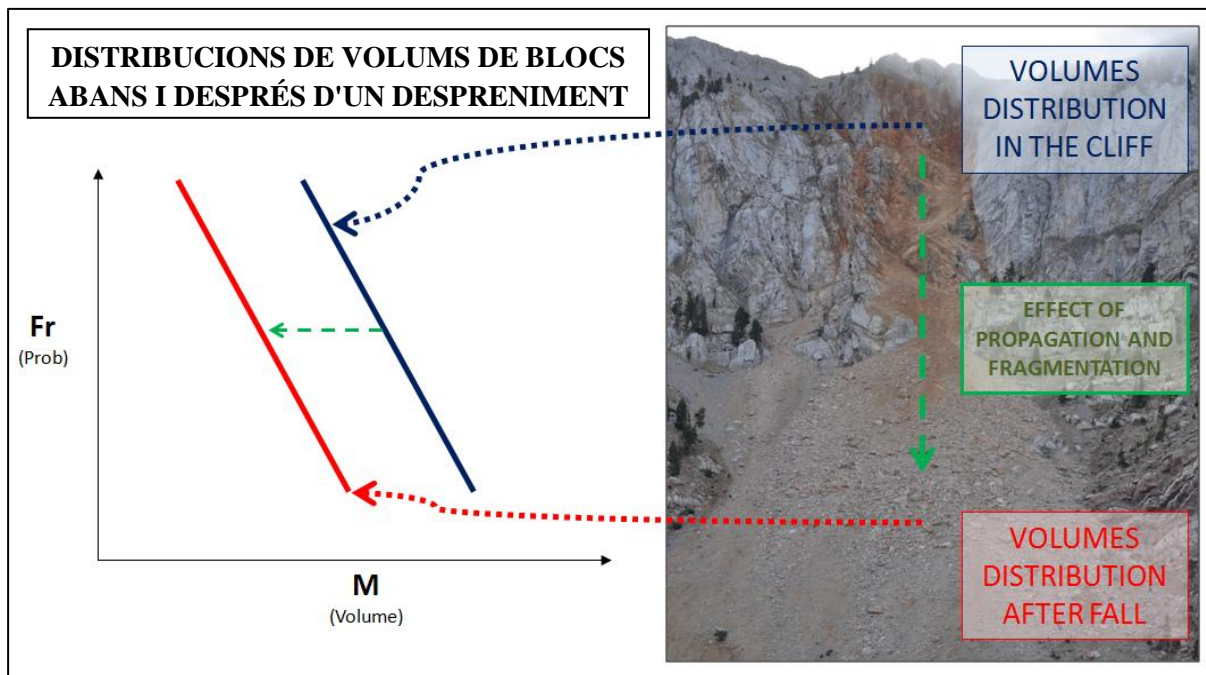


Fig. 15: Esquema de plantejament del segon objectiu de la present tesina. Obtenció de les distribucions de volums de blocs abans i després del desprendiment rocós per avaluar la fragmentació que es produeix.

3. L'últim objectiu serà el de discutir els resultats comparant les distribucions obtingudes observant l'efecte de la fragmentació sobre aquestes.

Per tant, es pretén diferenciar entre la **disgregació de blocs in situ segons les discontinuïtats preexistents a la paret rocosa**, al que podríem anomenar **disgregació**, ja que els volums ja estan predefinits al massís amb el sistema de famílies de discontinuïtats; **a diferenciar amb la fragmentació**, que en el present treball farà referència a **aquells blocs que es generen a partir de la ruptura de blocs mitjançant noves cares fresques**, tot i aprofitar parts de discontinuïtats preexistents o l'anisotropia de la roca.

La persistència de les discontinuïtats dificulta l'estudi i caracterització de les distribucions de volums de blocs. Els punts de roca, aquells trams en els que les discontinuïtats ja no penetren i la roca està relativament intacte, són els que donen certa resistència a l'hora d'intentar fragmentar un bloc seguint discontinuïtats de persistència variable o desconeguda.

A l'esquema de l'anterior Fig. 15 es mostren dues **distribucions conceptualment representades per dues línies rectes**. La realitat no es tant senzilla, però és cert que en gran part, els inventaris duts a terme fins ara **es poden ajustar molt bé a lleis potencials** que en doble escala logarítmica queden representades per línies rectes, i que a la vegada tenen una forta **interpretació** des d'un punt de vista de la teoria **fractal**. Es prendrà especial atenció en aquests aspectes al llarg de la tesina, ja que la caracterització de les distribucions de volums de blocs és l'objecte d'estudi d'aquesta.

Lògicament, el trasllat d'una distribució abans del desprendiment a la de després del desprendiment no és una simple translació, ja que els blocs més grans tenen més probabilitats de ser fragmentats que els petits degut a la major probabilitat de tenir discontinuïtats i valors energètics majors. L'anàlisi del pendent i de la forma d'aquestes distribucions serà estudiat a la present tesina.

D'ara en endavant, per facilitar la redacció i lectura del present treball s'utilitzarà l'acrònim **IBSD** per fer referència a la *In situ Block Size Distribution*, la **Distribució de Volums de Blocs abans del desprendiment**, és a dir, in situ al massís rocós. De la mateixa manera, s'utilitzarà l'acrònim **PBSD** per fer referència a la *Propagated Block Size Distribution*, la **Distribució de Volums de Blocs Propagats**, és a dir, després del desprendiment i afectada per la fragmentació o no dels blocs. No s'ha utilitzat **FBSD**, fent referència a la distribució de volums de blocs Fragmentada, ja que seria fer una hipòtesis no certa, i es que els blocs no tenen perquè fragmentar-se en escenaris amb baixes energies, salts petits i roques molt massives i dures.

Des d'un punt de vista **d'objectius més general**, la present tesina intenta **definir una metodologia per dur a terme en un gran nombre de casos**, per estudiar molts escenaris de desprendiments amb diferents materials geològics, diferents estructures geològiques i sistemes de discontinuïtats, així com diferents terrenys i topografies sobre els que es propaguen els desprendiments. Amb un gran nombre de dades es podria realitzar un **interpretació empírica i estadística de la variació de les distribucions de volums de blocs abans i després d'un desprendiment** amb la que es podria **predir millor la fragmentació dels blocs**. Per altra banda aquesta informació, ben adquirida, **es podria utilitzar per calibrar models físics** desenvolupats per exemple amb models d'elements discrets com per exemple el Particle Flow Code (PFC) desenvolupat per l'empresa Itasca.

4. Despreniment al Cap de la Fesa, Serralada del Cadí

La present tesina s'ha desenvolupat en una zona situada a la part oest del vessant nord de la Serralada del Cadí, al nord de Catalunya, en una gran paret rocosa calcària propera al Cap de la Fesa (Fig. 16), a la zona del Fou, on es troba una gran tartera on s'acumulen tots els blocs que es desprenen de la paret com es pot veure cartografiat al mapa geològic de la zona (Fig. 17), marcat com a material d'acumulació quaternari.

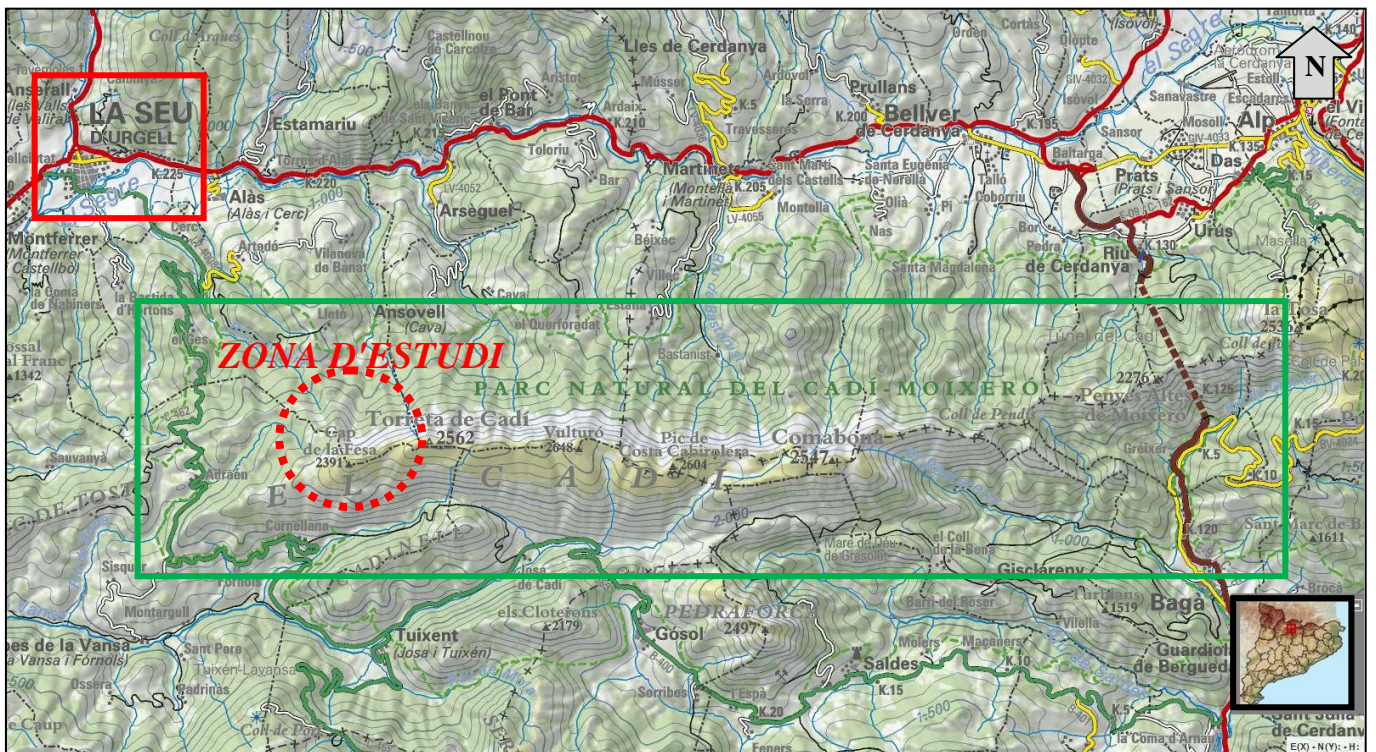


Fig. 16: Situació de la zona d'estudi, Serralada del Cadí, nord de Catalunya, (Institut Cartogràfic de Catalunya).

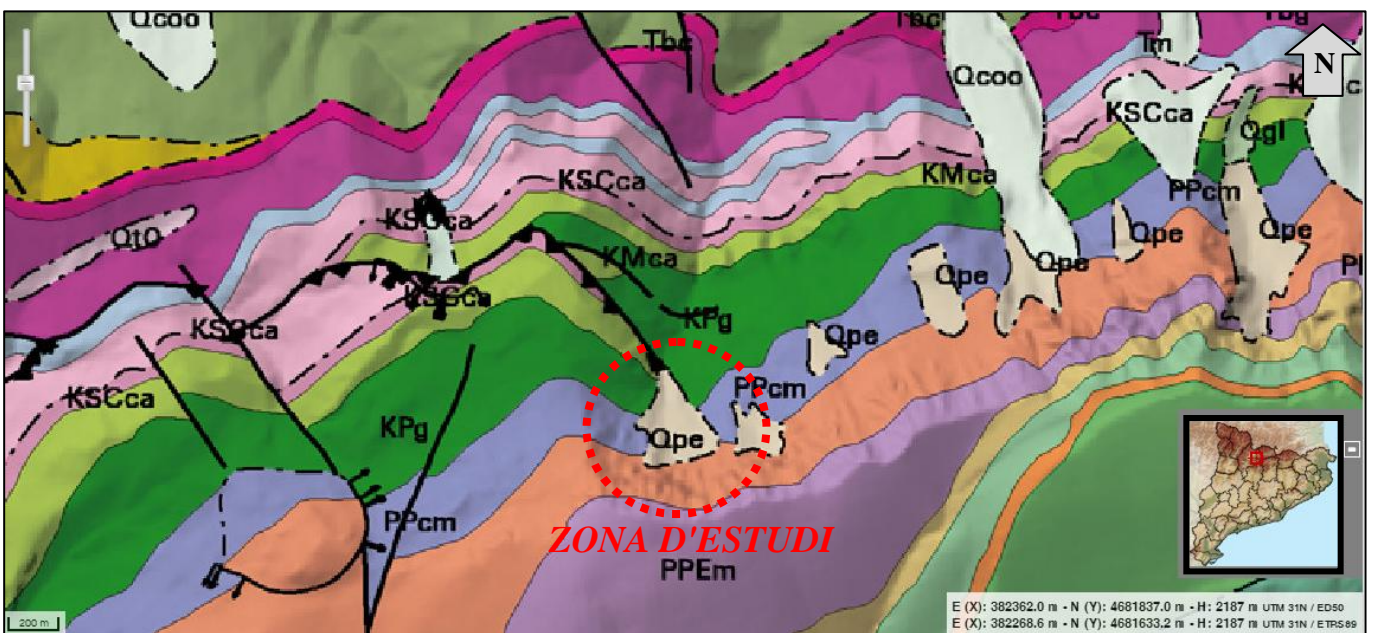


Fig. 17: Mapa geològic de la zona d'estudi on es pot observar el material acumulat cartografiat com quaternari i l'important encavalcament que fa d'aquest un punt estructuralment dèbil (Institut Cartogràfic de Catalunya).

A la Fig. 17, on es mostra el mapa geològic de la zona d'estudi, es pot observar un important encavalcament que precisament està cartografiat just fins arribar a la tartera del despreniment que es pretén estudiar. En aquest sentit, i seguint la traça d'aquest important encavalcament cap a la paret rocosa, s'arriba precisament al gran forat del despreniment d'interès. Aquest serà un punt rellevant a l'hora de caracteritzar les famílies de discontinuïtats que es troben just a la zona on s'ha produït el despreniment.

En concret, la present tesina es centrarà en un únic esdeveniment, un despreniment que els agents forestals van cubicar del voltant dels 50.000 metres cúbics i que la seva cicatriu es pot veure des de la mateixa Seu d'Urgell ja que ha deixat aflorant una important cara fresca ataronjada que remarca la recent activitat de la paret. Aquest **despreniment va ocórrer el mes de Novembre de l'any 2011**, i des d'aleshores hem fet sis campanyes de camp per dur a terme treballs de caracterització del despreniment.

A la Fig. 18 es mostra la topografia de la zona a escala 1:5000, on es pot apreciar perfectament la verticalitat de la paret rocosa i la zona fortament afectada per despreniments. La paret rocosa fa més de 160 metres d'altura i el desnivell de la tartera és d'uns 300 metres.

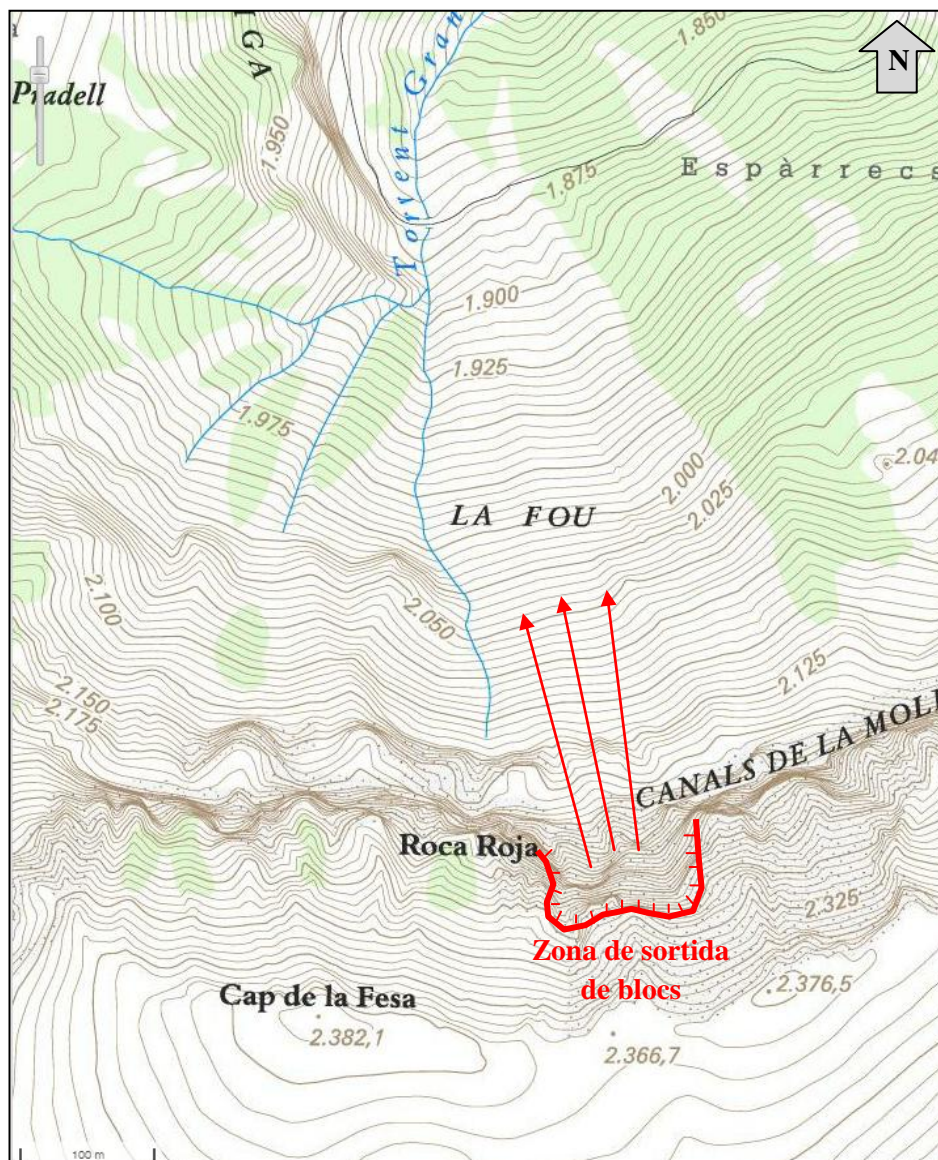


Fig. 18: Cartografia topogràfica a escala 1:5000 de la zona d'estudi.

Cal agrair les fotografies que el geòleg Albert de Gràcia va fer de la paret rocosa abans i després del desprendiment que s'estudiarà a la present tesina. Així doncs, a la següent Fig. 19 es pot apreciar la diferència notòria entre abans i després del desprendiment del mes de Novembre del 2011.

A la paret rocosa es pot apreciar el **canvi de coloració de la zona afectada**, que segons els habitants de la Seu d'Urgell es visible des de la mateixa localitat que es troba a uns 11 km en línia recta. Tot i el fort canvi, es pot observar que abans d'aquest important desprendiment, la paret ja era molt activa, prova d'això és la cartografia geològica, prèvia al desprendiment, que ja identificava la zona com a tartera d'acumulació de blocs caiguts, i la coloració ja rogenca.

A la zona d'acumulació **es pot observar** molt bé **l'extens mantell de material acumulat** degut al desprendiment, formant una tartera amb entitat a diferència de les acumulacions erosionades que s'observen abans del desprendiment. També es poden apreciar **arbres afectats** pel desprendiment així com **blocs puntuals de volums importants** abans i després d'arribar al camí que voreja per sota la zona d'estudi.

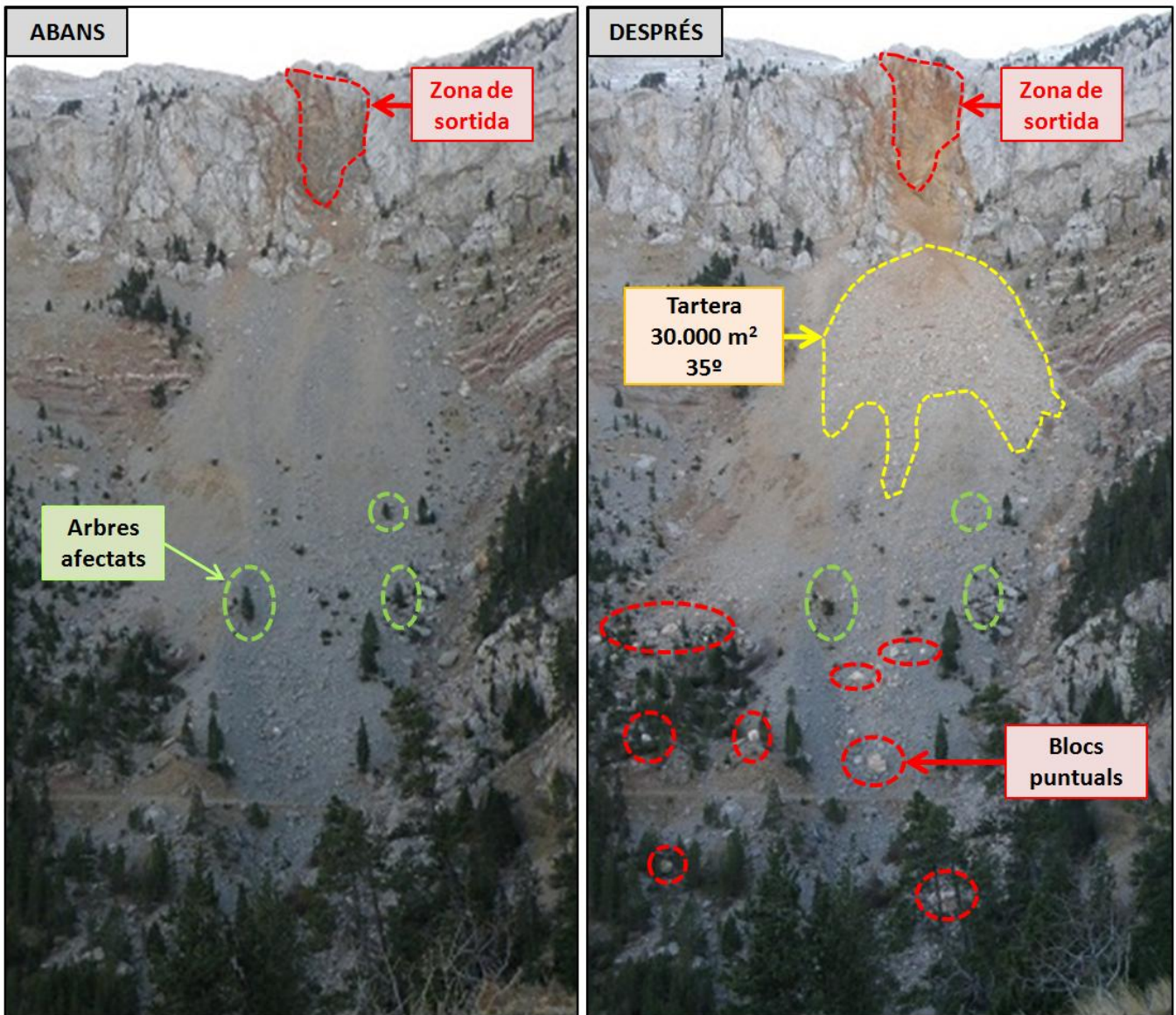


Fig. 19: Fotografies cedides per Albert de Gràcia: Comparativa abans (esquerra) i després (dreta) del desprendiment de Novembre del 2011, objecte d'estudi de la present tesina.

En la mateixa direcció, observant imatges d'abans i després del desprendiment, es poden comparar les ortofotos del 2011 i del 2012 obtingudes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (Fig. 20), on es pot observar la important acumulació de blocs a la zona alta de la tartera.

En aquest cas, al ser una fotografia presa des de sistemes satel·litals, i al ser un vessant nord, la façana rocosa queda amagada sota la seva pròpia ombra, sobretot a la ortofoto del 2011, de manera que és més difícil en aquest cas apreciar les variacions sofertes a la zona de sortida.

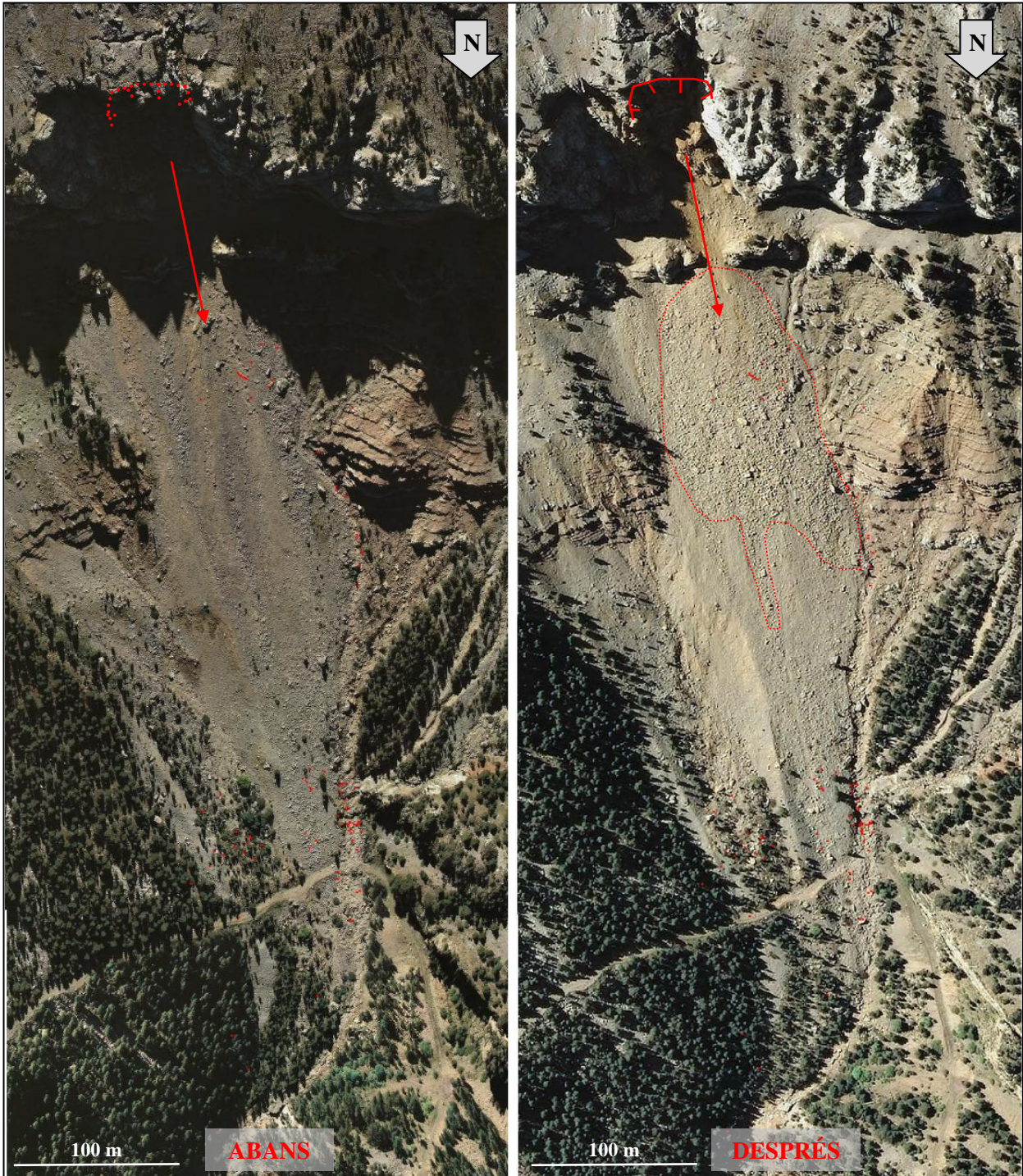


Fig. 20: Ortofotos de la zona d'estudi obtingudes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya dels anys 2011 (esquerra) i 2012 (dreta).

Si observem amb detall la zona de sortida de blocs, i cicatriu del despreniment en qüestió, tot i que la pròpia ombra impedeix veure amb claredat el massís, es pot observar un tram rocós que a la ortofoto del 2012 ja no apareix. A la següent Fig. 21 es mostra l'ampliació de la zona de sortida amb el detall de material caigut remarcat.

A uns 25 metres més al sud, per sobre l'escarpament, es pot observar una important esquerda oberta al massís que segueix la mateixa orientació que la junta que ha actuat com a pla de tracció i que ha limitat el despreniment pel sud.

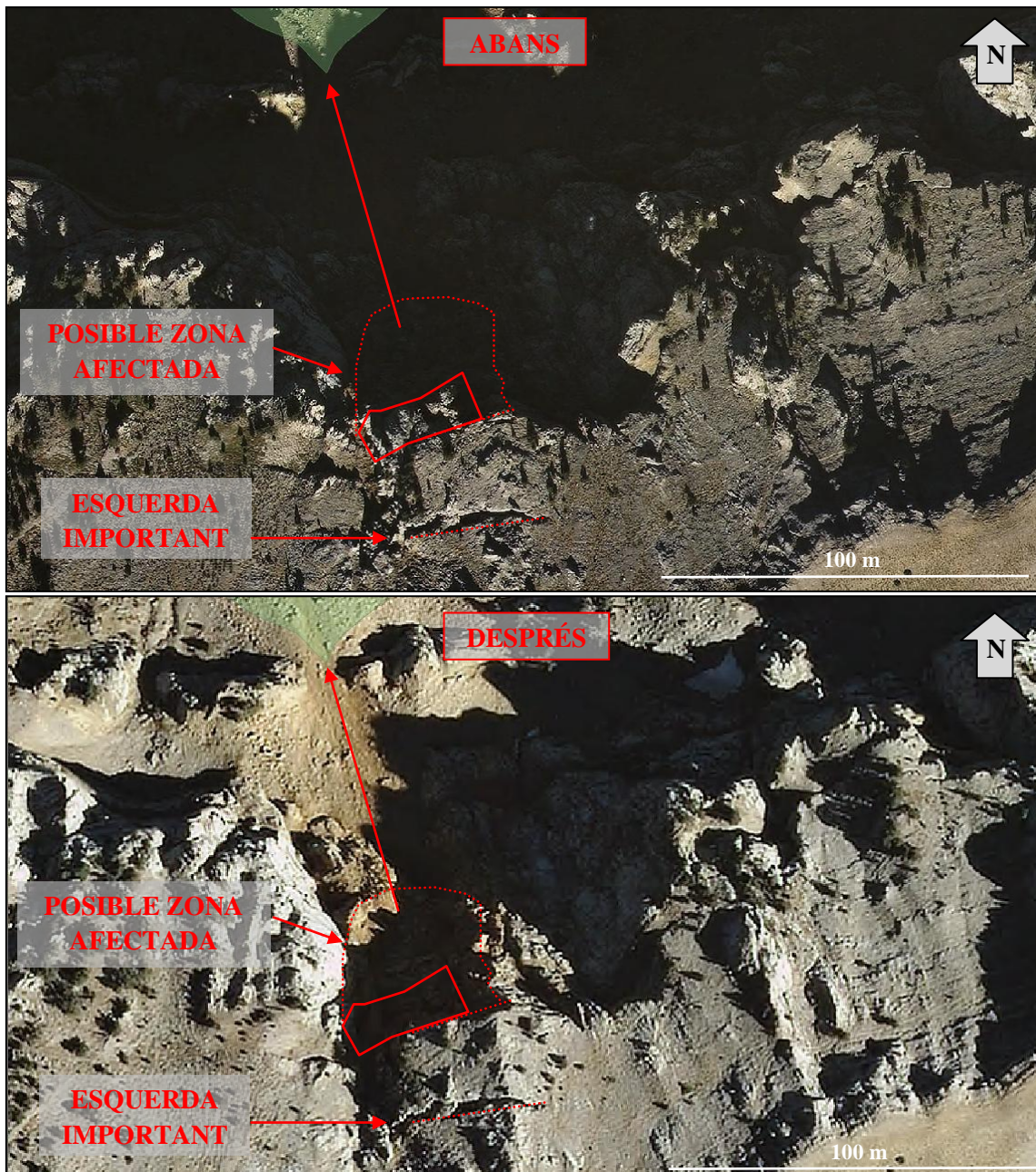


Fig. 21: Zona de sortida dels blocs, afectada pel despreniment. Ortofotos del 2011 i 2012 obtingudes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya.

Durant les diferents campanyes de treball de camp realitzades, s'han pres un gran nombre de fotografies amb les que es pot observar molt millor el despreniment, tant la cicatriu com el dipòsit, com a la fotografia de la Fig. 22, on ara sí, es pot observar bé el massís rocós i fins i tot es poden observar els blocs del dipòsit amb major resolució que a les imatges anteriors.



Fig. 22: Fotografia de la zona d'estudi on es pot observar bé la cicatriu del gran despreniment i el dipòsit generat al seu peu. Fotografia realitzada el mes de Desembre de 2011, poc després del despreniment.

5. Metodologia

5.1 Plantejament del treball

El **primer objectiu** del present treball és **l'estimació del volum de material implicat** en el despreniment de Novembre del 2011 al Cap de la Fesa, a la Serralada del Cadí. Aquest volum s'estimarà mitjançant **dos procediments diferents**.

1-Per una banda s'intentarà delimitar la zona de sortida **a partir d'un model digital de la paret rocosa** realitzada una vegada el despreniment ja va ocórrer, que correspon a la cicatriu deixada i que a la vegada és la **superfície que limita inferiorment** el volum després. Per obtenir el volum serà necessària utilitzar una superfície que delimiti aquest volum per la **part superior**, i s'utilitzarà la **cartografia topogràfica 1:5000** que es té de la zona per realitzar aquesta primera estimació.

2-Alternativament, es calcularà el volum després **a partir de la mesura de blocs despresos** i les extrapolacions necessàries a partir de les quals es caracteritzarà tant el volum implicat com la distribució de volums de blocs propagats (PSBD).

El cas ideal per al càlcul de volum implicat en el despreniment seria tenir d'entrada bones fotografies d'abans i després del despreniment per poder generar dos models digitals de la paret rocosa i poder combinar-les per obtenir el volum delimitat entre aquestes. En aquest cas es podria obtenir el volum de forma tant precisa com les tècniques fotogramètriques i els mitjans utilitzats ho permetessin.

Una vegada calculats aquests volums es compararan i es decidirà quin és el que caracteritza millor el despreniment.

Pel que fa al **segon i més important objectiu** del treball, l'obtenció de les **distribucions de volums de blocs abans (IBSD) i després (PBSD) del despreniment**, cal introduir una sèrie de conceptes i metodologies que s'aplicaran per assolir tal objectiu.

5.2 Obtenció i definició de les distribucions de volums de blocs (IBSD i PBSD)

En el següent apartat 2 del capítol 5 s'exposaran els conceptes claus que defineix el procediment d'obtenció de les distribucions de volums de blocs abans i després del despreniment (IBSD i PBSD).

De cara a l'obtenció de la **PBSD** caldrà fer algunes referències sobre què implica fer un mostreig sobre una població que segueix una **distribució potencial** ja que imposa la necessitat de **mesurar en tants ordres de magnitud com sigui possible**. També es farà referència al conjunt de **fitxes de camp** realitzades per registrar la informació i ordenar-la en una **base de dades** que serà representada mitjançant un **Sistema d'Informació Geogràfica**.

Finalment **s'exposarà la metodologia seguida per a la mesura de blocs i zones representatives** per a l'obtenció de la PBSD.

Pel que fa a l'obtenció de la IBSD, es farà una breu revisió de les tècniques disponibles o utilitzades fins ara revisant treballs amb simulacions estadístiques i caracteritzacions d'afloraments rocosos mitjançant tècniques tradicionals com l'scanline, o tècniques més modernes com l'ús del LIDAR o de les tècniques fotogramètriques.

Finalment es descriurà la **metodologia plantejada** en el present treball que es base en la **utilització de tècniques fotogramètriques** per obtenir un **model digital de la paret rocosa** a partir de a qual es **caracteritzaran les discontinuïtats** identificables. A partir d'aquest model de fracturació es **tallarà un volum de control** amb el que es **generarà una mostra de blocs** que es llistarà per obtenir la IBSD.

5.2.1 Conceptes de distribucions potencials

Un dels conceptes claus per entendre les distribucions de volums de blocs, així com tantes altres distribucions que es troben a la naturalesa, és el seu component logarímic o exponencial. En el cas de les mides de blocs, és fàcil entendre que a mesura que la mida es major, el nombre de blocs existents es redueix, és a dir, en una mostra qualsevol d'un desprendiment qualsevol, és fàcil esperar tenir un elevat nombre de blocs petits, un nombre mitjà de blocs mitjans, pocs blocs grans i algun de molt gran.

Aquest tipus de distribució és molt típic en un munt de fenòmens naturals i antròpics com es mostra en un article de la SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) escrit per Aaron Clauset i altres (Clauset et al., 2009). En aquest articles es mostren els diferents mètodes per dur a terme ajustos estadístics amb distribucions potencials sobre mostres de dades empíriques. A banda del caràcter tècnic d'interès de la publicació, es pot trobar un clar exemple de mostres de dades empíriques en les que s'observa un clar comportament potencial com es pot veure a la (Fig. 23). Entre altres casos, es poden destacar la freqüència d'aparició de paraules concretes a la novel·la Moby Dick (a), la durada de les trucades de llarga distància dels Estats Units (e), així com la gravetat d'atemptats terroristes mesurats en nombre de morts (g) o el volum de vendes de llibres als Estats Units (l), que s'ajusten molt bé a una distribució potencial.

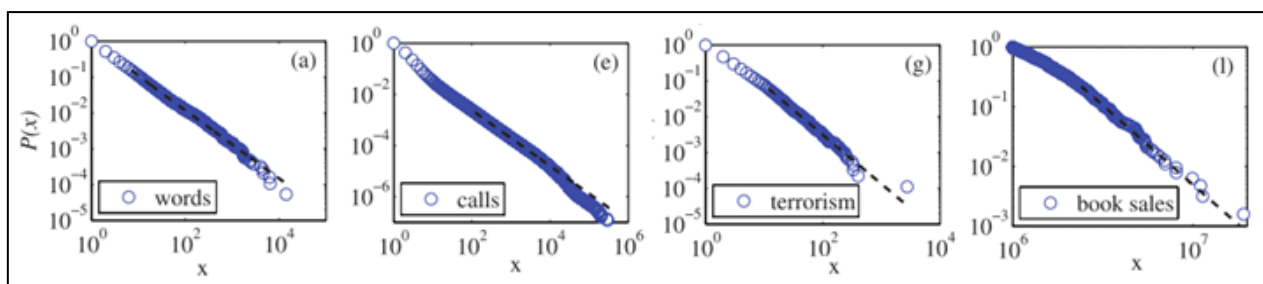


Fig. 23: Probabilitats o freqüències de diferents conceptes i versemblança del seu ajust a una distribució potencial de 4 mostres de dades empíriques extret de (Clauset et al., 2009).

(a) Freq. d'aparició de paraules a la novel·la Moby Dick (e) Nombre de trucades rebudes pels clients de la companyia telefònica de llarga distància als Estats Units. (g) Gravetat d'atemptats terroristes a tot el món des de febrer de 1968 fins juny de 2006 mesurat en nombre de morts.. (l) Volum de vendes dels llibres més venuts als Estats Units.

Les distribucions potencials es poden definir amb: una variable com pot ser el volum de bloc (V_0), la probabilitat de tenir elements de valor més petits al volum de la variable, i dos constants, una constant que s'anomena normalitzadora (C) i l'exponent (D) en una forma com:

$$P(V_{\min} < V_0) = CV_0^{-D} \quad \text{Eq. 1}$$

L'ajust a un conjunt de dades empíriques es pot dur a terme seguint diferents metodologies, fet que s'exposarà una vegada s'hagin obtingut les dades i se'n faci la corresponent interpretació. Però per fer un correcte mostreig, cal tenir en compte que aquest tipus de mostres engloben dades que es troben entre 4 i 6 ordres de magnitud diferents, fet que imposa realitzar un mostreig capaç de mesurar tants ordres de magnituds diferents com sigui possible.

En el cas concret de l'estudi de distribucions de volums de blocs que ens ocupa caldrà realitzar dos mostrejors a la població de blocs, un pels volums de blocs del massís rocós (per a l'obtenció de la IBSD), i una altra mostra sobre la població de blocs de la zona d'acumulació de blocs (per l'obtenció de la PBSD).

Pel que fa al mostreig de volums de blocs sobre els blocs caiguts que es troben a la zona d'acumulació (per obtenir la PBSD), s'ha pretès mesurar blocs des de 0.001 m^3 (10^{-3} m^3) fins a 40 m^3 (10^2 m^3) que és el major bloc a la zona d'estudi, de manera que el mostreig sobre els blocs a la zona d'acumulació abraça 5 ordres de magnitud. Aquest fet ve condicionat per la metodologia d'obtenció de les dades, que en aquest cas és la mesura directa utilitzant una cinta mètrica d'una mostra representativa de la població.

A diferència del mostreig de la població de volums de blocs de la zona d'acumulació, en la que no es mesura la totalitat dels blocs, sinó una mostra representativa, en el cas del mostreig de volums de blocs de la paret és diferent, ja que la metodologia seguida no serà la mesura directa, fet que és impossible, sinó que es generarà una simulació virtual dels blocs que permet mesurar la totalitat dels blocs generats. En aquest sentit, el volum de bloc més petit que es podrà mesurar té una mida de 10^{-7} m^3 i el més gran serà del voltant dels 10^2 m^3 o 10^3 m^3 si els resultats surten coherents amb les observacions de camp. Així doncs el mostreig sobre el volums de blocs de la paret rocós abraça entre 10 i 11 ordres de magnitud.

5.2.2 Metodologia proposada per a l'obtenció de la PBSD

Per a l'obtenció de la PBSD cal realitzar un rigorós mostreig sobre els volums de blocs que es troben a la zona d'acumulació de blocs. Per una banda troben una gran acumulació de blocs que forma una important tartera al peu de la paret rocós que té un desnivell de 300 metres i una superfície d'uns 30.000 m^2 . Per altra banda es poden trobar més de 200 blocs que no es troben a la tartera, ja que han aconseguit arribar més lluny i es troben al canal que baixa pel costat oest o més enllà de la tartera vessant avall. Davant d'aquest escenari, es planteja una metodologia diferent per a la mesura d'aquest dos grups de blocs, que es diferenciarà per la mesura de:

- 1. Blocs puntuals;**
- 2. Sampling Plots** o parcel·les de mostreig a la zona de tartera.

-Blocs Puntuals: Els blocs que no es troben dins de la tartera pròpiament, o aquells que són molt més grans que els del seu entorn dins de la tartera, s'han anomenat **blocs puntuals**. Pel que fa a la mesura d'aquest blocs, s'han intentat mesurar tots, un per un, mitjançant una cinta mètrica. Per a cada un d'aquest blocs s'han mesurat tres dimensions aproximant el bloc a un prisma rectangular, així com les seves coordenades mitjançant un GPS de mà de la marca GARMIN amb una precisió de posicionament entre 5 i 15 metres.

Per dur a terme l'obtenció de les dades s'ha creat una fitxa de camp que una vegada omplerta amb els treballs de camp corresponents es transfereix la informació a una base de dades feta amb Microsoft Access. El fet de tenir totes les dades referents als blocs puntuals georeferenciats en una base de dades facilita la seva representació i interpretació des d'un Sistema d'Informació Geogràfica (GIS). En aquest cas s'ha utilitzat el programa ArcGis per a la representació i anàlisi de les dades de blocs puntuals que es connecta a la base de dades d'aquests. La fitxa de camp realitzada per a les tasques d'obtenció de dades es pot trobar l'Annex 1: Fitxes de camp.

A nivell de resum, a la següent Fig. 24 es mostra la informació més important que s'ha adquirit a l'hora de fer l'inventari de blocs puntuals. A banda de la informació associada a la zona d'estudi i data de la campanya de camp en concret, es pren la informació referent a la georeferenciació per a cada bloc així com tres dimensions per estimar el volum mitjançant un prisma o un diàmetre en el cas que de voler fer una aproximació al volum esfèrica.

La fitxa està pensada per prendre molta més informació com pot ser el nombre de plans que defineixen el bloc i les seves característiques, on pren especial importància la interpretació de si els plans són cares fresques de ruptura o segueixen discontinuïtats preexistents a la roca mare. La fitxa també està prevista per prendre relacions geomètriques i espacials entre els plans que delimiten el bloc així com la litologia del bloc, la estructura que es podria categoritzar entre roca massiva o estratificada o foliada, i també es preveu una possible descripció breu de la morfologia o d'alguna observació especial del bloc.

Títol de l'estudi:				Data:		Fitxa num:	
Litologia:				Tipo. Mostra:			
Localització:		Geometria:		Estructura:			
Id		D1		Plans del bloc: nº de cares			
nº bloc		D2		Totals	Preexistents	Fresques	
X		D2		Relacions espacials entre plans			
Y		Vol. Prism.					
Z		Diàmetre					
Foto		Vol. Esf.					
Descripció							
Morfologia							

Fig. 24: Mostra de la fitxa de camp utilitzada per a la realització de l'inventari de blocs puntuals. Tota la informació obtinguda es traspasa a una base de dades connectada a un Sistema d'Informació Geogràfica.

Tot i que a la present tesina no es pretén fer simulacions de caigudes de blocs ni reproduir el desprendiment ocorregut, també s'han creat fitxes de camp per registrar dades referents a les trajectòries del blocs que es poden apreciar a camp. En aquest sentit, s'ha creat una fitxa per a registrar les coordenades i dimensions dels impactes que s'observen a camp (Fig. 25) així com una fitxa on es van registrant els diferents impactes i traces que es connecten formant una trajectòria (Fig. 26). A totes les fitxes es preveu un camp per vincular la informació a una fotografia que també es vincula a la base de dades. Aquestes fitxes completes es poden trobar també a l'Annex 1: Fitxes de camp.

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

Fig. 25: Fitxa de camp pel registre de dades referents a impactes de blocs sobre el terreny.

TRAJECTÒRIES		
CODI_TRAJ		
Punts d'impactes		
1	x	
	y	
	z	
2	x	
	y	
	z	
3	x	
	y	
	z	
4	x	
	y	

Fig. 26: Part de la fitxa de camp per registrar els diferents punts que units formen la trajectòria que ha seguit un bloc després.

Totes les dades es traspassen a la base de dades mitjançant fulles de càlcul Excel i aquestes són consultables tant des del propi Microsoft Excel, com des del Microsoft Access, ja des de la base de dades, o des de l'ArcGis, des d'on les dades es representen sobre la cartografia com ortofotos i cartografia topogràfica. La visualització de les dades sobre la cartografia permet corregir molt fàcilment possibles errors en la presa de les coordenades d'un bloc o en una errata al prendre la coordenada a camp o al transcriure-la a la base de dades.

-Sampling Plots: Obtenir els volums de tots els blocs de la tartera és una tasca relativament difícil de dur a terme. Existeixen algunes tecnologies que poden facilitar aquesta tasca, fet que serà objecte d'estudi al capítol de futures línies d'investigació i tècniques a utilitzar. Cal dir que amb un bon tractament d'imatges es pot **definir el contorn dels blocs** de forma semi-automàtica i **obtenir un llistat amb les àrees** que s'observen de cada bloc en una fotografia. Aquest és el cas de programes com Split-FX, el WipFrag o el GoldSize entre d'altres. Existeixen algunes **correlacions per passar** aquestes **superfícies** de cada bloc mesurat en una fotografia **a un volum**, realitzant una sèrie d'hipòtesis més o menys plausibles segons el cas d'estudi. En qualsevol cas per dur a terme aquest procés cal tenir una molt bona fotografia el màxim d'ortogonal possible respecte el terreny on es troba el conjunt de blocs i per fer-ho caldria un sistema de presa d'imatges aèries o un drone per a la captació de les imatges.

Una altra opció és la utilització de programari de tractament d'imatges ràster que permet obtenir les superfícies de blocs delimitant-ne els contorn **sense la necessitat de tenir una foto gaire ortogonal al conjunt dels blocs**, això sí, són necessàries mesures addicionals per poder transformar la inclinació del terreny de la fotografia a un pla ortogonal de mesura.

En qualsevol cas, per a la realització del present treball, i per a l'obtenció de la corba de distribució de volums de blocs de la zona de tartera, no es disposa ni d'aparells voladors no tripulats per prendre imatges ortogonals a la tartera i fer-ne un tractament ràster, ni es disposava del programari com Split-Fx, que permet calcular superfícies delimitant els contorns i corregint amb el suport de mesures geodèsiques la no ortogonalitat de la fotografia respecte el conjunt de blocs a mesurar. A la següent Fig. 27 es pot observar el tractament fet amb el programa Split-Fx en una versió de prova gratuïta en la que en base a una fotografia de la tartera, el programa delimita els contorns dels blocs i se'n pot obtenir una corba granulomètrica si la imatge s'escala correctament.



Fig. 27: Fotografia de la tartera retallada (imatge esquerra) i delimitació dels contorns dels blocs amb el programa Split-FX per obtenir-ne una distribució de volum a partir de la distribució d'àrees (imatge dreta).

Tot i que en un futur es poden utilitzar les tècniques de tractament d'imatges per a l'obtenció dels volums dels blocs de la zona de tartera, per a **la realització de la present tesina** s'ha dut a terme un procediment molt més barat, però que suposa moltes més hores de camp, que no és altra cosa que la **mesura manual** d'un **gran nombre de blocs en recintes representatius**.

Els **Sampling Plots** són parcel·les de mostreig, recintes o zones on es mesuren tots els blocs que es troben dins seu i els quals es consideren representatius d'una major superfície i per tant les dades obtingudes dins d'aquella parcel·la de mostreig són extrapolables a les zones adjacents. Així doncs, per al mostreig de volums de blocs de la zona de tartera es pretén realitzar un seguit de cartografies en les que es delimita una zonificació dels volums de blocs amb criteris visuals com la textura que s'observa a les fotografies que permet identificar zones amb diferents mides de blocs. A partir d'aquí es decideix realitzar 6 parcel·les de mostreig o sampling plots amb els que es mesuren absolutament tots els blocs dins del recinte delimitat i així poder obtenir la distribució de volums dins d'aquests recinte de mostreig. Es duen a terme com a mínim un sampling plot a cada una de les zones o regions definides amb la cartografia i les fotografies de la tartera.

-Compilació de dades: Per obtenir la distribució de volums de blocs representativa de tota la zona d'acumulació de blocs (PBSD), que englobi la informació dels blocs puntuals mesurats i de les dades referents a les parcel·les de mostreig de la tartera, cal dur a terme una compilació de totes les dades adquirides. Primer de tot caldrà utilitzar la cartografia realitzada de la zonificació de la tartera per extrapolar les dades de cada sampling plot a tota la superfície de tartera que es consideri que té la mateixa distribució, i finalment caldrà sumar les diferents distribucions obtingudes, tant les de la tartera com la dels blocs puntuals, obtenint així la distribució de volums de blocs propagats (PBSD).

Com a **resum i esquema de plantejament**, a la següent Fig.28 es mostra la idea fonamental que exemplifica la **metodologia proposada per a l'obtenció** de la distribució de volums de blocs propagats (PBSD):

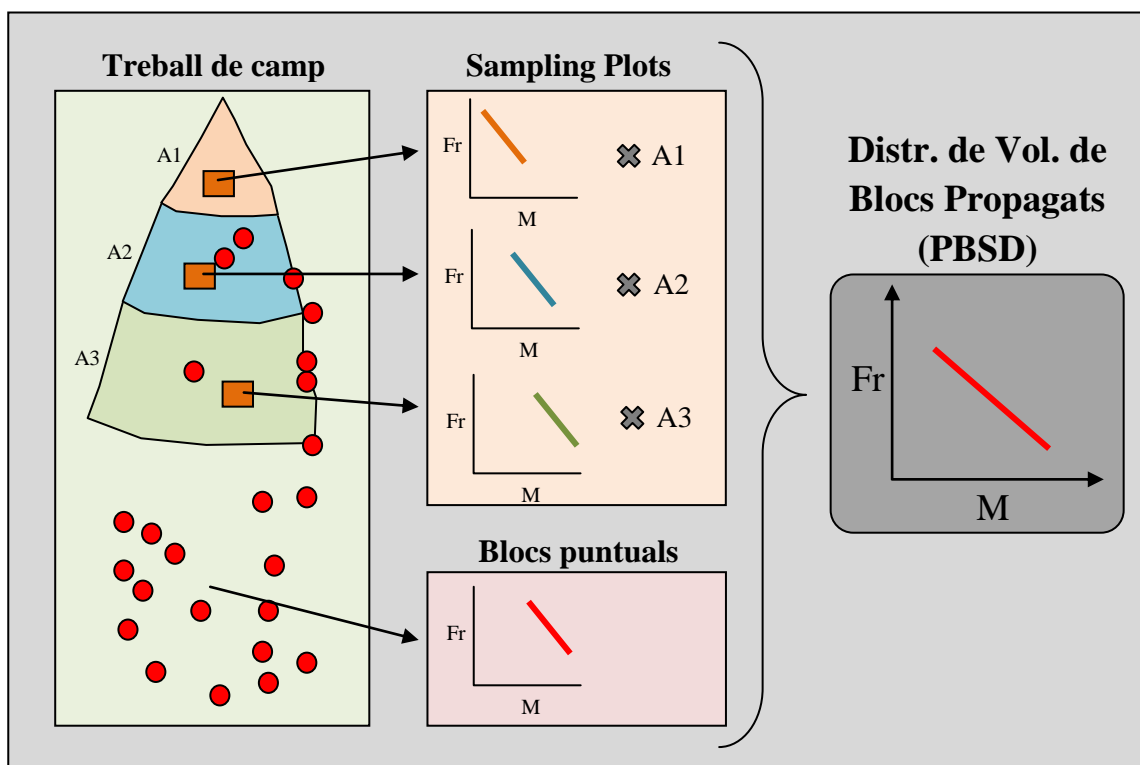


Fig. 28: Esquema del plantejament metodològic per a l'obtenció de la distribució de volums de blocs propagats (PBSD) en base a la mesura de blocs en parcel·les de mostreig (Sampling Plots), extrapolar aquesta informació sobre la zona representativa de cada mostreig i afegir la distribució obtinguda de la mesura de blocs puntuals.

5.2.3 Tècniques disponibles per a la obtenció de la IBSD

L'estudi de la distribució de volums de blocs en parets rocoses ha estat tractat per diferents autors. La idea fonamental és poder definir quins volums s'originen amb la intersecció d'un conjunt de plans que caracteritzen les discontinuïtats del massís rocós. Des d'un punt de vista geomètric, és una qüestió de quants plans intervenen, quina és la seva orientació, quins són els seus espaiats, quina persistència o continuïtat espacial tenen i com es combinen espacialment per delimitar un conjunt de blocs. Podem trobar diferents aproximacions a aquest problema, des d'un punt de vista estadístic i de combinatòria, i des d'un punt de vista més determinista en el que s'intenta caracteritzar una zona en concret.

Una de les publicacions interessants és l'article titulat "*A method to Estimate In Situ Block Size Distribution*" escrit per (Elmouttie & Poropat, 2011). Els autors generen sistemes de fractures basades en simulacions de Monte Carlo (Fig. 29). Per reduir el nombre d'anàlisis estadístics a dur a terme, els autors decideixen realitzar estudis amb 3 famílies de discontinuïtats que són ortogonals entre si. Una de les conclusions més interessants de la publicació és la rellevància de la persistència de les juntes, sobretot en els volums dels blocs de major mida.

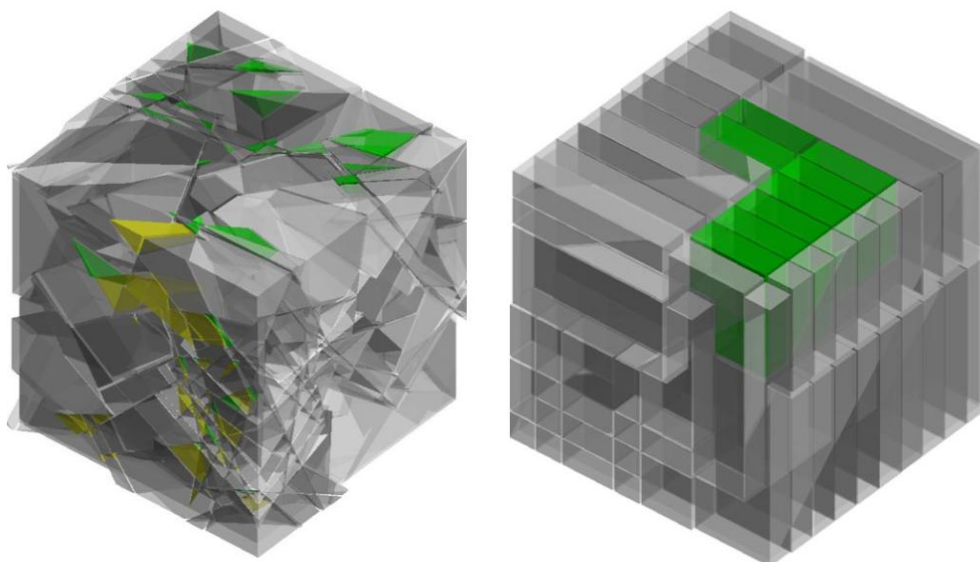


Fig. 29: Esquemes de sistemes de fractures obtinguts mitjançant simulacions de Monte Carlo per obtenir distribucions de volums de blocs, extretes de (Elmouttie & Poropat, 2011).

Una altra publicació molt interessant és la de (Kim et al., 2006), titulada "*Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-Persistent Joints*". En aquest article es valida una formulació proposada per (Cai, 2004), on es planteja com estimar volums de blocs en base a la orientació, espaiat i persistència de tres famílies de discontinuïtats. Per fer-ho, els autors realitzen simulacions amb programes d'elements discrets com l'UDEC i el 3DEC, ambdós de l'empresa Itasca i en comparen els resultats amb els formulacions prèvies. Altra vegada, la persistència juga un paper molt important sobretot en la delimitació de blocs de grans dimensions.

Els programes UDEC i 3DEC són codis que es basen en la caracterització física dels materials a estudiar mitjançant elements discrets, és a dir, volums definits geomètricament per

contorns coneguts, com poden ser massissos rocosos amb discontinuïtats. Són molts els estudis que es duen a terme al voltant de la mecànica de roques amb aquest tipus de programes i on s'utilitza la caracterització de les discontinuïtats per definir el medi.

A la publicació de (Kim et al., 2006) s'analitza estadísticament la influència de cada un dels factors que controlen la distribució de volums imposant certa desviació a cada un dels factors, com ho són la orientació dels plans, els espaiats de cada família i la seva persistència. A la següent Fig. 30 es poden veure dos models realitzats en l'article citat on a l'esquerra podem veure un model sense imposar una desviació en la orientació de les famílies, i a la dreta es pot observar un model on sí que s'ha imposat certa desviació aleatòria en la orientació de les famílies.

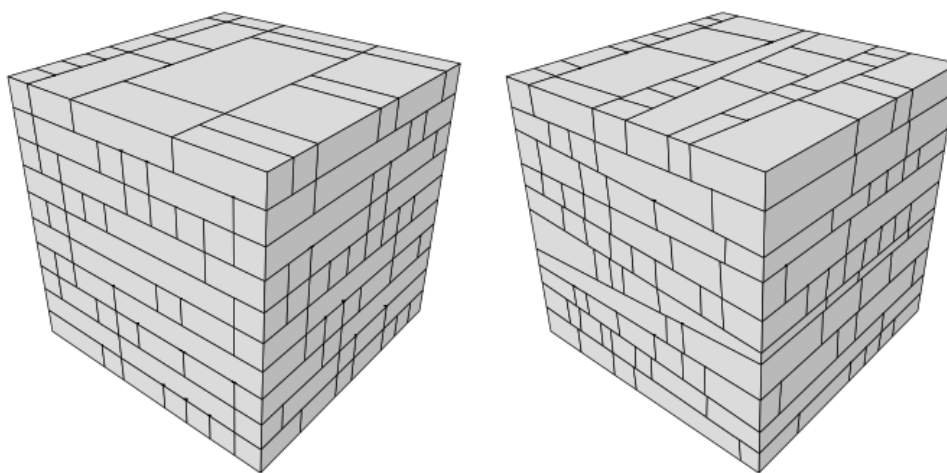


Fig. 30: Models realitzats amb 3DEC per (Kim et al., 2006) per a l'obtenció de la distribució de volums de blocs que es generen amb un conjunt de famílies de discontinuïtats (imatge esquerra) i imposant certa desviació aleatòria sobre la orientació dels plans (imatge dreta)

Una de les importants conclusions de la publicació és la validació de la formulació de (Cai, 2004). Tot i que a les formulacions proposades i validades s'utilitzen només 3 famílies de discontinuïtats, poden ser molt bones aproximacions de sortida.

Per identificar masses rocoses inestables i obtenir els patrons de fracturació (famílies de discontinuïtats, espaiats, persistències, etc...) en una paret rocosa en concret, s'ha utilitzat tradicionalment la tècnica de l'scanline, directament sobre l'aflorament rocós. Aquest procediment no deixa de ser un mostreig no necessàriament representatiu del conjunt i la principal dificultat és que les parets rocoses que generen desprendiments (cingles, penya-segats), són de difícil accés i són molt perilloses (com al cas d'estudi on el desprendiment de bloc aïllats és constant durant l'hivern). Per superar aquests inconvenients, una alternativa és la utilització de sensors a distància com el LIDAR (Light Detection And Ranging). El LIDAR té una elevada precisió i ofereix seguretat per treballar allunyat de la paret. El LIDAR però, té una limitació en la distància, que és d'uns pocs centenars de metres i un cost molt elevat.

Sovint s'utilitzen tècniques com el LIDAR o tècniques fotogramètriques per obtenir un model digital de la paret rocosa a partir de la qual identificar les diferents famílies de discontinuïtats. Les tècniques que s'utilitzen per caracteritzar geomètricament les discontinuïtats sobre models digitals de parets rocoses s'engloben dins del que s'anomena **Outcrop Modelling**,

que s'entén com tots els procediments que s'utilitzen per a la captació de les dades i la seua tractament per acabar obtenint una molt bona caracterització de les discontinuïtats i de la qualitat geomecànica de l'aflorament.

En el camp de l'*Outcrop modelling* es treballa en general amb núvols de punts obtinguts amb tècniques com el LIDAR i la Fotogrametria. Existeixen algunes publicacions interessants al voltant de la utilització d'aquestes tècniques per a la caracterització de massissos rocosos en les que es comparen les tècniques tradicionals de caracterització de discontinuïtats com l'scanline, que és la presa de mesures de plans sobre una línia, i les tècniques més modernes com el LIDAR i les tècniques fotogramètriques.

Una d'aquestes publicacions on es comparen les diferents tècniques és la titulada "*Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts*" escrita per (M. Sturzenegger, 2009). En aquesta publicació es comparen els resultats obtinguts mitjançant scanline, laser scanner i tècniques fotogramètriques i en descriu les necessitats i requeriments bàsics per a la utilització d'una o altra en funció dels objectius sobretot des d'un punt de vista de precisió.

A la següent Fig. 31 es mostren les discontinuïtats identificades amb cada una de les tècniques citades extret de (M. Sturzenegger, 2009), on es pot apreciar que des d'un punt de vista qualitatiu, el laser scanner i la fotogrametria són equiparables.

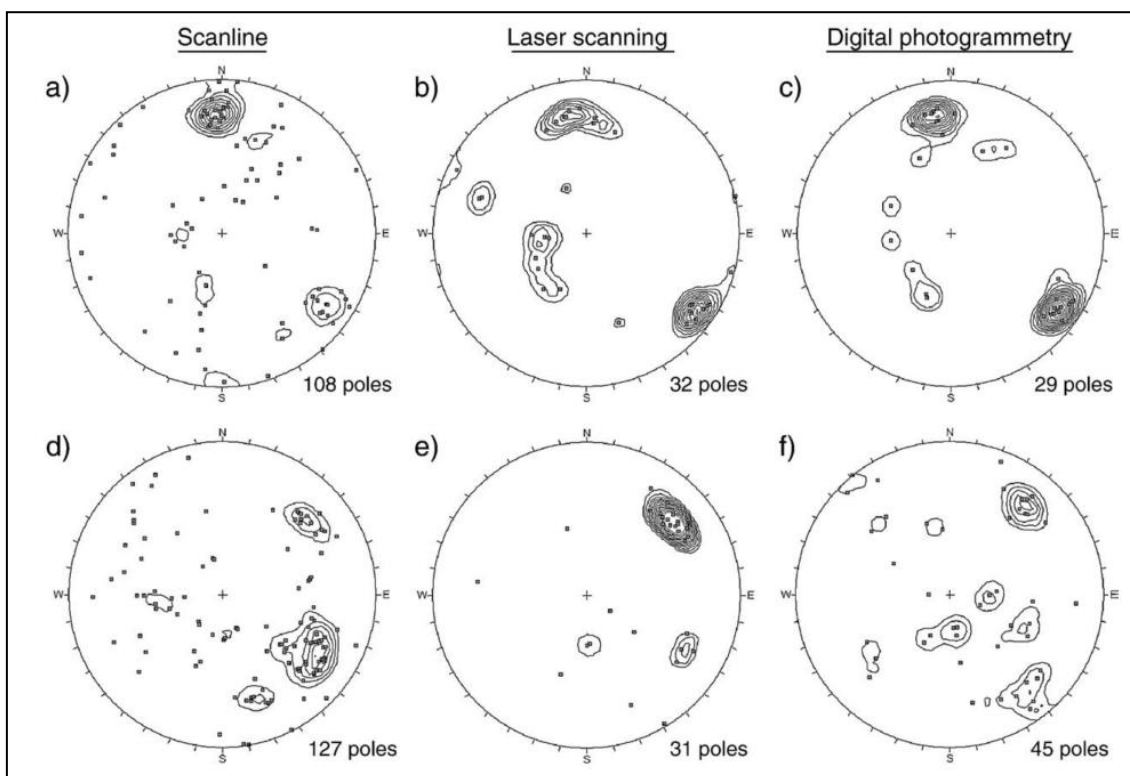


Fig. 31: Discontinuitats identificades mitjançant scanline, laser scan i fotogrametria digital en un aflorament de roca diorítica (a), (b) i (c), i en una pissarra (d), (e) i (f), extret de (M. Sturzenegger, 2009).

La utilització d'un model digital de la paret rocosa realitzada amb LIDAR ja ha sigut utilitzada per obtenir distribucions de volums de blocs. Aquest el cas de l'article (D. Santana, J. Corominas, O. Mavrouli, 2013), on es mostra com obtenir una distribució de volums de blocs en

base a les cicatrius de la paret i utilitzant-ne les dimensions que han quedat a la paret per estimar el volum després.

Tot i que la precisió del LIDAR és la més elevada, en el sentit de la densitat de punts obtinguts sobre la roca, cal tenir en compte que el que es planteja obtenir no és una precisió mil·limètrica com podria buscar-se en la identificació de petites deformacions pre-ruptura de control en talussos miners o deformacions del terreny per subsidència, sinó que es busca la identificació de discontinuïtats i l'estimació de volums de desenes, centenars o milers de metres cúbics. En aquest sentit, la precisió que poden oferir les tècniques fotogramètriques és suficient i a més a més aporta certs avantatges importants respecte el LIDAR.

El primer i més **important avantatge** en la utilització de **tècniques fotogramètriques** per sobre del LIDAR és **el cost** dels dispositius, ja que amb una bona càmera fotogràfica digital, i calibrant-ne les distorsions de l'objectiu, es poden aconseguir molt bons resultats i els costos són un o fins i tot dos ordres de magnitud menors. A més a més, la utilització de les tècniques fotogramètriques permet realitzar una gran quantitat de campanyes de camp degut al seu baix cost i fins i tot es pot dur a terme mitjançant la utilització de petits avions o helicòpters no tripulats denominats VANT (Vehicle Aeri No Tripulat) DRONE.

Per altra banda, realitzar la captació de dades, tant sigui amb LIDAR terrestre com amb fotografies preses arran de terra, comporta certs problemes com pot ser la oclusió de certes parts del massís rocós, o el que és conegut com zones d'ombra. Les **zones d'ombres són aquelles que des del punt de vista del dispositiu que capta les dades no són visibles** degut a l'angle que forma la visual entre el dispositiu i la paret rocosa i la pròpia morfologia de la paret. A la següent Fig. 32 es mostra un esquema on s'exemplifica el conceptes de zones d'ombra o d'occlusió de les quals no es pot obtenir informació utilitzant un dispositiu terrestre.

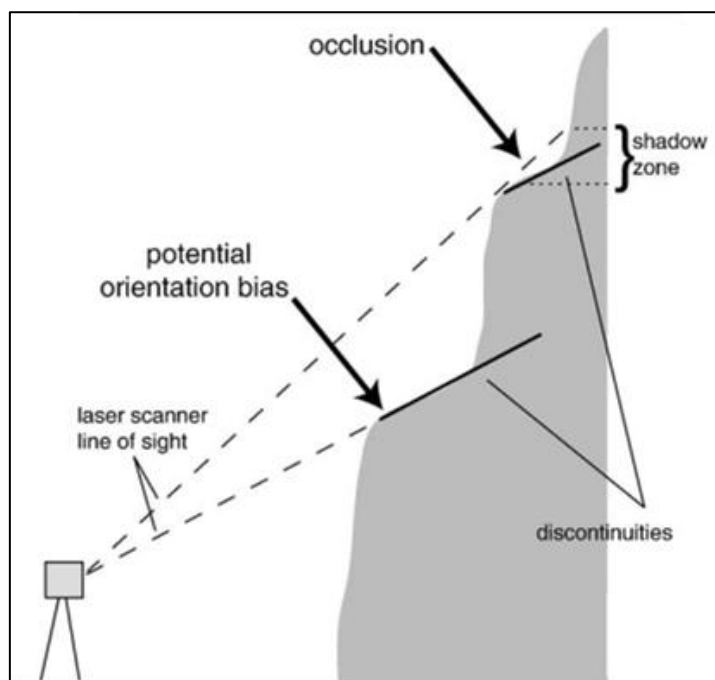


Fig. 32: Esquema representatiu de oclusió o de zones d'ombra que impedeix la correcta captura de dades extret de (M. Sturzenegger, 2009).

Aquest problema es pot solucionar prenent imatges des de diferents punts d'observació. La utilització de la fotogrametria mitjançant un vehicle aeri no tripulat permet la obtenció d'imatges des de diferents punts d'observació evitant les zones d'ombra i permeten el correcte reconeixement de tota la paret rocosa. A més, el fet de poder apropar-se molt a zones on el risc és elevat o l'accés es complicat o impossible, la utilització de vehicles aeris no tripulats pot ser la única opció per obtenir bones imatges de l'escarpament rocós.

Les tècniques fotogramètriques es basen en la correlació de píxels entre dues imatges capturades des de diferents punts d'observació sobre un mateix objecte com fa el cervell humà amb les imatges capturades per cada ull (Fig. 33). L'error amb el que es pot definir la posició tridimensional d'un punt a partir d'un píxel identificat en dues imatges diferents d'un mateix objecte, depèn principalment de la distància entre la càmera fotogràfica i l'objecte d'estudi, la mida del píxel del sensor i la distància focal de l'objectiu de la càmera fotogràfica, amb els que es pot conèixer la mida que representa cada píxel sobre el terreny.

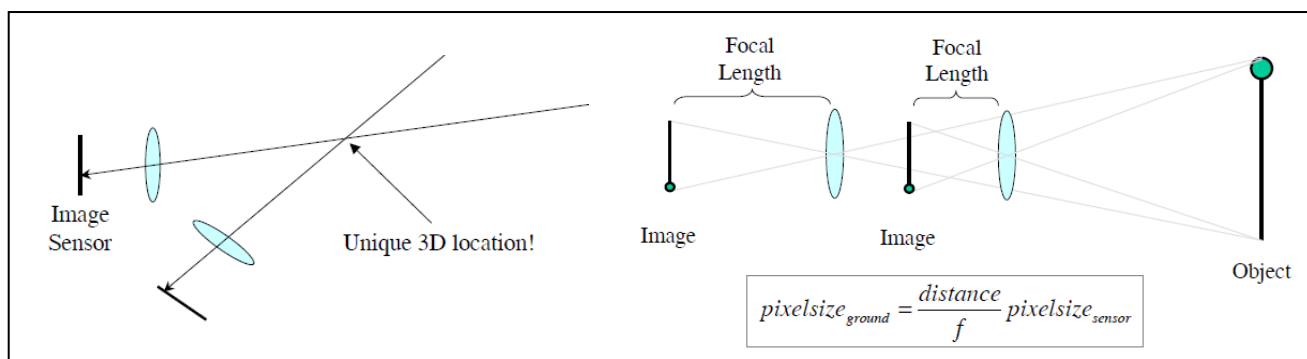


Fig. 33: Esquema d'identificació de la posició d'un punt des de dos punts de vista diferents (imatge esquerra), i relació entre la mida de píxel del sensor i la mida de píxel sobre el terreny (extret de la pàgina web d'Adam Technologies).

Però per conèixer realment la posició i l'escala dels punts mesurats, cal utilitzar tècniques geodèsiques per a la georreferenciació d'alguns punts de la malla tridimensional obtinguda. Així, l'objecte obtingut estarà georreferenciat i escalat correctament per poder obtenir distàncies i orientacions correctament, de manera que la precisió d'aquestes dependrà en part de les tècniques topogràfiques utilitzades per a la georreferenciació com l'ús d'un GPS diferencial.

Una vegada obtingudes les imatges es pot realitzar un model tridimensional amb programes de fotogrametria i a partir d'aquí es pot dur a terme la caracterització dels discontinuïtats. Existeixen una gran quantitat de programes de tractament fotogramètric com el conegut *PhotoModeller*, o d'altres que no només duen a terme la realització del model tridimensional a partir de fotografies, sinó que també permeten la caracterització de discontinuïtats sobre la malla tridimensional com ho són el programa *3DM Analyst* o el *Sirovision*.

A la següent Fig. 34 es mostra una captura de pantalla del programa *Sirovision*, en la que es mostra com es poden identificar plans estructurals o discontinuïtats directament sobre la el model tridimensional obtingut, que a més a més pot tenir a sobreposat la imatge de l'aflorament, fet que facilita la identificació dels plans. A més, es poden utilitzar tot tipus d'eines

informàtiques per caracteritzar de forma automàtica o semiautomàtica les orientacions de la paret rocosa, així com la identificació de plans i falques, com es mostra a la Fig. 35.

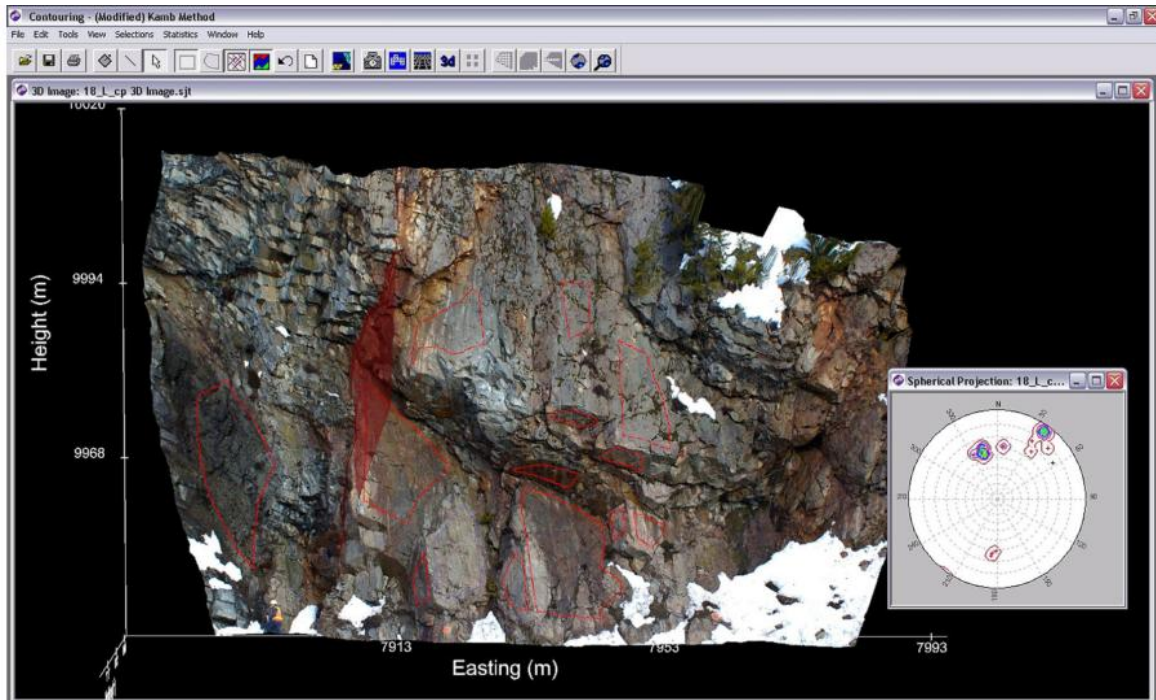


Fig. 34 Captura de pantalla del programa *Sirovision*, que permet obtenir un model tridimensional a partir de fotografies, així com la caracterització de discontinuïtats realitzada per (Haneberg et al., 2006).

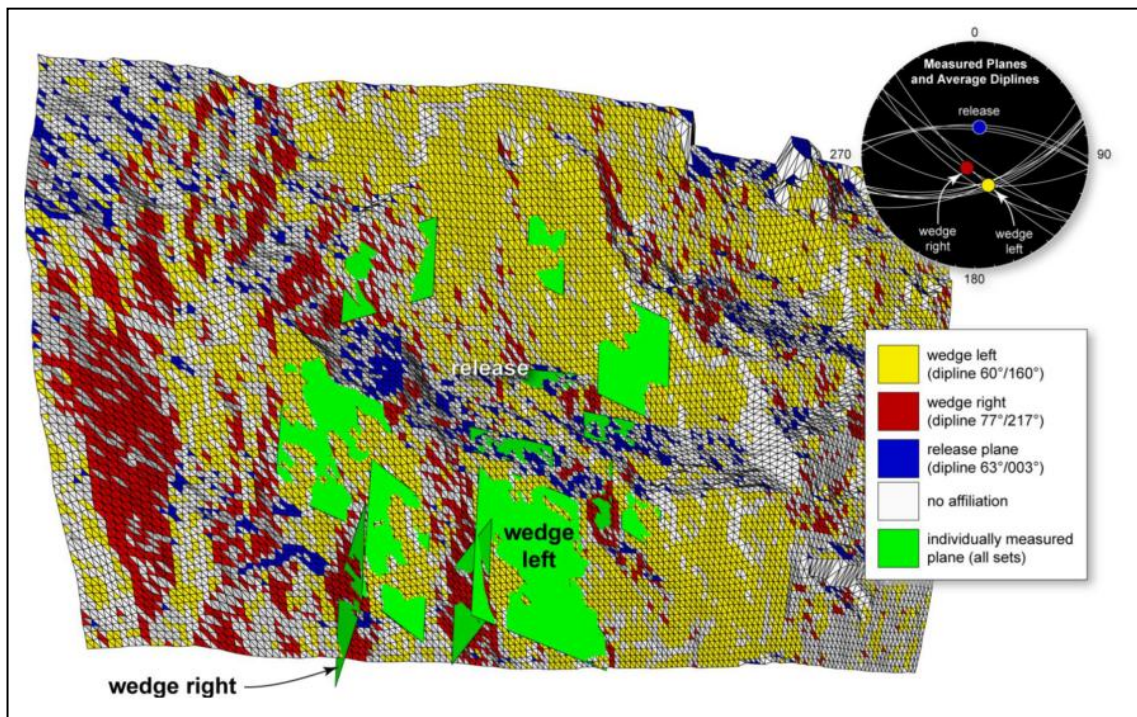


Fig. 35: Captura de pantalla d'una caracterització semiautomàtica d'orientacions i falques d'un aflorament rocós realitzada per (Haneberg et al., 2006).

Existeixen alguns treballs interessants en els que s'han utilitzat tècniques fotogramètriques per a la caracterització d'un aflorament rocós i modelar mitjançant codis d'elements discrets el conjunt de blocs que formen la paret rocosa per estudiar-ne l'estabilitat (Fig. 36) com en el cas de la mina de Carrara a Itàlia realitzat per (Firpo et al., 2011).

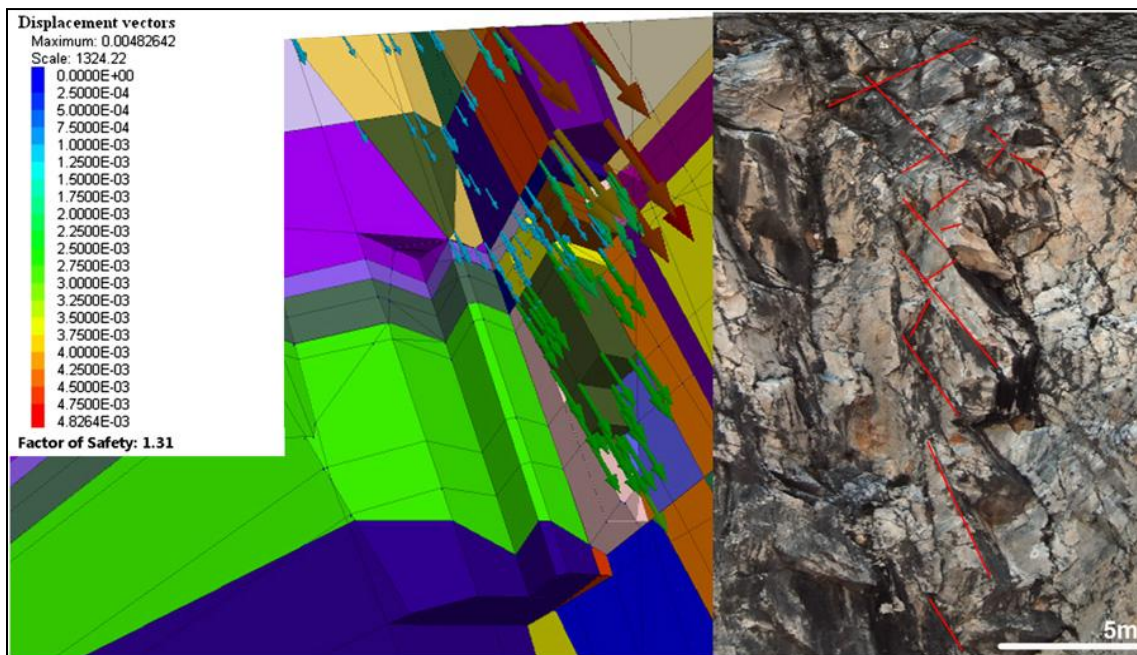


Fig. 36: Anàlisi d'estabilitat (vectors desplaçament obtinguts) de blocs inestables a la mina de Carrara, Itàlia, basat en la caracterització geomètrica de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques i analitzat mitjançant *Discrete Elements Methods*, extret de (Firpo et al., 2011)

També existeixen ja alguns treballs d'anàlisi d'estabilitat i del risc al voltant de desprendiments rocosos que utilitzen les tècniques fotogramètriques i el LIDAR per a la caracterització de blocs rocosos inestables com el cas de l'anàlisi a la línia ferroviària que va de Domodossola a Iselle, als Alps italians (Salvini et al., 2013).

La utilització de les tècniques fotogramètriques està en alça, ja que els costos són molt menors que el LIDAR i poden tenir una major versatilitat, tot i que difícilment s'aconsegueixen les precisions que pot aportar la utilitzar del LIDAR. En tot cas, la versatilitat de la tècnica permet realitzar moltes mesures en el temps i avaluar les variacions del front rocós. Per altra banda, també permet la utilització en dispositius aeris com els vehicles aeris no tripulats que pot permetre obtenir models sense zones d'oclusió.

Pel que fa a la precisió que es pot obtenir, que pot ser la major restricció de la tècnica, és una precisió que és més que suficient per mesurar volums de grans dimensions o caracteritzar discontinuïtats que a més a més, pot ser més fàcil pel fet de que a sobre del model digital tridimensional del front rocós, es superposa una imatge del massís que permet identificar juntes perpendiculars a la paret.

5.2.4 Metodologia proposada per a l'obtenció de la IBSD

Per dur a terme la caracterització de la PBSD en el cas d'estudi de la present tesina, s'utilitzaran **tècniques fotogramètriques** per a la caracterització del massís rocós i de les discontinuïtats existents. **Les imatges adquirides de la paret rocosa** es processaran amb tècniques fotogramètriques per obtenir **un model digital tridimensional** de la mateixa amb el programa *Agisoft Stereoscan*. Aquests programes permeten obtenir un núvol de punts 3D a partir d'imatges ràster que comparteixen més d'un 60% de la imatge.

Una vegada s'hagi generat el model tridimensional de la paret rocosa es procedirà a **identificar els plans i famílies de discontinuïtats**, així com els espaiats per caracteritzar la fracturació. La identificació de discontinuïtats es realitzarà de forma automàtica i **de forma manual mitjançant un programa de modelació 3D (*Rhinoceros*)** per poder supervisar tots els passos d'identificació i caracterització dels plans de discontinuïtat.

Amb les famílies de discontinuïtat identificades, **es trossejarà un volum de control en una simulació virtual** amb el programa de modelació 3D *Rhinoceros*. Una vegada trossejat virtualment el volum de control amb les diferents famílies de discontinuïtats es poden identificar i llistar els volums de tots els blocs generats, obtenint la IBSD de la paret rocosa abans de desprendre's i fragmentar-se. **A la Fig. 37 es mostra un esquema resum de la metodologia proposada per a l'obtenció de la IBSD.**

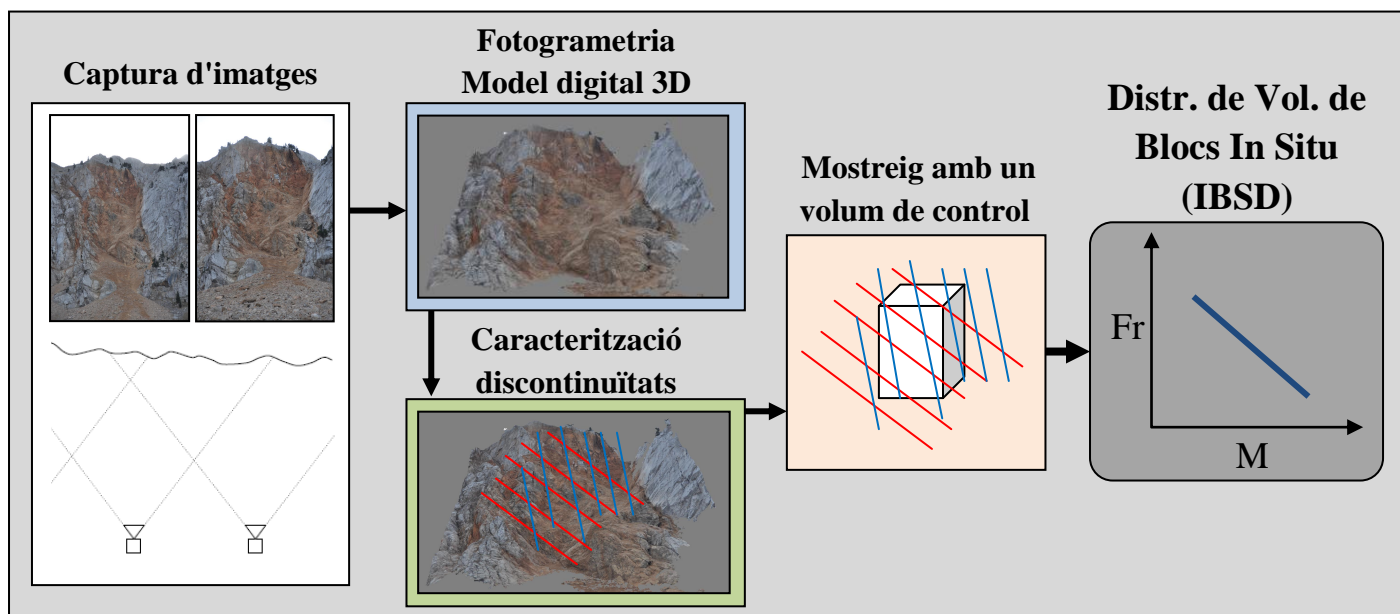


Fig. 37: Esquema de plantejament de la metodologia prevista per a l'obtenció de la IBSD.

De cara a definir el volum de control que s'utilitzarà per generar la distribució de volums de blocs, caldrà realitzar una estimació del volum del despreniment, que es durà a terme a partir de la comparació de la geometria de la paret rocosa abans del despreniment (basada en la topografia a escala 1:5000) i després del despreniment (model digital de la paret rocosa obtinguda amb tècniques fotogramètriques). A la vegada es disposarà d'una estimació del volum del despreniment basada en els volums mesurats i extrapolats del dipòsit.

6. Treball realitzat

En el següent capítol es descriuran les tasques realitzades per a l'obtenció de les distribucions de volums de blocs PBSB i IBSD, així com per a l'estimació del volum de material implicat en el despreniment d'estudi.

La primera part del capítol es centre en l'obtenció de la PBSB mitjançant la mesura de blocs en un seguit de visites de camp a la zona d'estudi, amb una clara diferència metodològica entre el que s'ha definit com a blocs puntuals (BP) i les parcel·les representatives o Sampling Plots (SP). Finalment cal aglutinar tota la informació obtinguda per generar una única distribució de volums de blocs que representi tot el dipòsit. També es realitzarà una estimació del volum de material involucrat en el despreniment segons les dades del dipòsit.

A la segona part del capítol es mostrarà com s'ha obtingut la IBSD a partir de dues fotografies realitzades a posteriori del despreniment, i a partir de les quals s'ha generat un model digital 3D de la paret rocósos. A partir del model digital es pot estimar el volum després, així com caracteritzar el conjunt de discontinuïtats que caracteritzen el massís en aquell punt. S'utilitzaran tals discontinuïtats per partir un volum de control virtual amb el que s'estimarà la IBSD.

6.1. Mesures de camp per a l'obtenció de la PBSB

La obtenció de la PBSB s'ha basat en: (1) **la mesura de blocs puntuals (BP)**, aquells que es troben fora de la tartera o dins seu però són d'unes dimensions molt més importants que els blocs del seu entorn més pròxim; (2) **i la mesura de blocs en parcel·les de mostreig o Sampling Plots (SP)** amb les quals després se'n han extrapolat les dades a tota la regió de la qual es considera representativa a mostra. A la següent **Taula 1** es mostra un recull de les dades de les **6 visites** de camp realitzades i que han requerit de dues o tres persones. S'han mesurat un total de **1.527 blocs**.

Visita	Data	nº de blocs mesurats		SP nº
		Blocs Puntuals	Sampling Plots	
1	15/12/2011	70	-	-
2	25/09/2012	15	284	SP1
3	04/10/2012	20	400	SP2
4	24/10/2012	12	216	SP3 i SP4
5	14/11/2012	82	-	-
6	06/08/2013	76	352	SP5 i SP6
Total		275 blocs	1252 blocs	
		1527 blocs mesurats		

Taula. 1: Visites de camp realitzades i nombre de blocs mesurats com a blocs puntuals (BP) i en Sampling Plots (SP).

6.1.1 Mesura de blocs puntuals (BP)

Es van dur a terme 6 visites de camp entre del mes Desembre de l'any 2011 fins l'Agost del 2013, en les que es va mesurar tots aquells blocs que es va considerar que eren frescos o recents, en base a la seva coloració viva i pels indicadors de les seves pròpies trajectòries encara recents, com impactes al vessant o arbres amb danys produïts per impactes dels blocs.

Es va fer una primera identificació d'aquest blocs amb fotografies i sobretot fent reconeixement de camp. Una vegada s'identificava un bloc com a nou es s'omplia la fitxa corresponent per alimentar la base de dades.

Primer de tot es numeraven els blocs de forma consecutiva i es registraven les seves coordenades geogràfiques en UTM al fus 31 mitjançant un GPS de mà de la marca GARMIN.

Tot seguit es mesuraven tres dimensions del bloc com es mostra a la fotografia de la Fig. 38, intentat aproximar el seu volum a un prisma rectangular. en el cas de que fos un blocs molt polièdric es podia fer l'aproximació a una esfera i aleshores es prenia el seu diàmetre i la fitxa de camp ja estava preparada per aquest cas. En el cas de trobar blocs molt semblants a prismes triangulars, s'ajustava una de les seves dimensions dividint-la per la meitat per definir millor el volum del bloc. Cada blocs es marca amb retolador amb el seu número per evitar duplicitats entre diferents visites de camp tot i que sempre es portaven a sobre les cartografies actualitzades amb els blocs ja registrats en les visites anteriors.

S'ha intentat sempre mesurar entre plans de la mateixa família, és a dir, bastant paral·lels, de manera que a la vegada es pogués obtenir alguna informació sobre espaiats. Si en total s'han mesurat més de 1500 blocs (**275 com a blocs puntuals**), en total s'han mesurat 4500 longituds que delimiten blocs, i algunes d'aquestes haurien de coincidir amb espaiats de les famílies de discontinuïtats que els delimiten quan aquest fos el cas.



Fig. 38: Fotografia de la mesura d'un bloc mitjançant una cinta mètrica.

Una vegada mesurats tots els blocs que s'han identificat com a blocs frescos o recents, es transfereixen totes les dades a la base de dades. Aquesta està connectada a un projecte de SIG en el que es superposa l'ortofoto de la zona amb la seva topografia i es representen les dades referents a la posició de cada un dels blocs com es mostra a la Fig. 39 següent. La mida del símbol que els representa depèn del seu volum, a més volum de bloc, major diàmetre del símbol que el representa.

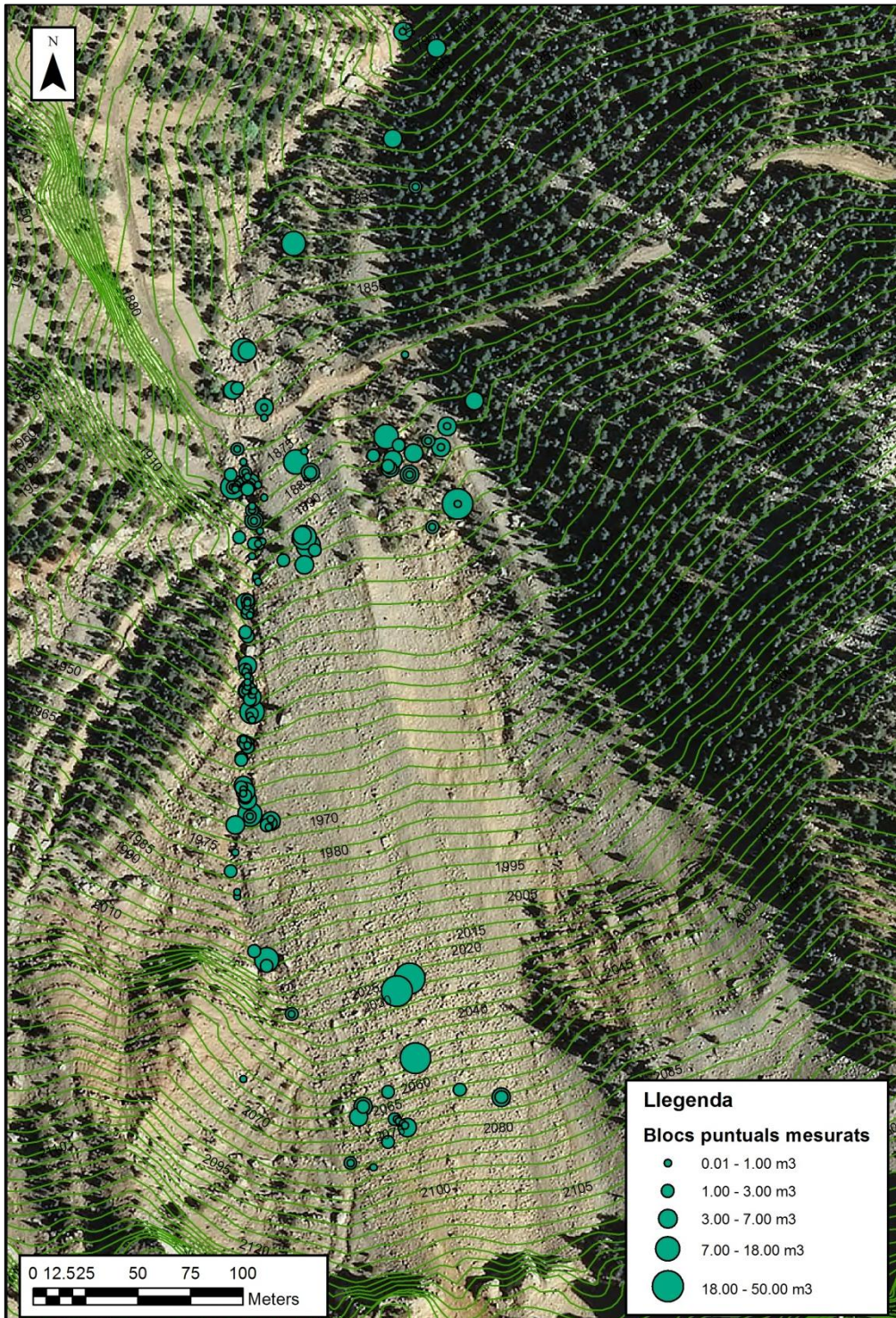


Fig. 39: Localització dels 275 blocs puntuals mesurats, superposats a la ortofoto i la topografia a escala 1:5000 de la zona d'estudi. La grandària del símbol que representa cada bloc és proporcional al seu volum.

A les següents Fig. 40 i 41 es mostren imatges on es pot observar les dimensions importants d'alguns dels blocs mesurats com a blocs puntuals. A la primera de les imatges s'observen un grup de blocs que es troben acumulats al canal que transcorre pel costat oest de la tartera. A la segona imatge es pot observar un dels blocs que es troba enmig de la tartera però que els seves dimensions molt majors als blocs dels seu entorn fan que s'hagi mesurat com un bloc puntual i no com un bloc més en una parcel·la de mostreig.



Fig. 40: Fotografia d'un conjunt de bloc dipositats al canal del costat oest de la tartera.

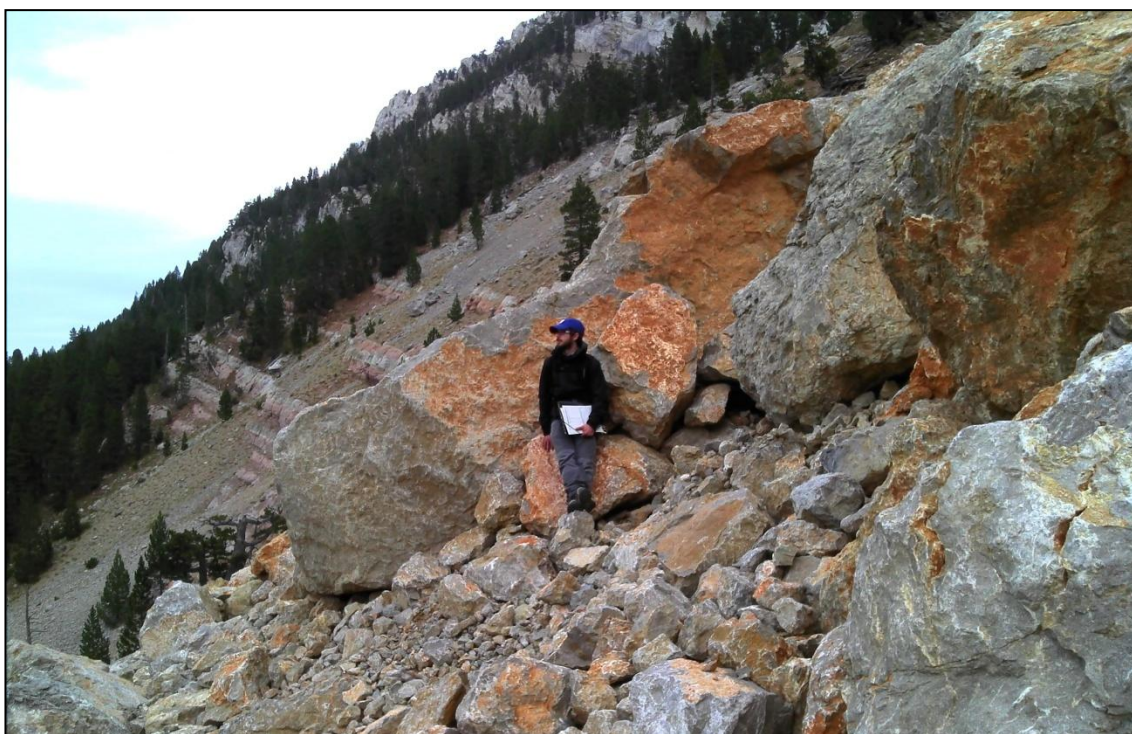


Fig. 41: Fotografia d'un bloc puntual mesurat enmig de la tartera ja que té unes dimensions molt majors als blocs del seu entorn més pròxim.

A les següents imatges 42 i 43 es poden observar blocs puntuals mesurats que mostren una de les seves cares clarament delimitada per una discontinuïtat preexistent com ho són els plans de falles que s'observen, amb unes marcades estries formades amb el desplaçament de la falla.



Fig. 42: Fotografia d'un dels blocs puntuals mesurats amb una de les cares que el delimiten definida per un pla de falla amb estries fortament marcades.



Fig. 43: Fotografia d'un dels blocs puntuals mesurats on es pot observar molt bé un pla de falla amb estries que delimita una de les cares del bloc.

A les següents imatges de les Fig. 44 i 45 es pretén mostrar la diferència entre la disgregació que es dur a terme utilitzant discontinuïtats preexistents, i la fragmentació, que es fruit de la generació de noves fractures que es desenvolupen creant cares fresques i que a vegades poden utilitzar discontinuïtats preexistents per propagar-se o per quedar limitades.

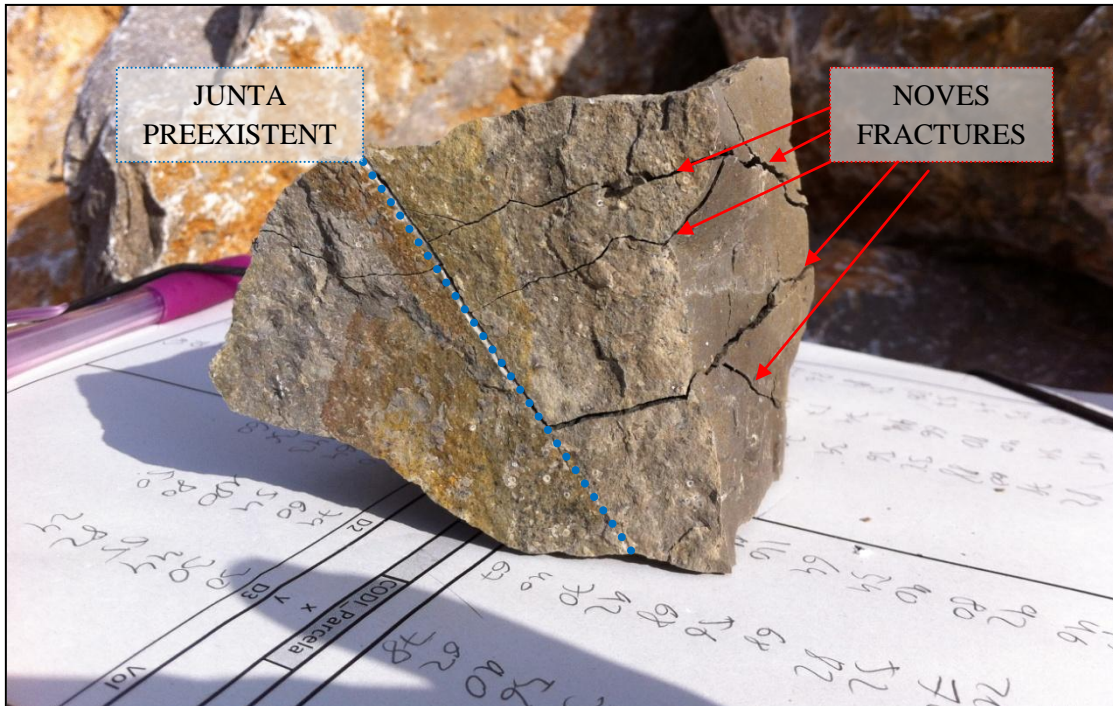


Fig. 44: Fotografia d'un bloc amb una junta preexistent i un conjunt de noves fractures fruit dels impactes que ha rebut.

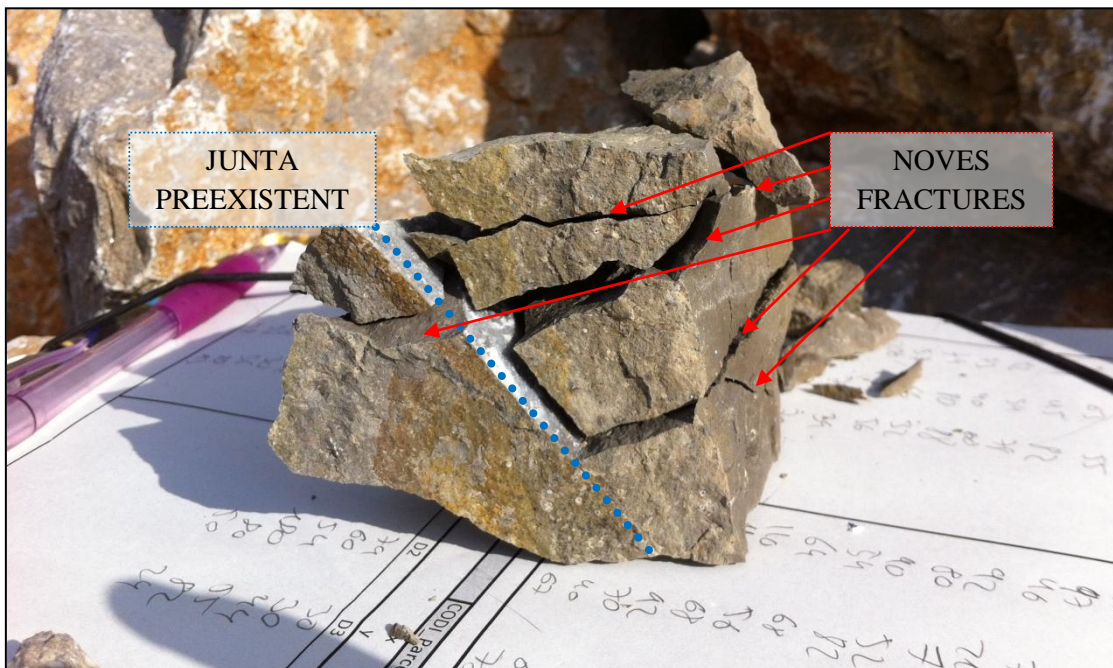


Fig. 45: Fotografia del mateix bloc que a la fotografia anterior però separant els diferents fragments que el formen, on es podria distingir entre disgregació per la junta preexistent i fragmentació amb les fractures noves.

6.1.2 Mesura de blocs en parcel·les de mostreig, Sampling Plots (SP).

Per poder obtenir una distribució de volums de blocs de la zona de la tartera, que fa aproximadament uns 30.000 m² amb un desnivell de 300 metres, en els que és impossible mesurar la totalitat dels blocs dipositats (sense la utilització de tècniques i tecnologia que no es tenen en aquests moments), **s'ha decidit realitzar una zonificació de la tartera amb base a les imatges fotogràfiques d'aquesta i la cartografia de camp, on s'han definit regions amb distribucions de blocs relativament homogènies en mida i densitat de blocs (Fig. 46)**. Una vegada definides aquestes regions, s'han realitzats Sampling Plots, o parcel·les de mostreig, on s'han mesurat tots els blocs del seu interior per obtenir la distribució de volums de blocs que després s'extrapolà a tota la regió que es considera que representa la mostra.

Una vegada es tenia clar la regió que es volia mostrejar, s'anava a camp a realitzar les observacions pertinents per decidir on es feia el mostreig exactament i la seva superfície. La superfície dels mostreig depèn de la mida dels blocs a mesurar. Quan la mida de bloc és relativament petita, entre 20 i 40 cm d'aresta, la superfície necessària per obtenir una mostra representativa és menor que quan la mida de bloc és del voltant dels 80 - 160 cm, en la que cal realitzar una parcel·la de mostreig de major superfície per mesurar un nombre major de blocs.

A la següent Taula 2 es mostra un resum de les dades en les que es van dur a terme les parcel·les de mostreig (Sampling Plots), la longitud de l'aresta del quadrant de mostreig, la seva superfície i el nombre de blocs mesurats dins de cada una de les parcel·les de mostreig. Com a resum final, **cal remarcar que s'han mesurat un total de 1252 blocs en parcel·les de mostreig que sumen una superfície total de 875 m²**.

Sampling Plots	Data	Longitud aresta (m)	Àrea (m ²)	nº de blocs mesurats
SP1	25/09/2012	10	100	284
SP2	04/10/2012	10	100	400
SP3	24/10/2012	5	25	113
SP4	24/10/2013	5	25	103
SP5	06/08/2013	20	400	209
SP6	06/08/2013	15	225	143
Total			875 m²	1252 blocs

Taula. 2: Dates, dimensions i nombre de blocs mesurats en les parcel·les de mostreig (Sampling Plots).

Observant les dades de la Taula 2 es pot veure com mesurar en una superfície major no implica un major nombre de blocs, sinó que depèn de la mida dels blocs, com es veu clarament amb el SP5 que amb una superfície de 400 m² s'han mesurat 209 blocs, menys que en els SP1 i SP2 on amb una superfície de 100 m² s'han mesurat 284 i 400 blocs respectivament, lògicament de dimensions molt més reduïdes com es mostrarà en el capítol 7 centrat en els resultats obtinguts.

A la següent Fig. 46 es mostra la localització dels Sampling Plots realitzats sobre la zonificació que s'ha dut a terme per caracteritzar la tartera. Les zones sense blocs són superfícies que no s'han computat per extrapolar les dades dels Sampling Plots. El mostreig SP2, que es troba a la zona més alta, és el que té un una mida de bloc menor, i a les zones adjacents lateralment, SP3 i SP4 les mostres tenen una distribució molt similar. En contraposició, els SP5 i SP6 són aquells que es troben més baixos i allunyats i on es troben les mides de blocs majors, per aquest motiu va ser necessari realitzar aquestes parcel·les de mostreig d'unes dimensions majors.

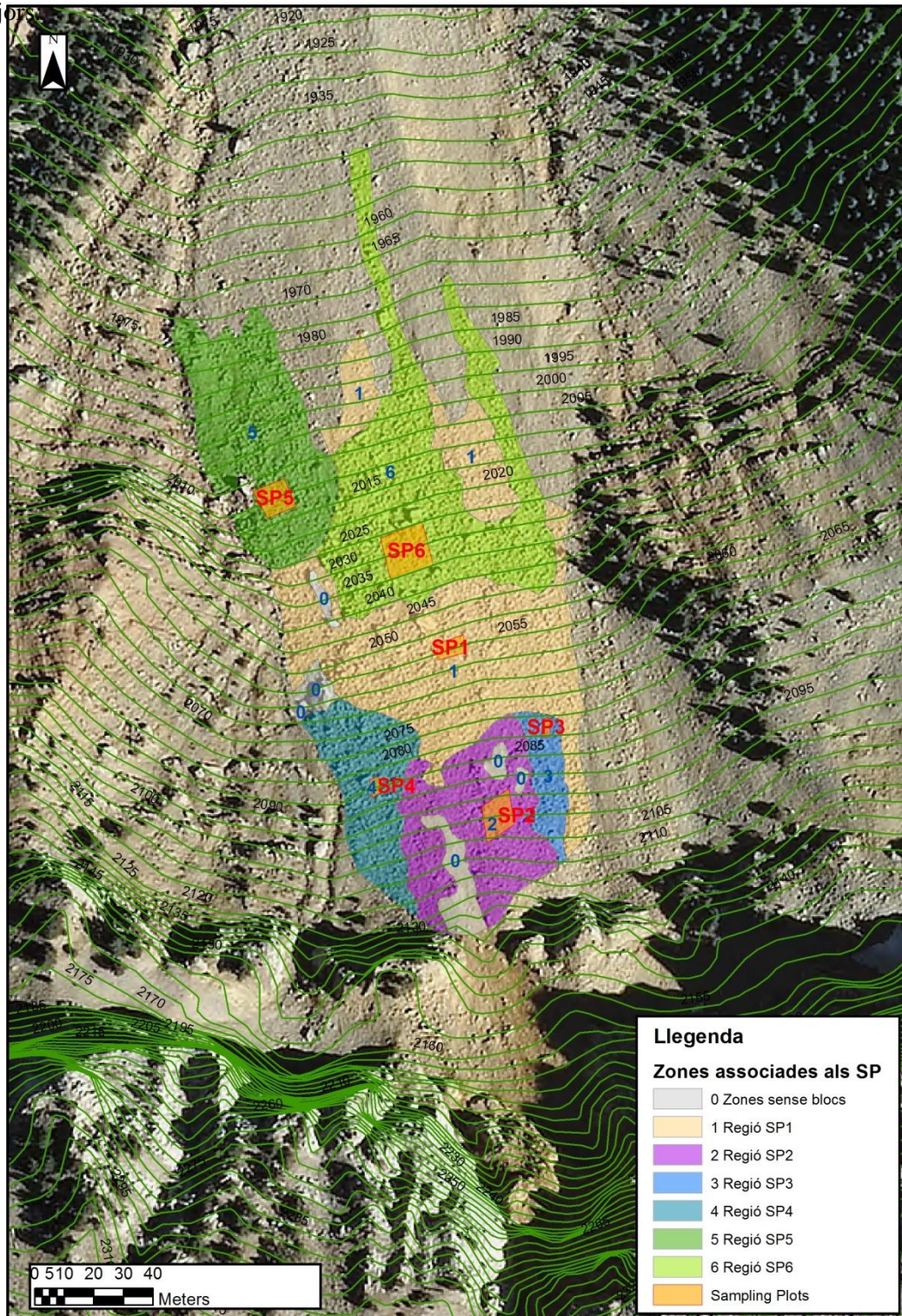


Fig. 46: Localització dels Sampling Plots realitzats i cartografia de la zonificació de la tartera.

A la següent imatge de la Fig. 47 es pot observar la zonificació realitzada així com la localització dels Sampling Plots i dels blocs puntuals mesurats en un model digital d'elevacions de la zona d'estudi amb l'ortofoto superposada en una vista 3D.

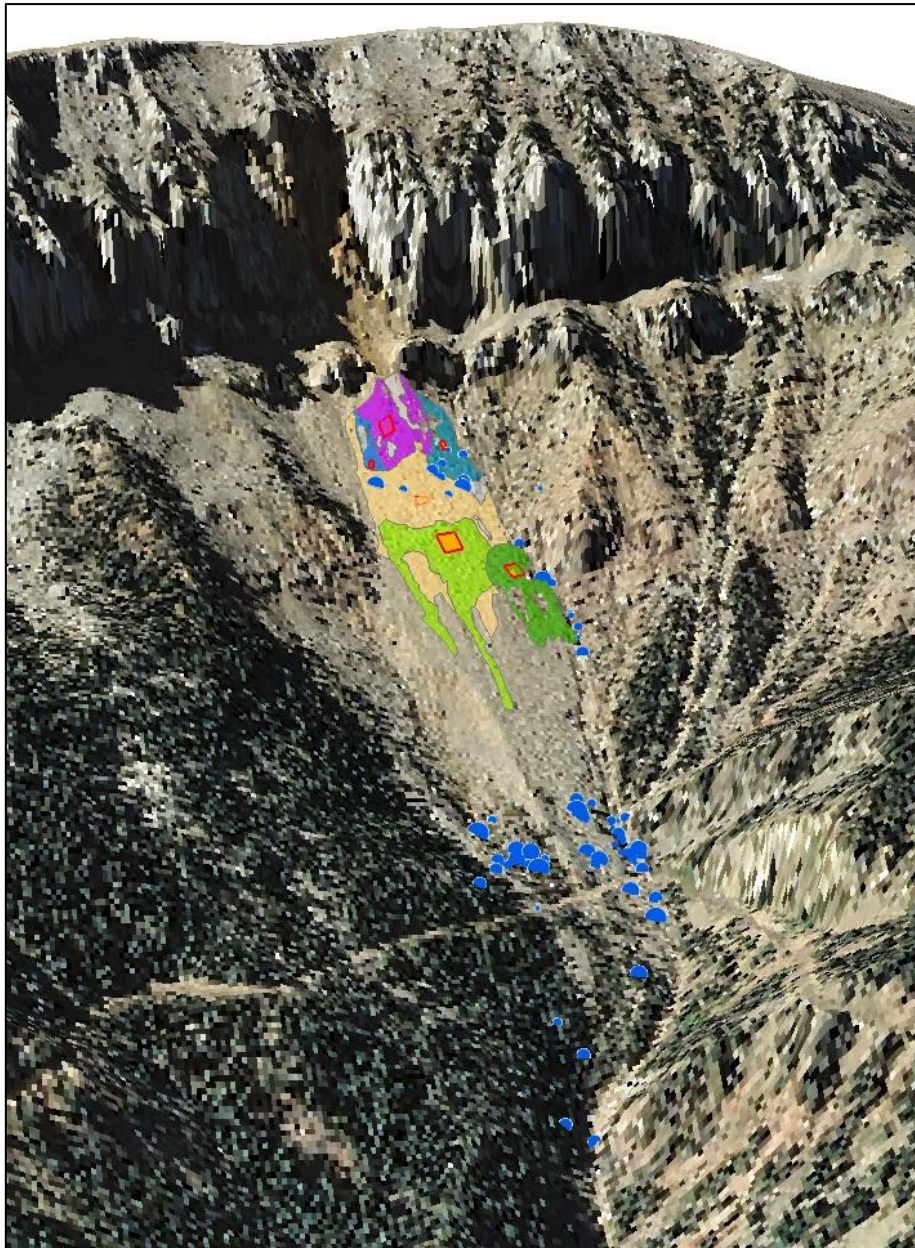


Fig. 47: Zonificació de la tartera i localització dels Sampling Plots i dels blocs puntuals mesurats sobre un model digital d'elevacions de la zona d'estudi amb l'ortofoto superposada.

A l'hora de realitzar cada una de les parcel·les de mostreig, s'ha buscat la zona més adequada des de la tartera estan, i s'han definit els límits de la parcel·la mitjançant una cinta mètrica de 25 metres. S'han definit els quatre vèrtex de la parcel·la de mostreig imposant la distància desitjada amb una cinta mètrica, i sempre intentat fer dues arestes paral·leles al pendent de la tartera i les altres dues perpendiculars a aquestes. Cada un dels vèrtex s'han mesurat amb el mateix GPS de mà utilitzat per georreferenciar els blocs puntuals i s'han registrat totes les dades en unes fitxes de camp que es poden trobar a l'Annex 1. Fitxes de camp.

A les següent fotografia de la Fig. 48 es mostra com es col·locava la cinta mètrica per mesurar i definir una de les arestes de les parcel·les de mostreig, en aquest cas del SP5.



Fig. 48: Col·locació de la cinta mètrica per mesurar i definir una de les arestes d'una parcel·la de mostreig, en concret del SP5.

A la visita de camp del 4 d'octubre del 2012, es va arribar fins al peu de la paret rocosa, des d'on es va poder observar la zona més alta de la tartera on gairebé no hi ha acumulació de blocs degut en gran part a l'elevat pendent (Fig. 49 i 50). En aquest zona es poden observar alguns reguerots erosius fets per l'aigua i traces de blocs que han lliscat arrossegant material.



Fig. 49: Fotografia presa just des del peu de la paret rocosa mirant cap aquesta.



Fig. 50: Fotografia presa des del peu de la paret rocosa mirant cap a la tartera.

Durant el mateix dia 4 d'octubre es va realitzar el SP2, que és la parcel·la que es troba més elevada dins de la tartera. A les següents imatges (Fig. 51 i Fig. 52) es mostren els blocs que es van prendre representatius de la regió representada pel SP2.



Fig. 51: Imatge del conjunt de blocs del SP2 mirant cap a l'escarpat rocós.

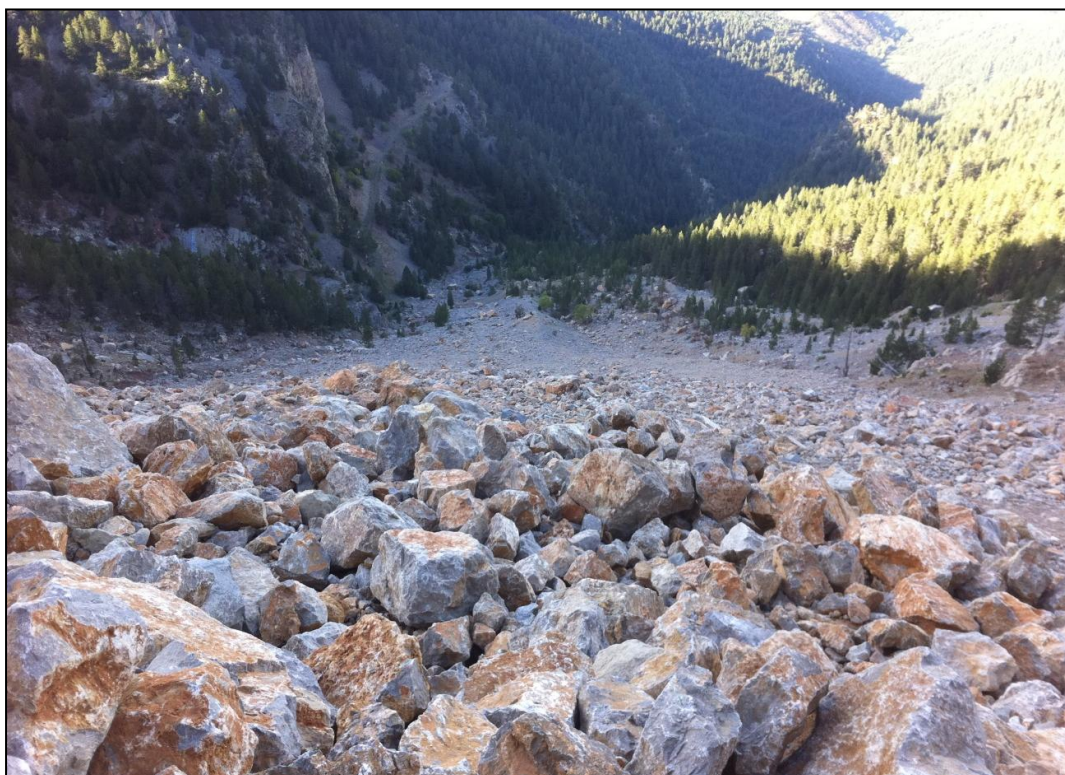


Fig. 52: Imatge dels blocs del SP2 mirant tartera avall.

El primer dels Sampling Plots que es va dur a terme va ser el SP1 que es va realitzar el dia 25 de setembre del 2012, des d'una zona molt central de la tartera on la mida de blocs és bastant homogènia com es pot observar a la següent fotografia de la Fig. 53.



Fig. 53: Imatge de la zona on es va dur a terme el SP1 mirant cap a l'escarpament.

Abans de tancar l'apartat referent a les tasques de camp que s'han dut a terme per a la mesura dels blocs puntuals i les parcel·les de mostreig, **cal remarcar el risc que suposa treballar durant tot un dia enmig de la tartera**, ja que la paret és molt inestable i contínuament es pot sentir com cauen blocs, sobretot els mesos de tardor i hivern en els moments de desglaç. De fet, en una de les visites es va presenciar un desprendiment que va fer patir per la nostre integritat i que va incitar encara més a la cerca de tècniques per a la mesura automàtica o semiautomàtica de mides de blocs, tant a les zones d'acumulacions com a les zones de sortida de blocs, sobretot amb l'objectiu de reduir l'exposició al perill.

A més, ja que l'objectiu a llarg termini d'aquests estudis es poder realitzar un elevat nombre d'inventaris de desprendiments amb les distribucions de volums de blocs abans i després, cal considerar de forma molt seriosa la exposició al risc a l'hora de fer el treball de camp. Aquest fet impulsa a la utilització de vehicles aeris no tripulats per obtenir imatges de qualitat sobre les quals es pugui caracteritzar tant les mides dels blocs de la tartera, com les famílies de discontinuïtats de la zona de sortida a l'escarpament.

Així doncs, es podria dir que l'experiència d'elevat risc que es va viure en una de les visites de camp és la que va impulsar el tractament amb tècniques fotogramètriques de la paret rocosa per a l'obtenció de la IBSD que es desenvoluparà a l'apartat 6.2.

6.1.3 Estimació del volum del desprendiment en base als blocs mesurats

Per realitzar una estimació del volum del desprendiment es poden utilitzar les dades de les mesures de blocs que s'han pres al dipòsit del desprendiment. Per una banda s'han mesurat 275 blocs puntuals amb un volum total de 591.6 m³. A aquest volum cal sumar-li el volum de roca que hi ha acumulat a la tartera del qual s'han mesurat 1257 blocs en parcel·les de mostreig, que suposen un volum de 238.82 m³. Aquest volum per això cal extrapolar-lo a la resta de la tartera i per fer-ho cal utilitzar la zonificació que s'ha realitzat d'aquesta en la que es delimita quines superfícies estan caracteritzades per cada parcel·la de mostreig.

Per mesurar les superfícies de cada zona s'ha utilitzat el programa ArcGis i s'ha tingut en compte el pendent més o menys constant de la tartera d'uns 35°. Així doncs, s'ha calculat la relació que hi ha entre l'àrea real de cada parcel·la de mostreig o Sampling Plot, i la superfície de la regió que representa. Aquesta relació o ratio, és la que es pot utilitzar per extrapolar tant els volums com les distribucions de blocs mesurades en els Sampling Plots per tota la tartera.

A la següent Taula 3 es mostren les dades referents a les superfícies dels Sampling Plots (A_m) i les superfícies de les regions que representen (A_r), amb les que s'obté la ratio necessària per extrapolar les dades per tota la tartera.

SP	Àrea de mostreig A_m (m ²)	Àrea representada A_r (m ²)	Ratio $R=A_r/A_m$
SP1	100	16125.1	161.3
SP2	100	2659.8	26.6
SP3	25	629.1	25.2
SP4	25	1810.3	72.4
SP5	400	3994.9	10.0
SP6	225	5610.9	24.9

Taula. 3: Relacions entre la superfície real dels Sampling Plots realitzats i la regió que representen sobre la tartera.

Per altra banda cal tenir en compte que en els SP5 i SP6 no s'han mesurat blocs menors de 0.5 m³, ja que les dimensions dels SP feien impossible la mesura de tots els blocs menors perquè es colaven entre els forats dels més grans, de manera que s'ha considerat oportú imposar la distribució obtinguda al SP1 (on gairebé tots els blocs són menors de 0.5 m³) per caracteritzar la fracció menor dels SP5 i SP6. D'aquesta manera la superfície representativa del SP1 cal sumar-li les superfícies dels SP5 i SP6.

Finalment es poden utilitzar les ratios obtingudes per extrapolar els volums mesurats a cada Sampling Plot per tota la tartera. A la següent Taula 4 es mostren els volums extrapolats i la estimació del volum total del desprendiment en base a les mesures de blocs del dipòsit.

	Volums mesurats V_m (m ³)	Ratio R	Volums extrapolats $V_e=V_m*R$ (m ³)
BP	591.60	1	591.60
SP1	17.46	161.3	2814.98
SP2	14.51	26.6	385.95
SP3	6.06	25.2	152.41
SP4	6.83	72.4	494.59
SP5	85.47	10.0	853.62
SP6	108.49	24.9	2705.52
VOLUM TOTAL: ΣV_e (m³)			7998.67 m³

Taula. 4: Resum de volums calculats per regions i volum total del desprendiment en base als blocs mesurats.

Així doncs, el volum estimat del desprendiment és d'uns 8.000 m^3 , en base als blocs mesurats i les extrapolacions de les mesures fetes en parcel·les de mostreig per les regions que representen (Fig. 54). Ja que existeix una part important de fracció fina que no s'ha pogut mesurar, que suposa una gran quantitat de blocs de molt petites dimensions, és raonable considerar que el volum de material rocós afectat pel desprendiment és de l'ordre dels 10.000 m^3 .

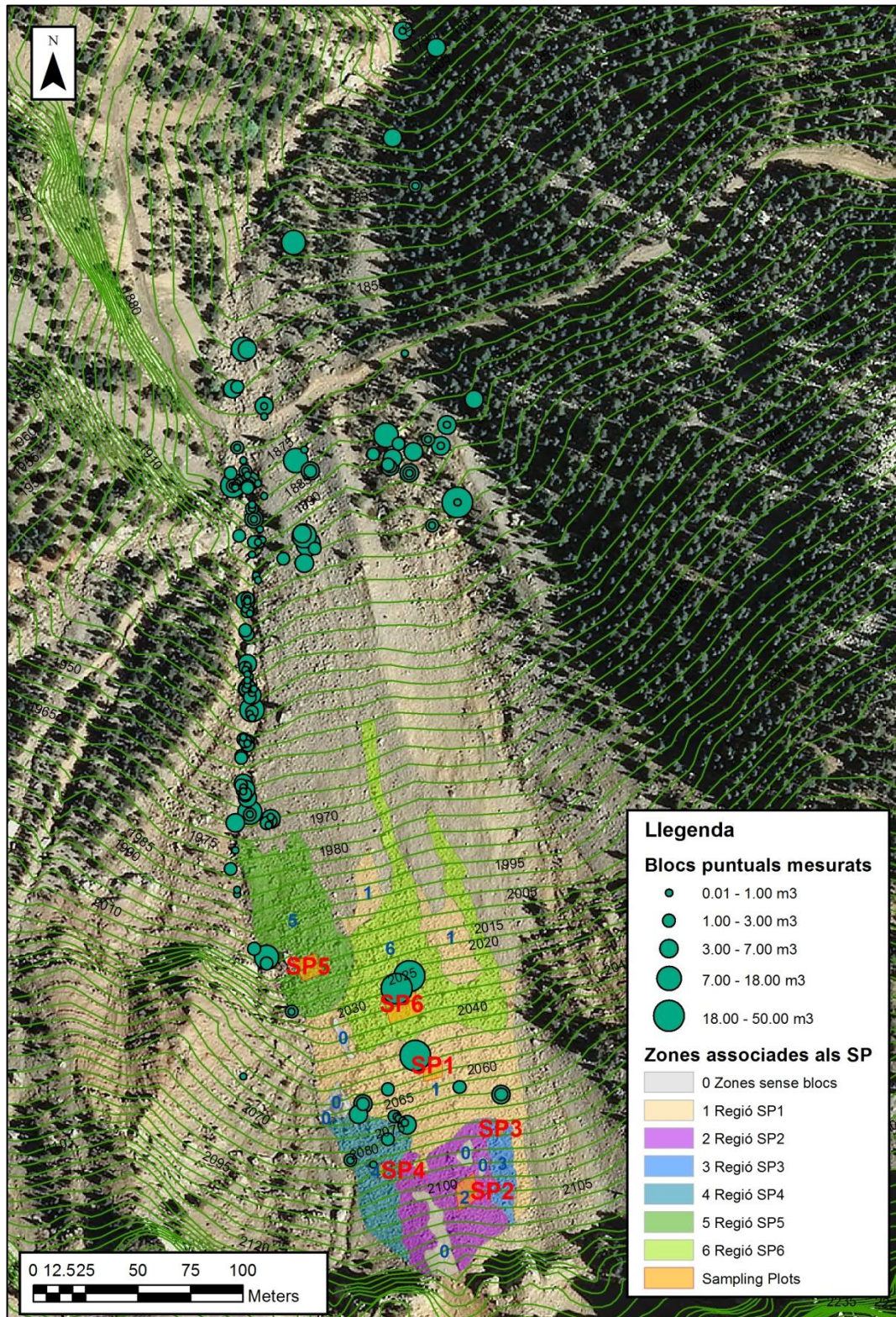


Fig. 54: Cartografia del treball de camp realitzat per a l'estimació del volum del desprendiment i per obtenir la PBSB.

6.2 Caracterització de la paret rocosa per a l'obtenció de la IBSD

En el següent apartat s'exposarà la metodologia utilitzada per obtenir la IBSD, basada sobretot en tècniques fotogramètriques que permet obtenir un model digital de la paret rocosa a partir de dues fotografies. Amb el model digital de la paret es poden identificar les discontinuïtats i utilitzar-les per tallar un volum de control generant una distribució de volums basada en el sistema de fractures del massís just a la zona afectada pel desprendiment.

6.2.1 Model digital de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques

Les tècniques fotogramètriques permeten obtenir models digitals del terreny a partir de dues o més fotografies des de diferents punts de vista. Una vegada s'ha generat el núvol de punts que tenen coordenades x , y i z . Es pot realitzar un procés de triangulació i així obtenir un model digital del terreny tridimensional amb el que es pot treballar sobre el relleu real de la paret rocosa.

És necessari escalar i georreferenciar el model utilitzant punts de coordenades conegudes, que típicament s'obtenen amb tècniques geodèsiques de suport com la mesura amb GPS o amb estació total. En aquest cas, no és fàcil aconseguir coordenades de punts a la paret degut a la situació i morfologia de l'emplaçament que dificulta la utilització d'aquestes tècniques. En aquest context, s'han pres punts de coordenades conegudes a partir d'ortofotos així com la correlació de la superfície generada mitjançant les tècniques fotogramètriques amb la superfície topogràfica a escala 1:5000 facilitada per l'Institut Cartogràfic de Catalunya.

El primer pas és l'obtenció de les fotografies amb les que es treballarà. En una de les campanyes de mesura de camp es va realitzar una sèrie de fotografies **des de diferents perspectives** enfocant la zona de sortida. Un dels criteris bàsics per a la realització de les fotografies és la superposició de més del 60% entre les imatges, però en aquest cas es complia sobradament. A la següent Fig. 55 es mostra un esquema típic de com prendre les imatges d'una paret per poder ser tractades amb programari fotogramètric.

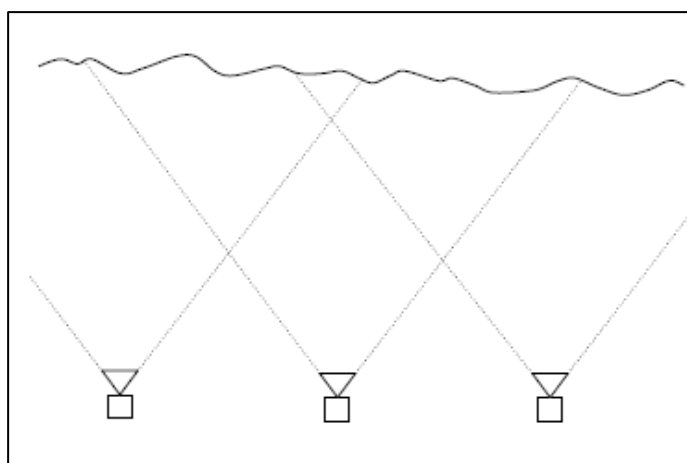


Fig. 55: Esquema de posicionament i orientació de la càmera per prendre les fotografies adientment.

Les fotos utilitzades es mostren a la Fig. 56 següent. Són fotografies preses el dia 12 de setembre del 2012 amb una càmera fotogràfica NIKON D90 en una resolució de 300 ppp i amb una mida de 2848 x 4288 píxels i una profunditat de 24 bits. La distància focal utilitzada en la presa de les fotografies és de 105mm.



Fig. 56: Parella de fotografies utilitzades per generar un model digital tridimensional de la paret rocosa mitjançant tècniques fotogramètriques.

S'ha utilitzat el software *AgiSoft StereoScan* ja que és un dels pocs programes d'elaboració de malles 3D mitjançant fotogrametria que **és gratuït** i que permet exportar el model digital resultant en formats convencionals com *.obj* i *.fbx*. Aquest formats són àmpliament acceptats per la majoria de programes de tractament de dades tridimensionals i de modelatge 3D com el *Rhinoceros*, que s'ha utilitzat per caracteritzar les discontinuïtats de la paret rocosa.

Amb la majoria de programes de fotogrametria es poden definir alguns dels paràmetres que s'utilitzen per a la correlació de cada píxel entre les dues fotografies, així com la densitat de punts amb la que es construeix la malla. En aquest cas s'ha provat realitzar la malla amb diferents nombre de punts, obtenint malles de diferents densitats associades a millor o pitjor precisió. S'ha observat que amb més de 1.500.000 punts la malla ja no guanyava precisió ni es

podia observar més detall de la paret rocosa, de manera que aquest és el nombre final de punts que s'ha utilitzat en la generació de la malla tridimensional.

Per facilitar la correlació entre els píxels de les dues fotografies, és important tenir una bona il·luminació. Les zones molt fosques o molt brillants dificulten la identificació de píxels individuals ja que tots els píxels del voltant són negres o blancs, en el cas d'una zona fosca o d'una zona brillant. El dia en que es van prendre les imatges feia núvol i la llum era bastant homogènia sobre tota la paret. Fa poc, els programes de fotogrametria et demanaven realitzar la correlació entre punts de forma manual, mentre que avui en dia, un sofisticat tractament ràster de les imatges permet correlacionar els píxels d'ambdues fotografies de forma automàtica, i la identificació manual s'utilitza per escalar i georeferenciar el model resultant.

El primer dels procediments que segueix el programa de fotogrametria és la orientació de les imatges, és a dir, és capaç **d'identificar la posició i orientació** des d'on s'han obtingut les imatges de l'objecte d'estudi. A la següent Fig. 57 es mostra una captura de pantalla del programa en la que es poden observar les fotografies Cadí_1 i Cadí_2 representades per un rectangle blau amb un vector normal que defineix l'orientació de la fotografia. Cal destacar que en aquest moment, pel programa, les coordenades X i Y fan referència al pla de les fotografies, i la Z és la coordenada tridimensional que calcula a partir de les coordenades X i Y de cada un dels píxels que concorden entre les dues fotografies. Per tant, en aquest pas el model encara no té escala ni orientació respecte el nord.

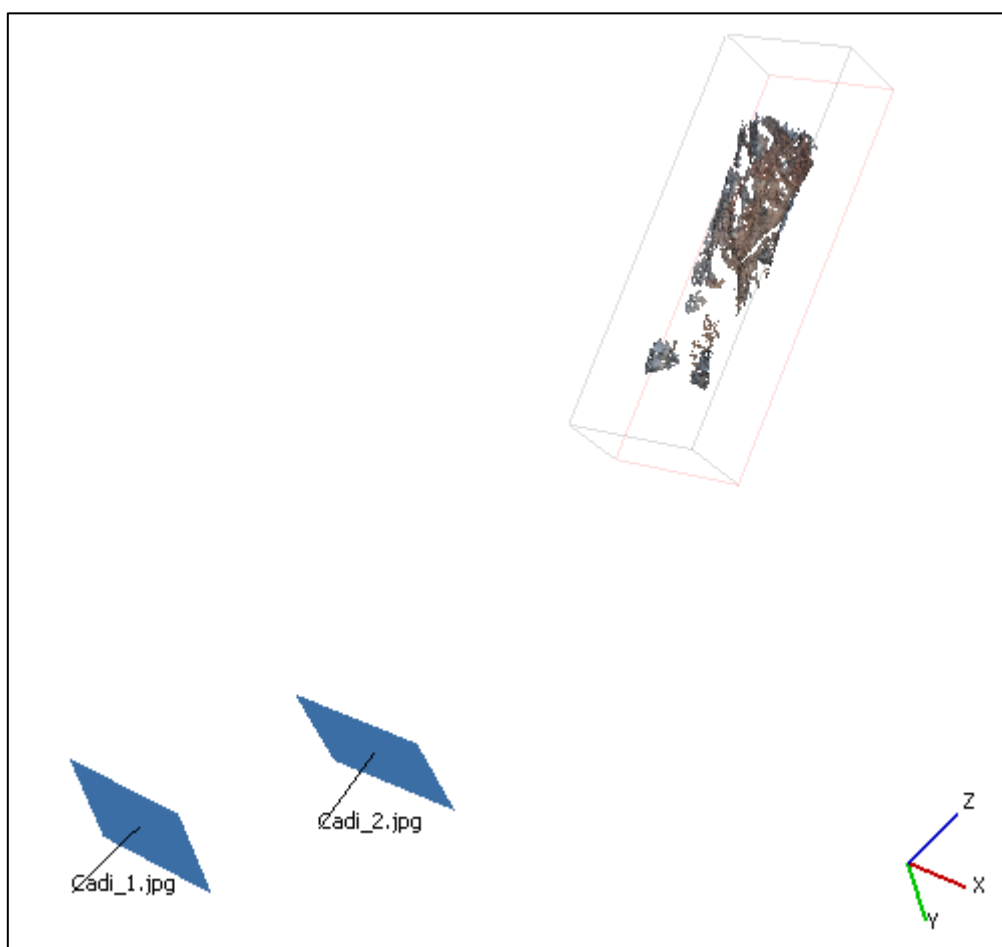


Fig. 57: Captura de pantalla del programa AgiSoft StereoScan on es pot observar la interpretació de la posició i orientació de les fotografies que s'utilitzen.

Una vegada orientades les fotografies, el programa es dedica a correlacionar tots els píxels que pot entre les dues imatges generant un núvol de punts amb coordenades x,y i z amb els que genera la malla tridimensional desitjada (Fig. 58). A sobre la malla s'hi pot projectar una imatge corregida que permet observar perfectament el model digital creat (Fig. 59).

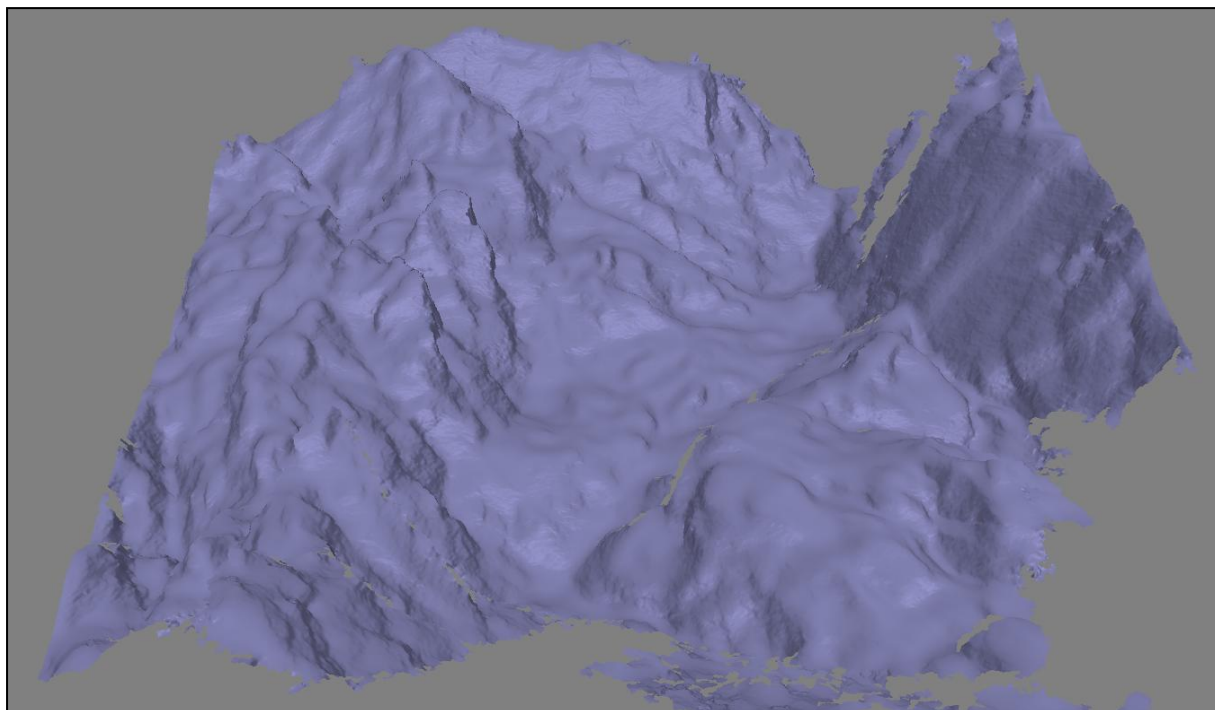


Fig. 58: Malla tridimensional basada en el núvol de punts obtingut de la correlació entre píxels de les dues fotografies. Realitzada mitjançant el programa *Agisoft StereoScan*.

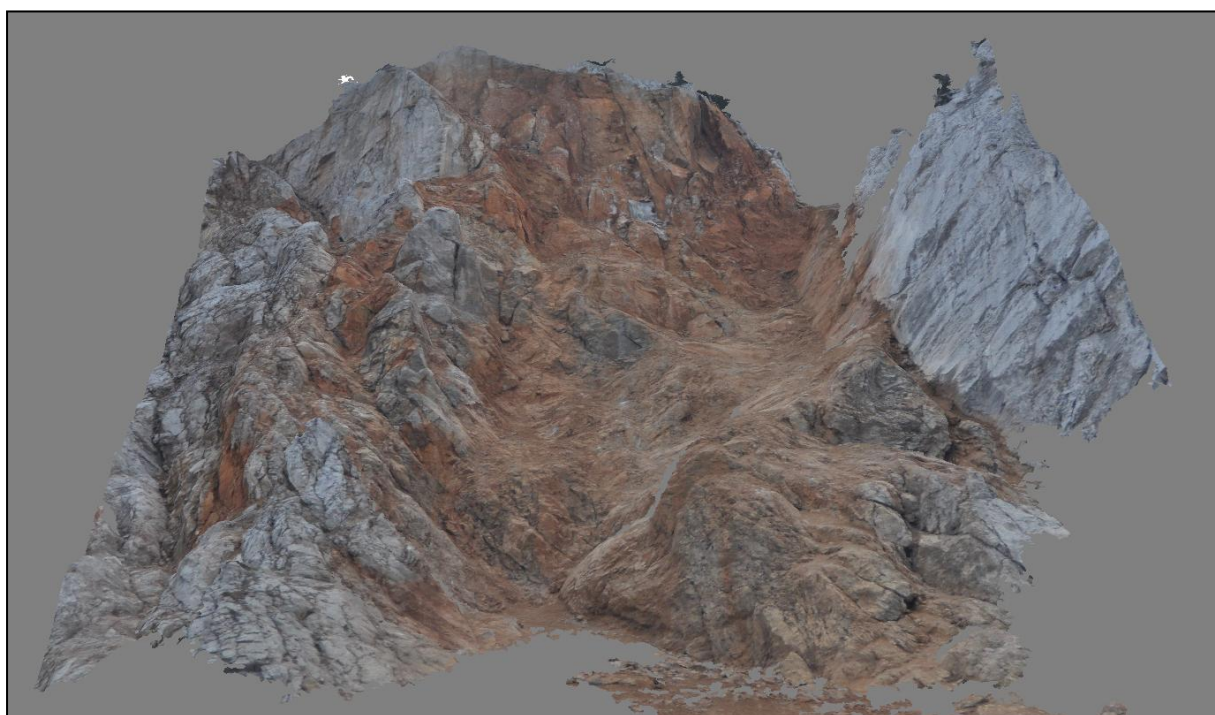


Fig. 59: Model digital de la paret rocosa amb la imatge corregida projectada sobre seu.

Una vegada s'ha obtingut el model digital de la paret rocosa, aquest no està escalat ni orientat respecte el nord, i per tant tampoc està georreferenciat. La georreferenciació del model no serà necessària, des del punt de vista que sobretot interessa escalar-ho amb l'objectiu d'estar mesurant els volums de blocs correctament. La seva orientació permetrà la mesura de l'orientació i cabussament de les discontinuïtats correctament. I finalment, la seva georreferenciació pot ser convenient per acoblar el model digital a la topogràfica existent.

En un cas ideal, es tindrien punt de control a les fotografies preses de coordenades conegudes, que s'haurien mesurat amb un GPS o amb estació total. En aquest cas s'han obtingut algunes coordenades en base a la posició coneguda d'elements que surten a les fotògrafes com el peu de la paret rocosa. A més a més, com que es disposava de la topografia a escala 1:5000 de la zona, s'ha utilitzat aquesta per correlacionar el model digital obtingut amb un núvol de punts generat a partir de la topografia. Aquest procediment s'ha dut a terme mitjançant el programa *CloudCompare*, també de llicència gratuïta, que és un programa de tractament de núvols de punts com ho són els resultats d'un mostreig amb LIDAR o amb tècniques fotogramètriques.

Així doncs, **amb la topografia 1:5000** de l'Insitut Cartogràfic de Catalunya **s'ha generat una model digital del terreny** a partir del qual **s'ha generat un núvol de punts** per poder treballar amb els mateixos formats S'ha escalat i georreferenciat el model digital de la paret rocosa agafant de referència aquelles part de la paret que no han sofert variacions i que coincideixen amb la topografia.

El programa *CloudCompare* ja té una funció per realitzar precisament aquesta operació, on es demanen els punts del dos núvols de punts que es consideren que són un mateix (Fig. 60), a partir dels quals ajusta un del dos núvols de punts. En aquest cas s'ha adaptat el núvol de punts de la paret rocosa al núvol de punts de la topografia amb els punts que no han sofert canvis, utilitzant sobretot punts d'un important pla de falla a la part oest i una carena de roques de la zona est, així com punts del peu de coordenades conegudes i fàcils d'identificar.

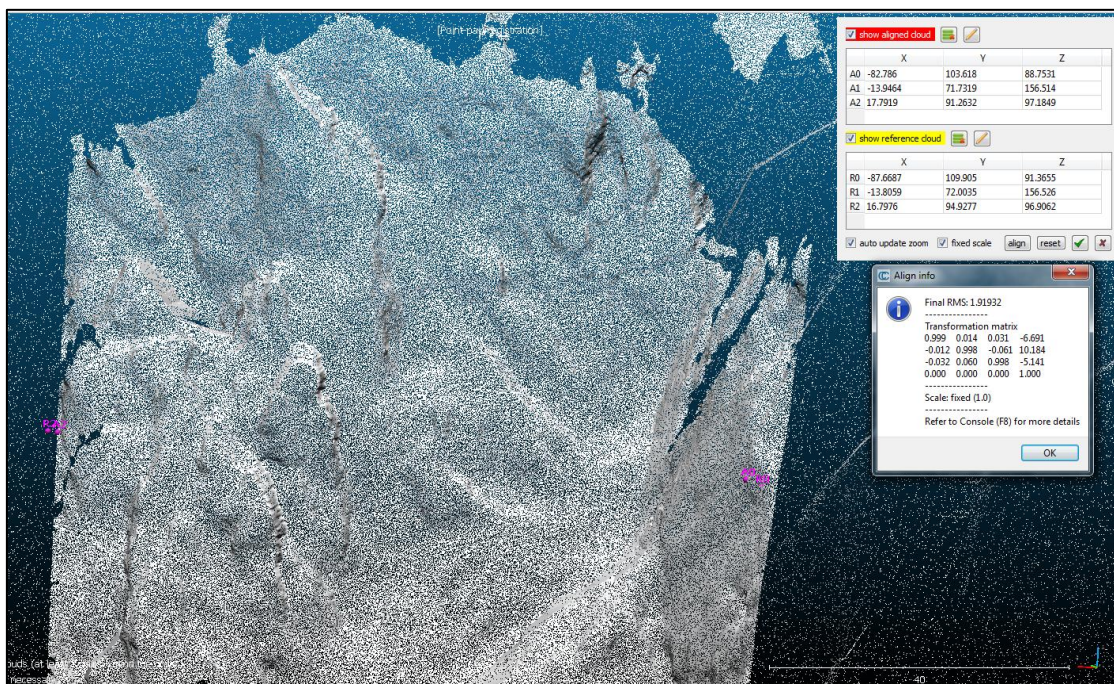


Fig. 60: Procés d'escalat i georreferenciació del model digital de la paret rocosa amb base a punts de coordenades conegudes i de la topografia existent a escala 1:5000.

Al acabar el procés, el programa informa de quin és l'error quadràtic mitjà així com la matriu de transformació que ha calculat per transformar la matriu (Fig. 61). Al capítol 8. Futures línies d'investigació es farà referència a com s'han de millorar aquest processos tècnicament.

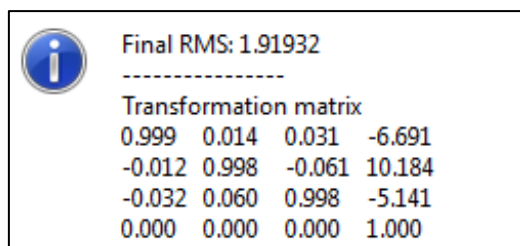


Fig. 61: Error quadràtic mitjà i matriu de transformació que el programa *CloudCompare* calcula per escalar i posicionar correctament el núvol de punts de la paret rocosa.

Una vegada escalat i georeferenciat correctament el model digital de la paret rocosa, es carrega en el programa *Rhinoceros* des del qual es caracteritzaran les discontinuïtats com s'explica en el següent apartat 6.2.2. A la Fig. 62 següent es mostra el model digital que s'utilitzarà per identificar les discontinuïtats carregat ja al programa *Rhinoceros*. Es poden observar alguns forats sense informació que corresponen a zones d'ombra o d'oclusió degut a que les fotografies es van realitzar des d'un punt de cota molta més baixa que la paret, de manera que la pròpia paret impedeix veure algunes zones.

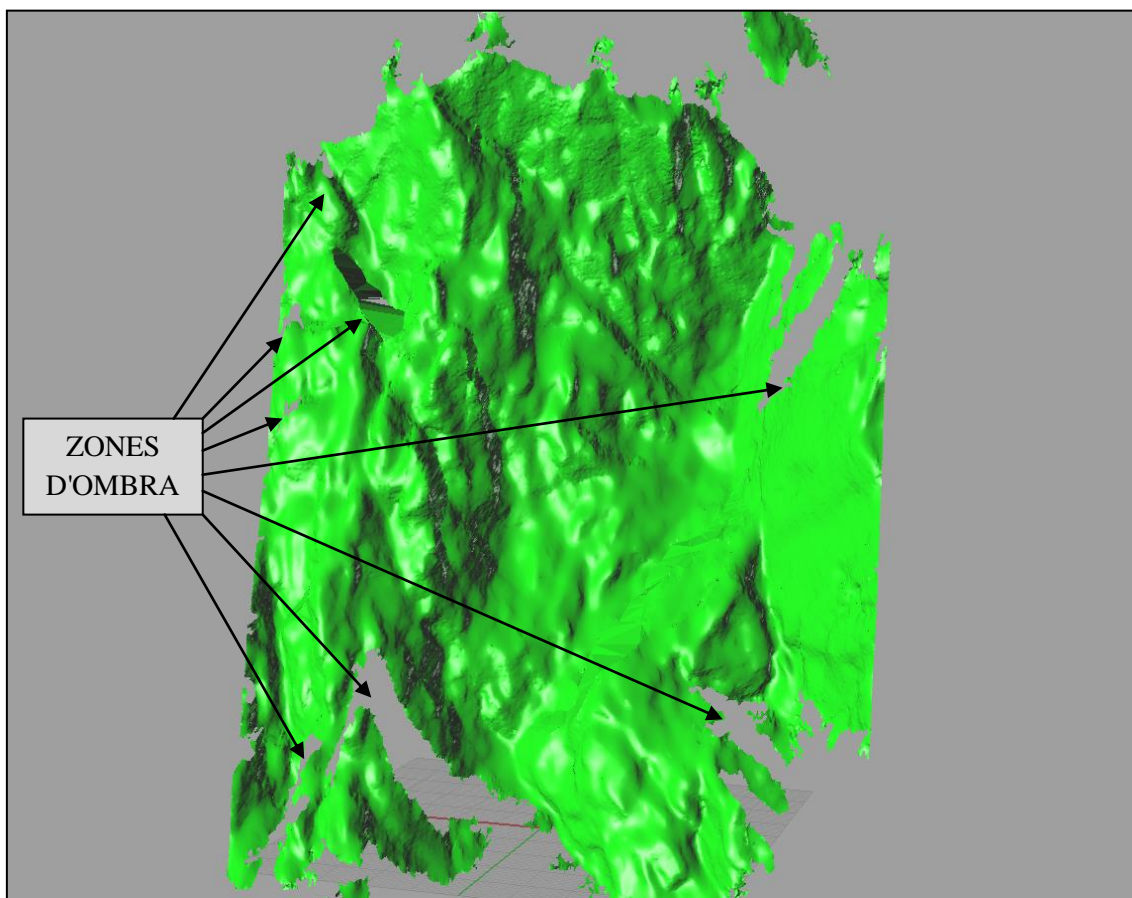


Fig. 62: Model digital de la paret rocosa carregat en el programa *Rhinoceros* on es poden observar algunes zones d'ombra o d'oclusió sense informació.

6.2.2 Caracterització de les famílies de discontinuïtats

La caracterització de les discontinuïtats a la paret rocosa és un procés que es pot dur a terme mitjançant diferents metodologies. Típicament es realitzen scanlines o mostrejos de discontinuïtats amb brúixola de geòleg sobre la paret a camp, però sovint, en els casos de despreniment, és molt difícil o impossible arribar a la zona d'interès, i sovint, les discontinuïtats que es mesuren a certa distància no són representatives de la zona de sortida de blocs. Per aquest motiu es decideix treballar a distància sobre fotografies i sobre el model digital del terreny obtingut.

En una primera etapa d'identificació de discontinuïtats, s'han remarcat totes aquelles juntes i interseccions de plans que es poden observar a la paret sobre una fotografia (Fig. 63) i es poden aglutinar de forma preliminar en famílies (Fig. 64).



Fig. 63: Identificació de les discontinuïtats visibles en una fotografia de la paret rocosa d'estudi.

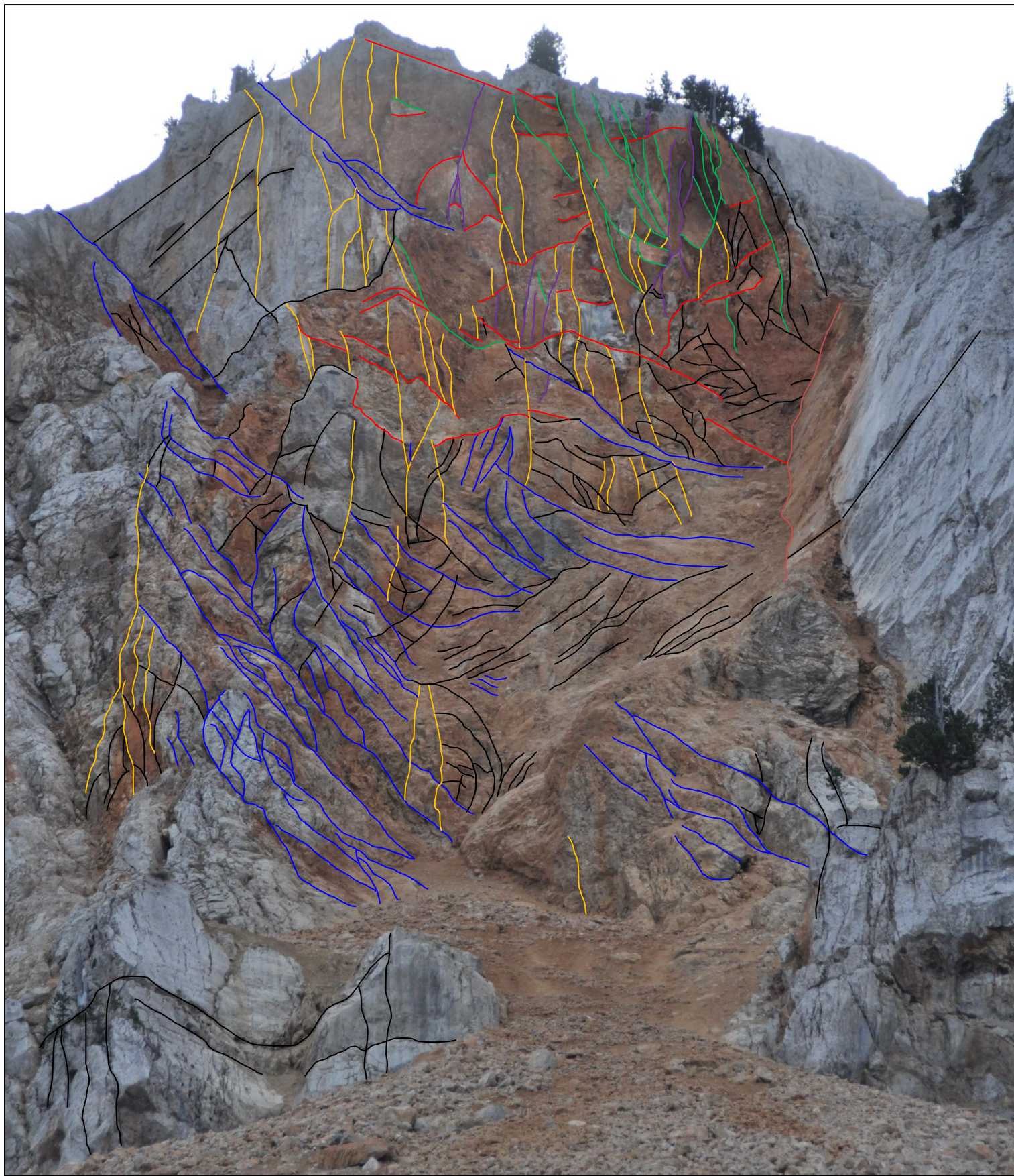


Fig. 64: Identificació de discontinuïtats per famílies sobre una fotografia de la paret rocosa.

6.2.3 Identificació automàtica de les famílies de discontinuïtats

Cal tenir en compte que la identificació de les discontinuïtats a partir d'una fotografia no és un cas ideal, ja que la tridimensionalitat de la paret pot enganyar la percepció de les juntes, i no és suficient, ja que per a cada junta observada en una fotografia existeixen infinits plans que poden generar la junta, és a dir, és un feix de plans. Per això és de gran utilitat el model digital de la paret rocosa, que permet delimitar sobre seu els plans que caracteritzen les famílies de discontinuïtats.

Per fer-ho, es poden fer algun anàlisi completament automatitzats, com els que permet realitzar el programa abans citat *CloudCompare*, que permet ajustar de forma automàtica plans a un conjunt de punts. Per exemple, un pla que s'observa molt bé tant a camp com a totes les fotografies és un important pla de falla que es troba a costat oest de la cicatriu del desprendiment (quedant a la dreta de la majoria de fotografies, on s'observa un pla grisós amb estries). A la següent Fig. 65 es mostra com es s'ajusta un pla al conjunt de punts que s'han obtingut d'aquest pla de falla.

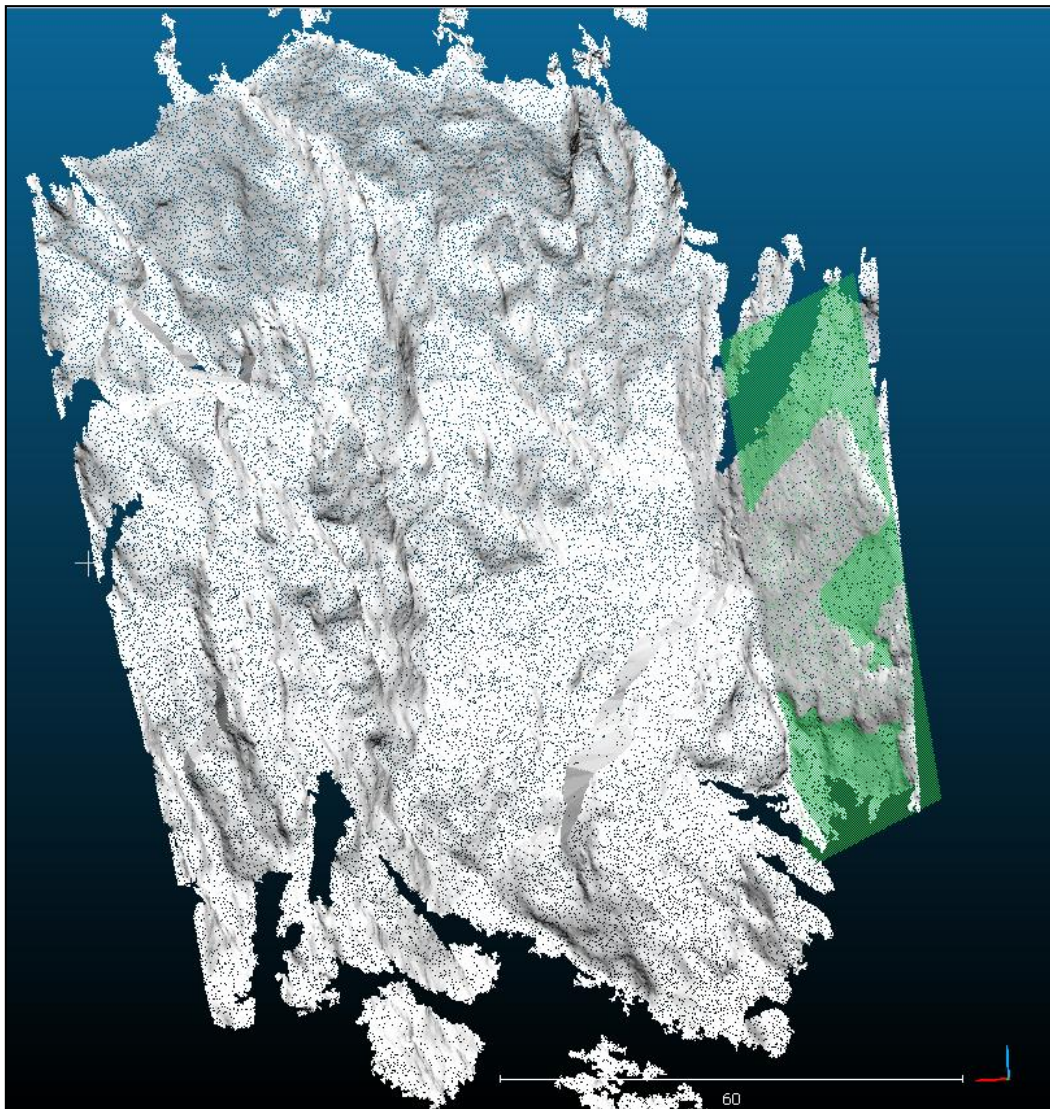


Fig. 65: Pla ajustat al pla de falla sobre el núvol de punts de la paret rocosa.

El programa *CloudCompare* permet analitzar de forma automàtica els plans que es poden ajustar al núvol de punts que compleixen certes condicions, com un llinar de coplanaritat entre els punts o una variació màxima dels diferents vectors normals ajustant diferents plans a un mateix grup de punts.

Per analitzar només la zona d'interès i no tot el model digital de la paret, el programa permet seleccionar només una part del núvol de punts i treballar sobre la part de la paret des d'on s'han després blocs. A la següent Fig. 66 es mostra aquest filtre amb el que s'agafa només la part d'on han caigut blocs, aquella zona que es veu més fresca, de tons més ataronjats i d'on s'observa a camp clarament que ha estat afectada pel desprendiment.

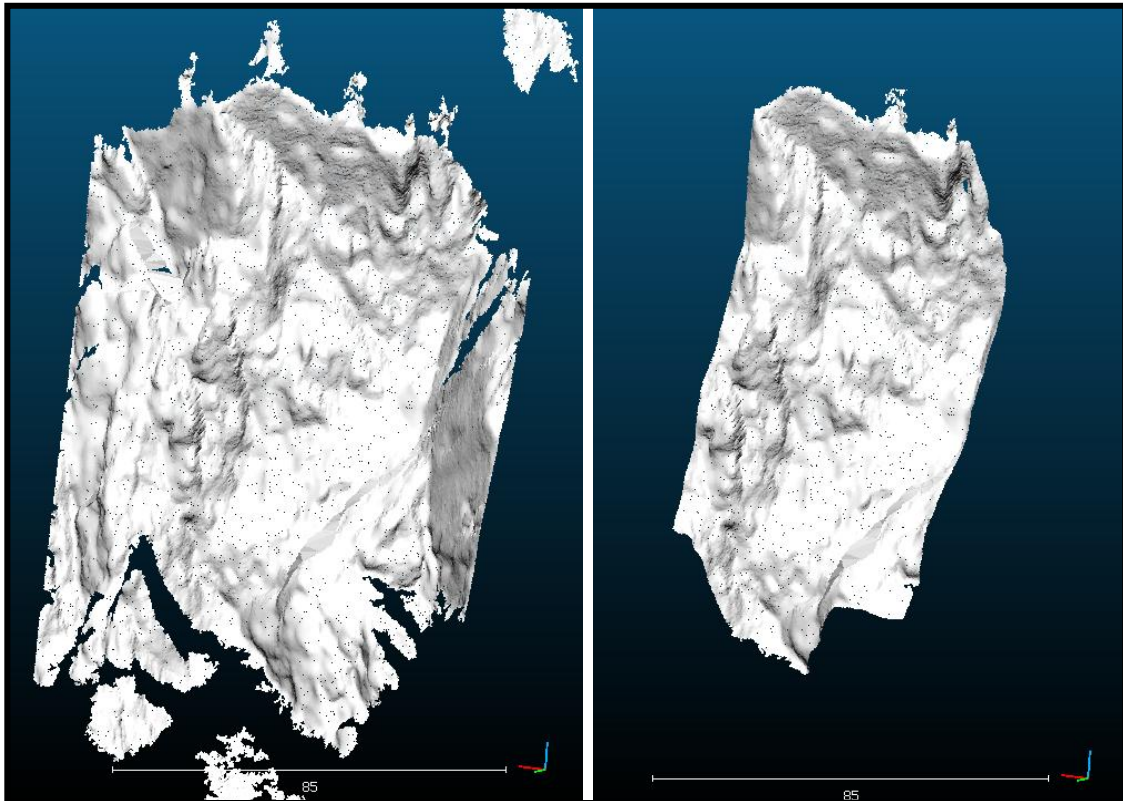


Fig. 66: Selecció de la zona afectada pel desprendiment en el núvol de punts de la paret rocosa.

A la següent Fig. 67 es mostren els paràmetres de control que s'utilitzen per realitzar l'ajust automàtic de plans al núvol de punts de la zona de sortida de blocs.

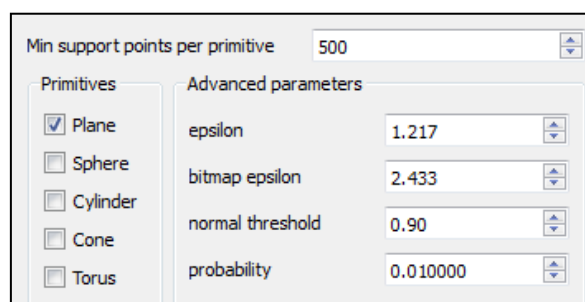


Fig. 67. Paràmetres d'ajust de plans al núvol de punts utilitzats per obtenir un ajust automàtic.

Entre el paràmetres de control de l'ajust de plans, s'utilitza un mínim de 500 punts per definir un pla, que implica que alguns plans que estiguin representats per massa pocs punts, no seran identificats, i per altra banda, implica que els plans identificats tenen més de 500 punts que compleixen les condicions imposades, fet que els hi dona certa fiabilitat a priori. Però no és així, i és que no tots els plans que es puguin ajustar al núvol de punts corresponen a famílies de discontinuïtats, i per això cal supervisar cada una de les famílies identificades en aquests procés automàtic, que es mostren a la següent Fig. 68.

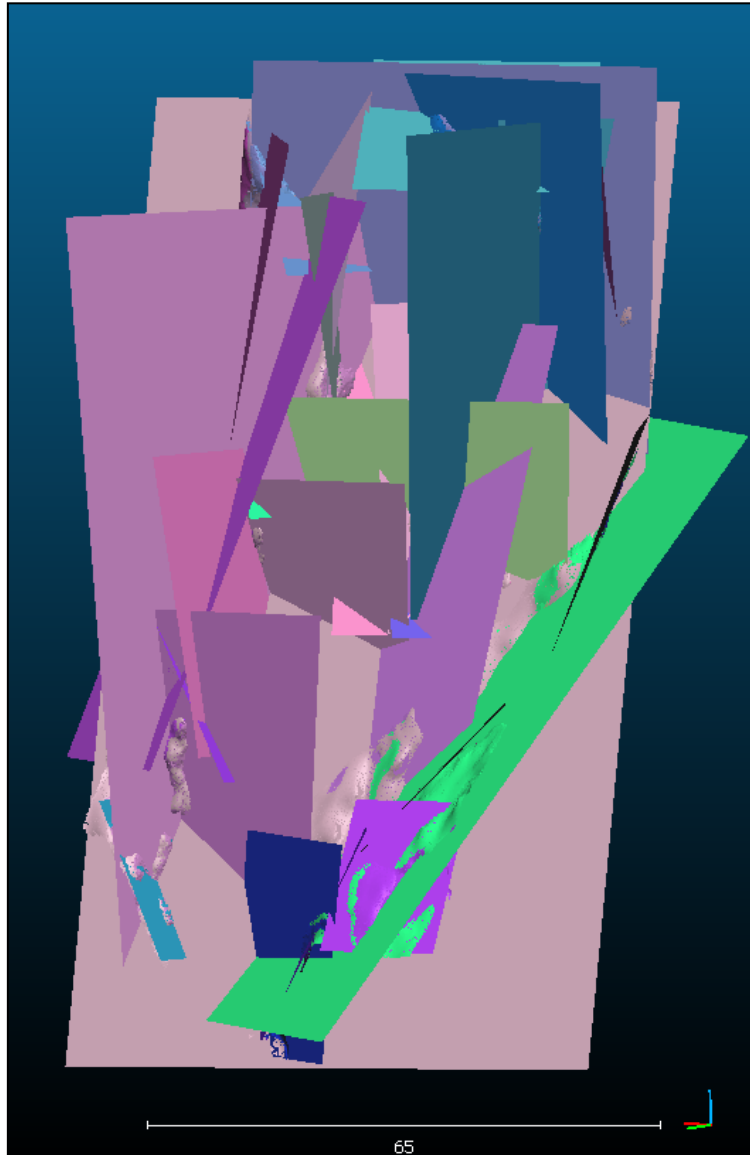


Fig. 68: Plans ajustats al núvol de punts de la zona de sortida de forma automàtica amb el programa *CloudCompare*.

Modificant l'error permès en la coplanaritat dels punts per ser ajustats a un pla, o el nombre de punts mínim que fan falta per assignar un pla, es poden obtenir resultats molt diversos. Per exemple, reduint el nombre de punts necessaris per definir un pla a 50 o 100 surten milers de plans que es poden ajustar a gairebé conjunts aleatoris de punts que compleixen les condicions imposades. Si es pren un criteri molt estricte de cara a que els punts siguin molt coplanaris, es perden la majoria de plans que es troben en plans rugosos, ondulats o corbats. Per

aquests motius es molt important la correcta supervisió de la identificació de les famílies i la seva correcta caracterització en base a criteris geològics.

S'han agafat 29 dels 54 plans identificats de forma automàtica sobre la zona de sortida que es mostren a la Fig. 68, i s'han representat a la projecció estereogràfica que es mostra a la Fig. 69 següent. S'han classificat cada un dels plans obtinguts en funció de la família a la que s'interpreta que corresponen (en diferents colors), així com el pla de falla de grans dimensions del costat oest (en blau turquesa), les superfícies basals de ruptura (en rosat) que també s'identifiquen bé, i un pla que s'ajusta a tots els punts i que caracteritza de forma general el talús trencat. (en groc). A la Fig. 70 es mostra el diagrama de densitat de pols de plans corresponent als plans identificats automàticament.

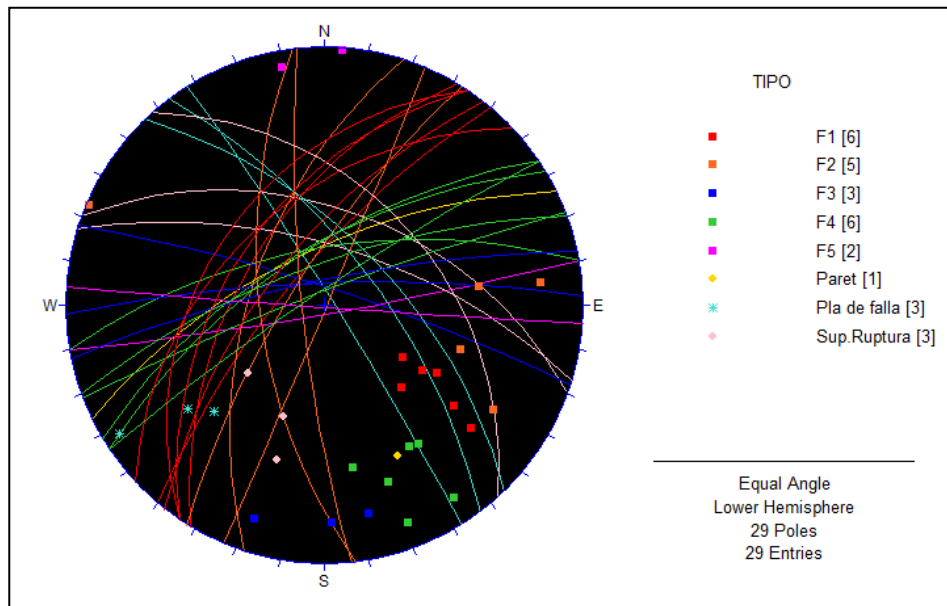


Fig. 69: Representació en projecció estereogràfica dels plans identificats automàticament amb el programa *CloudCompare* sobre el model digital de la zona de sortida de blocs.

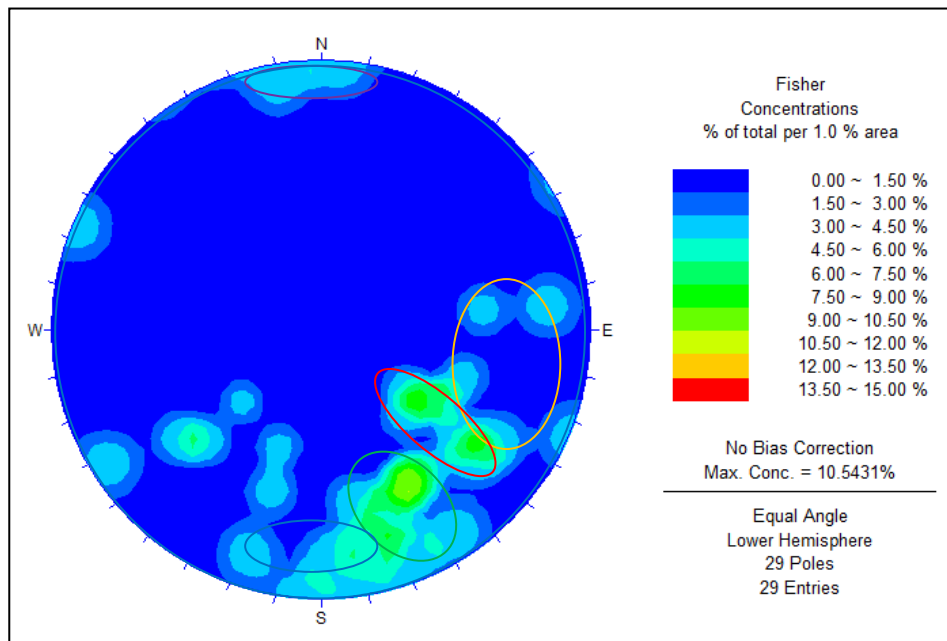


Fig. 70: Diagrama de densitat de pols dels plans identificats automàticament amb el programa *CloudCompare* sobre el model digital de la zona de sortida de blocs.

A la següent Fig. 71 es mostra una representació estereogràfica de només les famílies de discontinuïtats identificades de forma automàtica.

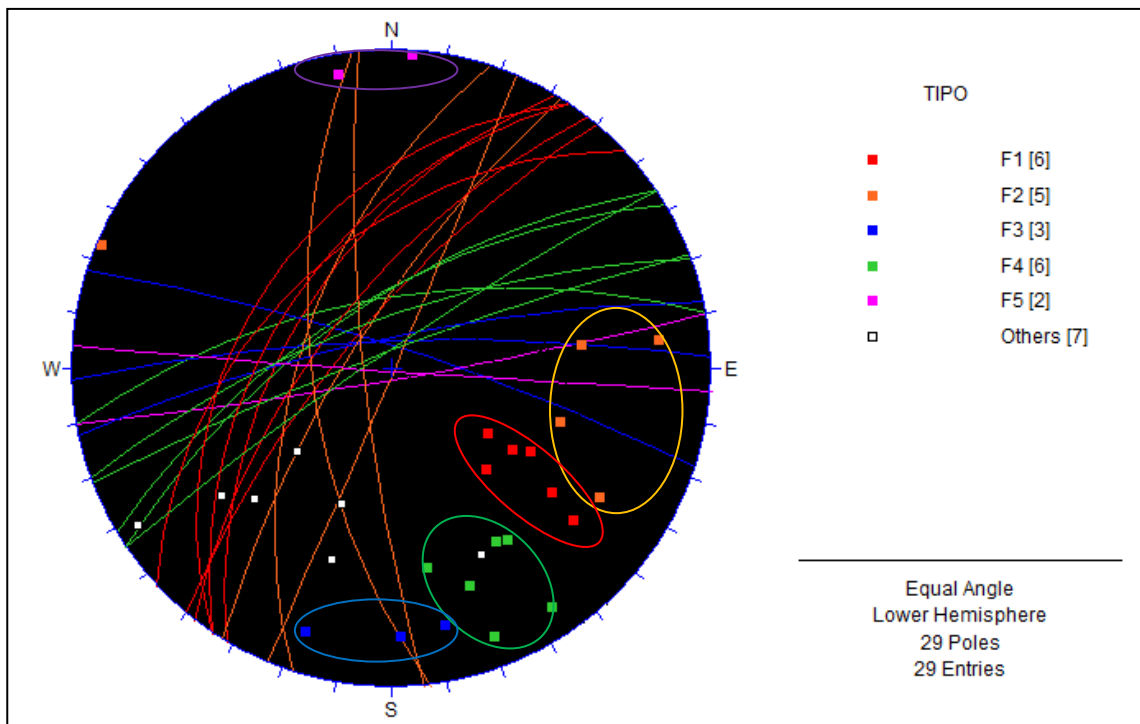


Fig. 71: Representació estereogràfica de les famílies de discontinuïtats identificades de forma automàtica.

El fet de dur a terme el procés de forma automàtica fa que algunes famílies no es detectin o es detectin poc, com el cas de la F2, que es veu sobretot en fotografies però que al no generar esglaons importants a la paret no són fàcilment identificables de forma automàtica, o es poden confondre amb al F1.

Aquestes famílies s'han identificat també de forma completament manual modelant els plans sobre el model digital de la paret rocosa, i s'han mesurat a posteriori per comprovar si els plans generats manualment coincideixen amb els trobats automàticament.

6.2.4 Identificació i modelació manual de les famílies de discontinuïtats

L'objectiu fonamental de la caracterització manual dels plans de discontinuïtats és la utilització d'aquests per tallar un volum de control i poder obtenir una distribució de volums de blocs representativa de la zona de sortida de blocs.

En una primera etapa es va realitzar una caracterització dels plans permeten certa desviació en la seva orientació, i fins i tot es van modelar alguns plans seguint formes corbades. Però al voler utilitzar aquest plans per tallar un volum de control i generar un conjunt de bloc, es va veure que la seva utilització generava molts problemes per realitzar els talls. Així doncs, per facilitar al càlcul al programa i no tenir errors en els càlculs de volum posteriors, s'ha decidit representar cada família de discontinuïtats amb una sol pla que es repeteix a tot arreu on apareix tal família però mantenint la mateixa direcció de capa i cabussament, és a dir, plans paral·lels.

Abans de començar a definir plans, es poden utilitzar algunes funcions d'anàlisi de núvols de punts per observar sobre seua tendències o morfologies, com ho pot ser una mapa de rugositats o un altre d'angle de cabussament.

A la següent Fig. 72 es mostra el model digital de la paret rocosa acolorint els punts en funció de la rugositat del núvol de punts, entès com la no coplanaritat dels punts en funció dels punts del seu entorn més pròxim. Aquesta imatge pot servir per identificar algunes morfologies o juntes que queden ben definides per interseccions de plans que generen vèrtex, que en aquest cas corresponen a punts poc coplanaris. Com a exemple, es remarquen en línies puntejades de color vermell i taronja les famílies F1 i F2 respectivament, ja detectades en el procediment automàtic.

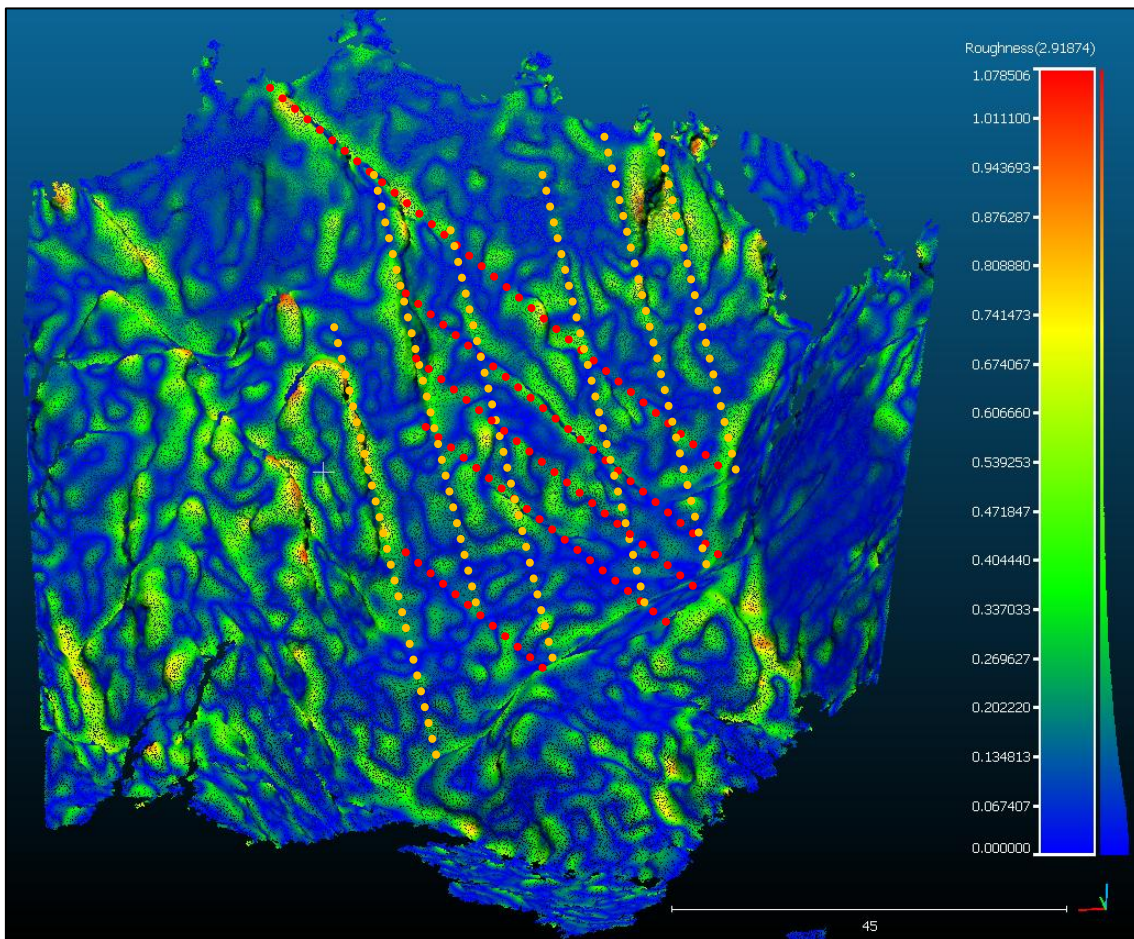


Fig. 72: Model digital de la paret rocosa amb els punts acolorits en funció de la rugositat entesa com la coplanaritat d'un punt en vers els del seu entorn més pròxim. Colors vermells, taronges i grocs menor coplanaritat, verd i finalment blau major coplanaritat.

Una altra funció d'anàlisi de núvols de punts o de malles tridimensionals és l'anàlisi del cabussament. El programa *Rhinoceros* permet identificar quines parts de la malla cabussa més o menys i definir el rang de colors que es volen utilitzar.

Així doncs, a la següent imatge de la Fig. 73 es mostra una vista frontal del model digital de la paret rocosa on es remarca cada zona en funció del cabussament de la superfície entre 90° i 45°.

Les zones que s'han marcat en blau corresponen a aquells plans molt verticalitzats que han actuat com a superfícies de tracció en el desprendiment. De color verd es poden trobar tots aquells plans de cabussament entre els 65° i els 55°.

En vermell s'identifiquen els plans propers als 45° de cabussament, i que s'associen a les superfícies de ruptura basal.

No es poden identificar zones amb cabussaments inferiors als 45° degut a la posició des d'on es van obtenir les imatges amb les que s'ha generat el model, de manera que els plans de menys de 45° de cabussament s'associen a les zones d'ombra o d'oclusió.

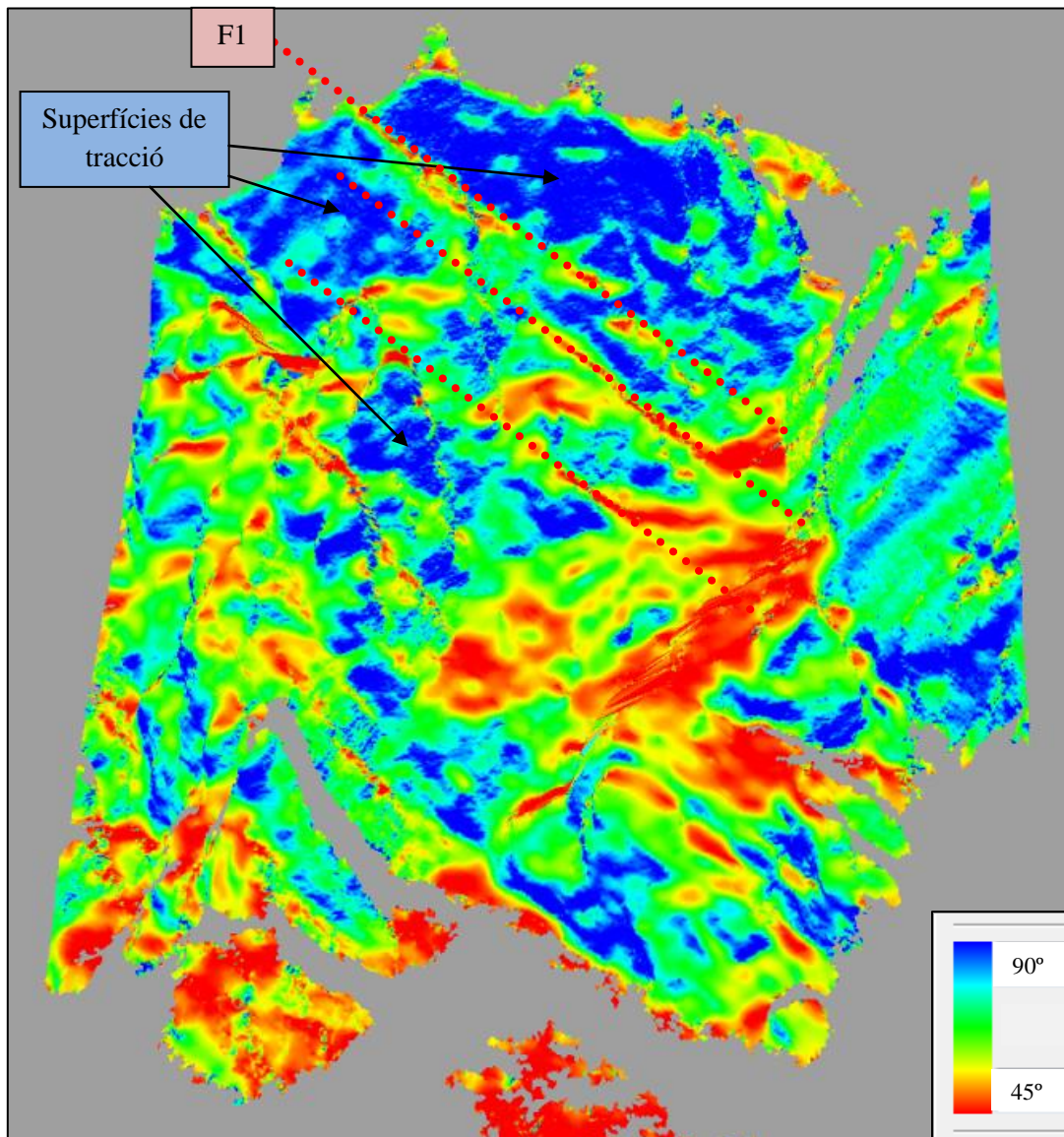


Fig. 73: Vista frontal del model digital de la paret rocosa identificant en diferents colors el cabussament de la superfície entre 45° i 90°.

Per a ajustar un pla es seleccionen un conjunt de punts i es demana al programa que ajusti un pla a aquell conjunt de punts. Després d'analitzar cada una de les famílies s'ha representat cada una d'aquestes per un únic pla amb la mateixa orientació i cabussament com s'ha citat abans per reduir problemes en el càlcul posterior de volums de blocs, ja que el fet de que plans d'una mateixa família arribin a intersecar comporta errors en el càlcul posterior de volum.

A la següent Fig. 74 es mostren els plans de la família F1 i F2 que s'han identificat i col·locat sobre el model digital de la paret rocosa. Per facilitar el càlcul posterior de volum s'ha fet una hipòtesis molt rellevant, que és la de considerar la persistència de les juntes infinita.

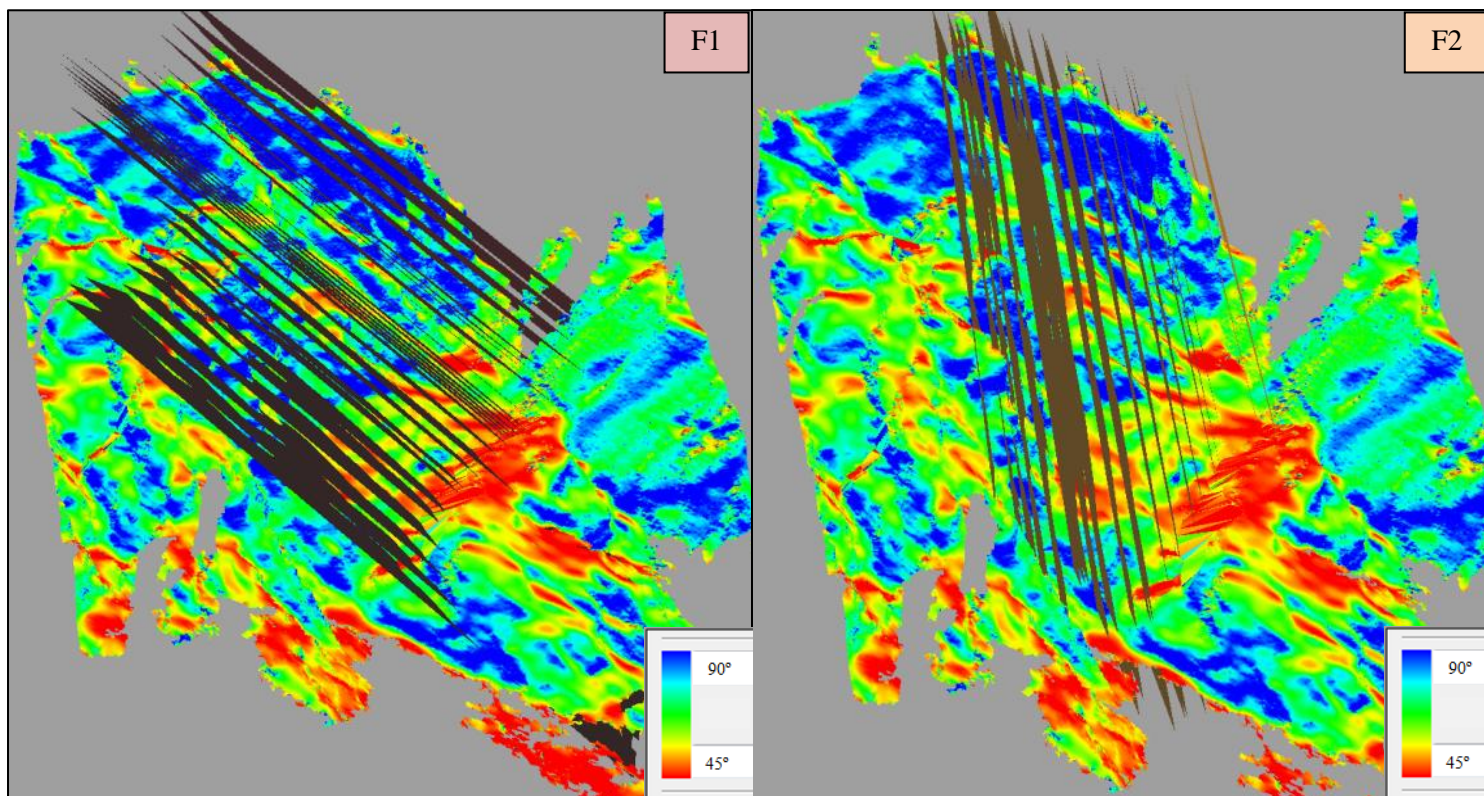


Fig. 74: Model digital de la paret rocosa en colors en funció de l'angle de cabussament amb les famílies identificades i modelades manualment: Família F1 (imatge esquerra); Família F2 (imatge dreta).

Cal dir que és difícil observar en imatges extretes del programa aquells ajustos que treballant sobre l'objecte en 3D es veuen clarament, com és l'ajust d'un pla a una regió del model digital.

El fet de treballar sobre la paret en un model digital identificant les discontinuïtats és una millora molt important en el camp de la seguretat, ja que no es corre absolutament cap risc i es pot treballar tantes hores com sigui necessari.

Aquest fet ha permès identificar més de 150 juntes, tot i que finalment s'han utilitzat 103 juntes per generar la distribució de volums de blocs de la paret rocosa.

A la següent imatge de la Fig. 75 es mostra la intersecció de les famílies F1 i F2:

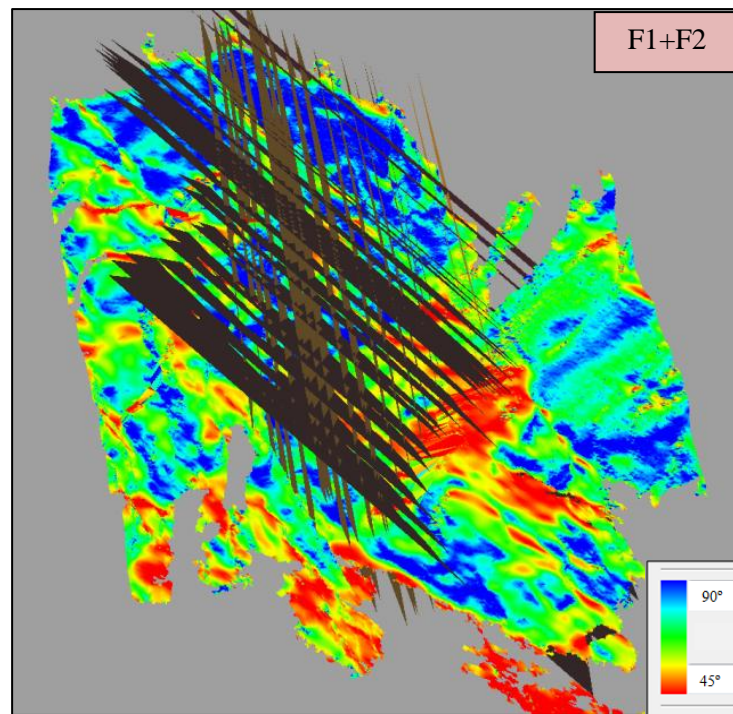


Fig. 75: Vista frontal del model digital de la paret rocosa amb les famílies F1 i F2, on es pot observar la tipologia cònica dels blocs que forma la intersecció d'aquestes dues famílies.

A la següent Fig. 76 es mostra una vista zenital del model digital de la paret, d'es don s'observen els plans de ruptura basal i s'identifiquen molt bé les famílies verticals F3 i F5.

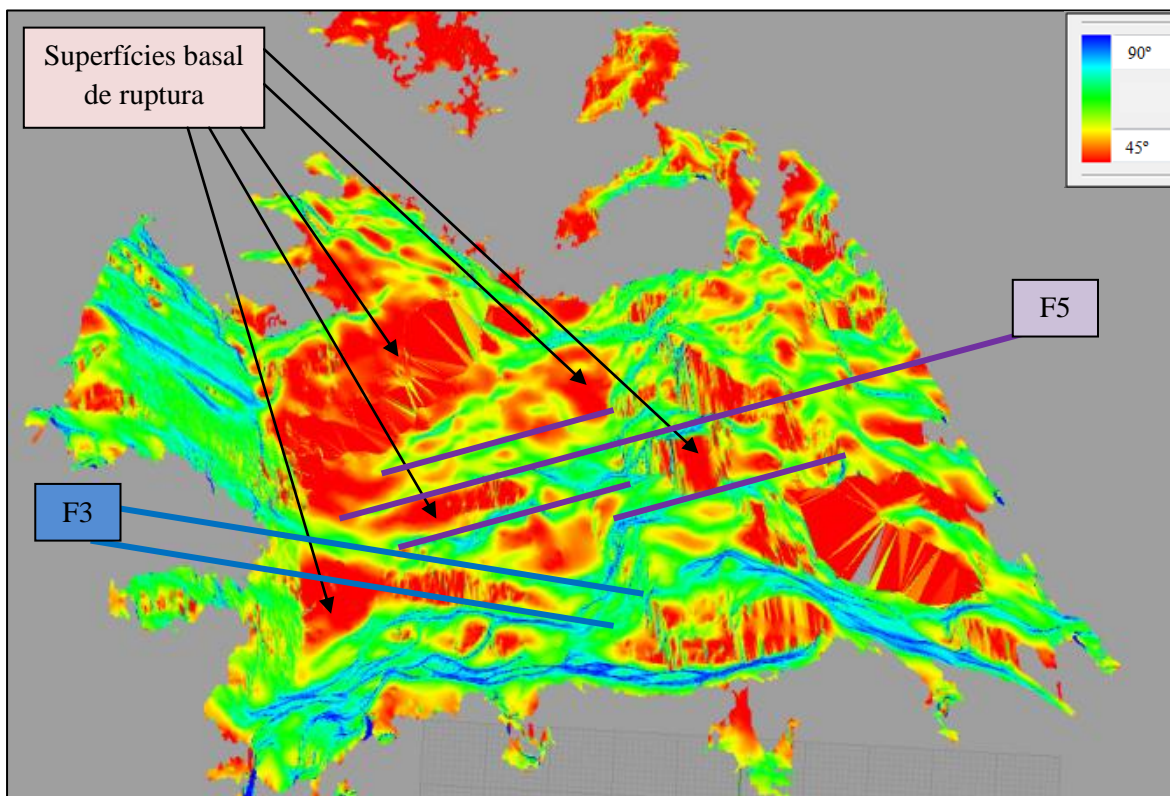


Fig. 76: Vista zenital del model digital de la paret rocosa on s'identifiquen bé les famílies F3 i F5.

A la següent Fig. 77 es mostren les famílies F3 i F5 que s'identifiquen bé des d'una vista zenital, i a la Fig. 78 es mostra la família F4 que s'apropa molt al pendent natural de la paret rocosa.

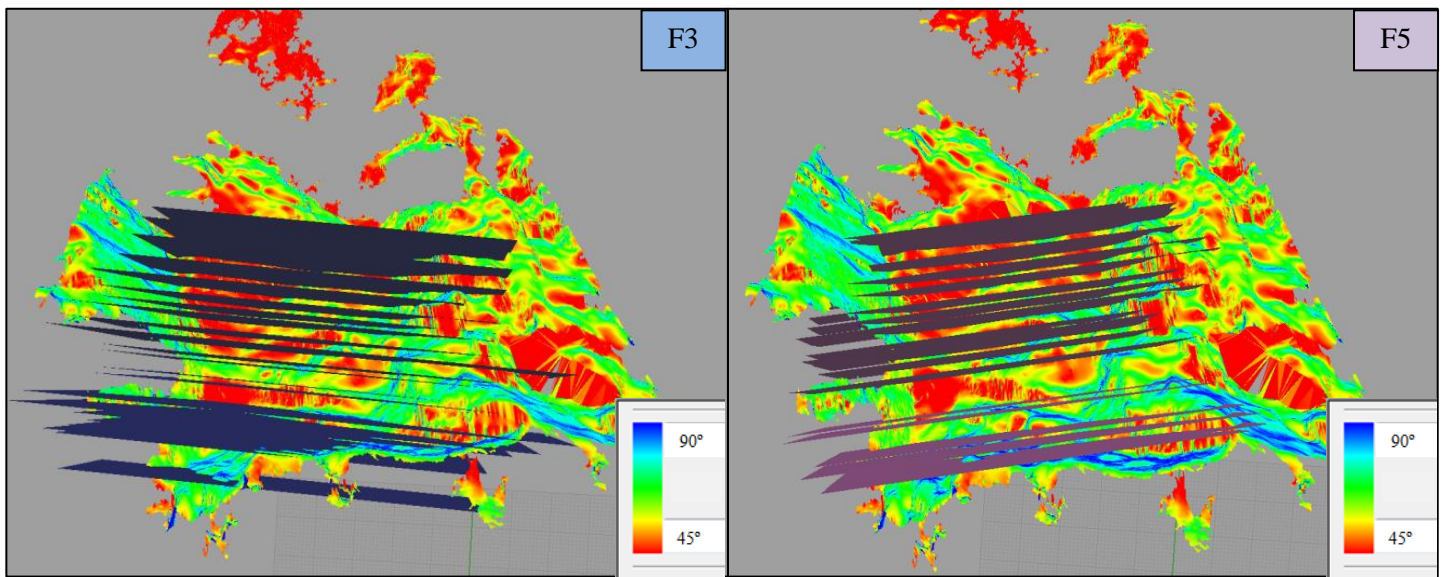


Fig. 77: Vista zenital del model digital de la paret rocosa amb les famílies F3 (imatge esquerra) i F5 (imatge dreta).

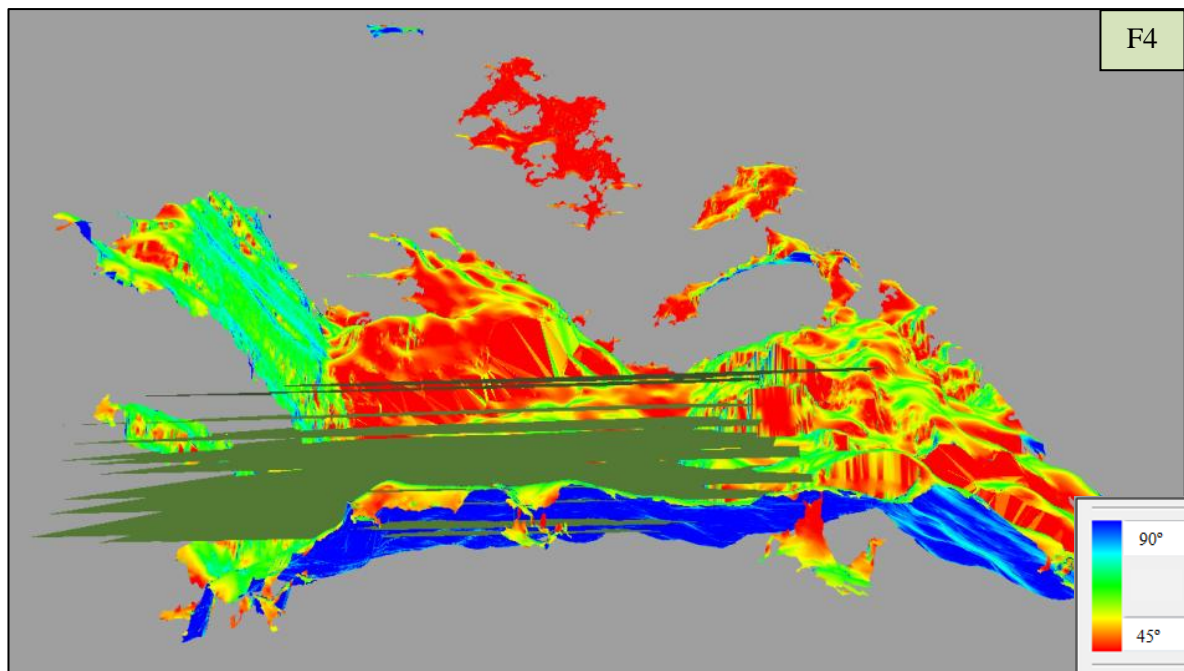


Fig. 78: Vista zenital del model digital de la paret rocosa amb la família F4 identificada i modelada.

Es poden identificar més famílies però s'ha considerat suficient utilitzar les 5 famílies més representatives amb les quals es pot generar la morfologia que s'observa a la paret després del desprendiment, és a dir, la majoria de formes que s'observen es poden generar com a combinació de les famílies identificades i modelades.

A la Fig. 79 es mostren les famílies modelades que s'utilitzaran per tallar un volum de control i generar una distribució de volums de blocs representativa de la paret rocosa. A la imatge esquerra es mostra una vista frontal de les juntes modelades, i a la imatge dreta s'observa el mateix conjunt de juntes sobre la paret rocosa però des d'una vista zenital.

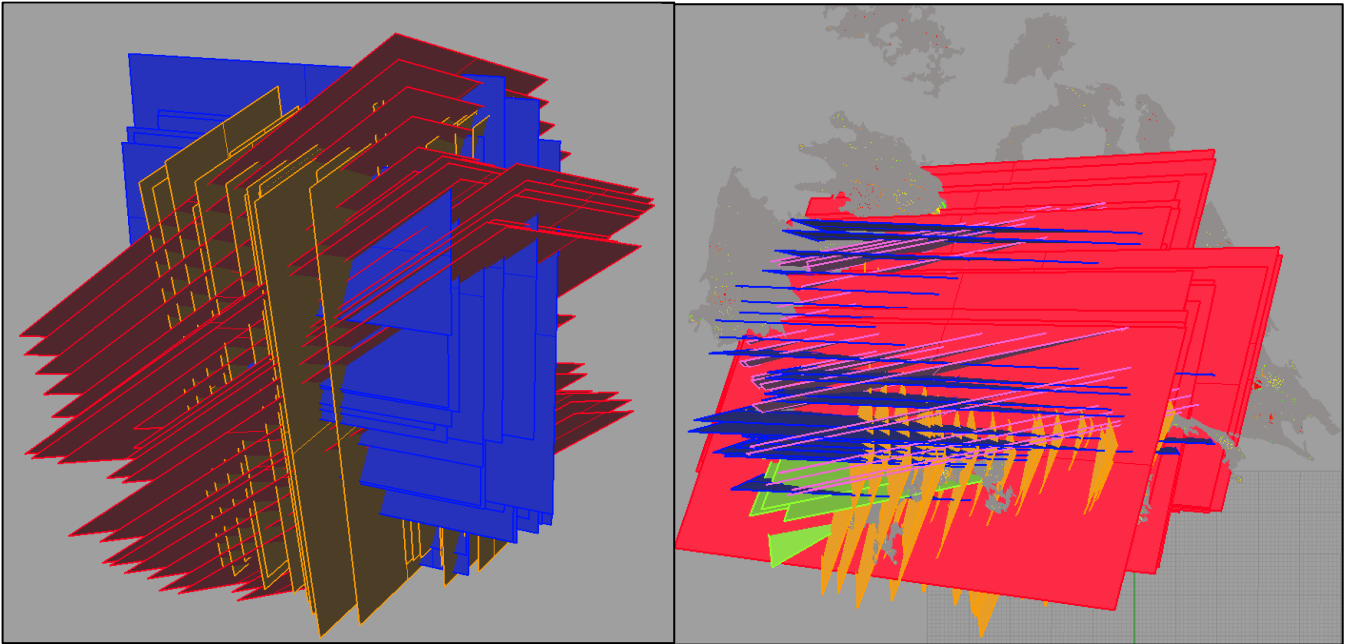


Fig. 79: Vista frontal de la paret rocosa amb les juntes modelades (imatge esquerra) i vista zenital (imatge dreta).

Les 5 famílies identificades i modelades sobre la paret s'han representat a la projecció estereogràfica a la Fig. 80, coincidint amb les de la Fig.71 obtingudes amb un procés automàtic.

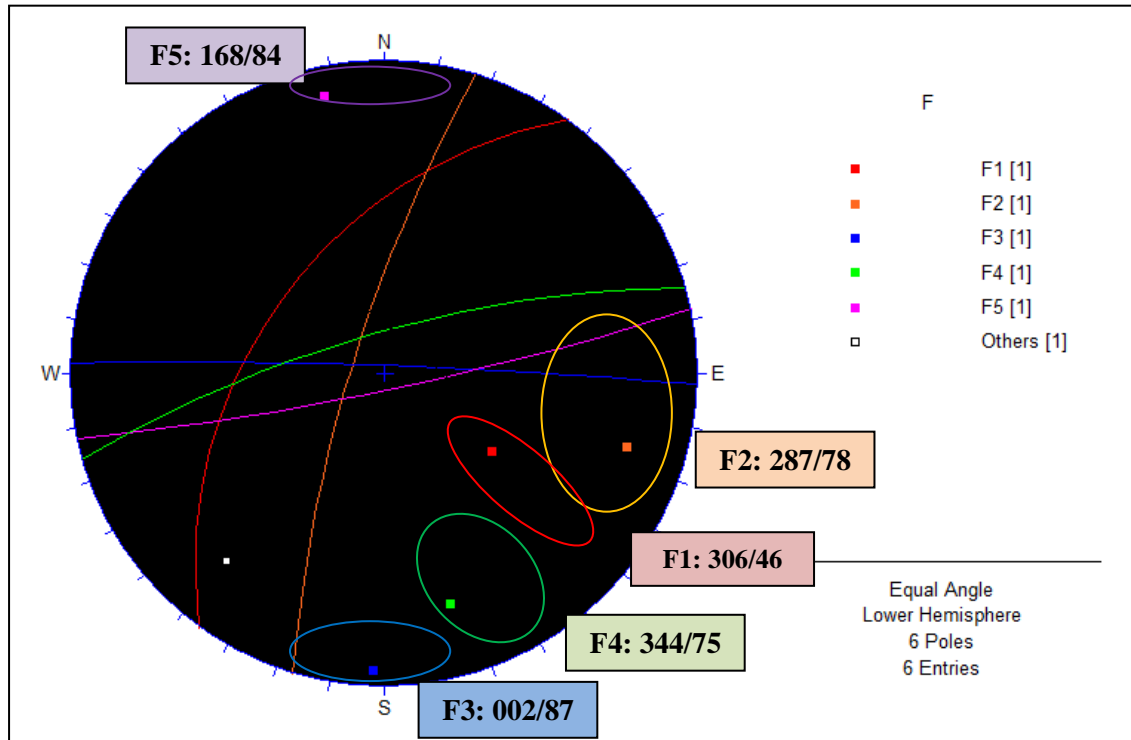


Fig. 80: Representació estereogràfica de les 5 famílies identificades i modelades sobre la paret rocosa.

També s'han mesurat els espaiats de cada una de les famílies sobre un pla perpendicular a aquestes com es mostra a la Fig. 81.

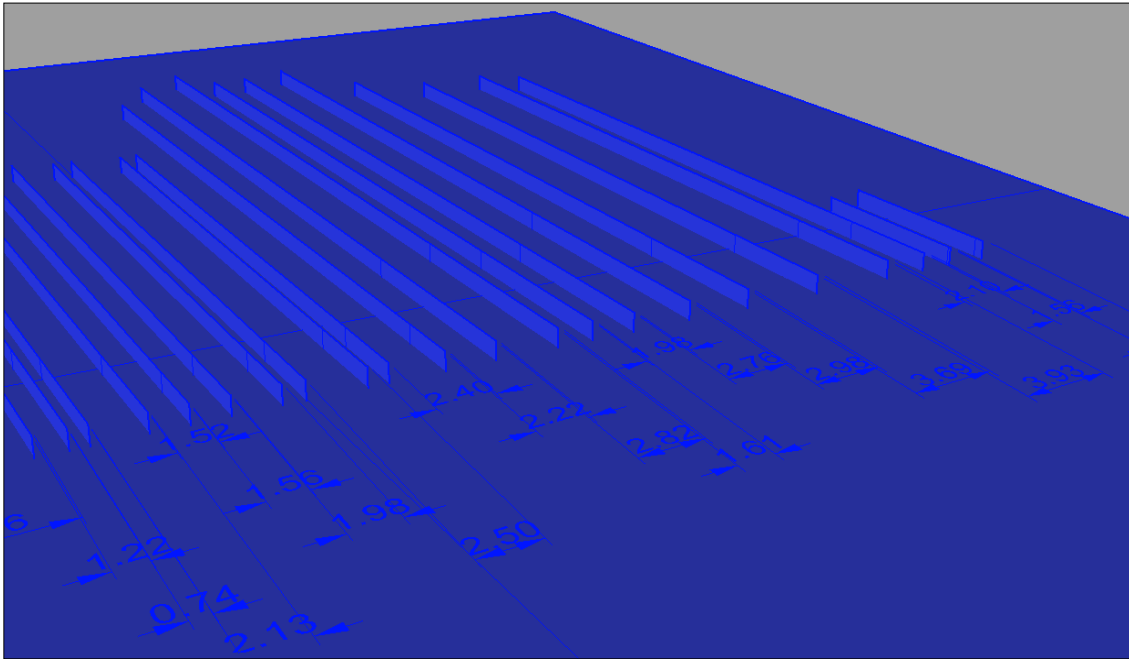


Fig. 81: Imatge extreta del programa *Rhinoceros* en el procediment per mesurar espaiats de les discontinuïtats modelades de la família F3 en aquest cas.

A la Fig. 82 es representen els espaiats mesurats de cada una de les famílies, on es pot observar que els espaiats obtinguts estan dins d'un rang entre els 23 cm i els 4 o 6 m.

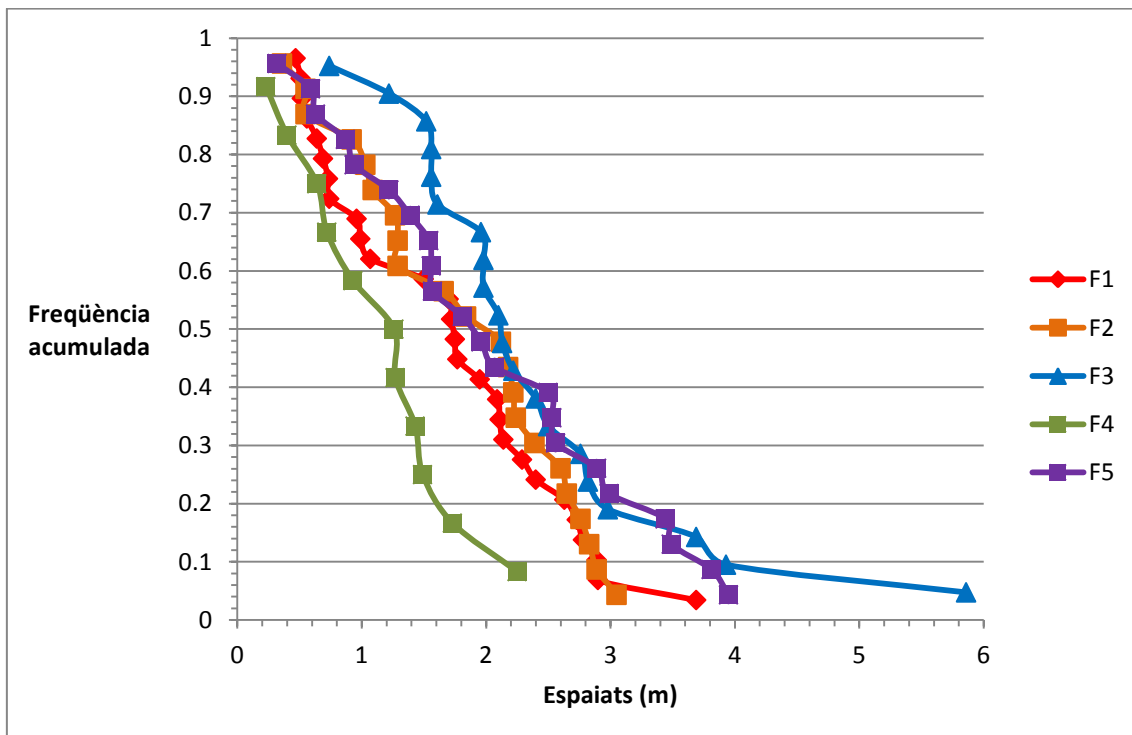


Fig. 82: Representació dels espaiats mesurats de cada una de les famílies identificades i modelades.

A les següents Taules 5 i 6 es resumeixen les dades referents als espaiats en metres mesurats de cada una de les famílies modelades sobre la paret rocosa, amb un total de **103 juntes modelades**.

F1 (306/46) Espaiats (m)	F2 (287/78) Espaiats (m)	F3 (002/87) Espaiats (m)	F4 (344/75) Espaiats (m)	F5 (168/84) Espaiats (m)
2.73	2.39	5.86	0.93	0.63
2.9	2.6	1.22	0.23	1.57
2.89	3.05	0.74	1.73	1.39
3.69	1.29	2.13	1.27	3.81
1.07	0.92	1.52	1.43	0.94
0.73	2.65	1.56	0.72	2.5
1.77	1.66	1.98	0.4	3.49
0.96	2.89	2.5	1.26	2.53
0.52	2.22	2.4	1.49	1.96
2.11	2.83	2.22	2.25	0.59
1.72	0.36	2.82	0.64	1.56
0.64	2.12	1.61		2.99
0.74	2.76	1.98		0.32
0.56	1.29	2.76		1.81
0.51	1.27	2.98		2.07
0.47	0.55	3.69		3.44
0.69	0.55	3.93		2.56
2.09	2.178	2.1		2.89
2.14	1.84	1.56		3.95
1.95	1.09	1.96		0.87
2.63	1.03			1.54
0.99	2.24			1.22
2.78				
1.5				
2.29				
2.4				
1.75				
1.7				

Taula. 5: Espaiats mesurats sobre cada una de les famílies modelades en el model digital de la paret rocosa.

F1	F2	F3	F4	F5
Mitjana 1.67571429	Mitjana 1.80809091	Mitjana 2.376	Mitjana 1.12272727	Mitjana 2.02863636
Mínim 0.47	Mínim 0.36	Mínim 0.74	Mínim 0.23	Mínim 0.32
Màxim 3.69	Màxim 3.05	Màxim 5.86	Màxim 2.25	Màxim 3.95
Sumatori 46.92	Sumatori 39.778	Sumatori 47.52	Sumatori 12.35	Sumatori 44.63
nº total 28	nº total 22	nº total 20	nº total 11	nº total 22

Taula. 6: Resum de les mesures d'espaiats de les famílies de discontinuïtats identificades i modelades.

Cal remarcar que l'espaiat mínim que s'ha pogut identificar és de 23 cm, ja que per una banda s'han seleccionat aquelles juntes més persistents i importants, i per altra banda cal tenir en compte que s'està treballant sobre un model digital obtingut a partir de fotografies preses des de més de 400 metres de distància. Si es poguessin obtenir imatges des de molt més a prop mitjançant un vehicle aeri no tripulat, es podria obtenir un model digital més detallat i un major precisió a l'hora de caracteritzar discontinuïtats sobre la paret rocosa.

6.2.5 Estimació del volum del desprendiment i tall del volum de control.

Per dur a terme l'estimació del volum del desprendiment seria ideal tenir un model digital de la paret rocosa abans i després del desprendiment, de manera que es podrien comparar els dos models i restar-los per obtenir el volum faltant. En aquest cas no es disposa de imatges de suficient qualitat d'abans del desprendiment, de manera que s'ha utilitzat la cartografia topogràfica a escala 1:5000 de l'Institut Cartogràfic de Catalunya.

Fent coincidir la topografia de la zona de sortida amb el model digital, fet que ja es tenia del procés d'escalat i georreferenciació del model obtingut amb tècniques fotogramètriques, es pot identificar la zona d'on s'ha després la major part del material. Però cal tenir clar que s'estan comparant dues superfícies generades amb tècniques molt diferents i de precisions molt diferents, i es que la topografia a escala 1:5000 no té suficient detall per poder ser comparada directament amb el model generat de la paret rocosa. Tot i això s'ha fet l'exercici d'utilitzar la topografia a escala 1:5000 com a superfície que delimita el volum després, juntament amb el model digital de la paret rocosa, delimitant així el volum afectat en el desprendiment d'estudi.

Com era d'esperar, el resultat és un volum sobreestimat, ja que la topografia 1:5000 és com una manta sobre un grup d'elements punxeguts com ho és la morfologia de la paret amb un dentat de roques que han anat caient i modificant el perfil del vessant.

El resultat és un volum sobreestimat de 25.000 m³ que es pot observar a la següent Fig. 83. La morfologia d'aquest volum és molt realista per la superfície que delimita per sota el volum, ja que és el model digital de la paret rocosa, i en canvi ho és molt menys per la superfície que el delimita per davant, que és la topografia a escala 1:5000.

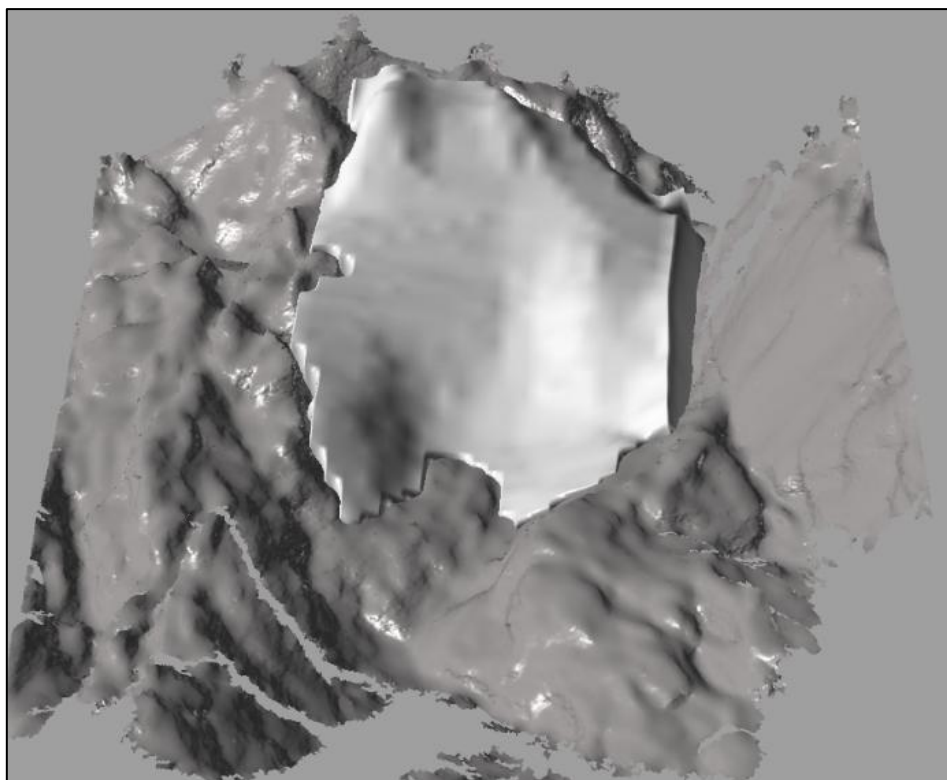


Fig. 83: Volum del desprendiment estimat amb el model digital de la paret i la cartografia topogràfica a escala 1:5000.

Per altra banda, al intentar realitzar el tall d'aquest volum generat amb les famílies de discontinuïtats modelades, els ordinadors utilitzats no han sigut capaços de generar el nombre i la forma dels blocs que tocaria. El problema sorgeix de que la intersecció de la morfologia molt detallada del volum genera una gran quantitat de vèrtex i d'arestes que cal multiplicar per tots els blocs que es generen al tallar el volum amb les juntes de les famílies identificades. Aquests nombres corresponent a uns 100.000 blocs amb més de 2 milions d'arestes que al ser irregulars col·lapsen els ordinadors que s'estan utilitzant per realitzar la present tesina. A la Fig. 84 es mostra el procés de tall del volum fallit i a la Fig. 85 es mostra el volum de control tallat fins on els diferents ordinadors utilitzats ho han permès (IntelCore i7-2673M a 1,7GHz, 6GB de RAM).

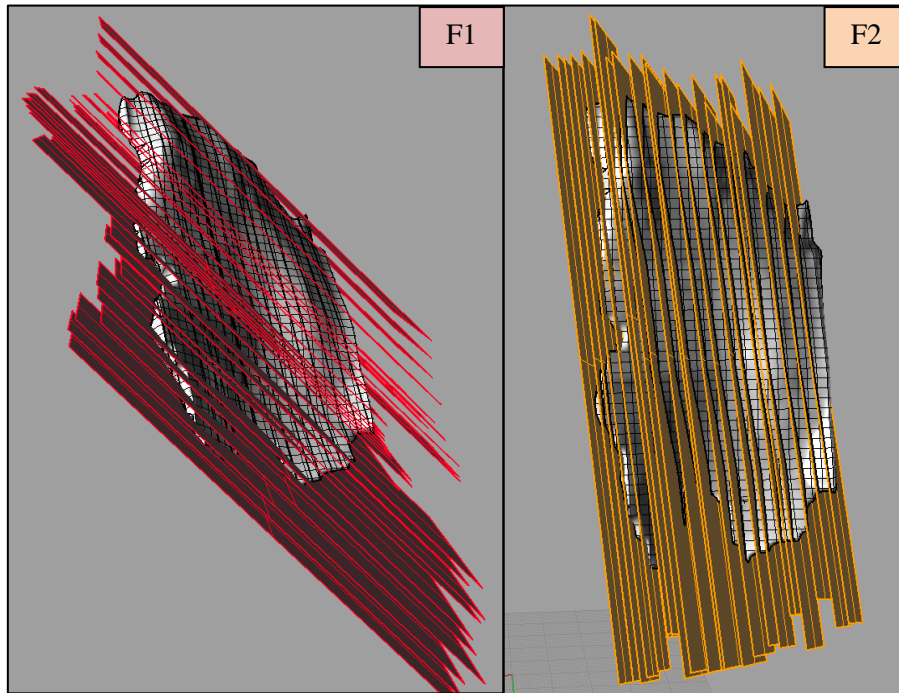


Fig. 84: Procediment fallit de tall del volum de control amb les famílies F1 i F2.

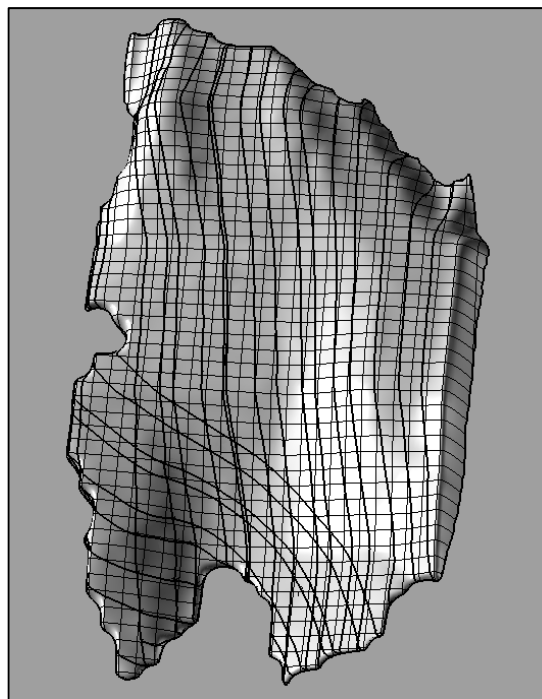


Fig. 85: Estat final aconseguit en reiterades ocasions en el tall del volum de control generat amb la topografia.

Però aquí no va quedar truncat el treball. **S'ha decidit utilitzar un volum de control amb una morfologia més regular per facilitar la generació d'una gran quantitat de blocs mitjançant les famílies modelades.**

En aquest sentit, com que el volum estimat a partir de les mesures de blocs a la zona del dipòsit és del voltant dels 10.000 m^3 , s'ha decidit utilitzar un volum de control amb una forma de prisma rectangular col·locat a la zona de sortida de 10.000 m^3 (Fig. 86) per generar un mostreig de com serien els blocs en una massa col·locada en el mateix lloc d'on s'han després els blocs del desprendiment d'estudi, amb la idea que l'important és la distribució de volums de blocs i que aquesta es pot obtenir a partir de la intersecció de les famílies de discontinuïtats modelades a la zona de sortida.

Tot i que en un cas ideal, caldria tenir un model digital de la paret rocosa abans i després del desprendiment, i tenir així molt ben quantificat el volum després, s'ha considerat adient obtenir la distribució de volums de blocs a partir del mostreig en base a un prisma rectangular col·locat a la zona de sortida de blocs, que es tallarà amb les 103 juntes modelades per obtenir IBSD.



Fig. 86: Vista frontal del model digital de la paret amb el volum de control de 10.000 m^3 utilitzat per obtenir la IBSD.

Així doncs, sobre aquest segon volum de control si que s'ha pogut dur a terme el tall d'aquest amb les 103 juntes modelades de les 5 famílies de discontinuïtats diferents identificades. Tot i passar a un volum de control de formes regulars, els ordinadors utilitzats no podien realitzar la tasca, que s'ha subdividit en 8 etapes diferents.

Així doncs s'ha fet un primer tallat del volum de control utilitzant juntes de la F3 per no modificar els volums generats dins del propi volum de control. S'han generat així 8 grans blocs que han servit per ser tallats a posteriori per les 5 famílies com es mostra a la Fig. 87. Una vegada realitzat el tall dels 8 fragments del volum de control es tallen tots els volums generats.

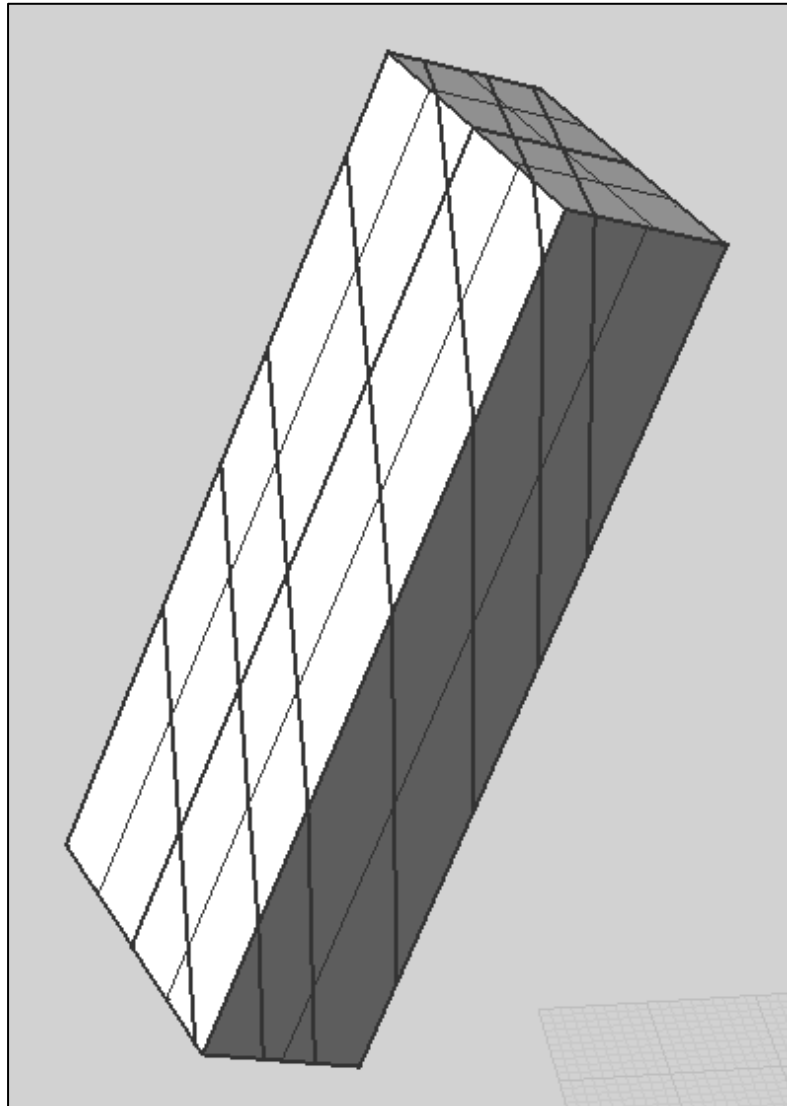


Fig. 87: Volum de control utilitzada per a l'obtenció de la IBSD a partir del tallat d'aquest amb les 103 juntes identificades i modelades sobre el model digital de la paret rocosa (imatge esquerra).

A la imatge de la Fig. 88 es poden observar les juntes utilitzades per tallar el volum de control seleccionades només dins d'aquest, de manera que es poden observar el forats que omplen els blocs generats amb aquest procediment. A la Fig. 89 es pot observar un augment de la mateixa imatge on es pot veure millor com queden delimitats els blocs per les juntes al tallar el volum de control.

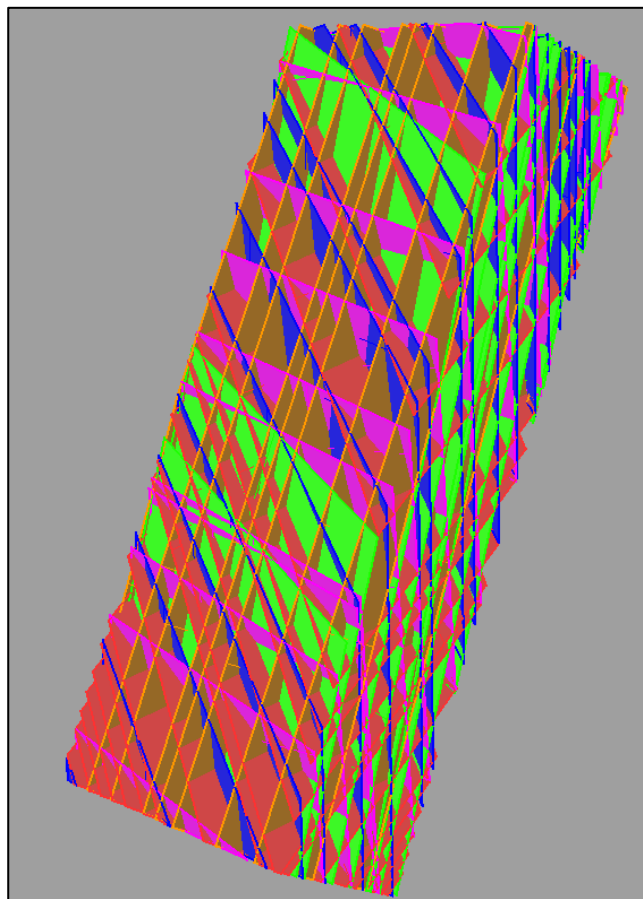


Fig. 88: Juntes que tallen el volum de control delimitades dins seu.

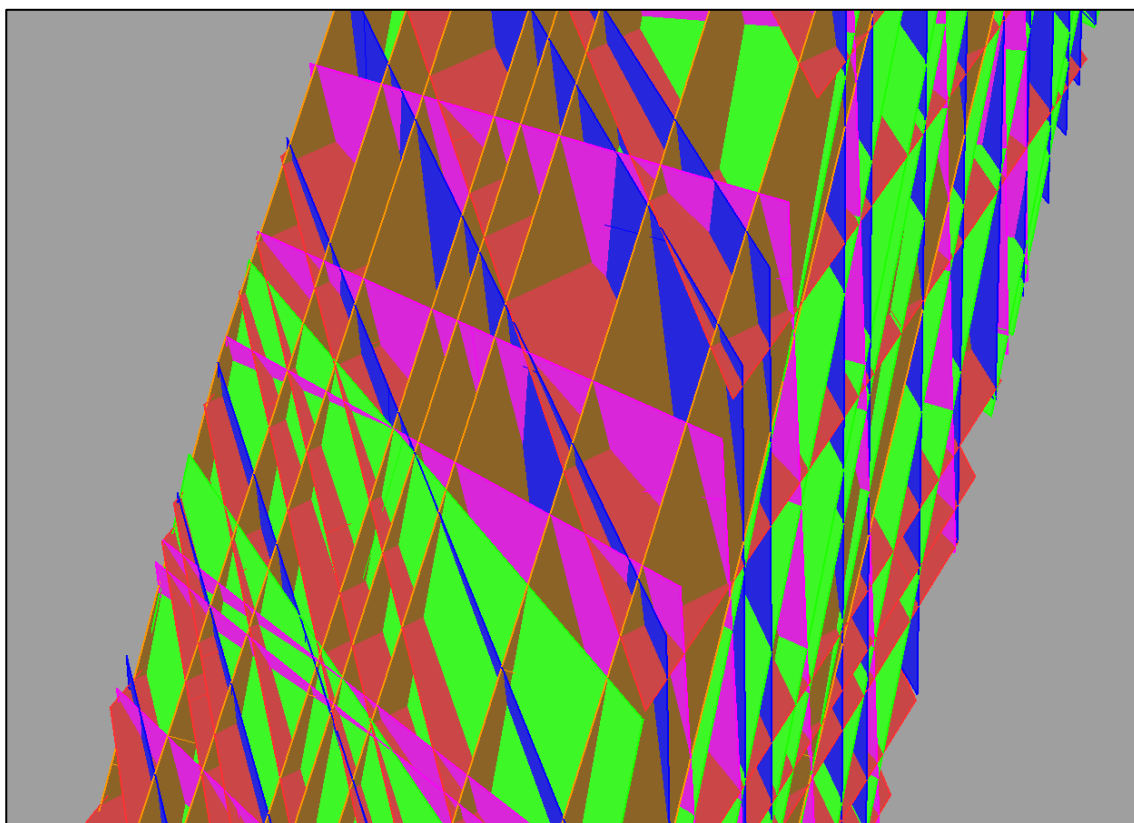


Fig. 89: Ampliació de les juntes que tallen el volum de control a la seva part central.

7. Resultats

En el següent capítol 7 es mostraran els resultats obtinguts amb cada una de les metodologies utilitzades per obtenir distribucions de volums de blocs. Els primers tres apartats es centraran en les dades referents a la PBSB, ja que s'han mesurat blocs puntuals per una banda i s'han mostrejat parcel·les representatives de la tartera per l'altra. Finalment farà falta aglutinar tota aquesta informació en una única distribució de volums de blocs, s'analitzarà el possible truncament d'aquesta.

Per altra banda, el cinquè punt es centrarà en les dades obtingudes mitjançant les simulacions que s'han realitzat a partir del model digital de la paret rocosa i de la identificació i caracterització de les discontinuïtats amb les que s'ha simulat la IBSD.

Finalment es compararan les dues distribucions de volums de blocs, PBSB i IBSD amb els que es podrà quantificar la fragmentació produïda durant la caiguda de blocs. També s'introduiran els conceptes bàsics per a la caracterització de les distribucions obtingudes mitjançant lleis potencials.

7.1 Distribució de volums de blocs obtinguda dels Blocs Puntuals mesurats

Com ja s'ha explicat en el capítol 6. Treball realitzat, s'han mesurat un total de 275 blocs puntuals, que són aquells que han arribat més enllà de la tartera o han quedat atrapats al canal o es troben dins de la tartera però tenen unes dimensions molt majors que els blocs del seu entorn més pròxim. A la següent Fig. 90 s'ha representat un histograma per classes dels volums de blocs puntuals mesurats i el percentatge acumulat, on es pot observar un conjunt bimodal amb dues famílies de blocs, una al voltant dels 0.1 m^3 i una altra al voltant dels 2 m^3 .

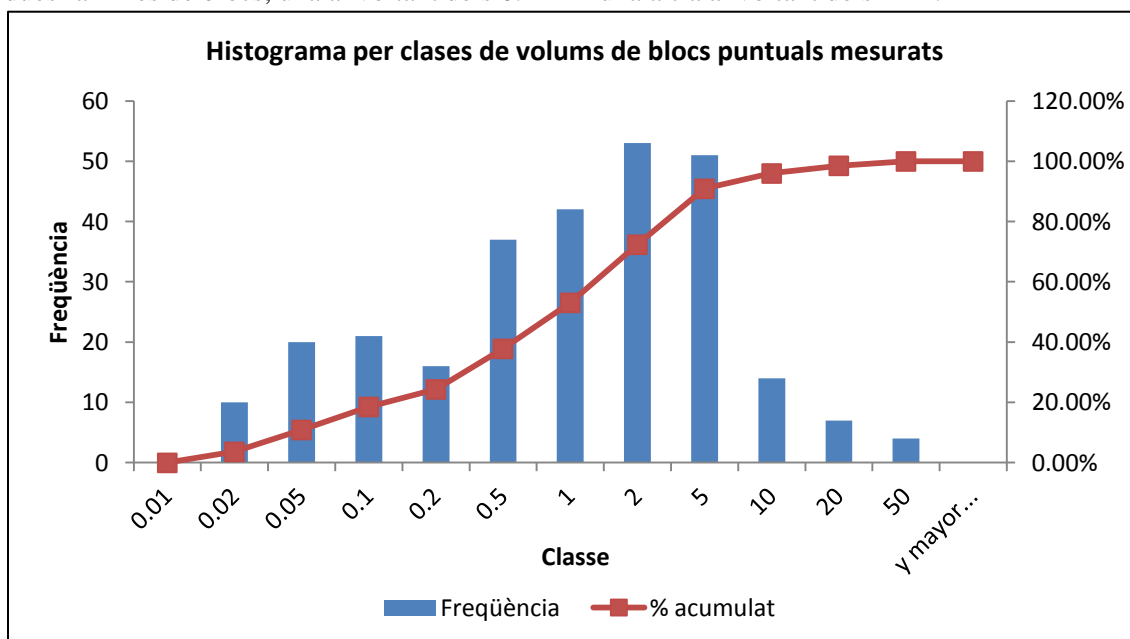


Fig. 90: Histograma per classes dels volums de blocs puntuals (BP) mesurats.

El volum mínim de bloc mesurat és de 0.01 m³, mentre que el bloc de volum màxim mesurat és de 41,3 m³, passant així per 4 ordres de magnitud diferents. Altres dades referents a l'anàlisi d'estadística descriptiva es mostren a la Taula 7, d'on cal destacar al desviació estàndard de 4.5, la mitja de 2.15 i la mitjana de 0.882.

Dades estadístiques dels blocs puntuals	
Mitja	2.151277375
Error típic	0.271962362
Mitjana	0.882
Moda	0.16
Desviació estàndard	4.509985557
Variança de la mostra	20.33996973
Curtosis	34.74013513
Coefficient d'asimetria	5.324941288
Rang	41.33308
Mínim	0.01092
Màxim	41.344
Suma	591.601278
Total	275

Taula. 7: Dades estadístiques dels volums dels blocs puntuals mesurats.

Si es representen les magnituds, volums en m³, segons les classes definides, i les freqüències acumulades associades a cada una d'aquestes, les dues en escala logarítmica, es pot obtenir directament la distribució de volums de blocs puntuals com es mostra a la següent Fig. 91.

Com s'observa a la distribució obtinguda, la mostra no segueix una llei potencial, ja que a partir del 1 m³ el pendent augmenta fortament, de manera que s'han ajustat dues lleis potencials, una per cada tendència.

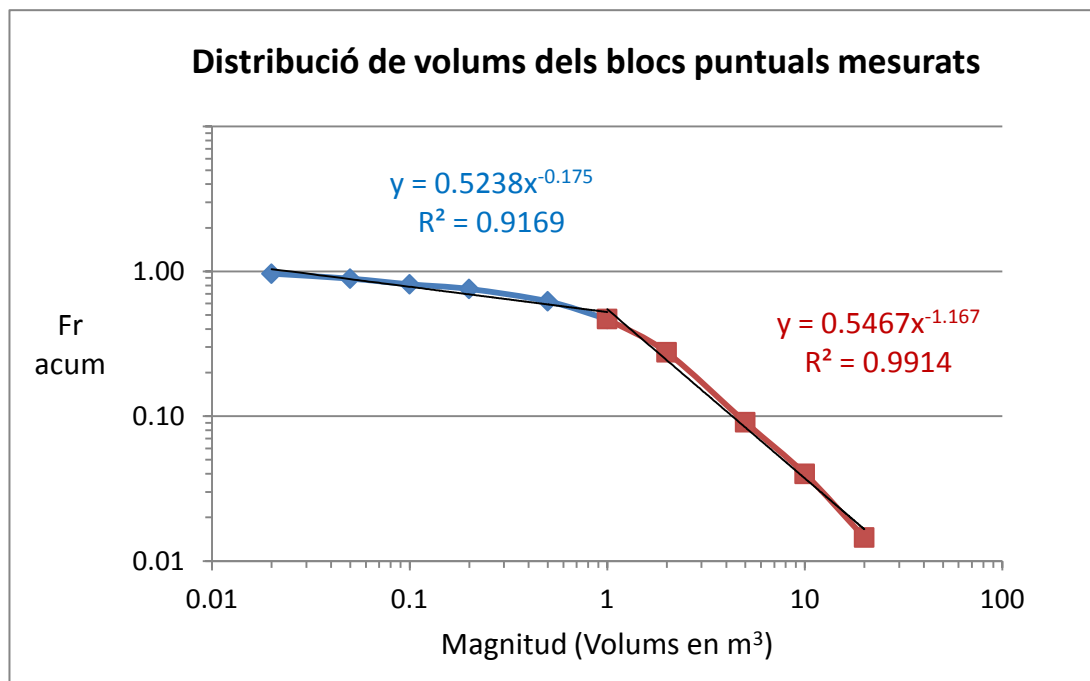


Fig. 91: Distribució de volums dels blocs puntuals mesurats.

Es plantegen dues explicacions a aquest comportament que es discutiran més endavant, però que fan referència a: a) que falti mesurar un gran nombre de blocs de la fracció fina, que seria lògic ja que els blocs puntuals per definició eren blocs de dimensions importants, i **cal tenir present que per sota de cert volum el mostreig és incomplet**, o bé b) que es tracti d'una distribució potencial truncada per un volum màxim o una distribució exponencial, fenomen que es treballarà també més endavant una vegada mostrades totes les distribucions obtingudes.

Per altra banda també es poden representar les dades sense classificar-les en classes com s'ha fet a la Fig.91 anterior, de manera que es poden observar tots els blocs mesurats directament, com es mostra a la Fig. 92, on es remarquen en colors diferents la zona de pendent suau i la zona de pendent fort, que queden bastant ben delimitades pel volum d'un metre cúbic. Prescindir de classificar els volums de blocs modifica lleument els ajustos de les lleis potencials proposades a la Fig. 91, però aquests ajustos són més realistes ja que no es veuen afectats per les classes predefinides.

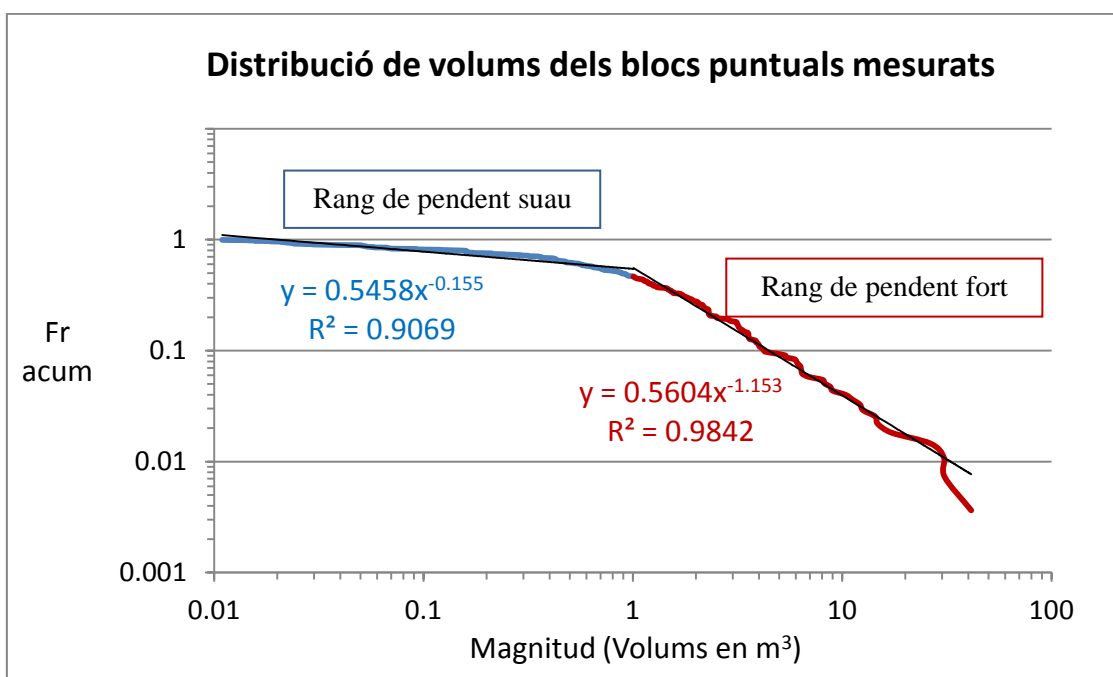


Fig. 92: Distribució de volums dels blocs puntuals sense classificar per classes.

Cal tenir en compte que aquesta mostra de blocs s'ha realitzat per completar les dades referents a la distribució de volums de blocs de la tartera.

Cal dir que els blocs que han sigut considerats blocs puntuals són aquells que han arribat més lluny i que segurament s'han fragmentat menys, o si més no, la dissipació d'energia ha sigut menor que la de la resta de blocs, ja que no s'han quedat per la tartera fragmentats com la resta de blocs.

De fet aquests blocs han seguit vessant avall arribant més lluny, fet que permet considerar que han sofert una menor pèrdua energètica en els impactes que podrien haver causat la seva fragmentació. El fenomen de la fragmentació pot comportar una dissipació d'energia major i un abast de la trajectòria menor degut a la menor massa de cada bloc resultant.

7.2 Distribució de volums de blocs obtinguda dels Sampling Plots

S'han mesurat més de 1200 blocs en 6 parcel·les de mostreig, cada una de les quals se n'ha obtingut una distribució de volums de blocs. Amb les dades en brut directament, i representant els volums mesurats a cada sampling plot, es pot afirmar que en totes les parcel·les s'han obtingut distribucions de volums de blocs que s'ajusten molt bé a distribucions potencials. En forma de resum, i abans d'entrar en detalls sobre cada parcel·la, a la Fig. 93 es mostren les distribucions obtingudes a cada sampling plot, on s'observa la bona correlació amb distribucions potencials, així com un resum estadístic de cada parcel·la a la Taula 8.

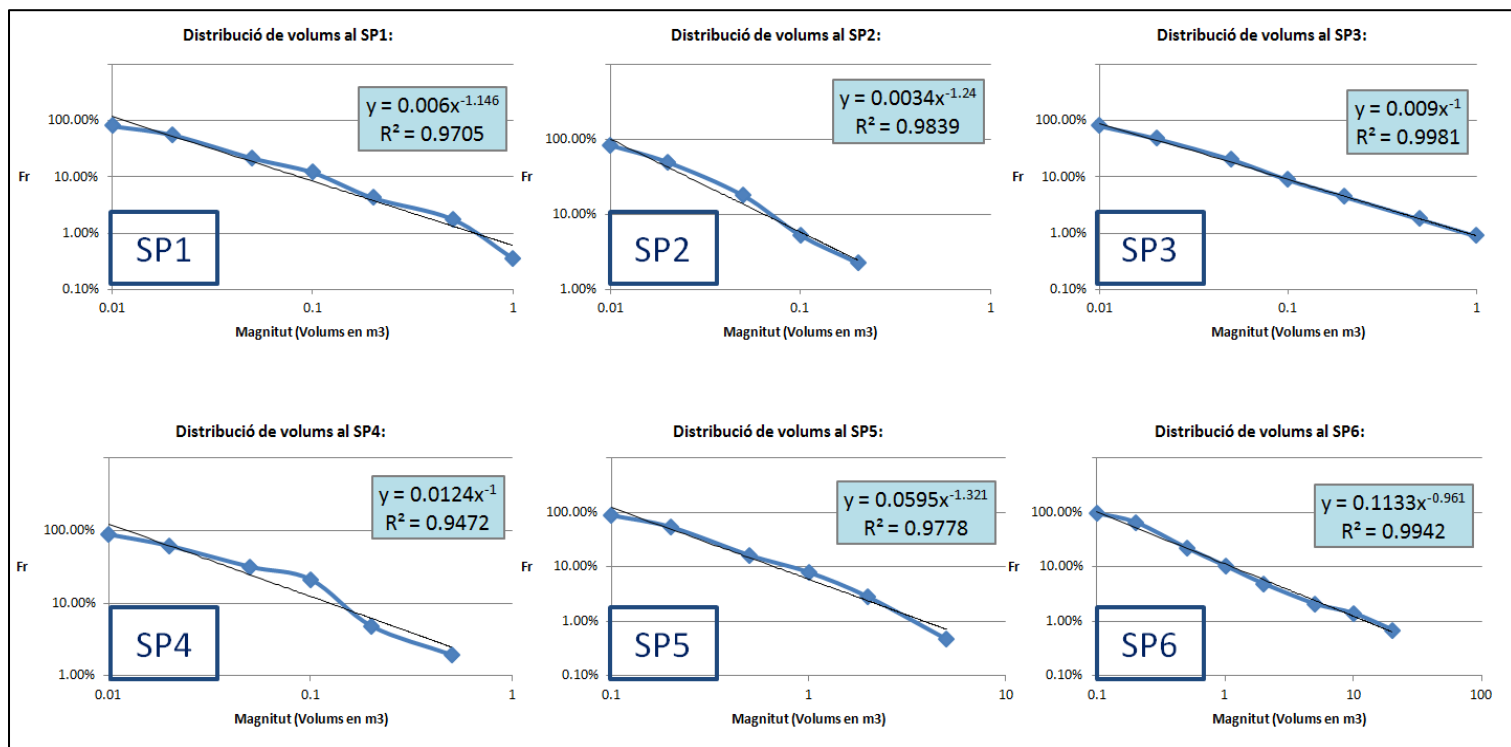


Fig. 93: Resum de les distribucions de volums de blocs obtingudes en els Sampling Plots.

VOLUMS	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
Mitja	0.061	0.036	0.054	0.066	0.409	0.759
Error típic	0.012	0.003	0.013	0.011	0.041	0.234
Mitjana	0.023	0.020	0.020	0.031	0.227	0.246
Moda	0.006	0.010	0.008	0.011	0.075	0.175
Desviació estàndard	0.205	0.054	0.133	0.108	0.598	2.792
Variança	0.042	0.003	0.018	0.012	0.358	7.797
Curtosis	171.192	27.423	38.179	26.440	42.500	85.779
Coefficient d'asimetria	12.032	4.706	5.916	4.561	5.419	8.854
Rang	3.091	0.484	1.012	0.816	6.094	29.584
Mínim	0.002	0.004	0.005	0.006	0.055	0.056
Màxim	3.092	0.488	1.018	0.822	6.149	29.640
Suma	17.457	14.511	6.057	6.830	85.472	108.493
Total	284.000	400.000	113.000	103.000	209.000	143.000

Taula. 8: Resum de dades estadístiques de cada una de les parcel·les de mostreig.

Però per estudiar bé cada una d'aquestes distribucions cal identificar quina part d'aquestes són rellevants o s'ajusten bé a una distribució potencial. En els ajustos mostrats a la Fig. 93 anterior, els ajustos s'han realitzat sobre la totalitat de les dades obtingudes a cada una de les parcel·les de mostreig. Observant amb més detall les distribucions obtingudes, s'observa que la distribució comença amb un pendent i que tot seguit aquest augmenta, com s'observa també a la distribució dels blocs puntuals. Aquest és un fenomen característic que indica cert truncament en el mostreig, en el sentit en el que segurament **manquen més mesures de blocs de mida inferior als 0.01 m³**. Per aquest motiu es decideix ajustar la distribució potencial teòrica filtrant abans les dades referents als blocs menors de 0.01 m³. A les següents **Figures 94, 95, 96, 97, 98 i 99** es mostren les **distribucions de cada un dels SP i els ajustos a una llei potencial** realitzats després de filtrar-ne els valors de menor mida de bloc que no s'ajusten adequadament.

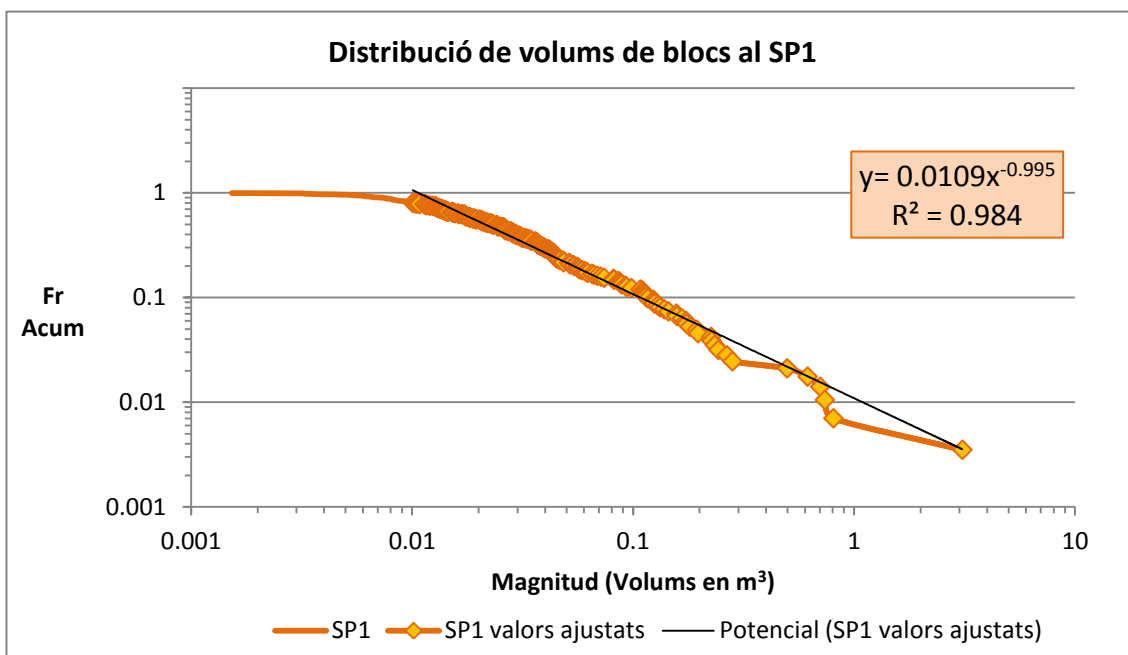


Fig. 94: Distribució de volums de blocs al SP1 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

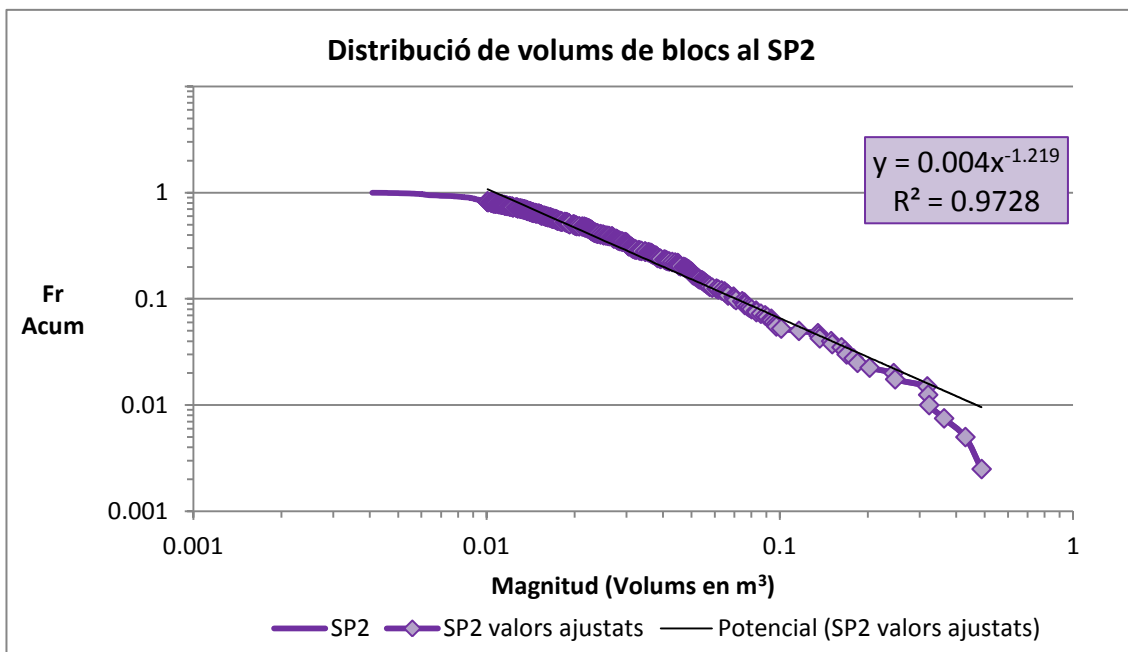


Fig. 95: Distribució de volums de blocs al SP2 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

Així com als SP1 i SP2 s'observa clarament el fenomen de la baixa representativitat de les mides de bloc més petites, a les distribucions dels SP3 i SP4 aquest fenomen és menor però també es pot observar. Ens els primers quatre Sampling Plots (SP1, SP2, SP3 i SP4), s'han filtrat tots els volums de blocs menors al 0.01 m³ per ajustar una llei potencial a la resta de valors de volums de blocs que representen el 80% de les dades, és a dir, que s'han filtrat un 20% de les dades o menys, com més endavant es mostrarà a la Taula 9.

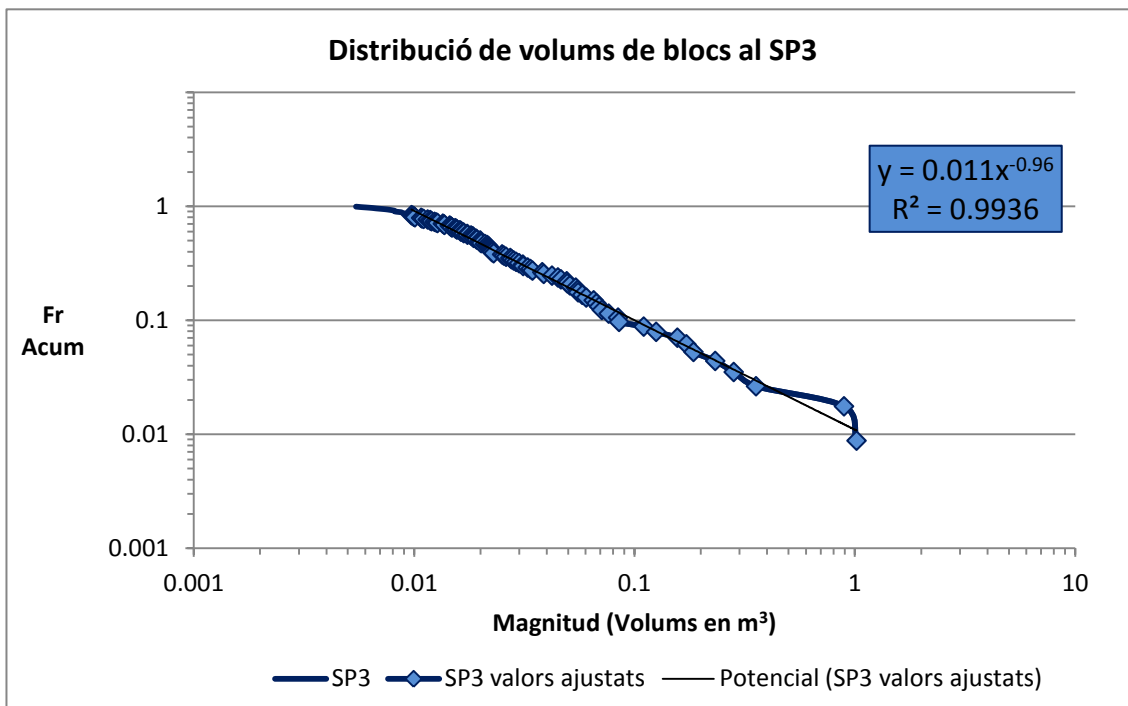


Fig. 96: Distribució de volums de blocs al SP3 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

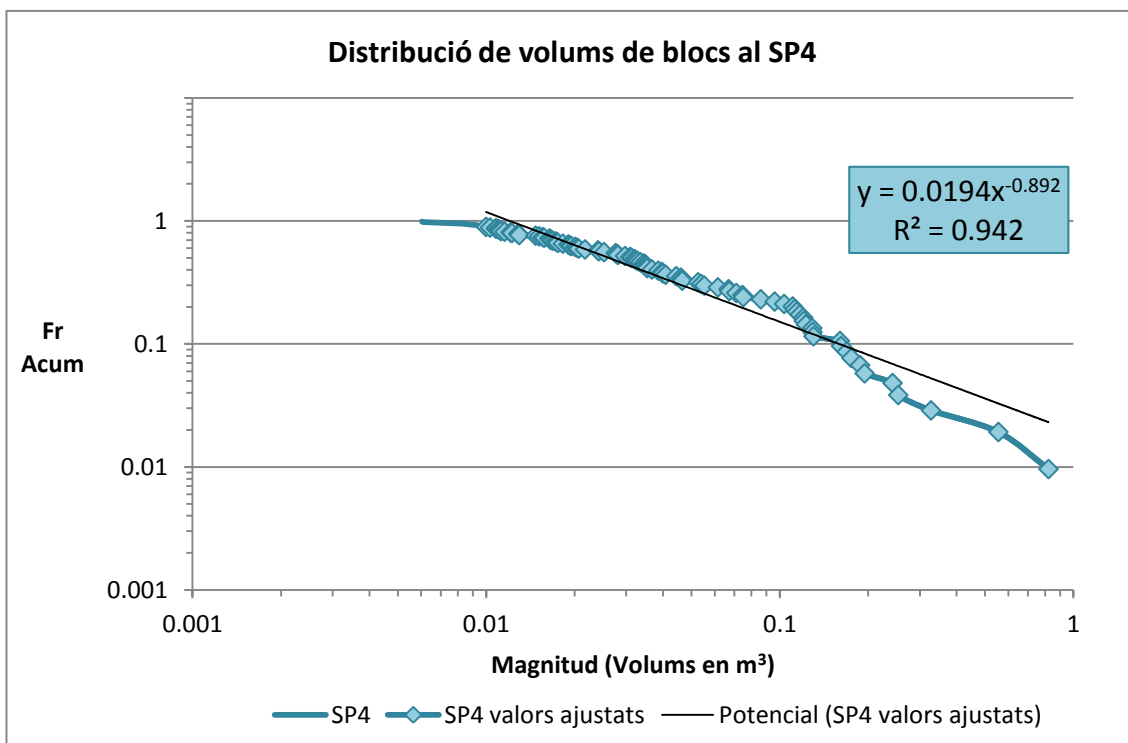


Fig. 97: Distribució de volums de blocs al SP4 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

Els SP5 i SP6 són els que s'han realitzat a la zona baixa de la tartera, on la mida de blocs mesurats és major que als altres SP. Per aquest motiu, els valors de volums de blocs menors que poden estar infravalorats són els menors de 0.1 m^3 , a diferència del 0.01 m^3 dels altres SP. Tot i això, el percentatge de dades filtrades suposen un 10% i un 5% per al SP5 i pel SP6 respectivament, com queda descrit a la Taula 9.

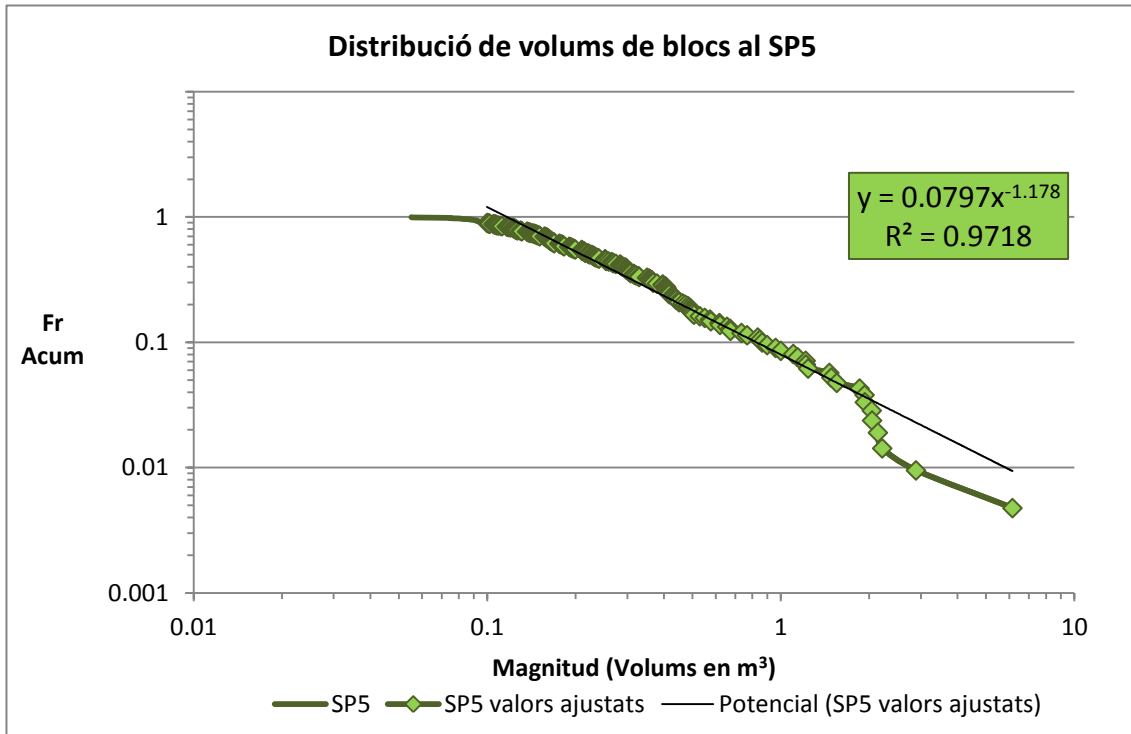


Fig. 98: Distribució de volums de blocs al SP5 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

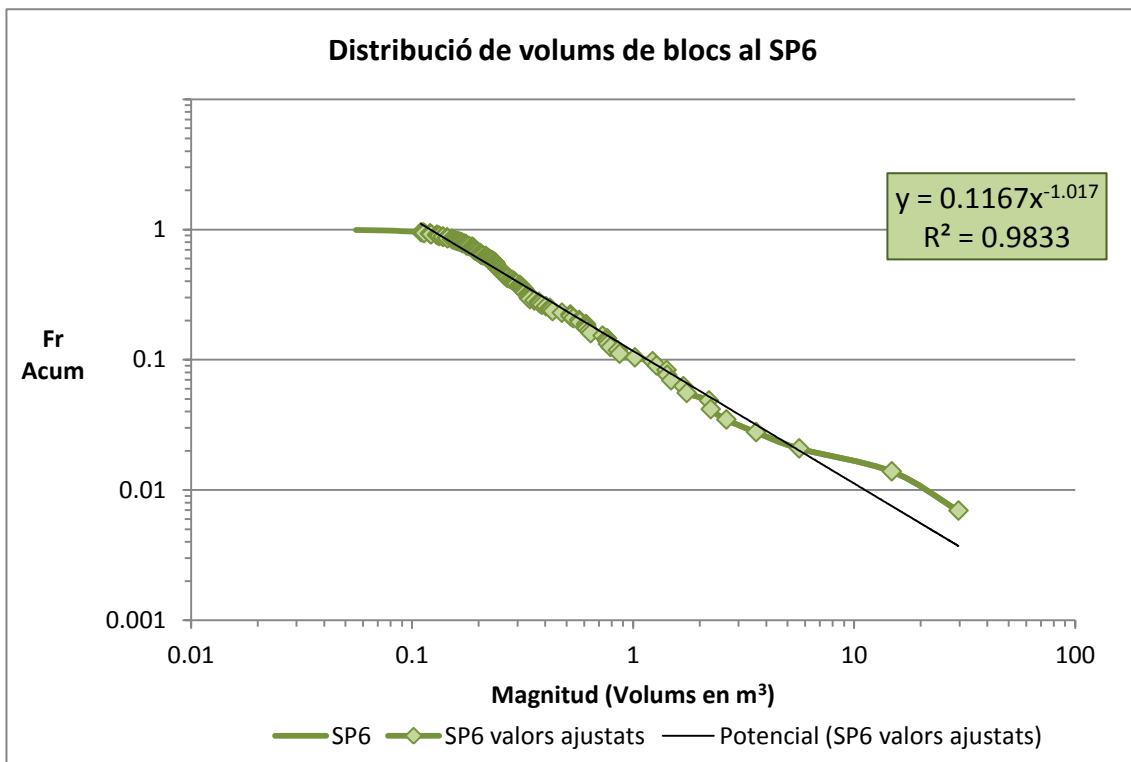


Fig. 99: Distribució de volums de blocs al SP6 amb una llei potencial ajustada als valors significatius.

A la següent Fig. 100 es poden observar les 6 distribucions de volums de blocs obtingudes a les parcel·les de mostreig amb els valors menors de cada una filtrats. També es mostren les lleis potencials ajustades. **Al tenir les distribucions representades en un mateix gràfic es pot observar com els volums de blocs dels SP5 i SP6 són d'una mida major.**

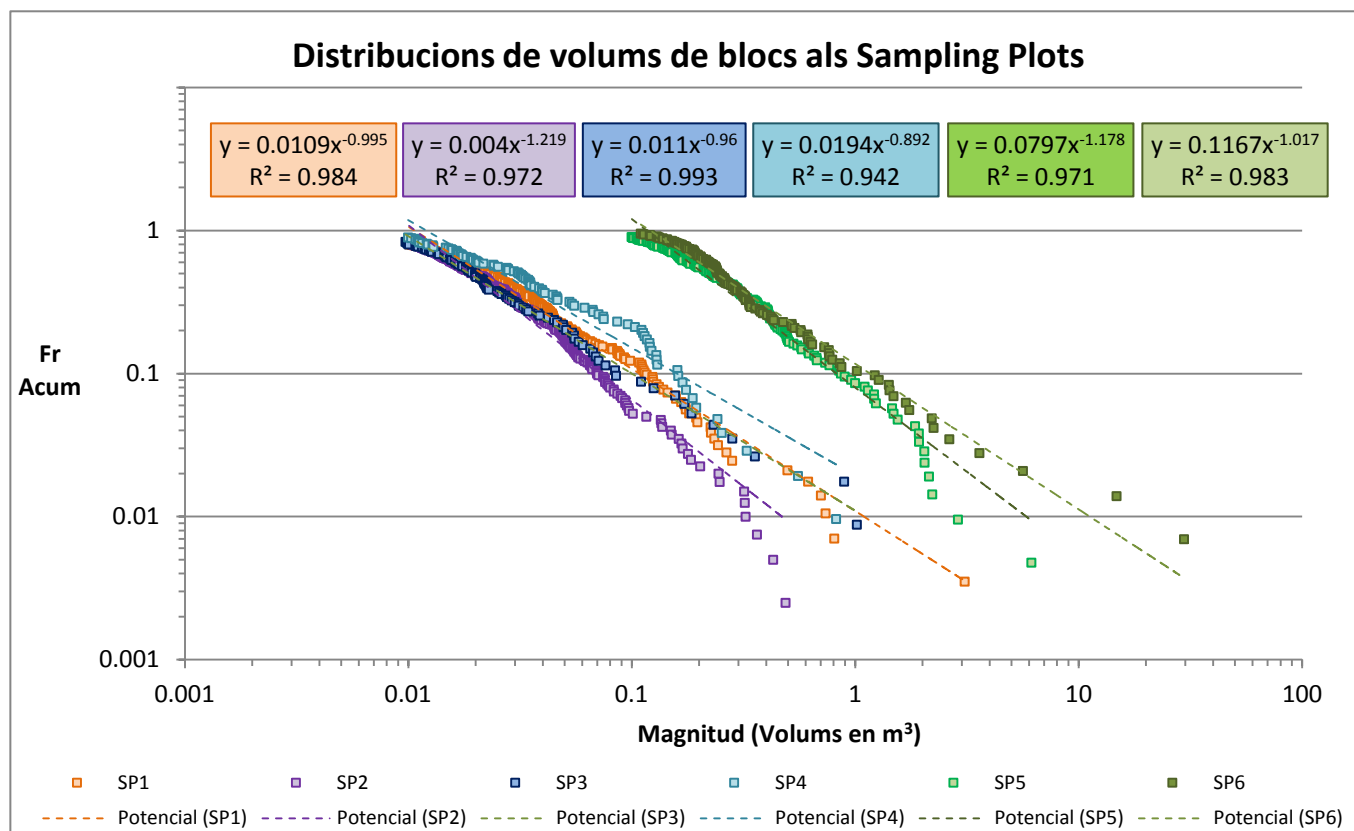


Fig. 100: Distribucions de volums de blocs dels Sampling Plots, filtrades i ajustades amb lleis potencials.

A la Taula 9 es mostren els valors de la constant C i de l'exponent D de les lleis potencials ajustades a les dades de cada Sampling Plot abans i després de filtrar-les pel volum mínim. Els SP 1, 2, 3, i 4 s'han filtrat els volums de blocs inferiors a 0.01m³ mentre que pels SP5 i SP6 s'han filtrat els valors de volums menors de 0.1m³. S'han rebutjat un percentatge petit de valors mesurats, entre el 4.2% i el 20%. Al ajustar les lleis potencials només sobre les dades significatives s'aconsegueix reduir l'error de l'ajust i el valor de l'error quadràtic s'apropa més a la unitat com es mostra a la Taula 9 següent i a la representació de l'error de la Fig. 102.

	Amb totes les mesures obtingudes			Filtrant a partir de cert V _{min}			Dades utilitzades		
	C	D	R2	C	D	R2	V _{min} filtrat	% utilitzat	% rebutjat
SP1	0.017	0.842	0.934	0.0109	0.995	0.984	< 0.0101	80 %	20 %
SP2	0.0062	1.077	0.9431	0.004	1.219	0.9728	< 0.0101	82 %	18 %
SP3	0.0126	0.912	0.9854	0.011	0.96	0.9936	< 0.01	83 %	17 %
SP4	0.0224	0.837	0.932	0.0194	0.892	0.942	< 0.01	89 %	11 %
SP5	0.0843	1.104	0.9562	0.0797	1.178	0.9718	< 0.1	90 %	10 %
SP6	0.1185	0.989	0.9751	0.1167	1.017	0.9833	< 0.11	95.8 %	4.2 %

Taula. 9: Valors d'ajust de les lleis potencials ajustades abans i després del filtrat dels volums mínims.

A la següent Fig. 101 es poden observar els valors dels exponents obtinguts a les lleis potencials ajustades a les distribucions de volums de blocs dels SP abans i després de filtrar-ne els valors no significatius de volums menors. Es pot observar com el fet de filtrar els volums de menor mida, que solen estar infraestimats, fa que **el pendent de les lleis potencials ajustades augmentin lleugerament**. En qualsevol cas, **els exponents obtinguts es troben entre els valors de 0,8 i 1,2**. S'ha anomenat "*D original*" als exponents obtinguts amb les dades en brut de les parcel·les de mostreig, i "*D valors ajustats*" als exponents obtinguts ajustant les lleis potencials a les dades significatives.

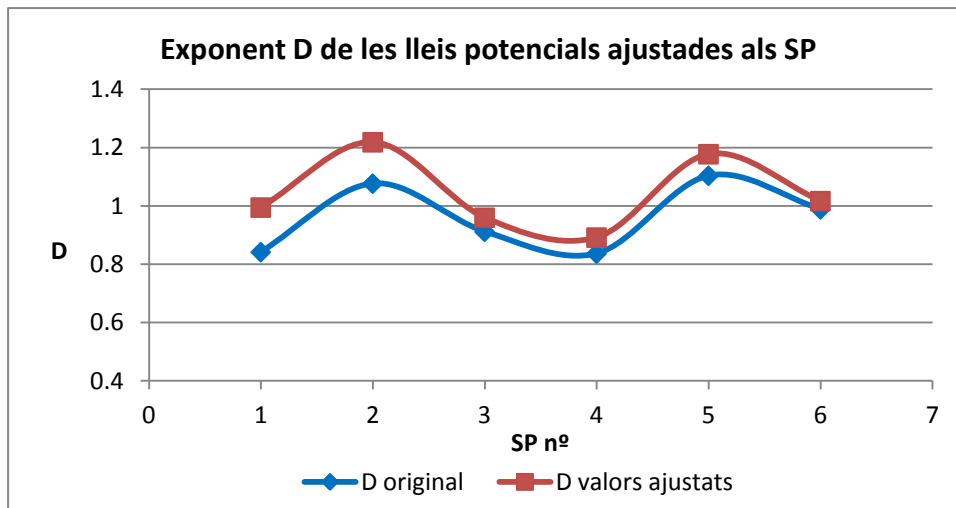


Fig. 101: Exponents de les lleis potencials ajustades a les distribucions de volums de blocs obtingudes a les parcel·les de mostreig, abans i després de filtrar els valors de volums mínims.

També és fàcil observar com **es redueix l'error quadràtic al filtrar els valors** de volums mínims de les distribucions. Així doncs, i com es pot observar a la següent Fig. 102, l'error quadràtic de les lleis potencials ajustades sobre els valors filtrats, s'apropa més a la unitat indicant un millor ajust. **El SP4 mostra el pitjor ajust, amb un coef. de correlació de 0.94, mentre que els altres ajustos tenen un coef. de correlació entre el 0.97 i el 0.99.**

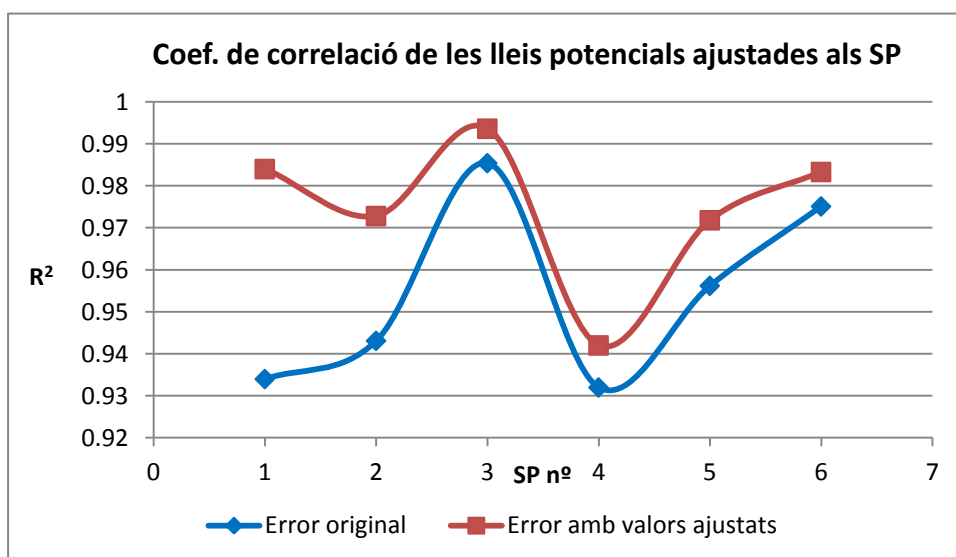


Fig. 102: Coef. de correlació de les lleis potencials ajustades a les distribucions del sampling plots abans i després de filtrar-ne les dades.

7.3 Construcció de la PBSD representativa de tot el dipòsit

Amb l'objectiu de definir **una única distribució de volums de blocs** del dipòsit del despreniment, s'han aglutinat les distribucions obtingudes de les **sis parcel·les de mostreig i dels blocs puntuals mesurats**. Per fer-ho, s'ha seguit el mateix criteri utilitzat anteriorment pel càlcul del volum del despreniment, on la idea fonamental és la utilització de la zonificació realitzada que defineix **quina regió és representativa de cada una de les parcel·les de mostreig**, obtenint la relació entre la superfície mesurada i la superfície representativa.

La ratio o relació obtinguda anteriorment, que vincula la superfície real de la parcel·la de mostreig amb la superfície de la regió que representa, s'ha utilitzat per extrapolar les dades de les parcel·les a tota la tartera. (Com s'explica a l'apartat 6.1.2 i 6.1.3 del capítol 6.)

A la següent Taula 10 es mostra el nombre de blocs mesurats en cada parcel·la classificats per volum de bloc, així com els blocs puntuals. **En vermell s'indica la ratio utilitzada per extrapolar les dades a tot la regió que s'ha considerat que representa cada parcel·la, i en** el cas dels blocs puntuals (BP) la ratio és 1, ja que els blocs mesurats són representatius d'ells mateixos, sense extrapolacions possibles o necessàries.

Una de les dades interessants resultants d'aquest procés és el **nombre de blocs totals** que s'estima que hi ha a la tartera dins dels rangs de volums de blocs definits, que **és del voltant dels 60.000 blocs**. A aquest nombre caldria sumar-li una gran quantitat de blocs més petits de 0.01 m³ fins arribar a la grava, sorra i pols que es genera en la trituració i elevada fragmentació que implica un volum que pot ser del voltant del 10% o 20% però que pot variar molt en funció dels nivells energètics dels impactes durant la propagació dels blocs en el despreniment.

Els blocs de volum compresos entre els 30 i els 50 m³ són un total de 4 blocs mesurats com a puntuals i 1 dins del SP6 que al ser extrapolat, acaben sent menys de 30 blocs que representen una freqüència molt baixa (remarcada en blau a la Taula 10) dins de la totalitat de blocs que són 60.257. Aquests valors no s'utilitzaran tot i que s'analitzaran com la resta.

Block Size													PBSD			
	SP1	161.3	SP2	26.6	SP3	25.2	SP4	72.4	SP5	10	SP6	24.9	BP	1	nº blocs	Fr Acum
0.01	0	0	0	0	4	100.8	1	72.4	0	0	0	0	0	0	173.2	0.997
0.02	70	11291	133	3537.8	37	932.4	28	2027.2	0	0	0	0	10	10	17798.4	0.701
0.05	97	15646.1	126	3351.6	31	781.2	31	2244.4	0	0	0	0	20	20	22043.3	0.335
0.10	27	4355.1	50	1330	13	327.6	11	796.4	1	10	0	0	21	21	6840.1	0.222
0.20	22	3548.6	12	319.2	5	126	17	1230.8	73	730	42	1045.8	16	16	7016.4	0.105
0.50	7	1129.1	9	239.4	3	75.6	3	217.2	80	800	63	1568.7	37	37	4067	0.038
1.00	4	645.2	0	0	1	25.2	2	144.8	18	180	17	423.3	42	42	1460.5	0.014
2.00	0	0	0	0	1	25.2	0	0	11	110	8	199.2	53	53	387.4	0.007
5.00	1	161.3	0	0	0	0	0	0	5	50	4	99.6	51	51	361.9	0.0018
10.00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	1	24.9	14	14	48.9	0.0010
20.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	24.9	7	7	31.9	0.0004
30.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	24.9	1	1	25.9	4.9786E-05
40.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1.65953E-05
50.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2.41494E-16

Taula. 10: Extrapolació de les mesures de blocs en parcel·les de mostreig per a la construcció d'una única distribució de volums de blocs representativa del dipòsit del despreniment.

Una vegada realitzada la ponderació per superfície representativa de cada una de les parcel·les de mostreig i la suma a aquestes dels blocs puntuals mesurats, s'obté el nombre de blocs de cada una de les classes de volum de blocs definides i la seva freqüència acumulada com es mostra a la Taula 10.

A la següent Fig. 103 es mostren les distribucions obtingudes a les parcel·les de mostreig i dels blocs puntuals mesurats, i finalment, la distribució de volums de blocs representativa del dipòsit del desprendiment. Així doncs, **s'ha obtingut la PBDS que es mostra en vermell a la següent Fig. 103.**

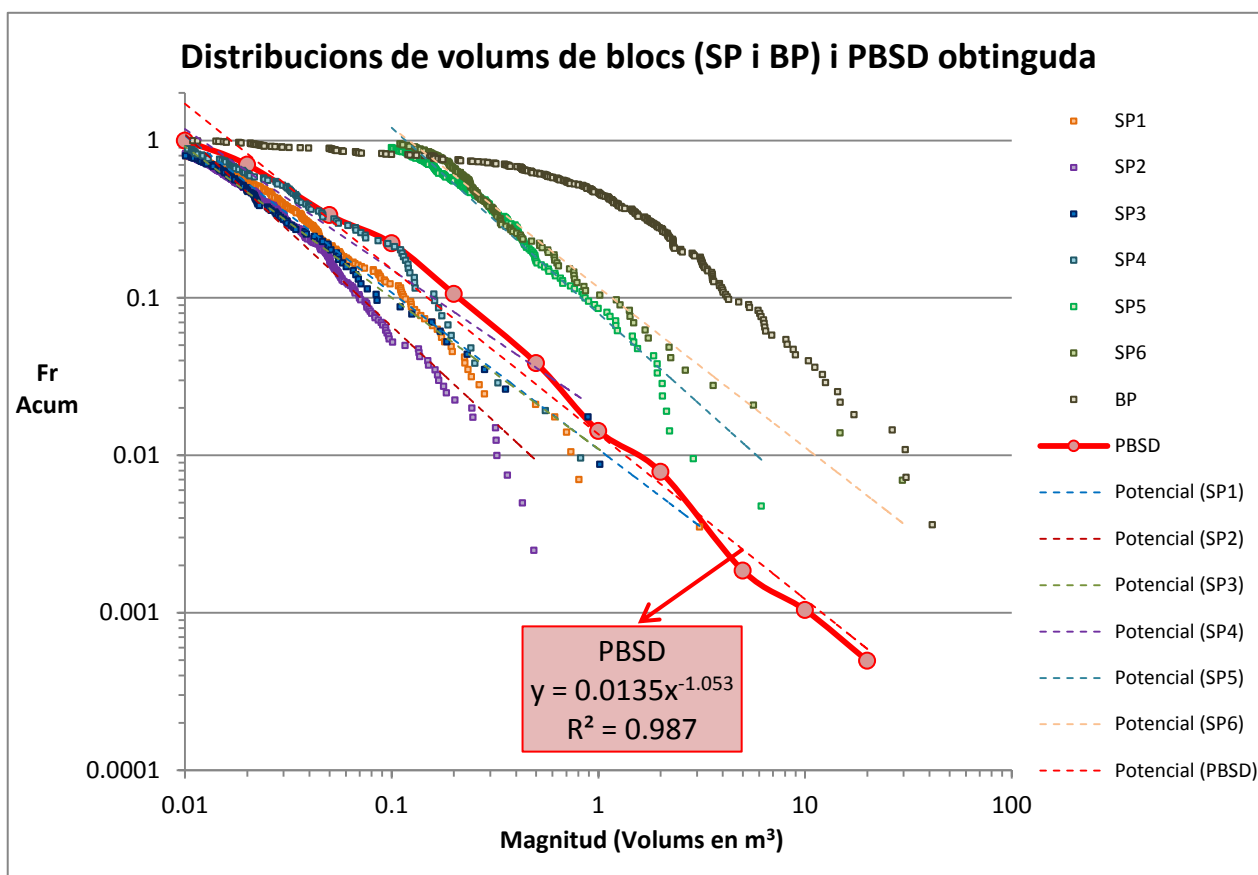


Fig. 103: Distribucions de volums de blocs mesurades en parcel·les de mostreig i blocs puntuals amb la PBSD obtinguda.

La PBSD obtinguda es pot ajustar molt bé a una llei potencial amb un coef. de correlació del 0.987. La constant normalitzadora C és 0.0135 i l'exponent de la llei potencial D, que és el pendent d'aquesta i que es pot interpretar com la dimensió fractal de la distribució és de 1.053.

La PBSD obtinguda és la que es compararà amb la PBSD que s'obté de l'anàlisi de la paret rocós. El fet de que la PBSD segueix-hi una llei potencial concorda amb els treballs realitzats per (Turcotte 1990), i és un comportament observat anteriorment en masses rocósos fragmentades. Aquest fet permet la interpretació d'un comportament fractal, és a dir, que es pot observar el mateix comportament a diferents escales de magnitud.

La PBSD (Propagated Block Size Distribution), és la distribució de volums de blocs que s'ha obtingut en base a les mesures de blocs puntuals i les mesures de blocs a les parcel·les de mostreig i que després s'han extrapolat a tota la tartera en base a les superfícies que s'han considerat representatives de cada una de les parcel·les. Com ja s'ha citat abans, el nombre de blocs compresos entre els 30 m³ i els 50 m³ és d'uns 25 blocs, que enmig dels 60.257 blocs estimats, representen una freqüència molt baixa.

Aquets blocs no s'han utilitzat per a la definició de la PBSD, però es poden veure representats a la següent Fig. 104. De la mateixa manera que s'han filtrat els valors de volums mínims en les parcel·les de mostreig, s'han filtrat aquesta valors de volums màxim per ajustar el màxim de bé la PBSD a una llei potencial.

Els valors de volums màxims obtinguts són de major rellevància que els volums mínims filtrats anteriorment, ja que els volums de blocs màxims és un dada important de cara a l'anàlisi del risc, la propagació i l'energia d'impacte dels blocs que puguin desprendre's.

La distribució sencera obtinguda és una llei potencial truncada, és a dir, una llei potencial que arribat a cert volum decau bruscament degut a una limitació que impedeix la generació de volums majors a cert valor. Un millor ajust es mostra a l'apartat 7.4.

En aquest sentit hi ha diferents factors que poden limitar els volums màxim de blocs, com ho pot ser el propi volum del desprendiment, que mai podrà ser superat per un bloc del desprendiment com és lògic. Per altra banda, les interseccions de les diferents famílies de discontinuïtats també impedeix la generació de volums majors a cert valor, fet que és objecte d'estudi per a la identificació de volums màxims de bloc que poden ser inestables.

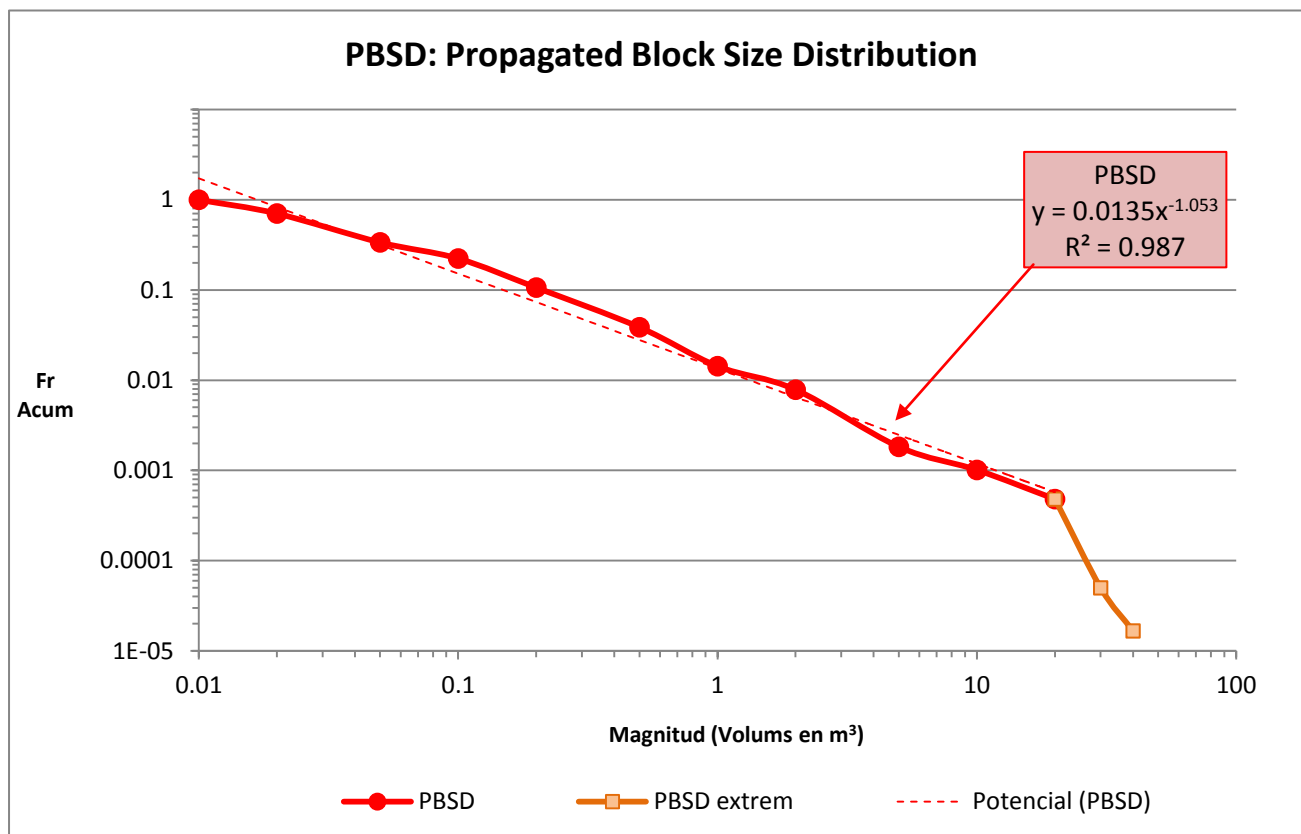


Fig. 104: PBSD: Propagated Block Size Distribution obtinguda sencera, amb els valors extrems que s'han filtrat.

7.4 Truncament de la PBSB en base a un volum màxim de bloc

Fins ara s'ha utilitzat la expressió típica d'una llei potencial per a l'ajust de les distribucions de volums de blocs a la tartera, amb una constant C i un exponent D (Eq. 2).

$$P(V_{\min} < V_0) = CV_0^{-D} \quad \text{Eq. 2}$$

Però per altra banda, i com fan altres autors com (Dussauge et al., 2003), es pot introduir el concepte d'un volum mínim dins de la constant normalitzadora C, i reescriure la distribució potencial com es mostra a l'Eq. 3.

$$P(V_{\min} < V_0) = \left(\frac{V_0}{V_{\min}} \right)^{-D} \quad \text{Eq. 3}$$

Aquesta interpretació permet introduir el concepte de quin és aquell volum mínim que es pren com a volum mínim considerat. La relació entre la constant C normalitzadora utilitzada fins ara i la nova forma d'expressió en funció del volum mínim és directe (Eq. 4 i Eq. 5):

$$C = \frac{1}{V_{\min}^{-D}} \quad \text{Eq. 4} \quad V_{\min} = \left(\frac{1}{C} \right)^{1/D} \quad \text{Eq. 5}$$

En aquest sentit, es pot replantejar l'equació de la llei potencial ajustada a la PBSB com es mostra a l'Eq. 6, on el V_{\min} obtingut a partir de la constant normalitzadora C és de 0.1676 m^3 :

$$P(V_{\min} < V_0) = \left(\frac{V_0}{0.01676} \right)^{-1.053} \quad \text{Eq. 6}$$

La funció obtinguda és exactament la mateixa, però amb una expressió on la constant normalitzadora C desapareix per utilitzar una valor amb sentit físic com és el volum mínim considerat per ajustar la llei a la mostra de blocs.

Aquesta interpretació permet, entre d'altres coses, realitzar el truncament de la distribució amb un volum màxim, degut al volum màxim del desprendiment o al volum màxim que es pot generar amb la família de discontinuïtats present en el massís rocós. El truncament de la funció es pot dur a terme restant a la distribució obtinguda les distribucions associades a volums majors a cert valor fixat d'entrada com a volum màxim. **Aleshores, la forma de la llei potencial truncada per un volum màxim queda com es mostra a l'Eq 7** (comentari personal de José Moya):

$$P(V_{\min} < V_0)_{truncada} = \frac{\left(\frac{V_0}{V_{\min}} \right)^{-D} - \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{-D}}{1 - \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{-D}} \quad \text{Eq. 7}$$

Es pot ajustar una llei potencial truncada amb un valor del V_{\max} de 50 m^3 que permet ajustar millor els valors extrems de volums de blocs de les mides majors com es mostra a la següent Fig. 105.

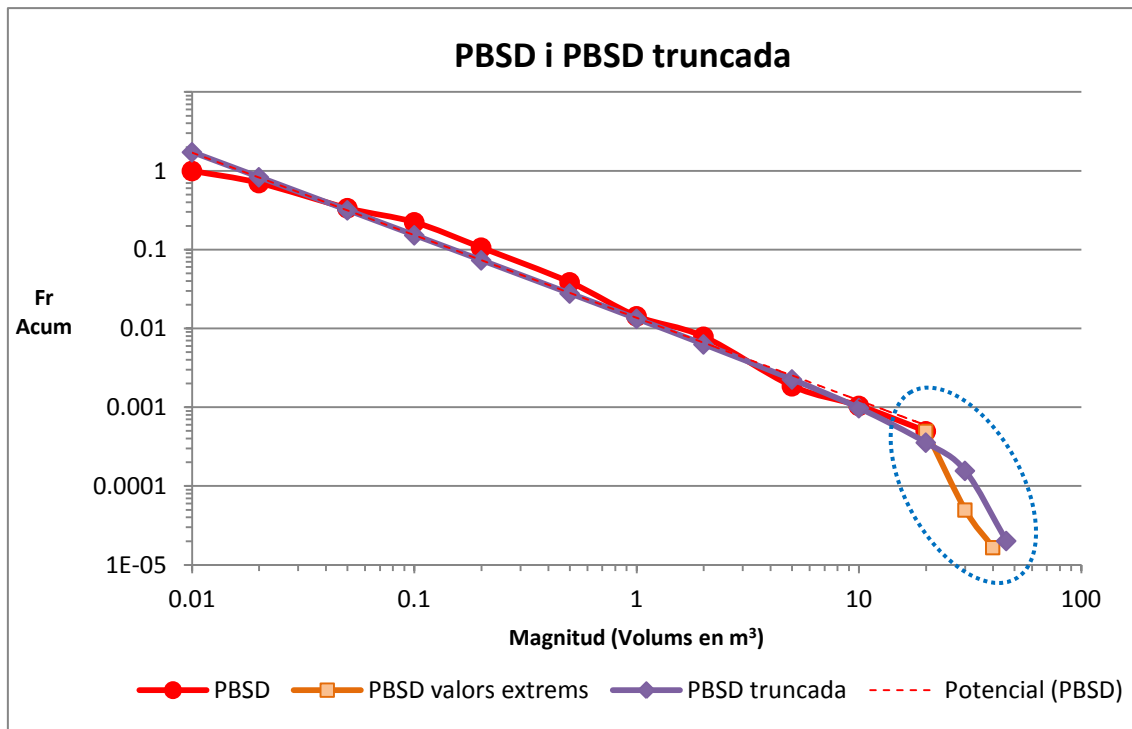


Fig. 105: PBSD obtinguda i PBSD amb els valors extrems ajustada amb una llei potencial truncada.

La interpretació física de la distribució millora al entendre que les distribucions potencials que s'ajusten a les mostres observades a camp no es poden extrapolar fins a volums de dimensions molt grans, degut a que existeixen certs factors que limiten el volum de bloc màxim com ho pot ser el propi volum del desprendiment o els volums màxims que es puguin generar amb la xarxa de discontinuïtats del massís rocós.

Així doncs, l'equació que millor s'ajusta a les dades de camp i a les extrapolacions realitzades per obtenir la PBSD, és la que es mostra a l'Eq. 8, on s'utilitza una llei potencial amb un truncament per volums màxims que acaba essent una constant, ja que el V_{\min} , el V_{\max} i l'exponent D defineixen el valor de truncament de la distribució.

$$P(V_{\min} < V_0 < V_{\max})_{\substack{\text{truncada} \\ V_{\min} > 0.016 \\ V_{\max} < 50}} = \frac{\left(\frac{V_0}{0.01676}\right)^{-1.053} - 2.149 \cdot 10^{-4}}{1 - 2.149 \cdot 10^{-4}} \quad \text{Eq. 8}$$

7.5 Construcció de la IBSD representativa del la zona afectada pel desprendiment

Per a l'obtenció de la PBSD s'ha realitzat tot el procediment mostrat a l'anterior capítol 6 Treball realitzat, a l'apartat 6.2, on s'ha mostrat tot el procediment per generar un model digital de la paret rocosa i la identificació de les discontinuïtats mitjançant un procediment automàtic o la identificació manual i el seu modelat, que és el que finalment s'ha utilitzat per tallar un volum de control de 10.000 m^3 col·locat a la zona de sortida de blocs.

Finalment, una vegada s'ha tallat el volum de control, es demana al programa *Rhinoceros* que llisti tots els poliedres generats indicant el seu volum. S'ha considerat interessant observar la rellevància entre utilitzar 3, 4 o 5 famílies de discontinuïtats.

Al tallar el volum utilitzant només amb 3 famílies s'ha obtingut una gran quantitat de volums desmesuradament grans com ho són 138 blocs de 50 m^3 , 45 blocs de 100 m^3 , 8 blocs de 200 m^3 i fins i tot 4 blocs de 1000 m^3 . Aquest fet fa que s'utilitzin les 4 i 5 famílies modelades, però fa pensar que cal una major precisió en la identificació d'espais menors per poder generar els blocs d'una forma més detallada.

Així doncs, s'ha realitzat el tall d'un volum de 10.000 m^3 amb 4 i 5 famílies de discontinuïtats identificades, com es mostra a la Fig. 106, on es mostra el volum de control amb les 8 parts en que s'ha dividit per poder realitzar el càlcul (imatge esquerra), el volum tallat amb 4 famílies (imatge central) i el volum tallat amb les 5 famílies (imatge dreta).

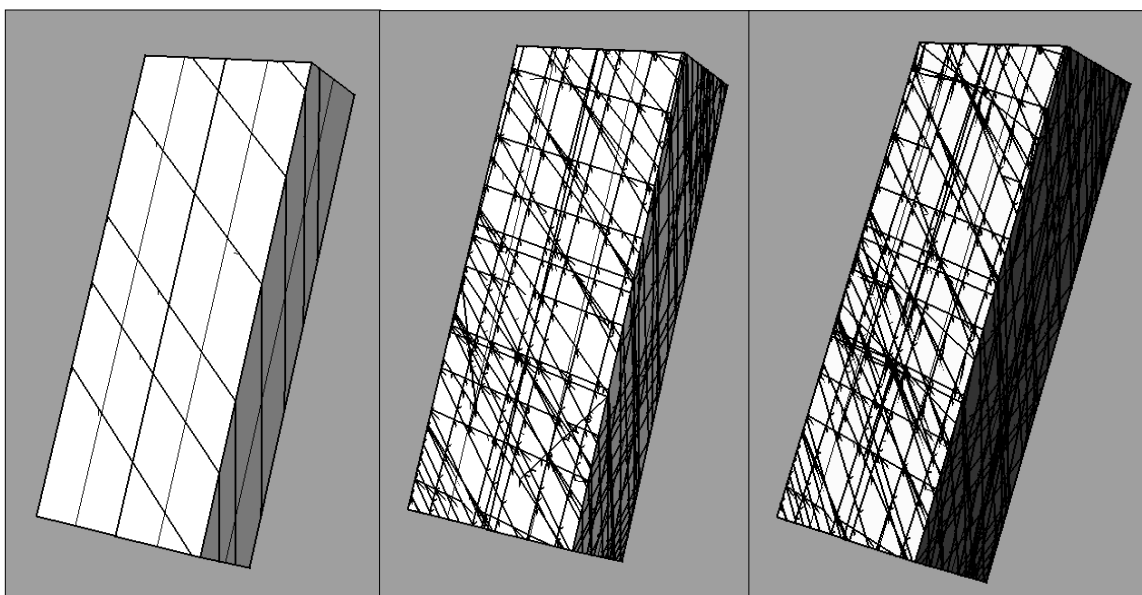


Fig. 106: Volum de control de 10.000 m^3 (esquerra), volum de control tallat amb 4 famílies (central) i tallat amb 5 famílies (dreta)

Tot i que a les imatges pot semblar que algunes famílies no tallen per complet el bloc, és degut a un problema de la representació en temps real dels blocs en les captures de pantalla, però s'ha utilitzat una persistència infinita per definir els plans, de manera que totes les juntes tallen per complet el volum de control. Aquesta hipòtesis afecta d'una forma important als resultats, sobretot en els volum més grans, fet que es discutirà amb els resultats davant.

Per altra banda, i ja que s'ha dividit el càlcul en 8 trams, s'ha decidit observar quina és la distribució de volums de blocs si enlloc de prendre un volum de control de 10.000 m^3 , es pren un volum de control de 5.000 m^3 . A la següent Fig. 107 es mostra el volum de control de 5.000 m^3 que s'ha utilitzat per observar la rellevància del volum de control que s'adopta.

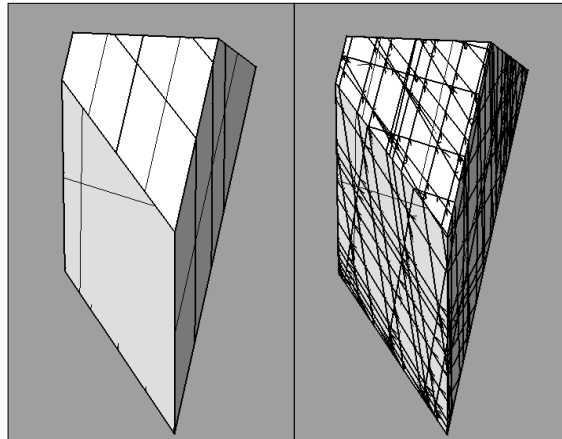


Fig. 107: Volum de control de 5.000 m^3 (esquerra), tallat amb 5 famílies de discontinuïtats (dreta).

A la Fig. 108 es representen les IBSD obtingudes. On es poden comparar les distribucions realitzades amb 4 famílies de discontinuïtats amb un volum de control de 5.000 m^3 (en lila) i amb un volum de control de 10.000 m^3 (en verd). La diferència entre aquestes últimes és menor que la que es pot observar amb la distribució obtinguda amb 10.000 m^3 i utilitzant les 5 famílies de juntes modelades (en blau) i que correspon a la IBSD que es considera representativa de la paret rocosa d'estudi. Com era d'esperar, la utilització d'una cinquena família de discontinuïtats augmenta el nombre de blocs generats disminuint-ne el seu volum i traslladant les distribucions cap a l'esquerra, amb volums menors.

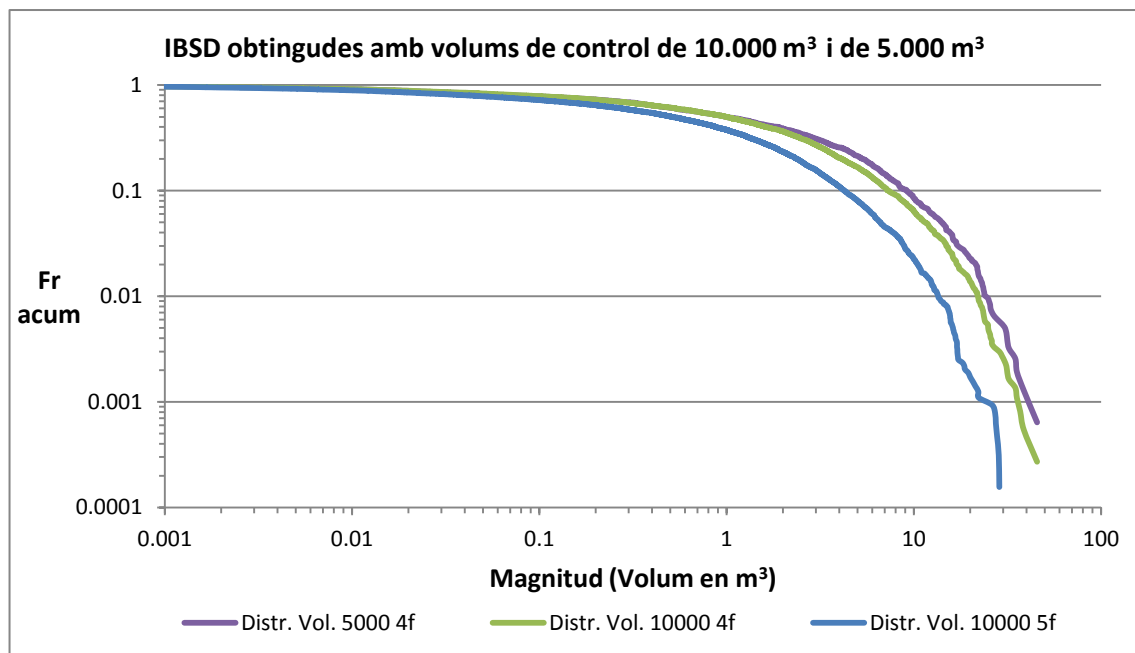


Fig. 108: Distributions de volums de blocs a la paret rocosa (IBSD) amb volums de control de 5.000 m^3 i 10.000 m^3 utilitzant 4 o 5 famílies de discontinuïtats (4f i 5f, respectivament).

Amb la IBSD obtinguda utilitzant 10.000 m^3 i 5 famílies de discontinuïtats cal identificar algunes dades d'interès, com per exemple que el 90% dels blocs generats tenen un volum menor de 5 m^3 . Per altra banda, cal dir que el **volum mínim que s'ha generat és de l'ordre de 10^{-7} m^3** , i que el **volum màxim generat és de 46 m^3** , aquest últim amb concordança amb les mesures de camp realitzades.

Hi ha alguns factors que afecten directament sobre la forma de la distribució obtinguda. Per una banda existeix un elevadíssim nombre de blocs de dimensions petites que s'ha pogut mesurar en aquest procediment i que no s'han mesurat en les mesures de camp, on el volum de bloc més petit mesurats de 0.01 m^3 , a diferència del 10^{-7} m^3 obtinguts de la IBSD. Per altra banda, el volums de major mida es veuen truncats pel volum del desprendiment, ja que mai es podran obtenir volums de blocs majors que el propi volum del desprendiment. En aquest sentit, el fet d'haver considerat un volum de control de 10.000 m^3 i una persistència de les juntes infinita fa que s'estigui truncant la distribució de volums.

La corba descrita per les IBSD obtingudes es poden interpretar en base als diferents truncaments que pateix, generant cert dubte sobre la seva validesa, però si es superposa a aquestes la distribució de volums obtinguda dels blocs puntuals mesurats s'observa certa correlació que pot permetre fer noves interpretacions d'aquestes distribucions.

A la següent Fig. 109 es mostren les IBSD obtingudes i al distribució associada als blocs puntuals mesurats (en vermell), on s'observa que aquesta última segueix una distribució molt semblant. A partir dels blocs de 5 m^3 , la distribució associada als blocs puntuals s'apropa més a la IBSD realitzada amb 4 famílies, el que podria explicar que aquestes mides de blocs no es veuen tallades per 5 famílies sinó per 4 o menys, i donant força a la idea de que la persistència juga un paper més rellevant en les mides de blocs grans, i a la possible fragmentació molt menor dels blocs puntuals que han aconseguit arribar més lluny en el dipòsit.

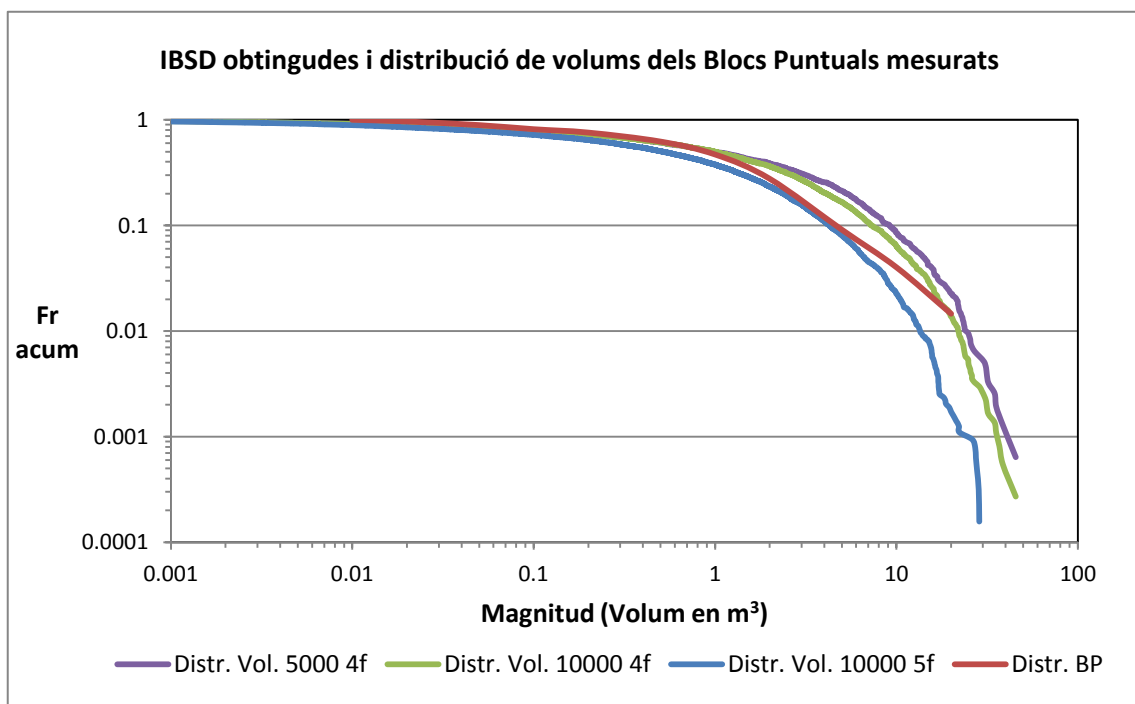


Fig. 109: IBSD amb la distribució de volums obtinguda a partir dels blocs puntuals mesurats.

A la Fig. 109 anterior s'han representat els volums dels blocs puntuals mesurats en base a les classes que s'han definit prèviament, fet que impedeix representar els valors màxims i la distribució es veu truncada. Per evitar això es poden representar absolutament tots els blocs com ja s'ha fet anteriorment i com s'estan representat les IBSD. Així, a la següent Fig. 110 es mostren les IBSD obtingudes i la distribució de volums de blocs puntuals sense classificar, de manera que es poden observar els volums màxims mesurats que arriben als 41 m³, concordant amb els volums màxims obtinguts a les IBSD.

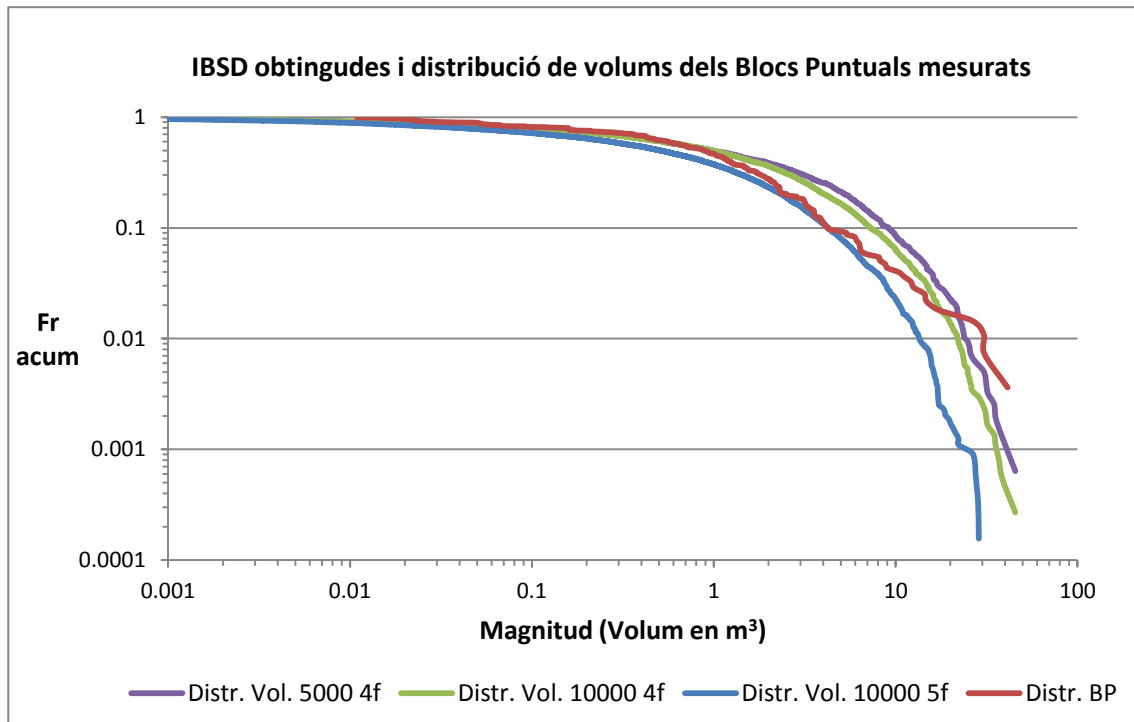


Fig. 110: IBSD obtingudes i distribució de volums de blocs puntuals un a un.

A la següent Taula 11 es mostren el nombre de blocs obtinguts per a cada classe definida a la IBSD utilitzant 5 famílies de discontinuïtats i un volum de control de 10.000 m³. Els volums de bloc màxims obtinguts, de 30 m³ i un de 46 m³ coincideixen amb l'ordre de magnitud dels 30 m³ i 41 m³ de volums màxims mesurats al dipòsit.

Classe	Freqüència	% acumulat
0.01	707	88.94%
0.02	266	84.77%
0.05	423	78.15%
0.1	398	71.92%
0.2	485	64.33%
0.5	893	50.36%
1	808	37.72%
2	923	23.27%
5	973	8.04%
10	371	2.24%
20	131	0.19%
30	11	0.02%
50	1	0.00%
l major...	0	0.00%
nº total de blocs	6390	

Taula. 11: Nombre de blocs i freqüència acumulada per classes de la IBSD obtinguda.

7.6 Comparativa de la IBSD i la PBSD

Finalment s'han obtingut les distribucions de volums de blocs abans i després del desprendiment, la IBSD (In situ Block Size Distribution) i la PBSD (Propagated Block Size Distribution), que es poden veure representades juntes a la Fig. 111.

La PBSD s'ajusta molt bé a una llei potencial, tal i com molts altres autors han descrit anteriorment. Aquesta distribució té una implicació des d'un punt de vista de la teoria fractal, i és que a qualsevol escala o interval d'ordres de magnitud, el comportament és el mateix, caracteritzat sobretot pel pendent de la llei potencial, que es vincula amb la dimensió fractal del conjunt. Per altra banda, la IBSD no segueix una llei potencial, apropant-se més al comportament d'una llei exponencial o una combinació d'una llei potencial i una exponencial.

Cal tenir en compte que la PBSD s'ha obtingut mitjançant 1.527 blocs de volum mesurat a camp, que s'han extrapolat a tota la tartera fent un total de 60.257 blocs de volum estimat. La IBSD està formada per 6390 blocs amb un volum mínim de $7,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ i un volum de bloc màxim d'uns 30-40 m^3 . Aquest volum màxim coincideix amb els volums màxims mesurats en els blocs puntuals mesurats a camp entre 30 i 41 m^3 . Amb els nombres de blocs obtinguts es pot dir que per cada bloc de la paret rocosa n'hi han més de 9 en el dipòsit.

La gran similitud de la distribució dels blocs puntuals amb la IBSD es pot interpretar com que els blocs puntuals són els blocs que menys fragmentació han patit i que han pogut mantenir una distribució més semblant a la distribució original que tenien a la paret rocosa. A més, el fet de fragmentar-se menys implica una pèrdua menor d'energia i més probabilitats d'arribar més lluny en les seves trajectòries com és el cas.

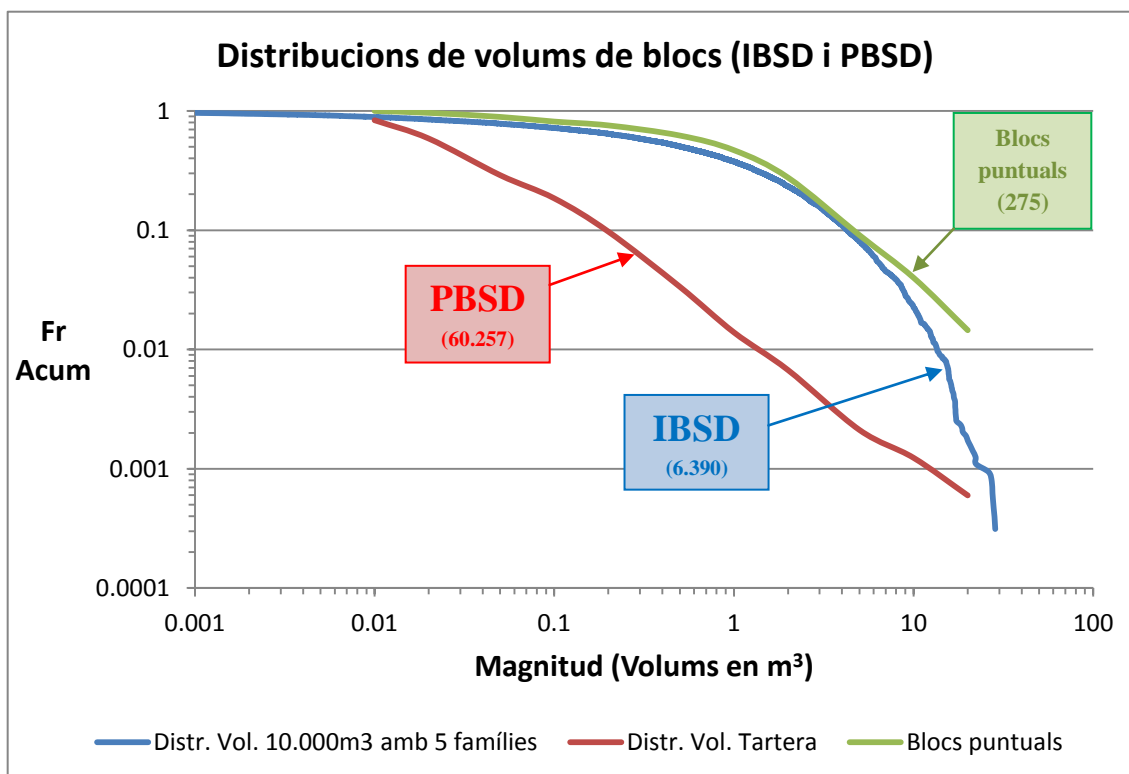


Fig. 111: IBSD (paret rocosa) i PBSD (dipòsit) obtingudes i distribució de volums dels blocs puntuals mesurats.

Així doncs, i com ja s'ha mostrat anteriorment, la PBSD s'ajusta molt bé amb una llei potencial. Per altra banda la IBSD s'ajusta molt millor a una llei exponencial, com es mostra a la següent Fig. 112, on es mostren la PBSD i la IBSD i els ajustos a una llei potencial i exponencial respectivament.

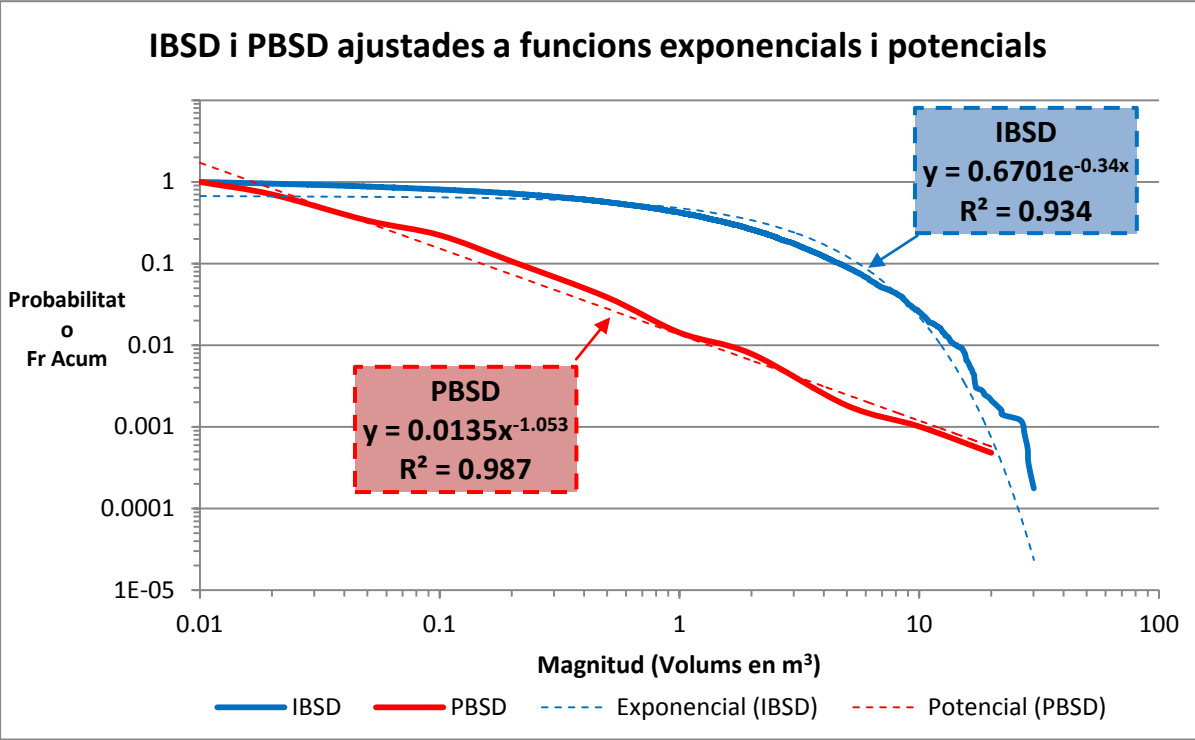


Fig. 112: Ajustos amb lleis potencials i exponencials a les distribucions IBSD i PBSD obtingudes.

Finalment es poden descriure amb un error raonablement petit (errors quadràtics de 0.93 i 0.98), les distribucions IBSD i PBSD obtingudes mitjançant les lleis indicades a la Taula 12, on Pr és la freqüència o la probabilitat d'obtenir un volum menor al volum V_o , que és el volum de bloc i la variable d'estudi.

DISTRIBUCIÓ AJUSTADA A LES DADES OBTINGUDES	
IBSD (Llei exponencial)	$Pr(V_{\min} < V_o) = 0.6701 * e^{-0.34 * V_o}$
PBSD (Llei potencial)	$Pr(V_{\min} < V_o) = 0.0135 * V_o^{-1.053}$

Taula. 12: Lleis potencials i exponencials ajustades a la IBSD i la PBSD.

-Interpretacions sobre els valors extrems:

Hi ha alguns detalls interessants sobre les distribucions de volums de blocs obtingudes, tant pel que fa a la IBSD com a la PBSB. A la següent Fig. 113 es mostra la distribució de volums de bloc puntuals que es superposa a al IBSD fins els volums de 20 m³, a partir dels quals es pot observar com ja no coincideix. Com ja s'ha citat abans, **els blocs puntuals mesurats segueixen la distribució de volums de la paret fins a cert punt**, i aquest fet permet interpretar que aquests blocs són aquells que han patit una menor fragmentació.

Per altra banda també permet interpretar com **el fet d'utilitzar una persistència infinita per a la simulació de la IBSD afecta sobretot als volums de grans dimensions**. Cal tenir en compte que es representen freqüència acumulades relatives a la mostra, i que per tant, **és difícil de compara mostres com la de blocs puntuals de 275 blocs amb la IBSD de més de 6000 blocs**. A més, cal dir que la distribució dels blocs puntuals ja es troba englobada a la PBSB.

Per altra banda, és interessant observar **la intersecció de la PBSB i de la IBSD, juntament amb la branca de valors extrems de la PBSB associada als volums de major mida**. Els volums de major mida es veuen limitats per una banda pel volum total de material involucrat en el desprendiment, i per altra banda **per la configuració de les juntes** que trossegueu la roca mare, generant uns volums màxims. Cal dir que els volums màxims extrems de la PBSB surten precisament de les mesures dels blocs puntuals on es registren els blocs de majors dimensions.

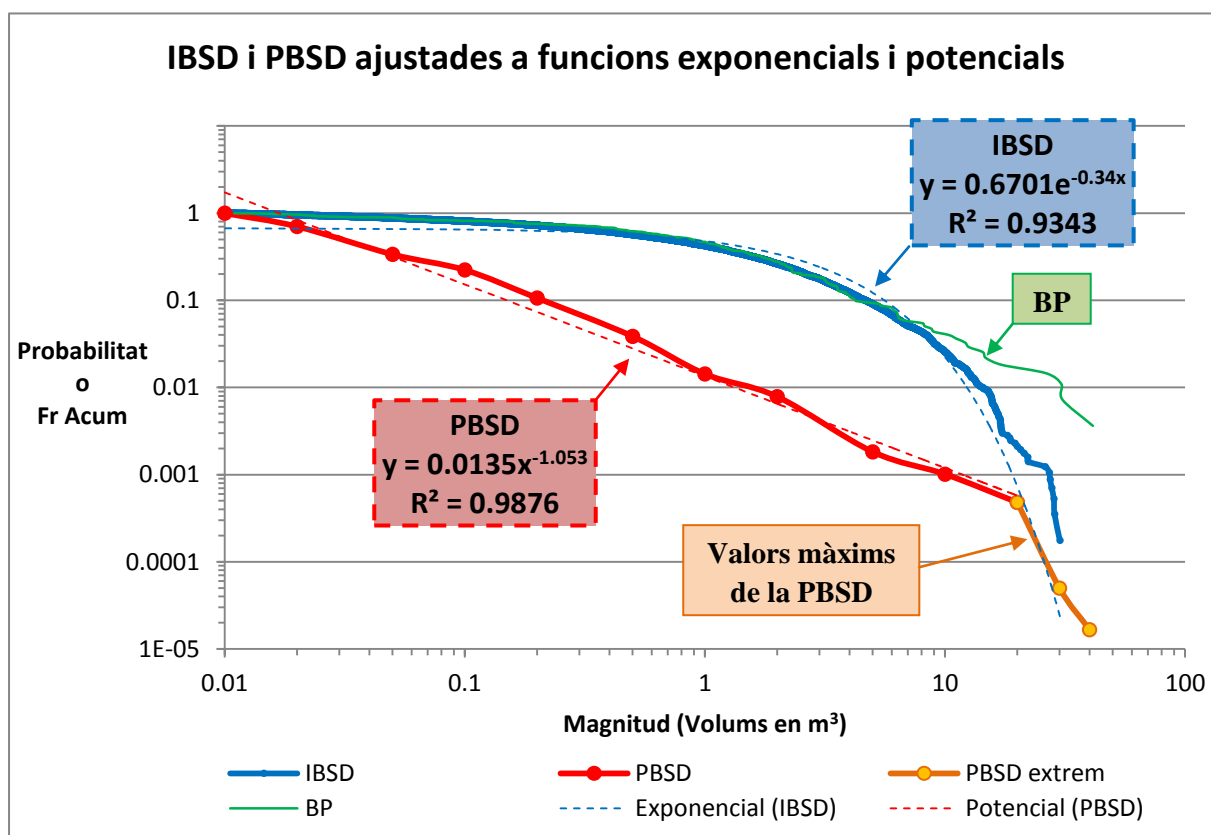


Fig. 113: IBSD, PBSB, distribució de blocs puntuals i extrem de la PBSB associada als volums màxims.

-Variacions sobre la mida de blocs:

Per observar com afecta la fragmentació sobre la mida dels bloc i el seu nombre, a més a més de com es mostra a les figures anteriors la distribució de volums de blocs en termes de freqüència relativa acumulada, es pot comparar el nombre total de blocs de cada una de les classes de volums definides de les dues distribucions obtingudes.

Així doncs, a la següent Fig. 114 es mostra el nombre de blocs de cada volum, per classes, de la IBSD i la PBSD. Es pot observar com els blocs majors de 1 m³ de la IBSD (de la paret rocosa), abans del despreniment, es veuen reduïts en nombre al propagar-se, mentre que els blocs menors de 1 m³ augmenten molt de nombre al dipòsit, degut a que els blocs de mides grans en generen molts de petits al disgregar-se o fragmentar-se. Aquesta comparació en termes absoluts, en nombre de blocs, es pot dur a terme ja que s'estan comparant distribucions obtingudes a partir de volums totals semblants, com ho són els 8.000 m³ de la tartera (PBSD) i els 10.000 m³ del volum de control utilitzat per generar la IBSD.

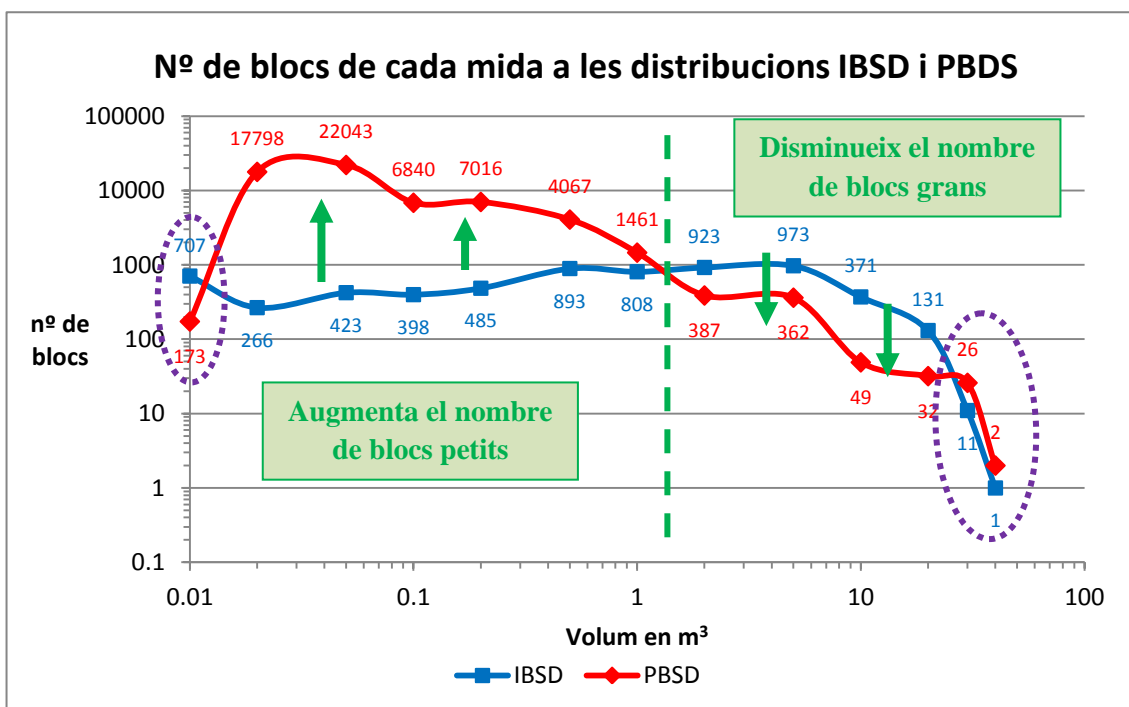


Fig. 114: Nombre de blocs de cada classe de volum definida de les distribucions IBSD (paret rocosa) i PBSD (dipòsit del despreniment).

A més a més del comportament esperat, en una reducció del nombre de volums de mides grans i un augment del nombre de blocs de volums menors, també es poden observar els errors associats a les metodologies utilitzades per obtenir les distribucions IBSD i PBSD marcats a la Fig. 114 amb marques liles puntejades.

Per una banda, en els blocs de grans dimensions, 30 m³ i 40 m³, s'observa un nombre major de blocs en el dipòsit (PBSD) que a la paret rocosa (IBSD) fet completament impossible, però que es produeix de la utilització de persistències infinites en la metodologia de tall del volum de control que s'ha seguit per generar la IBSD. Com ja s'ha comentat anteriorment, les persistències de les juntes són molt més rellevants en la delimitació de blocs i els seus volums en les dimensions majors.

Per altra banda, **en les mides de blocs més petites s'observa el contrari, que hi ha més blocs petits, de 0.01 m^3 a la paret rocós (IBSD) que a la tartera (PBSD)**, altra vegada impossible, i altre vegada fruit d'aspectes metodològics, ja que **els blocs obtinguts a la simulació de la paret s'han pogut llistar tots (fins mides de 10^{-7} m^3)**, mentre que **a les mesures de camp, el volum mínim mesurat i que s'ha pogut ajustar bé a les lleis de distribució de volum és de $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$** generant un dèficit en mides menors per a la construcció de la PBSD.

De fet, a priori, no es coneix quin és el volum mínim que s'està mesurant amb suficient precisió, és a dir, a partir de quin volum mínim ja no s'estan mesurant tots els blocs existents. Aquest volum mínim s'estima a partir de l'ajust de les lleis de distribució a les dades (C. Dussage et al., 2003), com s'ha fet una vegada s'ha obtingut la llei de distribució potencial dels blocs de la tartera (PBSD). En aquest ajust s'ha obtingut un volum mínim de 0.016 m^3 , a partir del qual ajustar la distribució de volums a una llei potencial (Eq. 6). A més, també s'ha truncat la llei obtinguda amb un volum màxim per ajustar-la millor als valors mesurats (Eq. 8)

De cara a la interpretació per establir una llei de fragmentació, basada en la transformació d'una distribució de volums de blocs al massís rocós (IBSD) a una distribució afectada per la propagació i fragmentació dels blocs (PBSD) cal tenir en compte els següents aspectes:

-Quan un bloc rocós pateix un impacte dinàmic al caure contra el terreny, el primer mecanisme de fragmentació és la disgregació per les juntes ja existents, ja que és el mecanisme que requereix menys energia (Crosta et al., 2007). El següent mecanisme de fragmentació és la propagació de juntes no persistents a través de la roca matriu, on l'energia requerida és funció de la superfície de ruptura propagada pel bloc. El tercer mecanisme, en ordre d'energia necessària, és la fractura nova de la roca mare, que pot seguir les anisotropies pròpies de la litologia i aprofitar-se de les discontinuïtats preexistents per iniciar o acabar la propagació de la nova fractura.

-L'energia dissipada en la fragmentació dels blocs redueix l'energia cinètica restant. L'energia requerida per la fragmentació sovint es considera proporcional al increment de superfície de ruptura, amb una constant K , proporcional a la resistència de la roca i a un terme associat a l'energia tèrmica dissipada.

-La fragmentació no es produeix igual a diferents escales, tot i que els seu resultat pugui ser una distribució de volums potencial. Com s'infereix de les distribucions de volums de blocs obtingudes (Fig. 113) i dels nombres de blocs generats i destruïts (Fig. 114), els blocs de major mida es veuen més afectats per la fragmentació generant un major nombre de blocs de mida menor, que a la vegada també es veuen afectats per la fragmentació però en menor mesura. Com major és la mida d'un bloc, major és la probabilitat de que contingui juntes persistents o no persistents que facilitin la seva fragmentació amb una menor energia. A la vegada, un volum major també comporta una major energia inicial i major probabilitat de poder dissipar l'energia necessària per fragmentar el bloc, tant sigui aprofitant les discontinuïtats o trencant de nou la roca mare amb generació de noves fissures.

En aquest sentit, al proper capítol 8 s'abordan les futures línies d'investigació, on es descriuran els següents passos interessants a realitzar en base als resultats obtinguts, i s'abordan les possibles millores metodològiques en base a l'experiència adquirida.

8. Resum i Conclusions

En el present treball de final de màster, s'ha estudiat **el fenomen de la fragmentació de blocs rocosos en un desprendiment de la Serralada del Cadí**. S'ha dut a terme una **estimació de les distribucions de volums de blocs abans i després del desprendiment** per observar com afecta el fenomen de la fragmentació sobre elles. En un principi, s'esperava que la mida dels blocs es reduiria per efecte de la ruptura d'aquests generant blocs de menors dimensions. A grans trets, s'ha pogut observar com els blocs de majors dimensions es veuen afectats per la fragmentació i es veuen reduïts en nombre i en el volum total que suposen, mentre que el nombre i volum total de blocs menors ha augmentat.

Per dur a terme aquest estudi s'han realitzat una sèrie de **treballs de camps que han comportat la mesura de les dimensions de més de 1.500 blocs**, així com la caracterització de la tartera i de la resta del dipòsit amb blocs puntuals d'un abast major.

S'ha diferenciat la mesura de blocs en **dues tipologies**: **a)** Per una banda s'han mesurat 275 blocs com a "blocs puntuals". Aquests són **els blocs de majors dimensions**, que es trobaven fora de la tartera pròpiament, vessant avall, o al canal lateral de la tartera, i també s'hi han inclòs blocs de grans dimensions que es troben dins de la tartera però amb unes dimensions molt majors que els blocs del seu entorn més pròxim. **b)** Per altra banda, la tartera suposa una manta de blocs d'uns 30.000 m², de manera que s'han utilitzat 6 parcel·les de mostreig dins de les quals s'han mesurat tots els blocs al seu interior. S'han mesurat més de 1200 blocs en sis parcel·les que sumen una superfície de 875 m². Cada una de les parcel·les és representativa d'una regió obtinguda a partir d'una cartografia de zonificació de la tartera en funció de la textura i de la mida de bloc característica.

Amb les mesures de volums de blocs fetes a camp s'ha aconseguit extrapolar una distribució de volums de blocs del dipòsit, anomenada PBSB (Propagated Block Size Distribution), que representa la distribució de volums de blocs que s'han propagat des de la paret rocosa i han patit certa fragmentació.

La PBSB obtinguda segueix una llei potencial (Fig. 112), fet que permet certa interpretació des d'un punt de vista fractal, amb un comportament autosemblant, o *scale-invariant*, és a dir, que la distribució de volums de blocs es manté més o menys constant a diferents ordres de magnituds de volums. Aquest comportament es caracteritza pel pendent de la llei potencial ajustada a les dades obtingudes, i que en aquest cas és de 1.053, amb un error mínim quadràtic de l'ajust utilitzat del 0.98.

Tot i això, la **distribució obtinguda està truncada**. **Inferiorment, la PBSB està truncada degut a que el mostreig realitzat a camp té un volum mínim de bloc** que es mesura amb suficient representativitat, que en aquest cas **es de 0.016 m³**. **Superiorment, la PBSB està truncada pel volum màxim mesurat a camp de 41 m³**, que a la vegada ha de ser un volum màxim que es pugui formar a la paret rocosa com a producte de la intersecció de la xarxa de fractures present al massís.

El volum del desprendiment estimat a partir de les mesures de camp és d'uns 8.000 m³, però es considera raonable estimar **el volum total del desprendiment de l'ordre dels 10.000 m³**, ja que hi ha un important volum de blocs menors de 0.016 m³ que no s'han pogut mesurar degut a les seves petites dimensions.

Per altra banda, **es desitjava comparar la distribució obtinguda amb la distribució de volums de blocs in situ (IBSD)**, és a dir, la que es troba al paret rocosa abans de que els blocs caiguin, es propaguin vessant avall i es fragmentin. L'objectiu fonamental era comparar les dues distribucions de volums de blocs, la IBSD (abans del despreniment) i la PBSD (després del despreniment)

Per obtenir la IBSD es pretenia realitzar un mesura de les juntes mitjançant un scanline a la zona de sortida de blocs, **però l'elevada perillositat impedia fer-ho**, i la mesura a peu de la paret rocosa no era representativa de la zona de sortida de blocs degut a un gran encavalcament que modifica fortament el sistema de fractures del massís de forma local.

Per aquest motiu, **s'ha decidit utilitzar tècniques fotogramètriques** amb les que s'ha generat un **model digital de la paret rocosa** amb fotografies preses amb una càmera Nikon D90 i el programa *Agisoft StereoScan*. Una vegada escalat i georreferenciat el model, **s'han identificats les discontinuïtats de forma automàtica** amb el programa *CloudCompare* i de forma manual amb el programa *Rhinoceros*.

S'ha modelat manualment el sistema de fractures del massís rocós a la zona de sortida del despreniment, considerant uns plans característics de cada una de les família identificades. **Amb un total de 5 famílies, s'han modelat 103 juntes amb uns espaiats mínims de 23 cm i màxims de 4 a 6 m**, totes elles **amb una persistència infinita**. S'ha utilitzat aquest model de fractures del massís per tallar un volum de control de 10.000 m³. S'ha pres aquest volum ja que és el volum inferit de les mesures de camp realitzades i de l'extrapolació de les dades de volums.

En un inici s'havia calculat el volum del despreniment combinant la superfície obtinguda del model digital de la paret rocosa després del despreniment (obtinguda amb tècniques fotogramètriques), i la superfície topogràfica abans del despreniment, de la que es disposava en una cartografia topogràfica a escala 1:5000. Però la falta de precisió de la superfície topogràfica a escala 1:5000 feia sobreestimar el volum estimant-lo en uns 25.000 m³.

La IBSD obtinguda, mostra que els volum de blocs a la paret segueixen un distribució exponencial (Fig. 112), segons un ajust a una funció d'aquesta tipologia amb un error mínim quadràtic del 0.93. Cal dir que aquesta distribució està esbiaixada per dos motius: a) Per una banda, es podria millorar la capacitat d'identificació de juntes amb espaiats menors. I b), per altra banda l'ús d'una persistència infinita ja ha sigut estudiada per (M.K. Elmouttie et al., 2011) i altres autors, on queda evident que les persistències afecten sobretot a la generació de blocs de grans dimensions.

En aquest sentit, en endavant, caldrà millorar la caracterització del sistema de fractures utilitzat incorporant una millor caracterització de la persistència de les juntes. Però també cal dir, que **els blocs de majors dimensions obtinguts a la simulació de la paret rocosa (IBSD) s'ajusten als blocs màxims mesurats al dipòsit (PBSD), al volant dels 46 m³ i 41 m³ respectivament.**

S'han comparat les distribucions obtingudes (Fig. 112) així com les variacions en els nombres de blocs de diferents mides (Fig. 114). De la Fig. 112 s'interpreta que la distribució de volums de blocs en origen, a la paret rocosa (IBSD) segueix una distribució exponencial, mentre que la distribució de volums de blocs al dipòsit segueix clarament una llei potencial, com s'ha demostrar també amb les sis parcel·les de mostreig realitzades.

S'ha ajustat una llei potencial a la PBSD amb un error quadràtic mínim del 0.93 i del 0.98 per la llei exponencial ajustada a la IBSD,.

De la Fig. 114 s'interpreta que el nombre de blocs de dimensions majors a un metre cúbic, es veu reduït per efecte de la propagació i de la fragmentació que pateixen, generant un major nombre i volum total de blocs de dimensions menors d'un metre cúbic.

CONCLUSIONS :

- **S'ha aconseguit obtenir la IBSD i la PBSD**, fet que permet quantificar el fenomen de la fragmentació.

- **S'ha dissenyat un procediment de mesura de blocs al dipòsit** basat en parcel·les de mostreig, que han permès estimar el volum del despreniment i la distribució de volums de blocs propagats que ocupen una superfície de més de 30.000 m². S'han mesurat més de 1.500 blocs amb els que s'ha generat una distribució formada per més de 60.000 blocs.

- Per altra banda, **s'ha proposat una metodologia per obtenir la distribució de volums de blocs a la paret rocosa**, basada en generar un model digital de la paret per caracteritzar-ne les famílies de discontinuïtats, amb les que s'ha tallat un volum de control generant més de 6.000 blocs i estimant la distribució de volums de blocs al massís.

-**S'ha observat com el fenomen de la fragmentació fa disminuir el nombre de blocs de grans dimensions a favor d'un important increment del nombre de blocs de petites dimensions**, com era d'esperar a priori. En concret, s'ha observat una **reducció en el volum total i en nombre dels blocs de mida superior al 1 m³**, així com un **augment en el volum total i en nombre dels blocs de mida inferior al 1 m³**.

- La distribució de volums de blocs del dipòsit (PBSD), **s'ajusta a una llei potencial amb un exponent de 1.053 i un R² del 0.98**, definint-lo com un bon ajust. La distribució de volums de blocs a la paret rocosa (IBSD), **s'ajusta a una llei exponencial amb un R² del 0.93**, definint-lo també com un bon ajust.

- **La conversió d'una IBSD a una PBSD no és un tema trivial**, i caldrà seguir treballant per obtenir lleis de fragmentació empíriques, basades en estudis com el present en diferents condicions litològiques, geomecàniques i topogràfiques

- **Cal millorar alguns aspectes metodològics** de cara a millorar les precisions i els ordres de magnituds de mesura, així com millorar la seguretat durant les tasques de camp.

- Caldrà realitzar una aproximació a les lleis de fragmentació desitjades des d'un punt de vista energètic, contemplant les energies potencials i cinètiques del bloc durant la seva trajectòria, i l'energia de fragmentació necessària per crear nous blocs.

- Per dur a terme un anàlisi quantificat del risc, cal ajustar les relacions magnitud - freqüència dels volums de blocs que poden desprendre's i arribar a cert punt. En aquests sentit, és del tot rellevant l'estudi del fenomen de la fragmentació per millorar les estimacions del risc en front a despreniments rocosos, sobretot quan aquests es duen a terme de forma quantificada. A llarg termini, pot ser interessant dissenyar elements de mitigació del risc basats en la dissipació d'energia dels blocs rocosos en base a facilitar la seva fragmentació, reduint el volum màxim dels blocs majors i el seu nombre.

9. Futures línies d'investigació

L'estudi de la fragmentació de blocs en desprendiments és un camp en el que queda molta feina per fer degut al gran nombre de variables que intervenen en el fenomen de fragmentació de la massa. S'ha estudiat com afecten les discontinuïtats, que són una geometria preferencial per on dividir els blocs. Per altra banda també influeix l'energia d'impacte on intervé l'altura de l'últim salt de la trajectòria així com la massa i la forma del bloc i el terreny sobre el que impacte. Alguns estudis han observat la variació de la fragmentació en funció de l'angle de càrrega del bloc respecte les anisotropies pròpies de la roca (A. Tavallali et al., 2010).

Caldrà estudiar des d'un punt de vista energètic el fenomen de la fragmentació de cara a estimar l'energia dissipada en la fragmentació dels blocs en base a les diferents teories existents, tant des d'un punt de vista de la mecànica de fractures, com a partir de lleis empíriques existents en el món de les voladures en explotacions mineres. L'estimació de l'energia potencial inicial i de l'energia cinètica en els diferents punts de la propagació dels blocs són més fàcilment estimables, i es poden utilitzar per calcular els balanços energètics i acotar l'energia dissipada en fragmentar els blocs, juntament amb les pèrdues energètiques associades a la propagació de fissures (A. Giacomini et al., 2009).

Caldrà també realitzar plantejaments probabilístics, ja que existeixen moltes variables aleatòries que controlen els resultats finals de la fragmentació. Per exemple, hi ha un gran grau d'incertesa amb el punt exacte del bloc que impacte contra el terreny, les seves formes i el vector de velocitats resultants, tot i que aquest es pot acotar, es pot veure fortament afectat per un procés de fragmentació en l'impacte. Altres aspectes molt aleatòries és la relació geomètrica entre els vectors de les forces d'impacte i les juntes i les anisotropies de la roca, que també poden modificar el resultat. En aquest sentit, l'ús d'alguns conceptes de la teoria fractals podria ajudar a incorporar els aspectes més probabilístics al grau de fragmentació resultant de cada impacte com planteja (Perfect, 1997).

Proposta de millores a la metodologia utilitzada:

En el present estudi s'han realitzat procediments on la precisió obtinguda no és la més adequada, com ho pot ser la identificació de les discontinuïtats sobre el model digital de la paret rocosa, on caldria millorar tant la pròpia identificació dels espaiats mínims detectables, com la definició de la persistència de les juntes, així com la pròpia precisió del model digital generat.

Per altra banda, el procediment de mesura de blocs en el dipòsit ha sigut tant exhaustiu com les circumstàncies ho han permès, tenint en compte que s'ha treballat durant dies sencers en una zona d'elevat risc i que s'han aconseguit mesurar més de 1500 blocs.

En aquest sentit, per millorar la precisió i millorar la qualitat de les dades amb les que es treballa seria fonamental la utilització d'un conjunt de millores tecnològiques. El plantejament s'engloba en la idea de que es desitja realitzar un nombre elevat d'inventari de desprendiments rocosos en diferents circumstàncies, fet que implica una major eficiència en les metodologies de mesura i una reducció de l'exposició al risc durant les tasques de camp.

Es proposen les següent tècniques i tecnologies per modificar la metodologia i millorar-ne els resultats:

1- La construcció d'un vehicle aèria no tripulat amb una càmera fotogràfica de certes prestacions per obtenir imatges tant de la zona font, el massís rocós, com de la zona d'acumulació de blocs. **Un vehicle aeri no tripulat (VANT)**, amb una capacitat de càrrega al voltant del 1 kg i 1.8 kg, **pot portar una càmera amb una òptica suficientment bona com per prendre imatges i utilitzar tècniques fotogramètriques** per obtenir un **bon model digital del massís** (Fig. 115). Per altra banda, el dispositiu VANT també **es pot utilitzar per prendre imatges de la zona d'acumulació de blocs** per tal de realitzar les mesures de mides de blocs en base a les imatges obtingudes.



Fig. 115: Vehicle aeri no tripulat (VANT) model S800 de la marca DJI, amb una càmera SONY NEX.

2- Per millorar els resultats en la precisió del model digital d'un front rocós, caldrà utilitzar programari fotogramètric més potent que el que s'ha utilitzat. Avui en dia, existeixen programes fotogramètriques que a més a més de generar el model tridimensional de la paret, tenen mòduls d'anàlisi de discontinuïtats amb els que es pot anar obtenint directament les orientacions i cabussaments de les juntes, així com els seus espaiats i alguns criteris de persistència. Alguns d'aquest programes més coneguts són el *3DManalyst*, i el *Sirovision*, ambdós d'empreses australianes i molt utilitzats en el camp de la mineria pel control de volums d'explotació i per la caracterització de les famílies de discontinuïtats.

3- Tot i la millor caracterització del model digital i de les discontinuïtats identificables mitjançant les imatges aèries i un programari més potent, també caldrà realitzar modelitzacions de la xarxa de fractures del massís considerant la persistència amb diferents criteris probabilístics. Alguns d'aquest models es poden dur a terme mitjançant models de simulació de Monte Carlo o amb mètodes d'elements discretes com el *3DEC* de l'empresa Itasca.

4- Per reduir l'exposició al risc en front a desprendiments rocosos durant les tasques de mesura de blocs, es poden utilitzar les imatges obtingudes amb un VANT de la zona d'acumulació de blocs. Existeix programari de càlcul de distribucions de volums de blocs a partir de tractament d'imatges ràster, com els que s'utilitzen en processos industrials miners per a la mesura de volums i diàmetres de blocs.

Alguns dels programes mes coneguts que són capaços d'obtenir corbes de distribució de volum a partir del tractament d'imatges ràster són: *Split-FX*, *WipFrag*, *GoldSize*, *FragScan*,

PowerSieve i *WIEP* entre d'altres. Aquestes programes necessiten escalar les imatges i la seva distorsió quan la imatge no és completament ortogonal a la superfície sobre la que descansen els blocs. Per altra banda, el que fa el programa és delimitar els blocs i calcular-ne les dimensions, de manera que cal aplicar algunes hipòtesis per convertir les superfícies mesurables a les imatges en volums de blocs extrapolats.

5- Tot i les millores tecnològiques proposades, cal dir que seria interessant la mesura manual de les discontinuïtats del massís mitjançant tècniques tradicionals com l'scanline per poder validar les mesures obtingudes amb els sistemes geodèsics i les tècniques fotogramètriques. En el cas d'estudi mostrat a la present tesina ha sigut impossible fer mesures directes sobre el front rocós degut a la seva difícil accessibilitat. Però si es desenvolupen i s'utilitzen les tècniques citades, caldrà dur a terme un procés de validació i presa de confiança amb les tècniques, calibrant-les i validant-les abans de confirmar-ne els resultats. En aquest sentit, es podria millorar molt la precisió dels resultats del treball present.

En termes generals, es considera que **és molt important la realització de nous inventaris i anàlisis de desprendiments rocosos en diferents condicions litològiques, geomecàniques, i topogràfiques**. Inventaris amb major informació que els inventaris precedents, on cal mesurar els volums dels blocs i les seves posicions, els impactes i les trajectòries, així com una bona caracterització del massís rocós i el seu sistema de fracturació.

Algunes dades interessants de mesurar podria ser el nombre de cares dels blocs majors de certa àrea, i a la vegada caracteritzar-los en tipologies, com podria ser-ho distingir entre cares de ruptura fresques, jutes preexistents, plans de falla o superfícies molt esglaonades entre famílies de juntes i cares de ruptura fresques. Però prendre aquestes dades és gairebé impossible amb tècniques com les utilitzades a la present tesina, en les que s'han mesurat un nombre tant elevat de blocs a mà. Aquests dades es podrien prendre en desprendiments de menors dimensions, com el cas del desprendiment d'Omells de Na Gaia mostrat a la Fig. 12.

Per obtenir informació sobre el tipus de cara que delimita els blocs en un gran dipòsit, caldria utilitzar un programa de tractament d'imatges com el *ImageJ* o similar, per filtrar les tipologies de cares en funció dels colors o la textura i calcular-ne l'àrea, com a mínim de les cares de blocs visibles en les fotografies.

A llarg termini, caldrà inventariar diferents desprendiments en un ampli ventall de condicions de contorn amb **l'objectiu d'obtenir relacions empíriques de fragmentació en desprendiments rocosos**. Amb un major coneixement de la fragmentació d'un massís en concret, **es poden dissenyar elements de mitigació del risc basats en reduir la perillositat** del desprendiment utilitzant la fragmentació dels blocs. La fragmentació implica una dissipació d'energia de forma natural que es pot ampliar promovent-la amb elements que produeixin una major fragmentació dels blocs al impactar contra ells.

Cal trobar l'equilibri entre els blocs de grans dimensions que poden desenvolupar llargues trajectòries amb energies d'impacte molt elevades, i un augment del nombre de blocs d'unes dimensions menors, amb un menor abast i energia individualment, però en major nombre i per tant una major dispersió espacial. L'anàlisi de la fragmentació en desprendiments rocosos pot permetre adaptar millor les mesures de mitigació del risc com les pantalles dinàmiques i els murs de protecció. En aquest sentit, caldria vincular els resultats a un índex de fragmentació semblant als que s'utilitzen en criteris de voladures en les explotacions mineres.

10. Referències bibliogràfiques

- Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455–471. doi:10.1016/S1365-1609(03)00021-2
- Bagde, M. N., Raina, A. K., Chakraborty, A. K., & Jethwa, J. L. (2002). Rock mass characterization by fractal dimension. *Engineering Geology*, 63(1-2), 141–155. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V63-44MFN76-D/2/6ac9fb4d23dbc1a6b75b98ba49ee58d0>
- Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F., & Darve, F. (2009). Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110(3-4), 68–79. doi:10.1016/j.geomorph.2009.03.017
- Chau, K. T., Wong, R. H. C. & Wub, J. J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sciences*. 39: 69-77.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. doi:10.1137/070710111
- Copons, R. 2004. Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principat d'Andorra), PhD Thesis, UB, Barcelona
- Corominas J., Mavrouli O., Santana D., & Moya J. (2012). Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. *XI Int. Symposium on Landslides, Banff, Canada*.
- Corominas J., Mavrouli O., Moya J., R. R. (2013). Metodología para la Evaluación Cuantitativa del Riesgo por desprendimientos de rocas en escala específica y local. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*.
- Crosta, G. B. & Agliardi, F. (2003). A methodology for physically-based rockfall hazard assessment, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407–422
- Crosta, G. B., Frattini, P., & Fusi, N. (2007). Fragmentation in the Val Pola rock avalanche, Italian Alps. *Journal of Geophysical Research*, 112(F1), F01006. doi:10.1029/2005JF000455
- Dussauge, C., Grasso, J.-R., & Helmstetter, A. (2003). Statistical Analysis of Rock Fall Volume Distributions: Implications for Rock Fall Dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 108 B6, 2286.
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, a., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., & Giraud, a. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2(1/2), 15–26. doi:10.5194/nhess-2-15-2002
- Elmouctie, M. K., & Poropat, G. V. (2011). A Method to Estimate In Situ Block Size Distribution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 401–407. doi:10.1007/s00603-011-0175-0

- Estay, D. a., & Chiang, L. E. (2013). Discrete crack model for simulating rock comminution processes with the Discrete Element Method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 125–133. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.12.041
- Firpo, G., Salvini, R., Francioni, M., & Ranjith, P. G. (2011). Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(7), 1045–1054. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.07.007
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., & Agliardi, F. (2008). Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94(3-4), 419–437. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.037
- Giacomini, a., Thoeni, K., Lambert, C., Booth, S., & Sloan, S. W. (2012). Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 171–181. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.07.030
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B., & Giani, G. P. (2009). Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), 708–715. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.09.007
- Giani, G.P, Giacomini, A, Migliazza, M & Segalini, A. (2004). Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design. *Rock Mech Rock Eng* 37:369–389
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., Perugia, I., Alta, M., Bicocca, M., et al. (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1079–1093. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300402000250>
- Guzzetti, F., Malamud, B. D., Turcotte, D. L., & Reichenbach, P. (2002). Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3-4), 169–183. doi:10.1016/S0012-821X(01)00589-1
- Haneberg, W. C., Norrish, N. I., Engineers, N. R., & Findley, D. P. (2006). Digital Outcrop Characterization for 3-D Structural Mapping and Rock Slope Design Along Interstate 90 Near Snoqualmie Pass , Washington. *Proceedings 57th Annual Highway Geology Symposium, Breckenridge, Colorado* (pp. 27–29).
- Heping Xie, D. J. S. (1995). Fractals kinematics of crack propagation in geomaterials. *Engineering Fracture Mechanics*, 50, 529–536.
- Jaboyedoff M., Dudt, J.P. & Labiouse, V. (2005). An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5: 621–632.
- Janeras, M.; Palau, J.; Prat, E., Jons, J., Rodríguez, H., Martínez, P. and Comellas, J. (2013). Valoración de 10 años de mitigación del riesgo de caída de rocas en el cremallera de Montserrat. A E. Alonso, J. Corominas i M. Hürlimann (eds.). *VIII Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca. Vol 2*: 624-636

- Joughin, W. C., Nezomba, E., Rwodzi, L., & Jager, A. (2011). *Rockfall Elimination Track B Managing the risk and the value of safety spending Volume I*.
- Khezzzadeh H., Mofid M. (2006). Tensile fracture behavior of heterogeneous materials based on fractal geometry. *Theoretical and Applied fracture Mechanics*, 46, 46–56.
- Kim, B. H., Cai, M., Kaiser, P. K., & Yang, H. S. (2006). Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(2), 169–192. doi:10.1007/s00603-006-0093-8
- Kruhl, J. H. (2013). Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: A special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 46, 2–21.
- Llasat, M.C. and Corominas, J. (2010). Riscos associats al clima. In Llebot, J.E. (ed.) *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Generalitat de Catalunya- Institut d'Estudis Catalans. Barcelona*. pp. 243-307
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687–711. doi:10.1002/esp.1064
- Pal, S. K., & Chakravarty, D. (2003). Rock-mass Characterization using Fractals. *National Conference on Nonlinear Systems & Dynamics* (pp. 217–220).
- Perfect, E. (1997). Fractals models for the fragmentation of rocks and soils: a review. *Engineering Geology*, 48, 185–198.
- Pickering, G., Bull, J. M., & Sanderson, D. J. (1995). Sampling power-law distributions. *Tectonophysics*, 248(1-2), 1–20. doi:10.1016/0040-1951(95)00030-Q
- Priest, S.D. 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman and Hall, London, 473.
- Priest, S.D., Hudson, J.A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomechanics Abstracts*, 18:183-197.
- Salvini, R., Francioni M., Riccucci S., F. Bonciani, I. C. (2013). Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola Iselle railway, the Italian Alps. *Geomorphology* 185 (2013) 110-122.
- Sturzenegger M., Stead D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106, 163–182.
- Tavallali, A., & Vervoort, A. (2010). Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2), 313–322. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.01.001
- Turcotte, D. L. (1990). Implications of chaos, scale-invariance, and fractal statistics in geology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(3), 301–308. doi:10.1016/0031-0182(90)90071-E

- Turcotte, D. L. (2007). Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. *Geomorphology*, 91(3-4), 302–310. doi:10.1016/j.geomorph.2007.04.016
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. a., et al. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2617–2651. doi:10.5194/nhess-11-2617-2011
- Wang, Y. (2009). *Three-dimensional rock-fall analysis with impact fragmentation and fly-rock modeling*. Tesi doctoral defensada a la Universitat de Texas, Austin.
- Wang, Y., & Tonon, F., (2010). Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis. *Rock Mech Rock Eng* 44:23–35.
- Whittles, D. N., Kingman, S., Lowndes, I., & Jackson, K. (2006). Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation. *Minerals Engineering*, 19(14), 1418–1429. doi:10.1016/j.mineng.2006.02.004
- Xie, H., Sun, H., Ju, Y., & Feng, Z. (2001). Study on generation of rock fracture surfaces by using fractal interpolation q, 38(50074032), 5765–5787.
- Zhang ZX, Kou SQ, Jiang LG & Lindqvist PA. (2000). Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *Int J Rock Mech Min Sci* 37:745–762

Pàgines webs:

- Pàgina web de l'empresa Adam Technologies: <http://www.adamtech.com.au/3dm/Analyst.html>
Consultada per última vegada el 2 de desembre del 2013.
- Pàgina web de l'empresa EcorisQ: <http://www.ecorisq.org/> Consultada per última vegada el dia 2 de desembre del 2013.
- Pàgina web de l'empresa Geo&Soft: <http://www.geoandsoft.com/> Consultada per última vegada el dia 2 de desembre del 2013.
- Pàgina web de l'Institut Cartogràfic de Catalunya: <http://www.icc.cat/> Consultada per última vegada el dia 2 de desembre del 2013.
- Informe titulat "*Port Hills 3D Rockfall modelling report, Christchurch, New Zealand*", realitzat per l'empresa Geovert, i extret de la pàgina web de la "*Canterbury Earthquake Recovery Authority*" (CERA): <http://cera.govt.nz/port-hills-3d-rockfall-modelling-report>
Consultada per última vegada el dia 2 de desembre del 2013.
- Pàgina web del diari digital Vilaweb: <http://www.vilaweb.cat/> Consultada per última vegada el dia 2 de desembre del 2013.

11. Annexos

11.1 Annex 1: Fitxes de camp

ANNEX 1: FITXES DE CAMP

Títol de l'estudi:	
---------------------------	--

Data:		Fitxa num:
Tipo. Mostra:		

Litologia:	
-------------------	--

Estructura:	
--------------------	--

Localització:	
Id	
nº bloc	
X	
Y	
Z	
Foto	

Geometria:	
D1	
D2	
D2	
Vol. Prism.	
Diàmetre	
Vol. Esf.	

Plans del bloc: nº de cares		
Totals	Preexistents	Fresques

Relacions espacials entre plans		

Descripció	
Morfologia	

Títol de l'estudi:	
---------------------------	--

Data:		Fitxa num:
Tipo. Mostra:		

Litologia:	
-------------------	--

Estructura:	
--------------------	--

Localització:	
Id	
nº bloc	
X	
Y	
Z	
Foto	

Geometria:	
D1	
D2	
D2	
Vol. Prism.	
Diàmetre	
Vol. Esf.	

Plans del bloc: nº de cares		
Totals	Preexistents	Fresques

Relacions espacials entre plans		

Descripció	
Morfologia	

Títol de l'estudi:	
---------------------------	--

Data:		Fitxa num:
Tipo. Mostra:		

Litologia:	
-------------------	--

Estructura:	
--------------------	--

Localització:	
Id	
nº bloc	
X	
Y	
Z	
Foto	

Geometria:	
D1	
D2	
D2	
Vol. Prism.	
Diàmetre	
Vol. Esf.	

Plans del bloc: nº de cares		
Totals	Preexistents	Fresques

Relacions espacials entre plans		

Descripció	
Morfologia	

SAMPLE PLOTS: PARCEL·LES							CODI_Parcel·la	
x		x		x		x		
y		y		y		y		
D1	D2	D3	Vol	D1	D2	D3	Vol	

SAMPLE PLOTS: PARCEL·LES							CODI_Parcela	
x		x		x		x		
y		y		y		y		
D1	D2	D3	Vol	D1	D2	D3	Vol	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

IMPACTES	
CODI	
x	
y	
z	
diam	
prof	
Foto	
Foto_bd	
Obs.	

TRAJECTÒRIES		
CODI_TRAJ		
Punts d'impactes		
1	x	
	y	
	z	
2	x	
	y	
	z	
3	x	
	y	
	z	
4	x	
	y	
	z	
5	x	
	y	
	z	
6	x	
	y	
	z	
7	x	
	y	
	z	
8	x	
	y	
	z	
9	x	
	y	
	z	
10	x	
	y	
	z	

TRAJECTÒRIES		
CODI_TRAJ		
Punts d'impactes		
1	x	
	y	
	z	
2	x	
	y	
	z	
3	x	
	y	
	z	
4	x	
	y	
	z	
5	x	
	y	
	z	
6	x	
	y	
	z	
7	x	
	y	
	z	
8	x	
	y	
	z	
9	x	
	y	
	z	
10	x	
	y	
	z	

TRAJECTÒRIES		
CODI_TRAJ		
Punts d'impactes		
1	x	
	y	
	z	
2	x	
	y	
	z	
3	x	
	y	
	z	
4	x	
	y	
	z	
5	x	
	y	
	z	
6	x	
	y	
	z	
7	x	
	y	
	z	
8	x	
	y	
	z	
9	x	
	y	
	z	
10	x	
	y	
	z	