

DESENCADENAMENT ACCIDENTAL DE PLAQUES. NOUS CONCEPTES, RECERCA I APLICACIÓ AL PIRINEU.

Ivan Moner¹, Jordi Gavaldà¹, Glòria Martí², Carles Garcia²

¹ Dept. Tècnic, Conselh Generau
d'Aran, Pg. dera Libertat 16, 25530
Vielha

² Servei Meteorològic de Catalunya,
C/Berlín núm. 38-48 4a, 08029
Barcelona

RESUM

El desencadenament accidental de plaques de vent és responsable de més del 80 % dels accidents per allau que es produeixen al Pirineu de Catalunya (font: ICC). És aquest, per tant, un fenomen que cal que coneguem a fons per tal de reduir l'accidentalitat a les nostres muntanyes. Com el pes d'un esquiador pot fer lliscar una acumulació de vent de diversos milers de tones? Com i perquè es produeixen desencadenaments a distància, quan l'esquiador transita per una zona sense pendent? Què són els whumpfs? I, sobretot, què podem fer per valorar l'estabilitat d'un vessant? Són preguntes que en els darrers anys s'han abordat des de diferents àmbits i què poc a poc van obtenint resposta. A continuació es presenta un breu estat de l'art del desencadenament accidental de plaques, seguint el fil de les investigacions de les escoles suïssa i canadenca, que pretén servir de guia per accedir a la bibliografia especialitzada, molt abundant els darrers anys. Finalment es provarà la sistemàtica proposada sobre les dades que es disposa de desencadenaments accidentals al Pirineu Català, i se'n trauran unes primeres conclusions junt amb una proposta metodològica.

RESUMEN

El desencadenamiento accidental de placas de viento es responsable de más del 80% de los accidentes por avalancha que se producen en el Pirineo de Catalunya (fuente: ICC). Es este, por lo tanto, un fenómeno que hemos de conocer a fondo para reducir la accidentalidad en nuestras montañas. ¿Cómo el peso de un esquiador puede hacer deslizarse una placa de viento de varios miles de toneladas? ¿Cómo y por qué se producen los desencadenamientos a distancia, cuando el esquiador transita una zona sin pendiente? ¿Qué son los whumpfs? Y, sobretodo, ¿qué podemos hacer para valorar la estabilidad de una ladera? Son preguntas que en los últimos años se han abordado desde distintos ámbitos y que poco a poco van obteniendo respuesta. A continuación se presenta un breve estado del arte del desencadenamiento accidental de placas, siguiendo el hilo de las investigaciones de las escuelas suiza y canadiense, que pretende servir de guía para acceder a la bibliografía especializada, muy abundante los últimos años. Finalmente se probará la sistemática propuesta sobre los datos de que se dispone de desencadenamientos accidentales en el Pirineo Catalán, y se sacarán unas primeras conclusiones junto con un propuesta metodológica.

CAPA FEBLE

Es dóna per acceptat que el desencadenament d'una placa de vent seca s'inicia amb la ruptura per cisallament d'una fina capa feble (o d'una interfase) subjacent una placa relativament gruixuda i cohesiva (McClung & Schaerer, 1993). Tenint en compte que la resistència de la neu és en general depenent del rati d'aplicació de la sobrecàrrega (Narita 1993), s'entén que per induir la fractura l'estrès de cisalla de la placa ha de

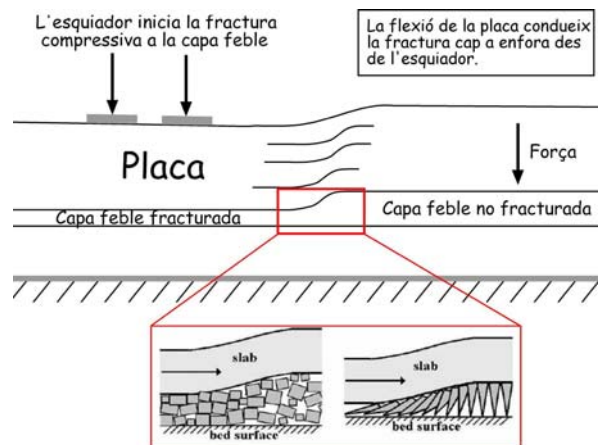
superar localment la resistència a la cisalla de la capa feble. Així doncs es produeix un desequilibri local que després ha de ser propagat, a través de la capa feble, fins atènyer un indret on la relació entre la tensió i la resistència lateral de la pròpia placa sigui màxima (McClung 1979). Existeixen zones dins de la mateixa capa feble on la resistència residual (resistència a la cisalla menys esforç de cisalla) és mínima, són els anomenats punts febles, i serà en aquestes àrees on s'iniciarà el desencadenament (Schweizer 1999).

Aquest enfocament resol de manera satisfactòria la qüestió del desencadenament de plaques *in situ*, però deixa sense atendre els desencadenaments a distància, on l'element que realitza la sobrecàrrega es pot trobar fora de la zona on el pendent, i per tant l'estrès de cisalla, són suficients per generar una allau. La literatura en aquest aspecte és menys abundant que en l'anterior, i ha estat represa amb èxit per un equip de la Univ. de Calgary (Johnson et al. 2000). El desencadenament s'iniciaria en aquest cas amb la fractura per compressió (no per cisallament) de la capa feble en el punt de desencadenament (indret on es realitza la sobrecàrrega). Això crearia una ona flexural a la placa que en propagar-se aniria col·lapsant la capa feble (fig. 1).



Figura 1: A dalt, fotografia del col·lapse d'una capa de gebre de superfície, presa al indret d'un whumpf. La fractura vertical s'estén fins a la superfície i indica l'àrea afectada (van Herwijnen 2005).

A la dreta, diagrama que mostra el col·lapse inicial d'una capa feble. La placa de es flexiona, proveint la força per progressivament fracturar la capa feble. (Mod. de Johnson et al 2000)



INESTABILITAT MECÀNICA/ESTRUCTURAL

Com s'ha vist per tots dos casos, l'existència d'una capa o interfície feble és clau per que es pugui produir el desencadenament accidental d'una placa seca. La resistència a la cisalla o a la compressió d'aquesta capa controlarà l'esforç que cal d'afegir perquè es produeixi la ruptura, és a dir, perquè *s'iniciï* la fractura. És el que anomenem **inestabilitat mecànica**. La capacitat de concentrar l'estrès de cisalla a la capa o interfase feble i així *propagar* lateralment aquesta fractura fins a produir el desencadenament d'una placa més o menys gran es coneix com **inestabilitat estructural**.

INESTABILITAT MECÀNICA

L'inestabilitat mecànica ha estat avaluada des de fa més de vint anys mitjançant els tests d'estabilitat. N'existeix una elevada diversitat, però en general consisteixen en aïllar un bloc de neu d'una mida determinada, de manera que només es suporti per la seva base, i sobrecarregar-lo progressivament fins produir la fractura. A Europa potser el més acceptat és el test del salt (rutschblock) (e.g. Schweizer 2002) (fig. 2). Al seu favor té que la major superfície testada resulta més representativa, mentre que la principal contra està en l'elevat temps d'execució. A Nord-Amèrica els tests de menor superfície, més ràpids però menys representatius, han estat millor acceptats. El test de compressió i el stuffblock o test de la bossa són els més utilitzats (Jamieson & Johnson 1997, Johnson & Birkeland 1994).

S'ha observat una correlació entre els resultats d'aquests tests i el desencadenament accidental de plaques, però l'ajust no és perfecte. És relativament freqüent que els tests sobreestimïn o subestimïn

Test del salt (rutschblock)			Dureses de mà
Valor	El bloc cau...	Estabilitat	
1	mentre s'aïlla	Escassa	1 → Pu → Puny
2	quan hi pugem	Escassa	2 → 4D → Quatre dits
3	al flexionar	Escassa	3 → 1D → Un dit
4	al primer salt	Dubtosa	4 → L → Llapis
5	al segon o tercer salt	Dubtosa	5 → G → Ganivet
6	al saltar sense esquís	Bona	Les dureses intermèdies (marcades amb +/-) són preses com intervals de 0.3 (Pu+ → 1.3; 4D- → 1.7)
7	No cau	Bona	

Figura 2: Valors del test del salt i de les dureses de mà

l'inestabilitat. Falsos resultats d'inestabilitat no són tan problemàtics com situacions de falsa estabilitat, en les que amb valors del test de 5 i fins i tot 6 (en el cas del rutschblock) s'han produït desencadenaments accidentals. A aquest important problema s'hi afegeix l'elevada variabilitat espacial que s'ha observat (Jamieson 1995, Campbell & Jamieson 2004) i el fet que, en ocasions, cal exposar-se al risc d'allaus al haver-lo de realitzar en pendents superiors als 25°.

INESTABILITAT ESTRUCTURAL

Vistes les mancances dels tests d'estabilitat, especialment en la valoració de la inestabilitat estructural, diverses línies de treball han estat encetades amb la finalitat d'incloure algun paràmetre en la observació que informi de la capacitat del mantell de propagar la fractura. La més antiga és la usada pels observadors suïssos, que des del 1995 registren junt amb el resultat del test la qualitat del pla de lliscament (regular, mitjà o irregular) i la porció del bloc que llisca (tot el bloc, part del bloc, només una cantonada). En treballar amb el rutschblock, que testeja una gran superfície, aquests indicadors serien suficients per indicar el potencial de propagació de la fractura (Schweizer 2002).

Darrerament s'han presentat altres propostes que van guanyant acceptació, especialment a Nord-Amèrica: d'una banda, als Estats Units, la proposta de registrar la **qualitat del cisallament** (Johnson & Birkeland 2002) (veure fig. 3)

Qualitat del cisallament (Shear Quality)		Caràcter de la fractura (Fracture Character)	
Superfície de cisallament inusualment neta, planar, llisa i <i>ràpida</i> .	Q1	SP (Sudden planar – Planar sobtada)	Fractura planar que creua repentinament la columna en un sol increment de la sobrecàrrega i el bloc llisca fàcilment per la capa feble.
		SC (Sudden Collapse – Col-lapse sobtat)	La fractura creua ràpidament la columna i causa un desplaçament vertical sensible del bloc
Cisallament “mitjà”. La superfície és més o menys llisa, però la placa no llisca tan ràpidament com en Q1.	Q2	RP (Resistant planar - Planar resistent)	Fractura planar o força planar que necessita més d'un increment de la sobrecàrrega per creuar la columna i/o el bloc no llisca amb facilitat.
La superfície de cisallament és no-planar, irregular, desigual i rugosa.	Q3	PC (Progressive Compression – Compensió progressiva)	La fractura usualment creua la columna en un increment de la sobrecàrrega, seguit d'una gradual compressió de la capa en els subsegüents increments de la sobrecàrrega.
		B (Non-planar break – Trencament no planar)	Superfície de fractura irregular.

Figura 3: Taula on es mostren els valors establerts per la qualitat de cisallament, el caràcter de la fractura i la seva equivalència. Valors de Q1 i de SP o SC són indicadors d'alt potencial de propagació. Q2 i RP serien valor transicionals, mentre que Q3 i PC o B indiquen baix potencial de propagació de la fractura (van Herwijnen & Jamieson 2003).

ja ha estat adoptada per la xarxa d'observadors del National Forest Service. Al Canadà s'està treballant en un sistema per caracteritzar la fractura (van Herwijnen 2002, 2003, 2004) que apunta ser el més precís, però que resulta més difícil per als observadors amb poca experiència.

Tots aquests mètodes han millorat força la correlació entre inestabilitat i resultats del test, especialment a l'hora de desemmascarar les situacions de fals estable: valors elevats del test d'estabilitat (p. ex. rutschblocks de 5 o 6) amb qualitats de cisallament de Q1 o fractures del tipus SP o SC és corresponen sovint desencadenaments accidentals de plaques.

L'ENFOC ESTRATIGRÀFIC

Paral·lelament a aquests treballs en els que s'aborda l'avaluació de l'inestabilitat estructural mitjançant la qualitat del cisallament o el caràcter de la fractura, diversos estudis a cavall entre els Alps i les Rocalloses han fixat les bases per una sistematització de la interpretació dels perfils estratigràfics. D'aquesta manera s'ha anat mostrant com la estratigrafia de la neu pot explicar tant la formació de fractures en el sí del mantell com la capacitat d'aquest de propagar la fractura i així generar un allau (fig. 4).

A partir de diferents mostres de perfils realitzats prop de la cicatriu de coronació d'allaus accidentals, diversos autors han estudiat quines característiques de les capes febles o de les interfases entre capes es correlacionaven amb la inestabilitat. Per cada variable estudiada s'estableix un llindar que separa les poblacions de

perfils estables i inestables. Els primers estudis inclouen una gran quantitat de variables i no resulten aplicables a la pràctica (Schweizer & Lütschg 2000, Schweizer & Jamieson 2000) però obren el camí a posteriors treballs que redueixen el nombre de variables explicatives a 5 (McCammon & Schweizer 2002) (veure fig. 5). S'anomena "*lemmon*" a cadascuna d'aquestes variables, i s'estableix que l'aparició de 4 o 5 "lilmons" en una mateixa capa o interfase es correlaciona molt bé amb la inestabilitat, fins i tot en casos que el rutschblock havia mostrat condicions de "fals estable".

Posteriors treballs amplien molt la mostra usada i fan un tractament estadístic més rigorós, provant d'incloure altres variables (Schweizer & Jamieson 2002, 2003). Finalment, Alec van Herwijnen (2005) publica la seva tesi en la que estableix, per una important base de dades de perfils del Canadà – en total 216 per l'anàlisi i 54 pel test del mètode –, un grup de 6 variables amb els seus llindars que són capaces d'identificar el 75% dels perfils inestables. Per similitud amb els "*lemmons*" d'en McCammon són anomenades "*Yellow flags*", i novament és el nombre de variables que superen el llindar l'indicatiu d'inestabilitat (5 o 6 "banderes grogues" → perfil inestable). Els llindars establerts són propis de cada regió nivoclimàtica, com mostren

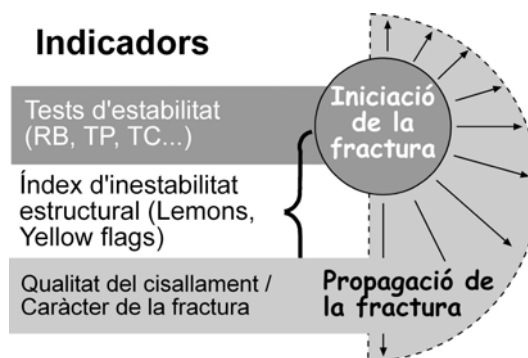


Figura 4: Estudis recents suggereixen que els resultats dels tests de estabilitat són primàriament indicadors del potencial d'iniciació de la fractura, i que el caràcter de la fractura i la qualitat de cisallament són bàsicament indicadors del potencial de propagació, mentre que els índex d'inestabilitat estructural podrien indicar tant el potencial d'iniciació com el de propagació de la fractura. (A partir de Jamieson & Schweizer, 2005)

Paràmetre	Llindar	Percentatge
Profunditat	≤ 1 m	96%
Gruix de la capa feble	≤ 10 cm	78%
Diferència de dureses	≥ 1 nivell	90 %
Tipus de gra	Persistent (□, v, ^)	86 %
Diferència de mida de gra	≥ 1 mm	65 %

Figura 5: Les cinc variables establertes per McCammon pel seus *lemmons*, sobre una mostra de 39 perfils del Canadà. El llindar establert separa les poblacions estables i inestables per cada paràmetre. Finalment, el percentatge de perfils fets en allaus accidentals que aconsegueixen la condició donada.

treballs realitzats paral·lelament amb dades dels Alps Suïssos que obtenen llistats amb diferències estadísticament significatives (fig. 6). Anàlisis univariats més acurats demostren també que totes les variables no tenen el mateix pes, i la suma ponderada s'apunta com un millor mètode per establir l'índex final (Schweizer et al. 2005).

Variable	Llistat o interval		Valor de la variable en la suma ponderada
	Suïssa	Canadà	
Mida de gra de la capa que falla	≥ 1.125 mm	≥ 1 mm	0.5
Duresa de la capa que falla	≤ 1.5 (entre Pu+ i 4D-)	≤ 2.7 (1D-)	0.5
Diferència de mida de gra	≥ 1.125 mm	≥ 0.5 mm	1
Diferència de dureses	≥ 1.5	> 1	1
Tipus de gra	Persistent (\square , v, \wedge)	Persistent (\square , v, \wedge)	1
Profunditat del pla de ruptura	13 ... 89 cm	20... 85 cm	0.5
Valor del rutschblock (RB)	< 4	No es considera	2
Inestable si la suma és...	≥ 5	≥ 5	≥ 3.5

Figura 6: *Yellow Flags* de van Herwijnen i Schweizer. Pot observar-se la notable diferència entre alguns dels llistats, diferència que ha de ser atribuïda a diferències nivoclimàtiques i de relleu. A la columna de més a la dreta s'hi representa el pes relatiu de cada variable en la suma ponderada, mètode que s'ha mostrat com el més eficient, arribant a una exactitud del 77% (veure fig. 2 per interpretar els valor del RB i la duresa. (A partir de Schweizer et al 2005)

Cap d'aquests mètodes pot ser considerat definitiu ni pot ser usat de manera exclusiva per establir la inestabilitat. La utilitat d'aquests índex encara no ha estat establerta, especialment pel que fa a la seva utilització per usuaris avançats. Tot i això, els índex d'inestabilitat estructural reuneixen molts avantatges (objectivitat, menor dependència del indret escollit, possibilitat de tractament estadístic...) i són actualment un dels tèmics d'investigació més atractius i "calents" en el món de la predicció d'allaus.

APLICACIÓ AL PIRINEU

Durant la temporada 05/06 s'ha incorporat la qualitat del cisalla a les mesures que prenen els observadors nivometeorològics del Pirineu Occidental de Catalunya. La utilitat d'aquesta mesura encara no ha estat validada a la nostra serralada, però esperem en el futur poder treure conclusions al respecte.

D'altra banda, pel present article s'han recopilat els perfils estratigràfics realitzats prop de cicatrius de desencadenaments accidentals dels que es disposa. S'han trobat 27 perfils estratigràfics, la majoria (21) sense test d'estabilitat associat. D'aquests, 16 són de les passades tres temporades, en les que s'han començat a fer observacions sistemàtiques, mentre que la resta es reparteixen entre les 15 temporades anteriors i corresponen sempre accidents registrats a la base de dades de l'ICC. S'han hagut de descartar 6 perfils per estar realitzats lluny de la zona de sortida o temps després del desencadenament. De la petita mostra resultant s'han extret els índex d'inestabilitat

estructural, tant els *lemmons* d'en McCammon com les *yellow flags* de van Herwijnen (vegeu figura 7).

N	Variable	Lemmons (McCammon 2002)		Yellow Flags (van Herwijnen 2005)		Banderes grogues (mod. de van Herwijnen 2005)	
		Llindar	Percentatge	Llindar	Percentatge	Llindar	Percentatge
N = 21	Gruix	≤ 10 cm	48 %	/	/	/	/
	Profunditat	≤ 1 m	100 %	20...85 cm	81 %	20...85 cm	81 %
	Mida gra	/	/	> 1 mm	62 %	≥ 1 mm	76 %
	Δ Mida gra	≥ 1 mm	33 %	> 0.5 mm	38 %	≥ 0.5 mm	71 %
	Duresa	/	/	< 1D (3)	100 %	< 4D (2)	100 %
	Δ Duresa	≥ 1 grau	90 %	> 1 grau	52 %	≥ 1 grau	90 %
	Tipus gra	persistent	76 %	persistent	76 %	Persist. +	95 %
		Encert: 57 %		Encert: 33 %		Encert: 81 %	
N = 5	Rutschblock	/	/	< 4	60 %	< 4	60 %
SUMA PONDERADA:				Encert: 60 %		Encert: 80 %	

Figura 7: Llindars i percentatge d'encert per cadascuna de les variables, pels *lemmons*, les *yellow flags* i l'adaptació feta pel Pirineu del darrer índex.

Com ja s'ha comentat, les *yellow flags* han estat obtingudes a partir de mostres majors i amb mètodes estadístics més elaborats que els *lemmons*. De la seva aplicació als perfils del Pirineu s'observa el mal ajust que tenen algunes de les variables, especialment les diferències de duresa i mida de gra. El percentatge d'encert de l'índex resulta molt baix, només un terç dels perfils reben un índex de 5 o 6. La suma ponderada millora l'encert fins el 60 %, però la poca mostra de perfils amb test del salt no permet treure conclusions.

Les darreres columnes de la figura 6 mostren una classificació feta a partir d'uns llindars modificats per criteri d'expert. Sembla que ampliant lleugerament els rangs de diferència de duresa, diferència de mida de gra i mida de gra s'aconsegueix una substancial millora de la classificació. Per contra, el llindar de dureses pot fer-se més restrictiu sense que empitjori l'encert. Finalment s'observa que quasi totes les capes febles que no eren de tipus de gra persistent (□, v, ^) estaven formades per agulles visibles (λ). Aquestes diferències poden explicar-se per:

El reduït nombre de perfils de la mostra estudiada. No podem descartar que es produeixin desviacions en els resultats per la petita quantitat de perfils disponibles. A més a més, les metodologies de presa de dades han anat evolucionant, i els perfils més antics van ser fets amb uns criteris diferents dels actuals. Per exemple, al Pirineu fins fa molt poc no s'han fet distincions intermèdies entre els graus de duresa de mà (pex. 1D+ o L-) ni s'han registrat detalls sobre el trencament en els tests d'estabilitat.

La menor abundància en les nostres muntanyes de situacions de gebre de superfície enterrat. Als Alps aquest tipus de capa feble causa un 42% dels desencadenaments accidentals (Schweizer & Lütschg 2000), mentre que aquí no ha estat registrada més

que en un allau accidental (< 5 %). Això té dues implicacions: d'una banda, els cristalls de gebre acostumen a tenir mides de gra molt grans, de diversos mm, que contrasten fortament amb les capes del seu voltant, el que faria augmentar la mida de gra mitjana de la capa feble i el contrast entre les mides de gra. A més, la notable abundància d'agulles visibles a les capes febles de les allaus accidentals del Pirineu, un tipus de gra de vida més o menys curta, indicaria que les ruptures accidentals tendeixen a produir-se poc després de les nevades, com confirmen les estadístiques d'accidents (85% d'accidents els 3 dies posteriors a la nevada. Font ICC), mentre que el gebre enterrat pot ser inestable durant setmanes (Chamers & Jamieson 2001). Per tant, és d'esperar que la mida de gra i la diferència de mides de gra siguin inferiors al Pirineu, i que les agulles visibles prenguin importància en produir-se un volum significatiu de desencadenaments accidentals els dies immediatament posteriors a la nevada.

PROPOSTA DE METODOLOGIA

S'ha observat que molts dels perfils de que es disposava tenien mancances en les observacions que han resultat importants. Per exemple, mentre que tots tenien un sondeig de percussió associat –una paràmetre difícil de comparar i que en moltes ocasions passa per alt capes primes molt importants-, en molt pocs s'havia fet el test del salt o rutschblock, que aporta una informació molt més directa. A partir dels treballs citats i de les aportacions dels predictors d'allaus del Pirineu de Catalunya, proposem la següent metodologia de treball, amb un ordre de prioritats en cas que no es puguin realitzar totes les mesures:

- 1.- Obtenir informació general de l'allau: situació, tipus, mida, pendent, desencadenament. Si és possible, esbrinar el punt on era l'esquiador en el moment de provocar l'allau. Amb aquesta informació triar el lloc on fer el perfil i els tests. Serà preferible un lateral de l'allau, prop de la cicatriu de coronació, abans que sobre la cicatriu, doncs les condicions seran més semblants a les del punt de desencadenament.
- 2.- Identificar i caracteritzar la capa feble. Visualment, amb un pinzell o amb la plaqueta mirar d'identificar la o les capes febles. Fer el test de la pala en aquest estadi pot ajudar molt a detectar capes o interfases febles. Les variables que caldrà registrar principalment són: profunditat, gruix, tipus de gra, mida de gra i duresa de mà.
- 3.- Caracteritzar les capes per sobre i per sota de la capa o interfase feble, amb les mateixes prioritats que en el punt 2.
- 4.- Realitzar el test del salt. Anotar sempre: resultat del test, pendent, qualitat del cisallament i/o caràcter de la fractura.
- 5.- Realitzar el perfil estratigràfic complert, inclosa la temperatura, la humitat i la densitat.
- 6.- Realitzar el sondeig de penetració.

CONCLUSIONS I LINIES DE TREBALL

Els nous mètodes de valoració de la inestabilitat estan demostrant ser una eina útil per l'avaluació de l'estabilitat de les plaques seques pel que fa al seu desencadenament accidental. Ja s'ha observat que, per diferents regions nivometeorològiques, els llindars que separen les poblacions estables i inestables per cada una de les variables

estudiades poden variar significativament. Cal esperar que pel Pirineu, nivoclimàticament força diferent dels Alps i les Rocalloses, els llindars prenguin valors diferenciats. Per establir-los caldrà esperar a reunir una mostra estadísticament significativa, tant de perfils en zones de sortida d'allaus accidentals, com de vessants esquiatats en que no s'ha produït desencadenament. La implementació de la metodologia proposada pot resultar útil per tal de reunir una mostra de qualitat durant les properes temporades hivernals.

Bibliografia

Birkeland, K.W. and Johnson, R.F. (1999). The stuffblock snow stability test; comparability with the rutschblock, usefulness in different snow climates, and repeatability between observers. *Cold Regions Science and Technology*, 30(1-3), 115-123.

Campbell, C.P. and Jamieson, B. (2004). Spatial variability of rutschblock test results in avalanche start zones. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Jackson Hole, Wyoming, U.S.A. Sept 19-24, 2004.*

Chalmers, T.S. & Jamieson, B. (2001). Extrapolating the skier stability of buried surface hoar layers from study plot measurements. In *Cold Regions Science and Technology*.

[Institut Cartogràfic de Catalunya \(2006\). Base de dades d'accidents per allau al Pirineu de Catalunya. www.icc.es/allaus](http://www.icc.es/allaus)

Jamieson, B. (1995). Avalanche Prediction for persistent snow slabs. Ph.D. Thesis, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

Jamieson, B and Johnson, C. (1997). The compression test for snow stability. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Banff, Alberta, Canada. Oct 1996.* 118-125.

Johnson, B., Jamieson, B., Johnston, C. (2000). Field data and theory for human triggered "whumpfs" and remote avalanches. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, U.S.A, Oct. 2000.*

Johnson, R. And Birkeland, K. (2002). Integrating Shear Quality into stability test results. *Proceedings of the*

International Snow Science Workshop. Pencticton, British Columbia, Canada. Oct. 2002.

McCammon, I. and Schweizer, J. (2002). A field method for identifying structural weaknesses in the snowpack. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Pencticton, British Columbia, Canada. Oct. 2002.*

McClung, D.M. (1979). Shear fracture precipitated by strain softening as a mechanism of dry slab snow avalanche release. *J. Geophys. Res.* **84**(87), 3519-3526

McClung, D.M. and P. Schaerer (1993). *The Avalanche Handbook.* The Mountaineers, Seattle, Washington, U.S.A., 271 pp.

Narita, H. (1983). An experimental study on tensile strenght of snow. *Contributions from the institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan. Series A,* 32, 1-37.

Schweizer, J. (1999). On the role of deficit zones in dry snow slab avalanche release. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 30, 43-56.

Schweizer, J. and Lütschg, M (2000). Measurements of human triggered avalanches from the Swiss Alps. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, U.S.A, Oct. 2000.*

Schweizer, J. and Jamieson, B. (2000). Field observations of skier-triggered avalanches. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, U.S.A, Oct. 2000.*

Schweizer, J. (2002). The rutschblock test. Procedures and applications in Switzerland. *The Avalanche Review* 20(5), 1, 14-15.

Schweizer, J. and Jamieson, B. (2002). Contrasting stable and unstable with respect to skier loading. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Penticton, British Columbia, Canada. Oct. 2002.*

Schweizer, J. and Jamieson, B. (2003). Snowpack properties for profile analysis. In *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 37, No 3, 233-241.

van Herwijnen, A. and Jamieson, B. (2002). Interpreting fracture character in stability tests. *Proceedings of the International Snow Science Workshop.*

Penticton, British Columbia, Canada. Oct. 2002.

van Herwijnen, A. and Jamieson, B. (2003). An update on fracture character in stability tests. *Avalanche News* 66, Canadian Avalanche Association, pp. 26-28.

van Herwijnen, A. and Jamieson, B. (2004). Fracture character in compression tests. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Jackson Hole, Wyoming, U.S.A. Sept 19-24, 2004.*

van Herwijnen, A. (2005). Fractures in weak snowpack layers in relation to slab avalanches release. PhD Thesis. Dept. Of Civil Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada.