

Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional
Facultat de Geografia i Història
Universitat de Barcelona



Tesi doctoral

***Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada
a partir de registres sedimentaris***

Memòria presentada per en
Marc Oliva i Franganillo
Per optar al títol de Doctor en Geografia

Programa de Doctorat
Gestió ambiental, Paisatge i Geografia
Bienni 2004-2006

Els directors de tesi

Dr. Antonio Gómez Ortiz

Dr. Lothar Schulte

CAPÍTOL 4

ELS REGISTRES SEDIMENTARIS DE SIERRA NEVADA: ELS LÒBULS DE SOLIFLUXIÓ. DISTRIBUCIÓ, MORFOMETRIA I DINAMISME ACTUAL

4. Els registres sedimentaris de Sierra Nevada: els lòbuls de solifluxió. **Distribució, morfometria i dinamisme actual**

Des de 1987, els membres del Grup de Recerca Consolidat *Paisatge i paleoambients en la muntanya mediterrània* (2005SGR01045) de la Universitat de Barcelona han anat desgranant diferents aspectes de la geomorfologia nevadense. La recerca ha anat evolucionant des de l'explicació morfològica i cartografia de detall fins al monitoratge tèrmic i dinàmic de manifestacions periglacials actives, sempre en el context evolutiu i temporal de la dinàmica del paisatge de cims de la Sierra. Tot aquest bagatge previ en el coneixement dels processos freds, actuals i heretats, ens canalitza a complementar la recerca amb l'estudi d'arxius sedimentaris que permetin la reconstrucció paleoecològica de les alçades de Sierra Nevada durant l'Holocè.

Les característiques biofísiques del massís no propicien l'abundància de registres sedimentaris útils per a la interpretació de l'evolució ambiental dels darrers mil·lennis a Sierra Nevada i limiten el seu estudi a aquells enclavaments amb presència més contínua d'aigua. Els sediments emplaçats en ambients reductors, proclius a la conservació de la matèria orgànica, són aquells potencialment més adients per a la nostra recerca: lòbuls de solifluxió i llacunes d'alçada.

Entre els dipòsits sedimentaris presents a Sierra Nevada, cal destacar aquells heretats de fases més fredes relatius a les glaciacions pleistocenes, en especial al LGM²⁹, que es manifesten en morrenes i sòls poligonals, el coneixement actual dels quals no permet una seqüenciació cronològica continuada (només puntual) dels esdeveniments ambientals ocorreguts durant els darrers estadis freds del Quaternari. Cal destacar també el reguitzell de glaceres rocoses relictas escampades pel massís, símptoma i conseqüència d'unes condicions més fredes que les actuals, molt possiblement d'època tardiglacial. Ja emmarcats en l'Holocè, tot i que possiblement d'ençà la desglaciació, trobem els sediments que acullen les llacunes instal·lades en els fons dels circs, els quals ens permeten obtenir informació paleoambiental del nivell de cims. Els registres lacustres presenten l'avantatge de ser, teòricament, continus, fet que permet establir una detallada geocronologia de l'evolució ambiental holocena en els sectors culminants del massís.

²⁹ Veure apartat 2.2.2, pàg. 48.

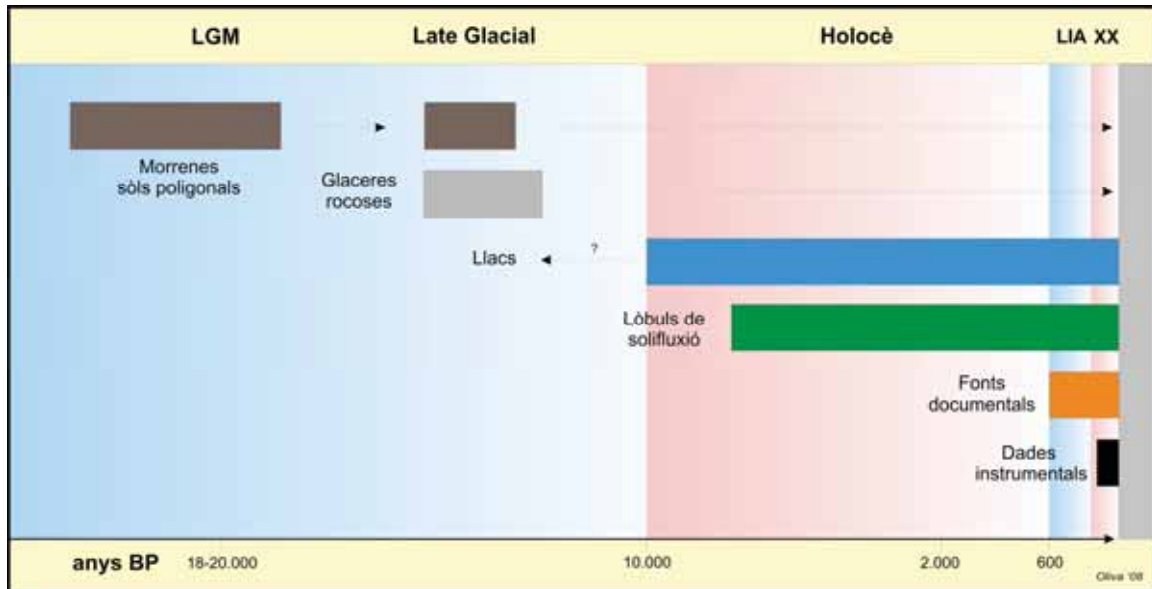


Figura 4.1. Fonts d'informació paleoambiental en el massís de Sierra Nevada.

Els lòbuls de solifluxió són registres sedimentaris característics d'ambients periglacials d'altres latituds i de muntanyes elevades de latituds mitges. En el cas de Sierra Nevada, el seu estudi permetrà una doble finalitat: caracteritzar el dinamisme actual dels processos periglacials sota les condicions climàtiques presents i, alhora, reconstruir la dinàmica de vessants dels darrers mil·lennis en l'estatge supraforestal de la Sierra.

Altres fonts d'informació que ens ajuden a explicar l'evolució ambiental de l'àrea d'estudi són les fonts documentals d'època històrica, que ens detallen elements concrets i/o indirectes de processos geomorfològics esdevinguts al massís durant les darreres centúries³⁰, tot i que cal una indispensable dosi de cura en la interpretació que se n'extreu d'aquests relats. La presa de mesures instrumentals de diferents paràmetres meteorològics des de finals de segle XIX i principis del XX permet quantificar l'actual context climàtic i posar-lo en relació amb la variabilitat climàtica holocena.

Introduït el ventall de registres sedimentaris existents al massís i, abans d'entrar pròpiament en la recerca, pretenem aclarir alguns conceptes relatius als lòbuls de solifluxió i puntualitzar alguns termes de confusa utilització.

³⁰ Veure apartat 2.2.5, exemples de les evidències geomorfològiques deixades pels naturalistes a finals del s. XVIII i al llarg del s. XIX.

Els lòbuls de solifluxió, gelifluxió o gelisolifluxió³¹ són dipòsits de vessant lligats a moviments lents d'un sòl que conté elevats continguts d'aigua i solen caracteritzar-se per una forma lobular de dimensions molt variables. La seva gènesi pot estar vinculada a l'existència de *permafrost* o de sòl estacionalment glaçat, tot i que es constaten també processos solifluidals associats a intenses pluges en vessants de muntanyes tropicals sota règims tèrmics no relacionats amb valors negatius en el sòl.

La solifluxió s'ha definit com el moviment de sòl més estès en regions periglacials (Lewkowicz, 1988; French, 1996; Kinnard & Lewkowicz, 2005 i Matthews et al., 2005). La pionera definició del terme es circumscriu al flux lent, pendent avall, d'una massa de sòl saturada d'aigua sobre un substrat estacionalment o permanent glaçat (Anderson, 1906).

Més recentment, Jackson (1997) entén per solifluxió aquell flux lent i viscos pendent avall de sòl i altre material superficial indiferenciat sobresaturat, que pot assolir velocitats de 0,5 a 50 cm/any i està situat sobre un nivell de sòl glaçat. La gelifluxió, per la seva banda, es limita al moviment del terreny per lliscament sobre un sòl glaçat (Washburn, 1979). Actualment, però, es generalitza l'ús del terme solifluxió per moviments de massa lents relacionats amb l'acció del gel-desgel (Ballantyne & Harris, 1994; French, 1996).

A Sierra Nevada, com en certs enclavaments dels Pirineus, pel que respecta a les muntanyes ibèriques, l'existència de *permafrost* queda circumscrita a sectors molt marginals, llegat de la LIA. En el pis crionival de la Sierra, on s'acomoden els lòbuls, no hi ha *permafrost*, però els sensors tèrmics UTL instal·lats a diferents profunditats constaten l'existència d'una profunda capa glaçada estacional d'entre 60-100 cm en altures properes als 3.000 m en ambdós vessants del massís³². Cal concebre, doncs, la solifluxió a Sierra Nevada com un procés de moviment de sòl característic del cinturó periglacial associat a un horitzó estacionalment glaçat.

³¹ Durant les darreres dècades, la utilització sovint confusa d'aquests termes ens porta a limitar l'ús del mot solifluxió com a vocable genèric pels fluxos de sòl amb abundant contingut d'aigua (independentment del seu origen: fusió nival o precipitacions líquides) en ambients periglacials d'altres muntanyes de latituds mitges, conseqüència de l'acció combinada de la crioreptació i la gelifluxió. La gènesi i dinàmica dels lòbuls s'associa a l'acció del gel-desgel amb presència de gel subsuperficial, que pot veure's reforçada per precipitacions de caràcter líquid que saturin el lòbul i inestabilitzin el vessant.

³² Veure apartat 4.3.1, pàg. 141.

Els lòbuls de Sierra Nevada han estat cartografiats i classificats per tipologies, concretant així la seva distribució i característiques morfològiques bàsiques. Del seu emplaçament actual, es percep una manifesta correlació entre lòbuls de solifluxió i vegetació, essent aquells sectors recoberts de vegetació en els fons de vall (*borreguiles*) les àrees més fecundes en presència de manifestacions solifluidals. Els lòbuls es desenvolupen en sectors que requereixen d'una mínima quantitat de neu que proveeixi aigua durant el desglaç, tal i com s'ha constatat en altes latituds (Hugenholtz & Lewkowicz, 2002).

En aquest capítol s'abordarà, a més de la cartografia geomorfològica esmentada, la morfometria dels lòbuls de solifluxió a partir d'una minuciosa anàlisi estadística de diferents variables relacionades amb la seva ubicació i la seva geometria, en funció de cada una de les tipologies de lòbuls existents al massís. A la vegada, també es dedicarà un apartat a discutir la possible influència antròpica en els lòbuls de solifluxió: la profusió d'incisions i canals que apareixen en molts d'ells ens porta a considerar la possibilitat de que l'empremta humana hagi influït en la seva dinàmica. El paper històric de la derivació d'aigües en el massís ha comportat variacions en l'estructura de drenatge natural dels *borreguiles* i canvis en la fisonomia externa dels lòbuls en qüestió; tanmateix, aquesta afectació sembla ésser d'època recent, ja que no se n'ha trobat testimoni en l'estructura interna de cap d'aquests registres sedimentaris analitzats a Sierra Nevada. Finalment, es presenten els resultats relatius al control dinàmic i al monitoratge tèrmic des d'agost de 2005 a agost del 2008, que permeten posar en relació els processos solifluidals actuals amb les condicions climàtiques imperants en els sectors culminants del massís.

4.1 Context geomorfològic

Els lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada només es disposen en enclavaments molt específics, on la combinació de la topografia local i les condicions microclimàtiques, sobretot disponibilitat d'aigua, ho permeten. La zona d'estudi roman en el sector occidental del massís, concretament a les capçaleres de Rio Seco i San Juan, que van venir actuant com a circs glacials durant les glaciacions quaternàries. Mentre a San Juan els lòbuls s'assenten en una típica vall glacial, a Rio Seco queden restringits als escassos racons vegetaltzats de la capçalera, ample amfiteatre obert a migjorn.

Prenent com a referència el mapa geomorfològic de Sierra Nevada (Gómez Ortiz et al., 2002), s'ha acomodat la cartografia de les dues valls d'estudi atenent a les observacions realitzades durant el treball de camp. A més, l'escala utilitzada tant en els mapes generals de cada vall com en aquells més específics dels sectors que concentren els lòbuls, propicia una major precisió en la representació de les formes i modelats geomorfològics.

A la vall de San Juan trobem uns *borreguiles* que es compten entre els millor conservats de tota la Sierra³³. Aquesta vall té un fons relativament pla, amb els vessants poc empinats, suavitzats per l'acció del periglaciariisme des del LGM. Està orientada al N-NW, amb una cobertura vegetal escassa de només un 3,8% per sobre dels 2.500 m. Els lòbuls s'emplacen en tres sectors, en un rang altitudinal comprès entre els 2.474 i 2.911 m (taula 4.1).

Rio Seco és una ampla caixa glacial del vessant meridional de Sierra Nevada engabiada pels Crestones de Rio Seco. El substrat de fons de circ, polit i amb nombroses estries i canaletes glacials, denota un flux de la glacera en capçalera en direcció SW, possiblement empesa per la transfluència glacial des del circ de Valdeinfierno (Gómez Ortiz et al., 2002). Els lòbuls de solifluxió es disposen en els sectors recoberts de vegetació just en el desguàs de la llacuna homònima. La cobertura vegetal a la capçalera de Rio Seco és molt pobre, de l'ordre del 1,6% de la superfície del circ per sobre dels 2.800 m (taula 4.1). La contundència de la insolació a la cara sud del massís, una menor romanència de la neu i un pendent més elevat que a San Juan, es combinen per propiciar una escorrentia superficial més ràpida, limitant la vegetació a només aquells enclavaments on la presència líquida és més continuada durant l'estació càlida.

Taula 4.1. Resum dels paràmetres bàsics de les valls en estudi.

PARÀMETRES BÀSICS DE LES VALLS EN ESTUDI							
Vall	Altitud àrea d'estudi (m)	Orientació	Superfície conca (km ²)	Vegetació (%)	Pendent (%)	Altitud lòbuls (m)	n
San Juan	2.474-3.040	N-NW	3,2	3,8	12,1	2.474-2.911	156
Rio Seco	2.931-3.116	S	1,6	1,6	13,8	2.931-3.005	46

³³ La suavitat dels vessants en la part superior de la vall de San Juan ha atret l'interès de CETURSA, empresa explotadora del domini esquiable, per tal d'ampliar-hi les instal·lacions hivernals per a la pràctica dels esports d'hivern, tot i que de moment, sortosament, no han prosperat les temptatives.

4.1.1 Capçalera del barranc de San Juan

La capçalera de la vall de San Juan engloba tres sectors on es distribueixen els lòbuls de solifluxió (SJA, SJB i SJC). Es tracta d'una vall relativament estreta, recolzada en la estructura tectònica general, que tendeix a eixamplar-se aigües avall; els vessants estan recoberts de material provinent de les crestes rocoses sobrestants i en el fons de vall es detecten nombroses restes morrèniques i glaceres rocoses relictas (figura 4.2). Tota l'àrea d'estudi va canalitzar una llengua de gel durant el LGM, la qual, en enretirar-se cap a posicions més elevades, va deixar nombrosos cordons morrènics. A més, les fases fredes del Tardiglacial devien possibilitar un reforçament dels processos periglacial a la vall, explicant així la presència de glaceres rocoses avui inactives com l'existent a SJB.

Els sectors d'estudi estan esglaonats en alçada; SJA és l'àrea d'estudi emplaçada a major alçada i s'hi han cartografiat 28 lòbuls de solifluxió, SJB és el sector intermedi i presenta 50 lòbuls i SJC és la parcel·la inferior amb 78 unitats.

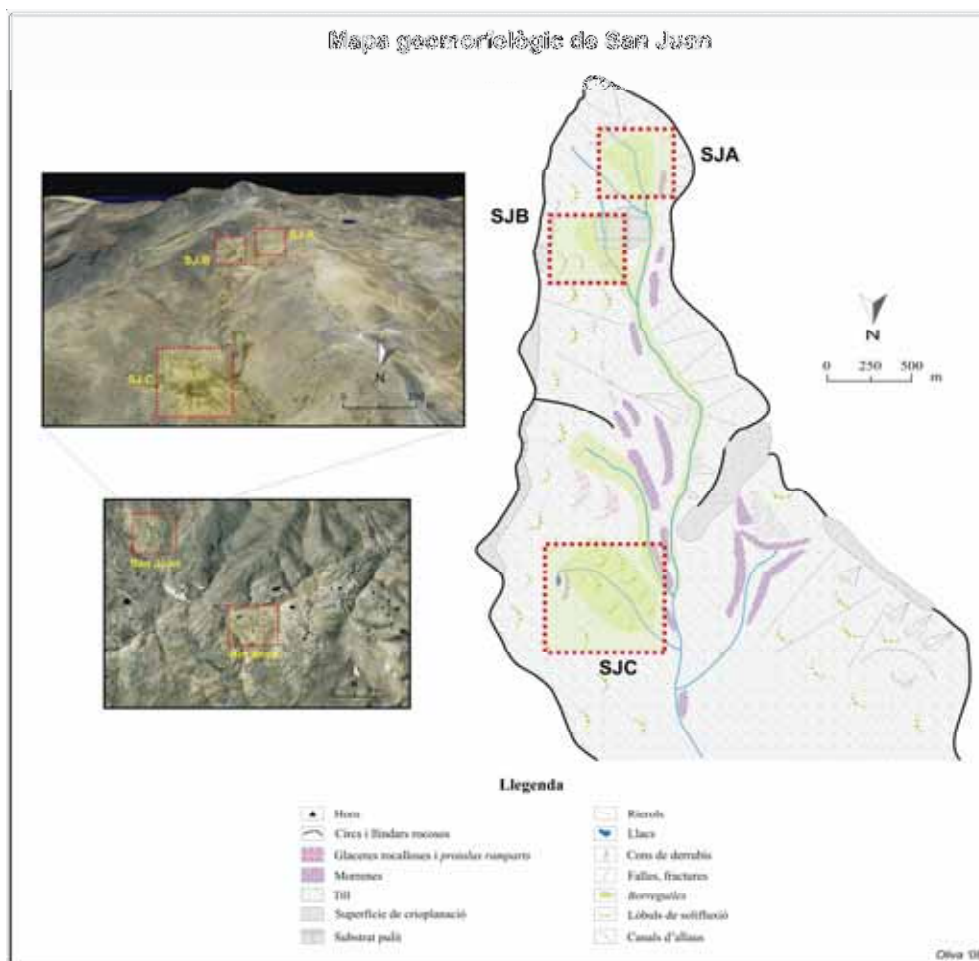


Figura 4.2. Mapa geomorfològic de la vall de San Juan.



Figura 4.3. Fotografia del sector SJA.

Els lòbuls de SJA es disposen en el tram superior de la vall, entre 2.844-2.911 m, en dos sectors: en el marge superior, enllaçant el fons de vall amb el vessant, on resten les darreres congestes de neu de la temporada, i en un sector més distal i planer, aprofitant la dispersió d'aigua en la confluència de dues torrenteres.

El sector SJB s'emplaça immediatament per sota de SJA i es caracteritza per la presència d'una densa cobertura vegetal, torbosa en la zona central. L'elevada disponibilitat líquida en aquesta àrea és conseqüència de la intensa fracturació del substrat i del rocam i l'elevada porositat dels dipòsits de vessant no estabilitzats, que faciliten la circulació d'aigua profunda i la seva reaparició en superfície. Els lòbuls s'emplacen entre 2.787-2.843 m, pròxims a les congestes de neu tardanes i adjacents a la zona central torbosa saturada d'aigua.



Figura 4.4 . Fotografia del sector SJB.

En cotes inferiors, sense contigüitat geogràfica amb SJA i SJB, trobem el sector SJC, amb lòbuls situats entre 2.474-2.548 m. És un sector topogràficament planer, un amfiteatre de suaus flancs, on la vall s'eixampla orientant-se al NW. És un àmbit intensament antropitzat, en el qual l'home ha derivat i transportat les aigües per ampliar-hi la superfície



Figura 4.5. Fotografia del sector SJC.

de pastura. Els lòbuls de solifluxió connecten els talussos de derrubis on romanen les darreres clapes nivals i els suaus lloms colonitzats per una vegetació tancada que esmorteix la dinàmica de vessants. Destaca la successió i encadenament de lòbuls, de notable longitud i potència, ubicats en una zona de marcat pendent a la part superior de SJC, en el flanc esquerre del col·lector principal.



Figura 4.6. Cartografia dels lòbuls de solifluxió del sector SJA.

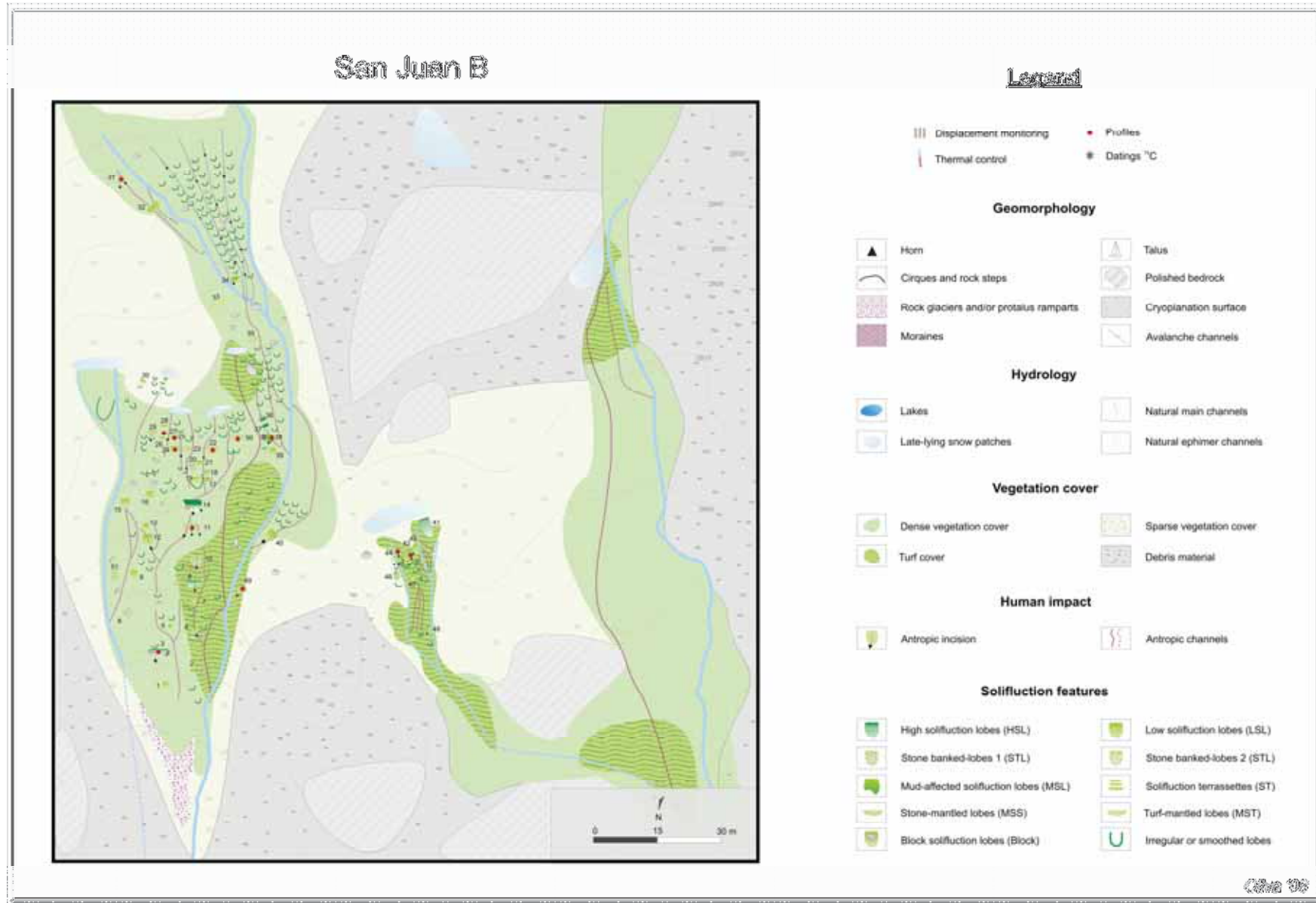


Figura 4.7. Cartografia dels lòbuls de solifluxió del sector SJB.

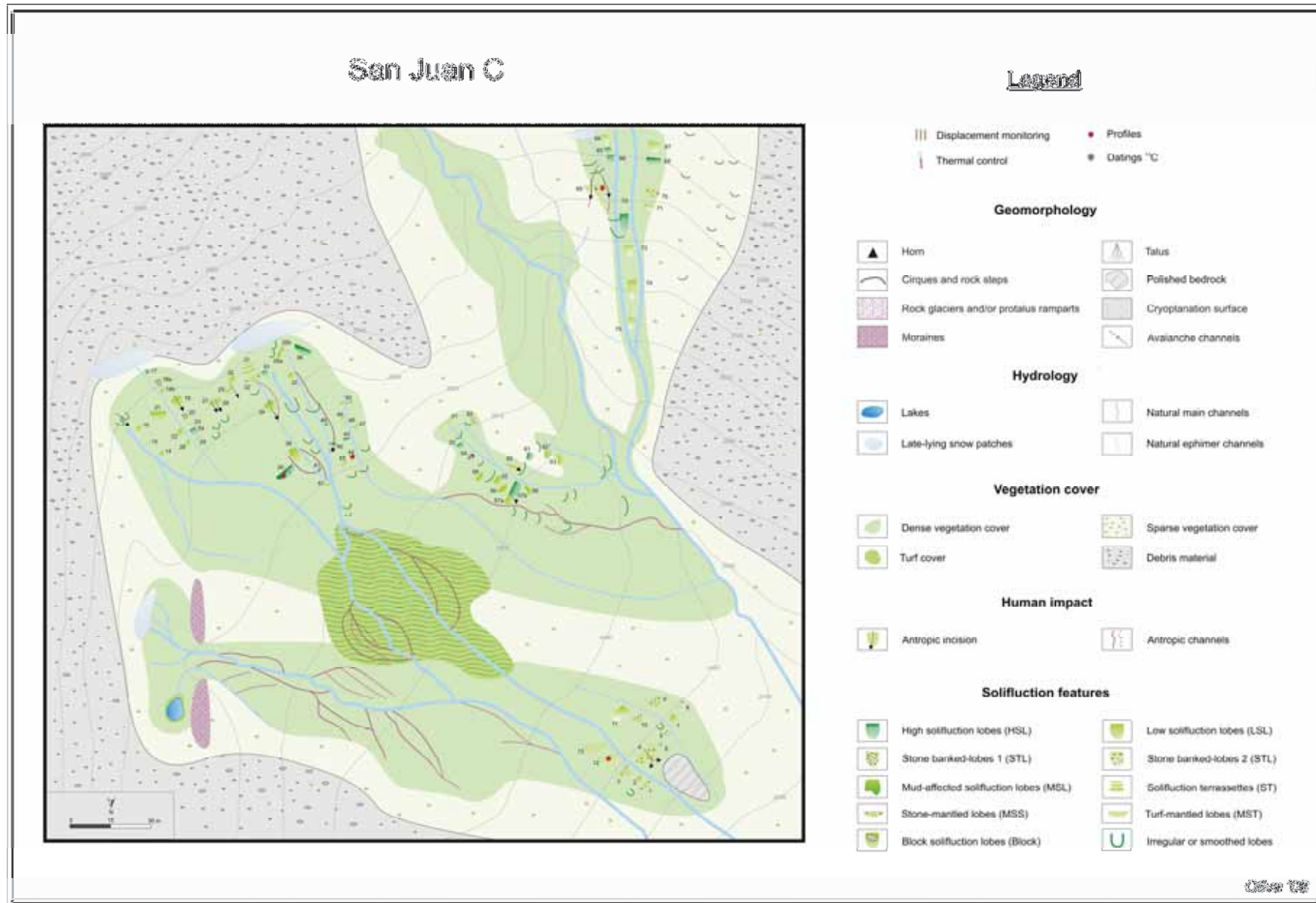


Figura 4.8. Cartografia dels lòbuls de solifluxió del sector SJC.

4.1.2 Capçalera del barranc de Rio Seco

Rio Seco és un vast circ de capçalera de prop d'1 km d'amplada delimitat per una successió de crestes rocoses retallades que connecten suaument amb el fons de circ gràcies a l'abundant massa de clastos que l'acció del periglaciariisme ha dipositat des de la desglaciació del vessant meridional de la Sierra. El fons de circ roman ben polit i relativament lliure de materials detrítics³⁴ aflorant recurrentment el substrat en superfície. Els lòbuls de solifluxió s'emplacen en dos sectors (RSA i RSB) a la boca de les llacunes de Rio Seco³⁵; ambdós, però, són els escassos indrets d'aquest circ que acullen vegetació i lòbuls, ja que per sota d'aquests, els racons on s'ha desenvolupat una incipient cobertura vegetal són sectors planers on la manca de pendent impedeix la formació dels lòbuls.

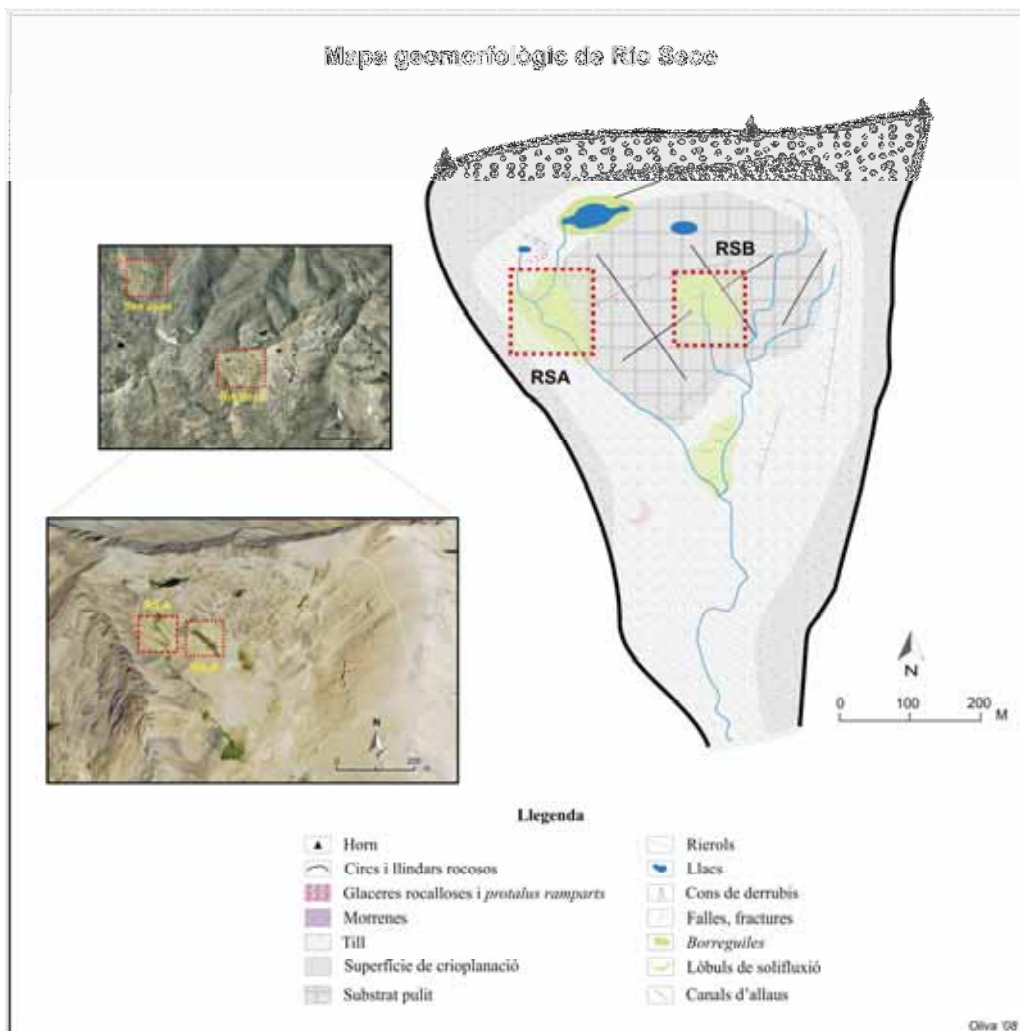


Figura 4.9. Mapa geomorfològic de la vall de Rio Seco.

³⁴ A excepció d'alguns blocs erràtics transportats pels lòbuls de solifluxió a RSA, veure taula 4.2, pàg. 114.

³⁵ Sondejades en la present tesi doctoral, veure apartat 6.2, pàg. 216-225.

El sector de RSA, de vocació meridional, destaca per tenir una major extensió i un nombre de lòbuls sensiblement superior a RSB (38 vs 8) entre 2.987-3.005 m. Tanmateix, RSA



Figura 4.10. Fotografia del sector RSA.

presenta una disponibilitat hídrica inferior, ja que el nivell de la llacuna de Rio Seco durant els mesos estivals no és prou elevat com per desguassar aigua. Aquest fet és cabdal a l'hora de comprendre l'actual dinamisme dels lòbuls en un i altre sector, i serà decisiu per entendre la seva activitat durant els darrers mil·lennis, ben diferent a RSB.

En el sector de RSA hi destaca una limitada intervenció humana, amb poca derivació d'aigua: només s'ha cartografiat un canal antròpic en el marge inferior de l'àrea d'estudi (figura 4.12). Els lòbuls de RSA tenen una cobertura pràcticament total, tot i que la vegetació presenta un grau de dessecament notable ja a inicis d'agost (figura 4.10).

RSB és, per contra, un sector de dimensions més restringides però amb lòbuls de notable potència i tamany entre 2.931-2.952 m. La vegetació (i els lòbuls) resta molt retallada per la topografia i el substrat aflorant, que apareix ràpidament en ambdós marges. És una àrea amb una orientació dominant E-SE, oberta al Mediterrani i a sotavent de la influència atlàntica.



Figura 4.11. Fotografia del sector RSB.

RSB roman lligat amb la Laguna de Rio Seco per un talús vertical intensament diaclasat que permet el filtratge i escolament de l'aigua procedent de la llacuna superior, suposant així una aportació extra d'aigua als lòbuls en qüestió.



Figura 4.12. Cartografia dels lòbuls de solifluxió del sector RSA.



Figura 4.13. Cartografia dels lòbuls de solifluxió del sector RSB.

4.2 Anàlisi morfomètric dels lòbuls de solifluxió

A fi i efecte de classificar els lòbuls de solifluxió de Sierra Nevada s'ha procedit a realitzar una catalogació de les característiques morfomètriques i pedològiques que aquests presenten. S'han adaptat les propostes prèvies de caracterització de les morfologies solifluidals (French, 1996; Hugenholtz & Lewkowicz, 2002; Matsuoka et al., 2005) a les peculiaritats nevadenses, assumint, tanmateix, noves tipologies de lòbuls més específiques.

A més de la seva tipificació, s'han mesurat una sèrie de variables relatives a la ubicació (latitud, longitud, altitud, orientació, pendent i recobriment vegetal) i morfometria (longitud, amplada, potència vertical, angle respecte el pendent, superfície, volum i morfologia) de cada lòbul de solifluxió de les dues valls d'estudi.



Figura 4.14. Exemples de tipologies solifluidals a Sierra Nevada.

Taula 4.2. Principals característiques pedològiques i morfomètriques de les diferents tipologies de lòbuls de solifluxió identificades a Sierra Nevada (Oliva et al., 2008).

TIPOLOGIES I PRINCIPALS CARACTERÍSTIQUES DELS LòBULS DE SOLIFLUXIÓ A SIERRA NEVADA											
Tipologia	Característiques	Lòbuls (monitorats)	Actius / estables	Longitud (m)		Amplada (m)		Potència front (m)		Pendent (°)	
				Rang	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang	Mitjana
<i>High solifluction lobe</i> HSL	Dominància de turba amb un front ≥ 80 cm	33 (5)	1 / 4	2-10	6,6	2-10	5,3	0,8-1,2	0,9	4-19	11,5
<i>Low solifluction lobe</i> LSL	Dominància de turba amb un front < 80 cm	103 (4)	2 / 2	1,2-15	4,4	1-5	3,6	0,2-0,7	0,47	5-21	9,8
<i>Stone-banked lobe-1</i> STL-1	Dominància de graves/roques $> 50\%$	6 (1)	1 / 0	3-10	5,1	2-5	3,4	0,6-1	0,39	9-19	13,0
<i>Stone-banked lobe-2</i> STL-2	Abundància de graves/roques $< 50\%$	33 (2)	1 / 1	1,8-8	5,4	2-8	4,5	0,3-0,9	0,52	6-26	10,5
<i>Turf-mantled lobes</i> MST	Extens lòbul amb dominància de turba ≥ 8 m longitud	6 (1)	0 / 1	10-22	13,3	10-19	12,7	0,5-1,5	0,78	9-19	13,2
<i>Stone-mantled lobes</i> MSS	Extens lòbul amb dominància de graves/roques ≥ 8 m longitud	10 (0)	0 / 0	9-16	11,1	8-13	9,5	0,6-1,4	0,86	12-19	14,0
<i>Ploughing boulders</i> STL (block)	Bloc transportat sobre un lòbul (“bloque arador”)	5 (1)	1 / 0	3-6,8	4,6	2-3,5	2,8	0,5-0,9	0,67	6-10	8,0
<i>Solifluction terracettes</i> ST	Petites terrasses de solifluxió	3 (2)	0 / 2	0,6-2	1,1	0,3-1	0,8	0,2-0,3	0,24	6-18	10,0
<i>Mudflow-affected solifluction lobes</i> MSL	Lòbuls de morfologia irregular amb matriu fangosa	3 (1)	0 / 1	5-6,5	5,8	5-10	7,5	0,2-0,7	0,67	6-9	7,7

Bàsicament, trobem dos grans grups de lòbuls a Sierra Nevada: aquells que presenten un recobriment majoritari de vegetació (71,8%) i aquells que sustenten una major proporció de graves i roques en la seva superfície (28,2%). Entre els lòbuls vegetaltzats hi trobem els HSL i LSL (taula 4.2), que sumen entre els dos el 67% del total de lòbuls; la diferència entre ells és que els HSL tenen un front igual o superior als 80 cm, mentre que la potència vertical dels LSL és inferior a aquest llinard. Destaquen també els MST, que tenen una cobertura vegetal densa i unes dimensions superiors, connectant els vessants inclinats amb els fons de vall planers. Els MSL són lòbuls on la seva morfologia irregular indueix a considerar un comportament més anàrquic, amb nombroses protuberàncies i esglaons en el seu front, indicatius de diferents fases d'impuls i col·lapse en el seu desplaçament; estan majoritàriament recoberts de vegetació i engloben una matriu fangosa.

Aquells lòbuls amb un contingut elevat de graves s'han classificat atenent a la proporció de blocs que presenten en la superfície. Més d'un 50% de graves es correspon amb un STL-1 i una relació inferior esdevé el tipus STL-2, el qual representa un 58% de tots els lòbuls amb presència de roques. Els MSS són una tipologia anàloga als MST però amb una significativa proporció de graves abocades per una dinàmica de vessants més activa. Els STL-block són aquells lòbuls que transporten un bloc de notables dimensions que llaura el terreny i deixa empremta al seu pas (blocs llauradors³⁶). Les ST són petites terrasses de solifluxió que es disposen en pendents de $\sim 10^\circ$ i configuren un tapís de vegetació dispersa i clapejada en petits esglaons.

En relació amb la distribució geogràfica dels lòbuls, les variables que s'han contemplat són la seva latitud, longitud, altitud, orientació, pendent i cobertura vegetal. Aquesta darrera ha estat concretada a partir d'una estimació visual del percentatge de recobriment de vegetació de la superfície dels lòbuls: molt alta (80-100%), alta (60-80%), moderada (40-60), baixa (20-40%) i escassa (0-20%). Les variables geomètriques considerades són la longitud, amplada, potència vertical, angle del lòbul respecte el pendent, pendent, superfície, volum i morfologia de cada lòbul. La superfície ha estat calculada a partir de la fórmula $A = (L*W)/4$, mentre que el volum que comprèn el lòbul de solifluxió s'ha determinat aplicant-hi l'angle que forma amb el vessant $V = H*(A*\cos \alpha_1)/2$ (Matsuoka et al., 2005). Per a concretar la morfologia s'ha aplicat la ràtio proposada per Wahrhaftig & Cox (1959): si longitud/amplada ≥ 1 la morfologia resultant és un lòbul en forma de llengua, mentre que si aquesta relació és < 1 la morfologia es classifica com a lobular.

³⁶ En castellà, es coneixen com a "bloques aradores" i sovint es corresponen amb blocs erràtics. En anglès reben el nom de *ploughing boulders* (French, 1996).

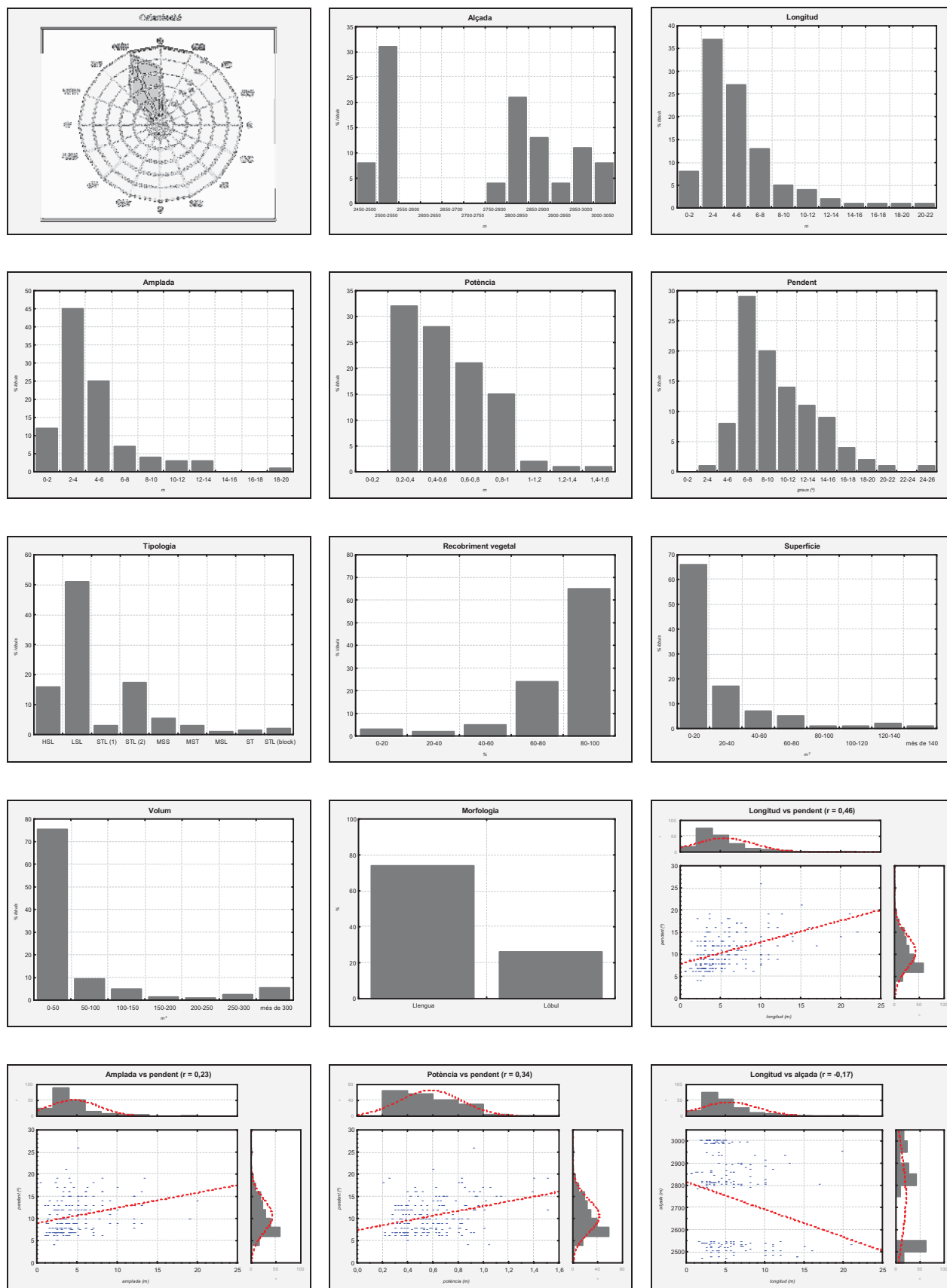


Figura 4.15. Variables morfomètriques de tots els lòbuls d'estudi.

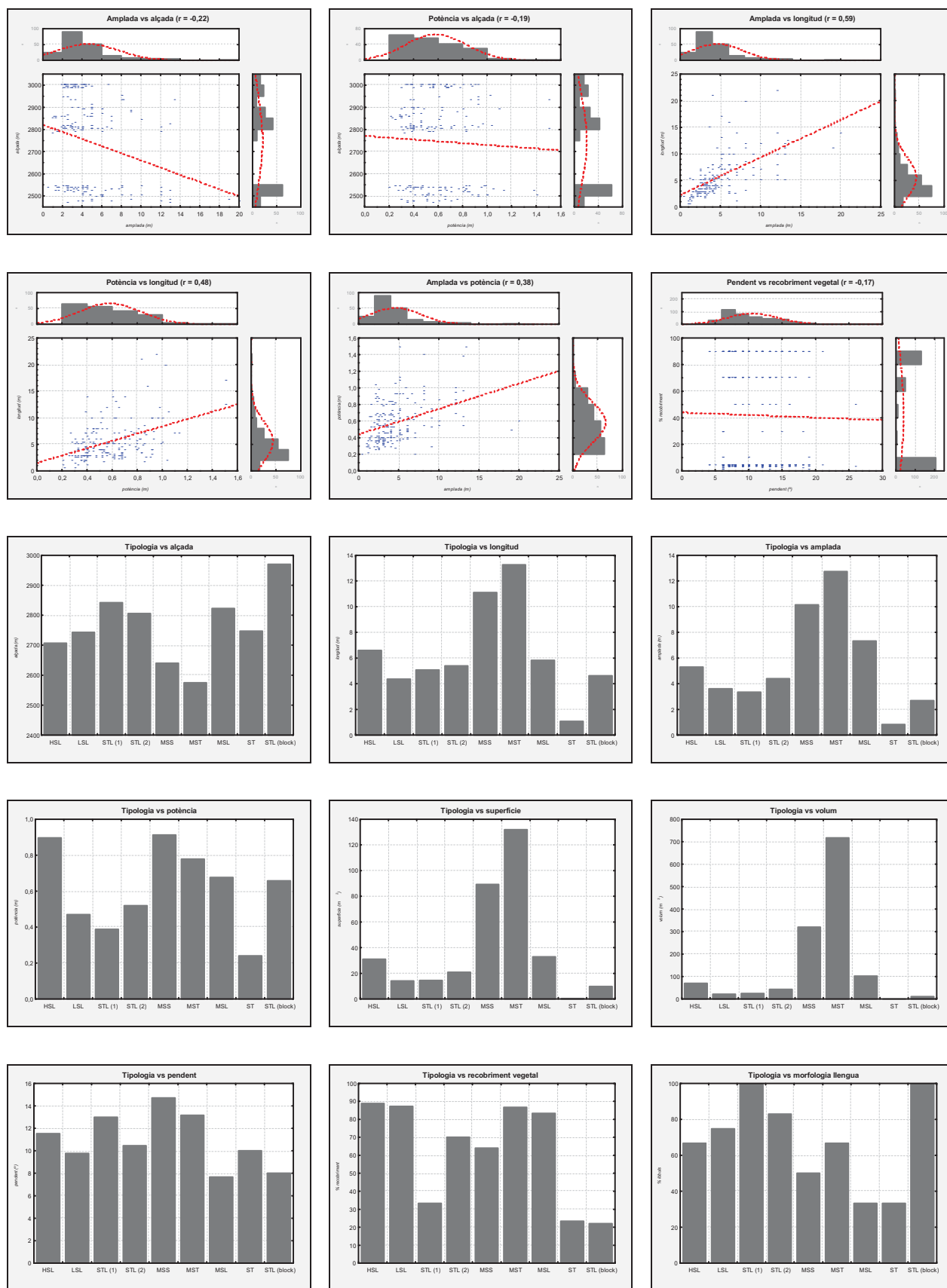


Figura 4.15. Variables morfològiques de tots els lòbuls d'estudi.

Un total de 156 dels lòbuls cartografiats es situen a la vall de San Juan i 46 a Rio Seco. L'exposició septentrional de la primera, amb un nombre de lòbuls sensiblement superior, explica l'orientació majoritària al N-NW i el limitat nombre de lòbuls encarats al Mediterrani, d'orientacions E i NE. Les alçades en què es troben els lòbuls són molt variables, essent decisòria la topografia local i la litologia; així, la disposició estructural dominant a San Juan explica la no existència de lòbuls entre 2.550-2.750 m. El pendent òptim per a la presència de lòbuls a Sierra Nevada es troba entre els 5 i els 15°, concentrant-se el 87,6% dels lòbuls en aquest rang. En el 65% dels lòbuls la vegetació sobrepasa el 80% de la seva superfície, un 24% tenen una cobertura vegetal entre un 60-80% i el restant 11% presenta un recobriment més dispers inferior al 60%.

Pel que fa a les dimensions dels lòbuls, convé destacar que solen tenir unes longituds moderades, no obstant això, un 90% dels lòbuls no arriben als 8 m de longitud³⁷, amb un 64% d'ells oscil·lant entre 2-6 m. El mateix succeeix amb l'amplada: només un 7% dels lòbuls tenen una amplada superior als 8 m i un 70% tenen entre 2-6 m d'ample. El fet de que la longitud tendeixi a mostrar valors més elevats que no pas l'amplada (5,5 vs 4,6 m de mitjana) explica perquè un 74% dels lòbuls tenen forma de llengua, més allargats, mentre que només en un 26% hi domina una morfologia lobular amb un amplada major que la longitud. També solen comptar amb potències reduïdes: un escàs 4% dels lòbuls supera el metre d'espessor en el seu front, amb un 60% fluctuant entre els 20-60 cm de potència (LSL). Lògicament, l'àrea i volum que ocupen els lòbuls és una funció directa d'aquestes variables anteriorment comentades; el 86,1% tenen una àrea inferior a 50 m² i el 84,7% té un volum de menys de 100 m³.

La tipologia resultant d'aquestes característiques anteriors és una preponderància de les morfologies solifluidals vegetalitzades (LSL: 51%; HSL: 15,8%), tot i una destacable proporció d'aquells lòbuls amb < 50% de graves (STL-2: 17,4%). Les sis tipologies restants cobreixen un espectre menor, representant entre totes elles un discret 15,8%.

El control que exerceix la microtopografia de Sierra Nevada en els lòbuls de solifluxió es percep en la seva morfologia. L'alçada no és determinant en la forma dels lòbuls, presentant correlacions³⁸ lleugerament negatives amb la longitud ($r = -0,17$), amplada ($r = -0,22$), potència ($r = -0,19$), recobriment vegetal ($r = -0,27$) i morfologia ($r = -0,19$). Per tant, a mesura que els lòbuls

³⁷ Límit inferior de longitud dels MSS i MST.

³⁸ Correlacions significatives amb $p < 0,05$.

s'emplacen en altures superiors, tendeixen a tenir unes dimensions més reduïdes i a presentar una cobertura vegetal més dispersa, ja que l'alçada limita l'extensió de la vegetació augmentant l'efectivitat dels processos crionivals.

L'orientació no sembla jugar un paper destacat en la morfologia de les manifestacions solifluidals a la Sierra i no presenta correlacions significatives amb cap variable morfomètrica, malgrat que la concentració d'un 65,3% dels lòbuls al N-NW tendeix a emmascarar les correlacions amb la resta de paràmetres. El pendent, negativament correlacionat amb l'alçada ($r = -0,20$), controla moderadament la longitud ($r = 0,46$), la potència ($r = 0,34$) i l'amplada ($r = 0,23$) dels lòbuls. Superfícies més inclinades promouen uns lòbuls més llargs, més amples i amb un front més potent; a més, faciliten un drenatge més ràpid de l'escorrentia superficial i propicien una menor vegetació, existint una dèbil correlació negativa entre el pendent i el recobriment vegetal ($r = -0,17$).

Lògicament, les variables geomètriques dels lòbuls mostren unes correlacions dependents entre sí. L'àrea i el volum ocupats pels lòbuls mostren unes correlacions significatives amb la longitud ($r = 0,81$; $r = 0,58$), l'amplada ($r = 0,88$; $r = 0,78$), moderades amb la potència ($r = 0,41$; $r = 0,33$), i, indirectament, més suavitzades amb el pendent ($r = 0,31$; $r = 0,18$).

La tipologia mereix una consideració especial, ja que la seva catalogació és conseqüència, i no causa, de les característiques morfològiques i pedològiques dels lòbuls. No es poden extreure conclusions de la relació entre les diferents tipologies i l'alçada, ja que els lòbuls es distribueixen en una relativa anarquia altitudinal. Els paràmetres relatius a les dimensions dels lòbuls (longitud, amplada, potència, àrea, volum) mostren sempre uns valors més elevats en aquelles tipologies definides atenent a un tamany i una extensió majors (MST, MSS i HSL), i més reduïts en aquells tipus que representen dimensions menors (LSL, ST).

El pendent i la tipologia també presenten certa correlació, mostrant pendents més elevats aquells lòbuls que enllacen els vessants i els fons de vall (MST i MSS), els poc vegetaltzats (STL-1) i els de front més potent (HSL). La vegetació també mostra un patró conseqüent amb les característiques que defineixen els lòbuls explicitades en la taula 4.2: són aquells lòbuls recoberts de vegetació (HSL, LSL, MST i MSL) els que mostren uns valors més elevats, entre 80-100% de recobriment de la superfície lobular. La morfologia denota una relació menys evident, amb una prevalença de la forma de llengua en la majoria de tipologies, excepte en els MSL i ST.

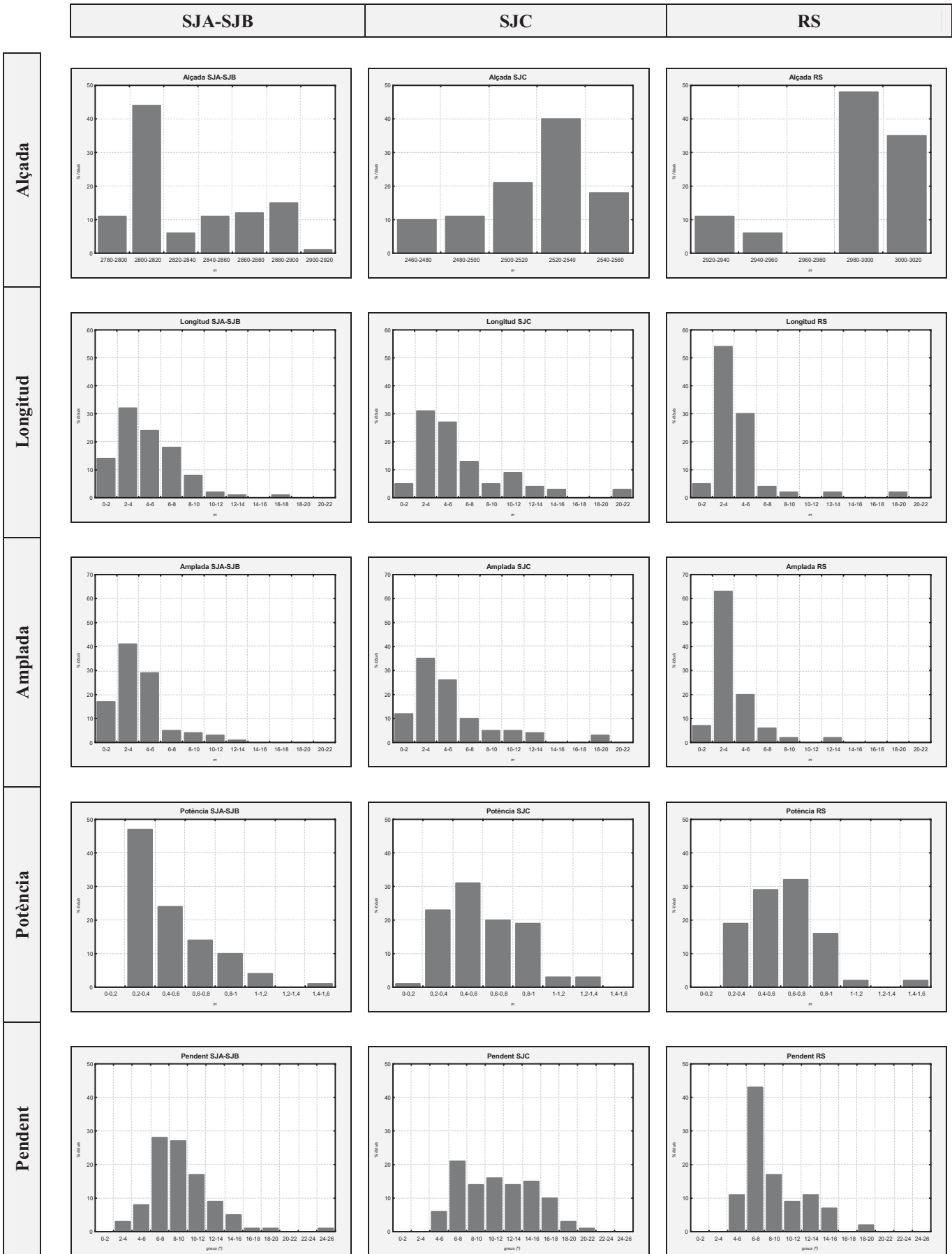


Figura 4.16. Variables morfomètriques dels lòbuls en els diferents sectors d'estudi.

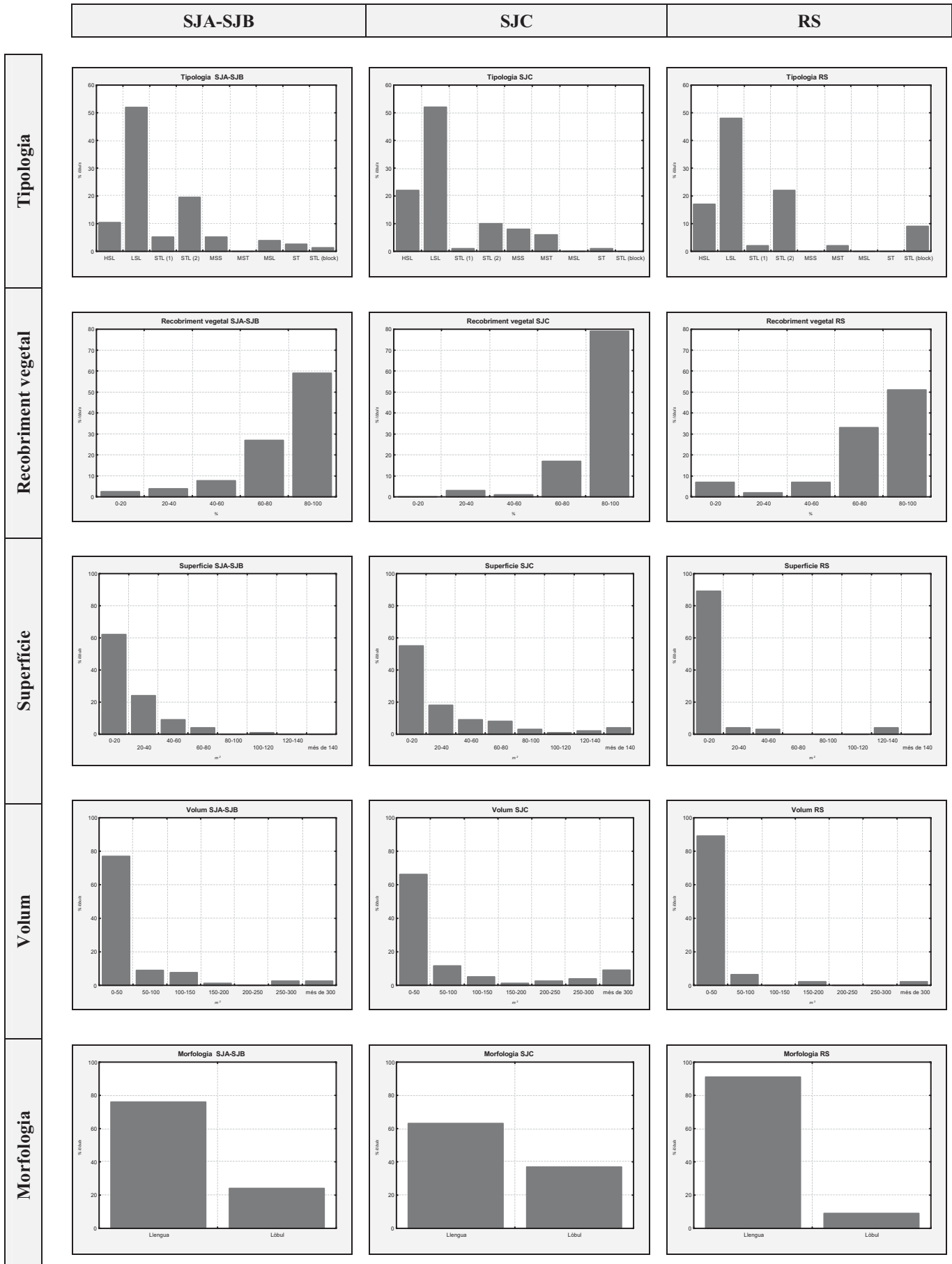


Figura 4.16. Variables morfomètriques dels lòbuls en els diferents sectors d'estudi.

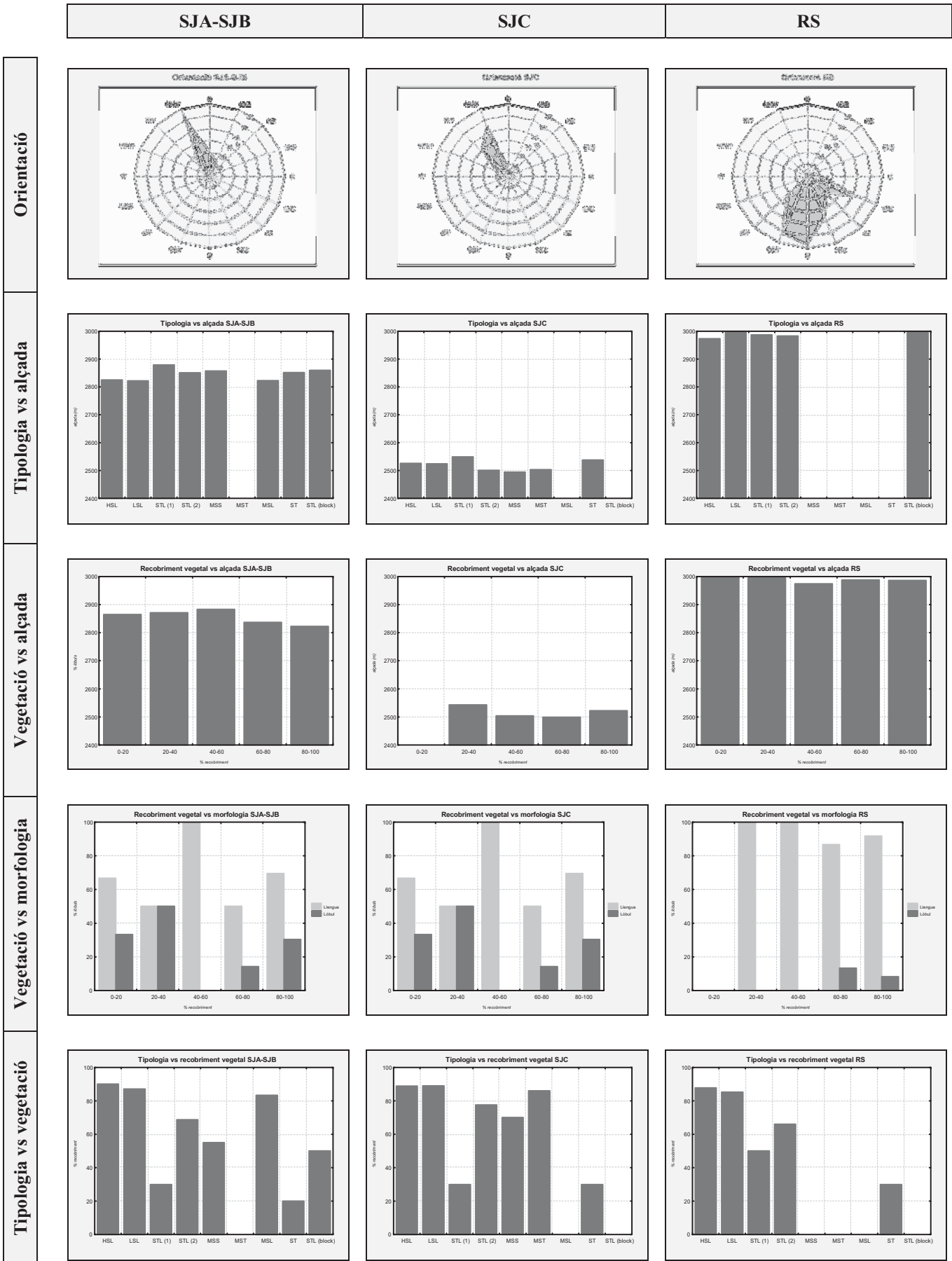


Figura 4.16. Variables morfomètriques dels lòbuls en els diferents sectors d'estudi.

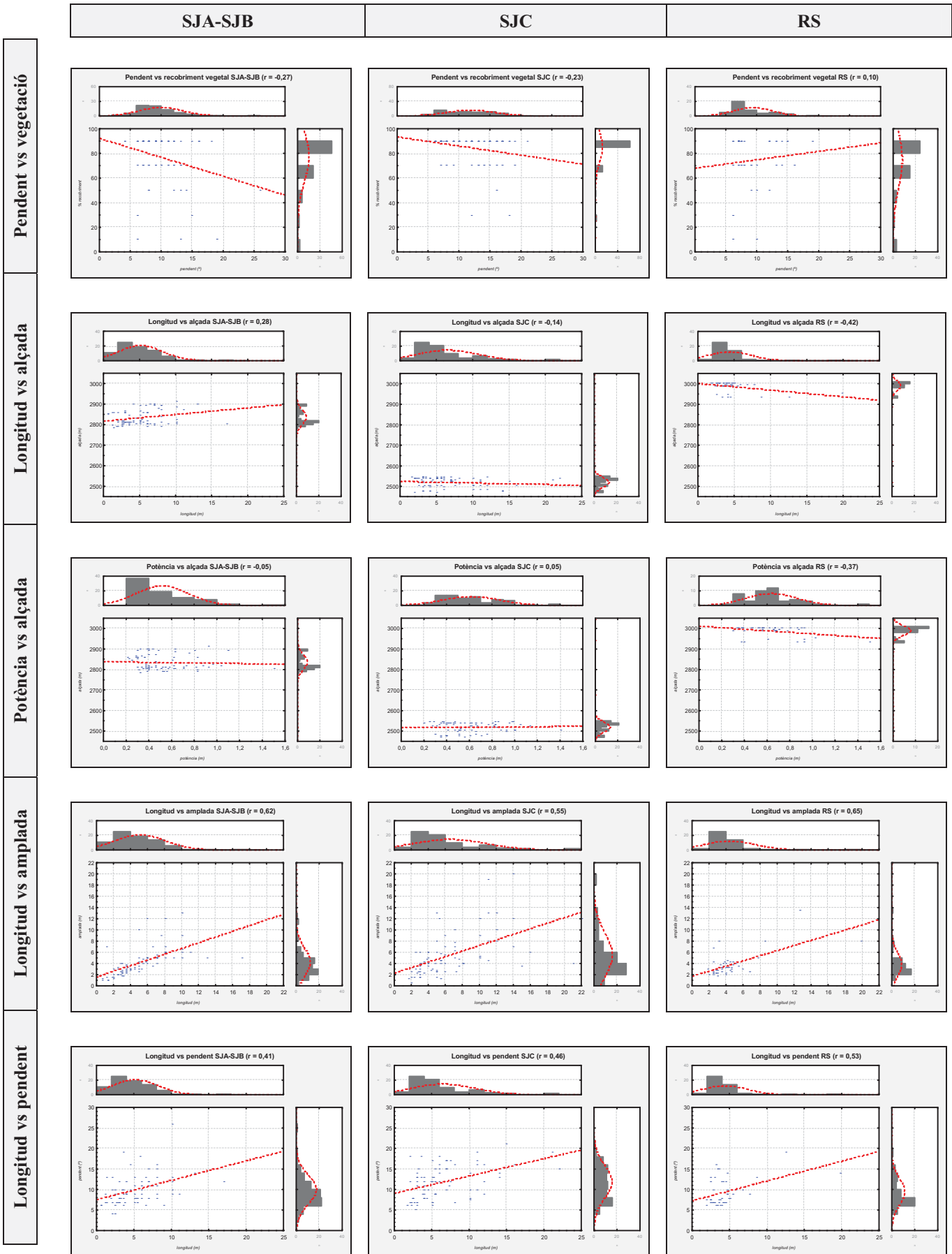


Figura 4.16. Variables morfomètriques dels lòbuls en els diferents sectors d'estudi.

Els gràfics de les pàgines anteriors (figura 4.16) resumeixen les variables dels lòbuls seccionades per àrees d'estudi, a fi i efecte de poder comparar àrees amb un nombre semblant de lòbuls; s'aglutinen així els dos sectors més elevats de San Juan (SJA-SJB), el de menor alçada (SJC) i les dues parcel·les meridionals de Rio Seco (RSA i RSB). Els lòbuls es disposen en altures que van de cotes inferiors als 2.500 m (SJC) fins a alçades lleugerament superiors als 3.000 m (RS). És precisament a RS on els lòbuls presenten una longitud i amplada més reduïts, amb valors mitjans de 4,4 i 3,7 m, augmentant conforme disminuïm d'alçada a 5,1 i 4,2 m a SJA-SJB i 6,5 i 5,5 m a SJC. La superfície i el volum ocupat pels lòbuls respon en conseqüència, amb prevalença dels valors més petits a RS, on el 89% dels lòbuls tenen menys de 20 m² d'àrea i de 50 m³ de volum. Pel que fa a la potència, convé assenyalar que els lòbuls de SJA-SJB es caracteritzen per un front més reduït (52 cm), associat a pendents moderats (9,9°); en canvi, en els sectors de SJC i RS, amb pendents mitjans de 11,8° i 9,4° respectivament, la potència mitjana dels lòbuls és sensiblement superior (61 vs 64 cm).

La tipologia dels lòbuls en els tres sectors mostra una estructura semblant: en tots ells, prop de la meitat dels lòbuls es corresponen a LSL, un percentatge significatiu a STL-2 i HSL i una menor proporció a la resta de tipologies. Convé ressaltar la significativa relació de STL-Block a RS, derivada de l'escampall de blocs erràtics alliberats per la glacera durant el seu retrocés a l'interior del circ. El recobriment vegetal presenta una evident correlació amb l'alçada: com més elevats es troben els lòbuls, menys vegetaltitzats es presenten; així, la coberta vegetal catalogada com a molt alta³⁹ assoleix valors de 51% a RS, 59% a SJA-SJB i 79% a SJC (figura 4.17). La morfologia dels lòbuls en forma de llengua, és a dir, en aquelles unitats en què la longitud ultrapassa l'amplada, és, en tots els sectors, superior a les formes solifluidals lobulars, oscil·lant entre el 63% dels lòbuls de SJC i el 91% de RS. Tant a SJA-SJB com a SJC hi dominen els lòbuls amb orientacions N-NW, mentre que a RS tenen una exposició preferent S-SW. De la relació entre la tipologia i l'alçada on s'assenten els lòbuls no es visualitzen tendències significatives, car l'escàs nombre de certes tipologies de lòbuls en alguns sectors dificulta extreure'n pautes espacials. La vegetació també és dependent de l'alçada, pendent i tipologia dels lòbuls; es percep un comportament similar en els tres àmbits, amb recobriments vegetals superiors al 80% en els casos de HSL, LSL, MST i MSL.

³⁹ Veure pàg. 115. La qualificació "molt alta" representa entre el 80-100% de la superfície del lòbul.

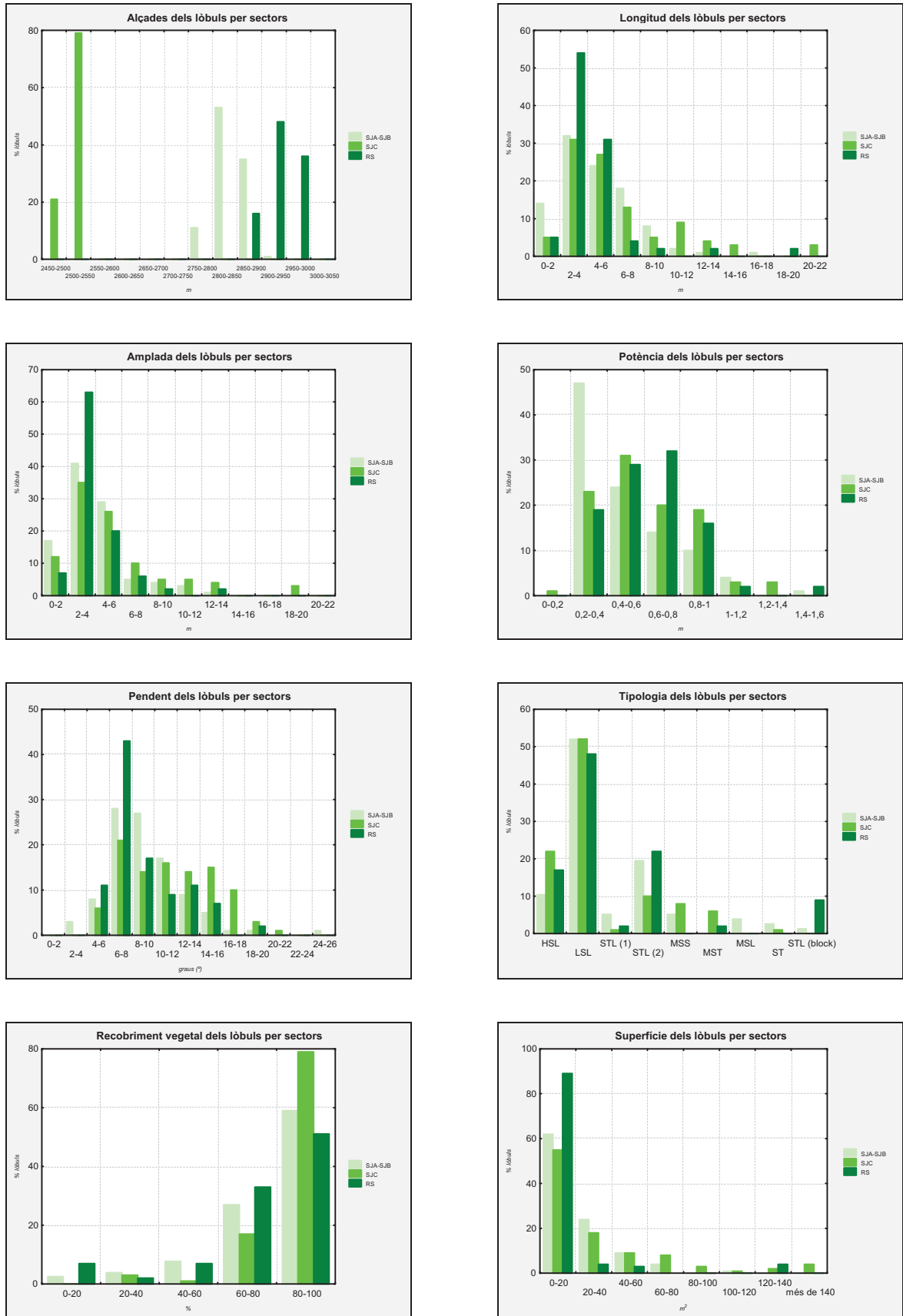


Figura 4.17. Variables morfomètriques dels lòbuls comparades per sectors d'estudi.

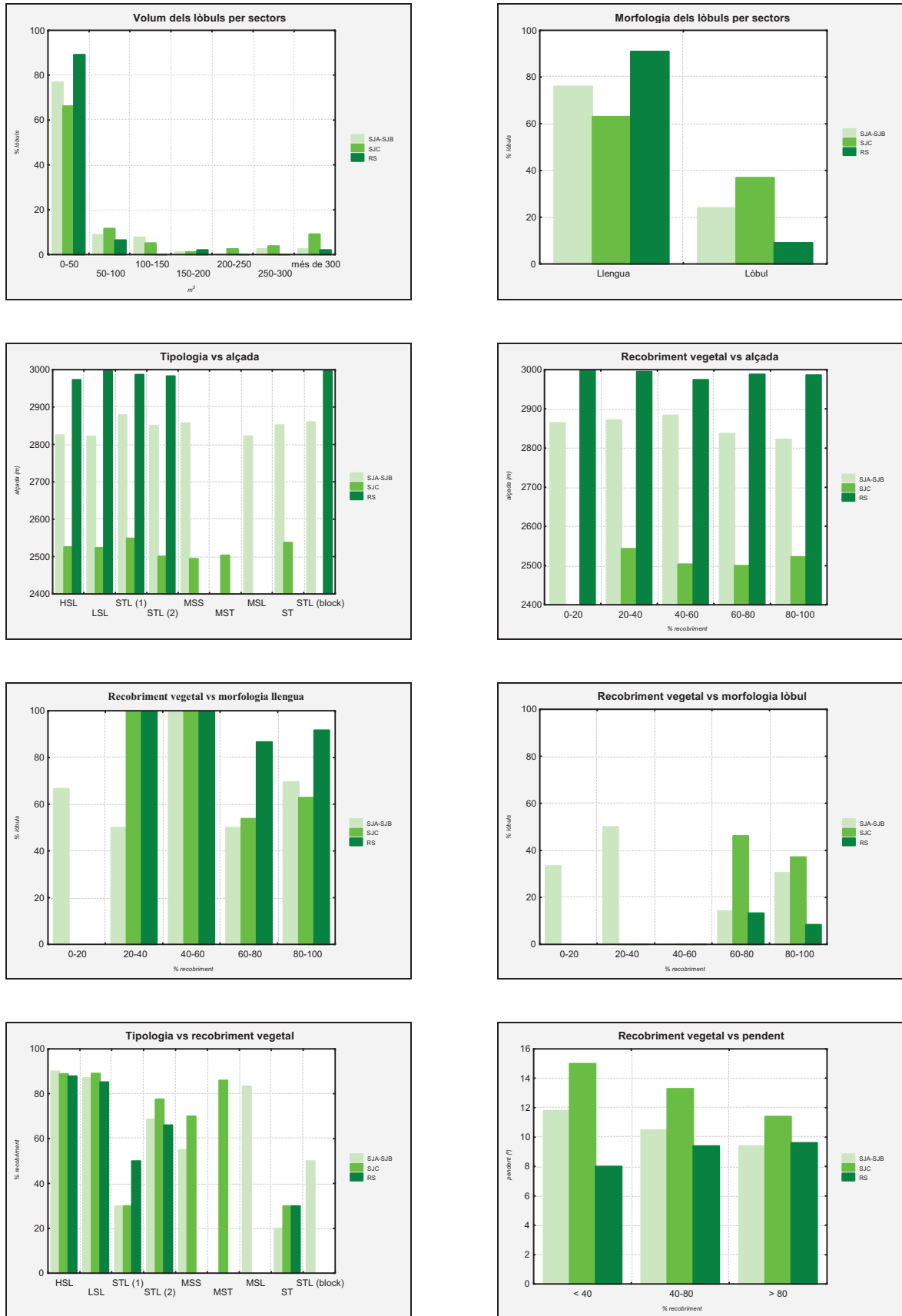


Figura 4.17. Variables morfomètriques dels lòbuls comparades per sectors d'estudi.

Alhora, també presenten majors percentatges de vegetació aquells lòbuls recoberts amb elevada proporció de graves (STL-1) a RS respecte d'aquells que presenten a la vall septentrional de San Juan. A més, es detecta una major proporció relativa de morfologies lobulars en aquelles unitats cobertes per un tapís vegetal menys dens, com es percep en els sectors SJA-SJB i SJC. Existeix un dèbil control del recobriment vegetal per part del pendent, tant a SJA-SJB ($r = -0,27$), com a SJC ($r = -0,23$) i RS ($r = -0,10$): pendents superiors suposen una escorrentia més ràpida i una menor disponibilitat d'aigua en el sòl, escurçant així el període potencial de germinació de la vegetació. La inclinació dels vessants és determinant per explicar la longitud dels lòbuls, ja que pendents més empinats originen lòbuls més llargs, amb correlacions moderadament positives pels tres sectors: SJA-SJB ($r = 0,41$), SJC ($r = 0,46$) i RS ($r = 0,53$).

Tot i que a nivell general l'alçada dels lòbuls presenta una lleugera correlació negativa amb la longitud ($r = -0,17$), per sectors hi ha una certa disparitat: si bé SJA-SJB senyala una connexió positiva ($r = 0,28$), tant SJC com RS mostren valors negatius, de $r = -0,14$ i $r = -0,42$, respectivament. La relació potència vs alçada també denota un comportament anàrquic, amb nul·la dependència a SJA-SJB i SJC i dèbil a RS ($r = -0,37$). Les correlacions dels paràmetres geomètrics dels lòbuls mostren totes elles uns valors significatius, com succeeix per exemple entre la longitud i l'amplada, les quals assoleixen magnituds notables per SJA-SJB ($r = 0,62$), SJC ($r = 0,55$) i RS ($r = 0,65$)⁴⁰.

Taula 4.3. Correlacions entre les variables morfomètriques analitzades de tots els lòbuls.

	H	O	L	W	H	α_1	α_2	T	V	A	V_o	M
H												
O	-0,19											
L	-0,17	0,06										
W	-0,22	0,04	0,59									
H	-0,19	-0,03	0,48	0,38								
α_1	-0,28	-0,02	0,39	0,17	0,47							
α_2	-0,20	0,01	0,46	0,23	0,34	0,91						
T	-0,11	0,11	-0,05	0,01	-0,12	-0,17	-0,15					
V	-0,27	0,09	0,02	0,09	0,13	-0,14	-0,17	0,28				
A	-0,22	0,07	0,81	0,88	0,41	0,24	0,31	0,05	0,02			
V_o	-0,20	0,07	0,58	0,78	0,33	0,13	0,18	0,15	0,04	0,84		
M	-0,19	0,02	-0,15	0,39	0,03	-0,15	-0,14	0,14	0,10	0,15	0,23	

* En vermell, correlacions significatives amb $p < 0,05$.

H: alçada; O: orientació; L: longitud; W: amplada; H: potència; α_1 : angle lòbul; α_2 : pendent vessant; T: tipologia; V: vegetació; A: àrea; V_o : volum; M: morfologia.

⁴⁰ Veure les matrius de correlacions per sectors a l'annex, pàg. 342 i 343.

4.2.1 Impacte antròpic en els *borreguiles*

Anteriorment s'ha comentat l'aprofitament històric de Sierra Nevada per part dels nuclis de població assentats en les seves immediacions⁴¹. La capacitat de la Sierra d'atreure comunitats interessades en l'explotació dels seus recursos naturals (aigua, pastures, neu, fusta, etc) indueix a pensar en un impacte antròpic secular en els seus vessants i valls.

La cartografia i l'anàlisi morfomètric dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada ha evidenciat la dependència entre la distribució d'aquestes geofomes solifluidals i els espais coberts de vegetació, els *borreguiles*. Martín Civantos (2007) detalla el procediment de derivació d'aigües en els *borreguiles* per sota dels 2.500 m i afirma que l'aprofitament històric d'aquests espais per part de la transhumància a Sierra Nevada és relativament recent, ja que es remunta a finals de segle XIX.

Per tal d'analitzar el caràcter antròpic dels propis *borreguiles* hem realitzat una cartografia d'aquestes àrees que concentren els lòbuls a Sierra Nevada a partir de la seva delimitació espacial basada en la interpretació de la fotografia aèria de l'*Instituto Geográfico Nacional* de 1985, processant la informació amb un Sistema d'Informació Geogràfica (ArcGis 9.1). Es percep la intrínseca relació dels *borreguiles* amb la xarxa hidrològica i les taques de neu de fusió tardana: molts cursos d'aigua fixen capçalera en àrees humides de vegetació higròfila en circs i fons de barrancs, és a dir, en aquells sectors de topografia suau i de major disponibilitat hídrica. Els *borreguiles* s'escampen en alçades superiors als 2.000 m⁴², amb prop del 60% de la superfície total concentrada en alçades entre 2.400-2.800 m. Per tant, els àmbits que tendeixen a mostrar un desenvolupament més extens de *borreguiles* són les zones deprimides de pendents suaus en àrees properes a les capçaleres de torrents.

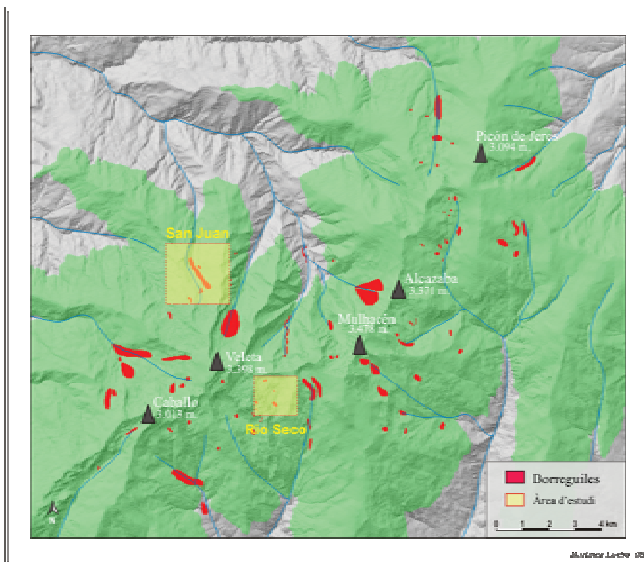


Figura 4.18. Borreguiles a Sierra Nevada. L'àrea ombrejada fa referència a alçades > 2.000 m.

⁴¹ Veure apartat 2.1.5, pàg. 42.

⁴² Només un escàs 1,5% de la superfície ocupada per *borreguiles* a la Sierra s'emplaça per sota dels 2.000 m.

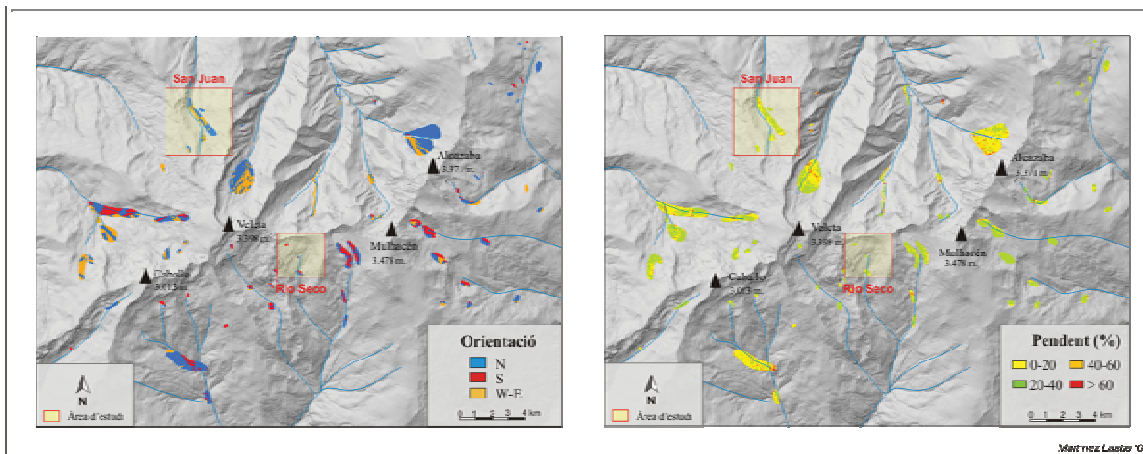


Figura 4.19. Distribució geogràfica dels borreguiles atenent a l'orientació i pendent.

L'orientació nord (NE, N i NW) és la que permet una major extensió de les superfícies ocupades per aquests ecòtops, ja que concentra fins a un 34,9% del total, mentre que en el sector meridional, els *borreguiles* s'escampen de manera més dispersa, amb només un 21,9% orientats al sud (SE, S i SW), evidenciant el control tectònic-morfoestructural en la distribució dels mateixos. El fet de que les valls de la Sierra siguin majoritàriament transversals a la disposició longitudinal de l'eix del massís explica la menor existència de *borreguiles* d'orientació W (23,7%) i E (19,5%). Les figures 4.19 i 4.20 posen de manifest que els sectors de topografia suau i amb pendents inferiors al 20% són àrees freqüentment ocupades per *borreguiles*; aquells emplaçats en topografies més inclinades solen concentrar-se a les capçaleres dels circs. Els *borreguiles* també semblen mostrar una component natural en llur distribució per alçada, amb només un 33,9% ubicats per sota dels 2.500 m, denotant una evident dependència de l'altitud. S'afirma, doncs, el caràcter puntual de l'acció antròpica en la distribució dels *borreguiles* per sobre dels 2.500 m, cinturó altitudinal del nostre estudi, essent més assumible en sectors menys elevats.

San Juan, d'orientació nord, pendents suaus amb *borreguiles* compresos entre 2.500-2.900 m, és una vall ben eloqüent de la topografia idònia per al seu desenvolupament.

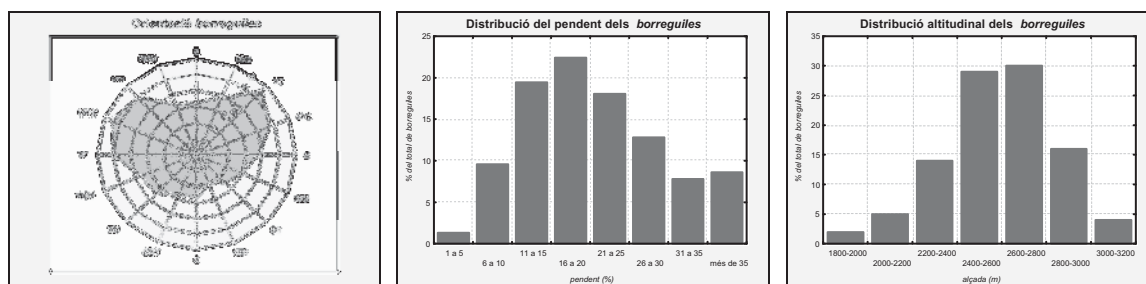


Figura 4.20. Orientació, pendent i alçada dels borreguiles.

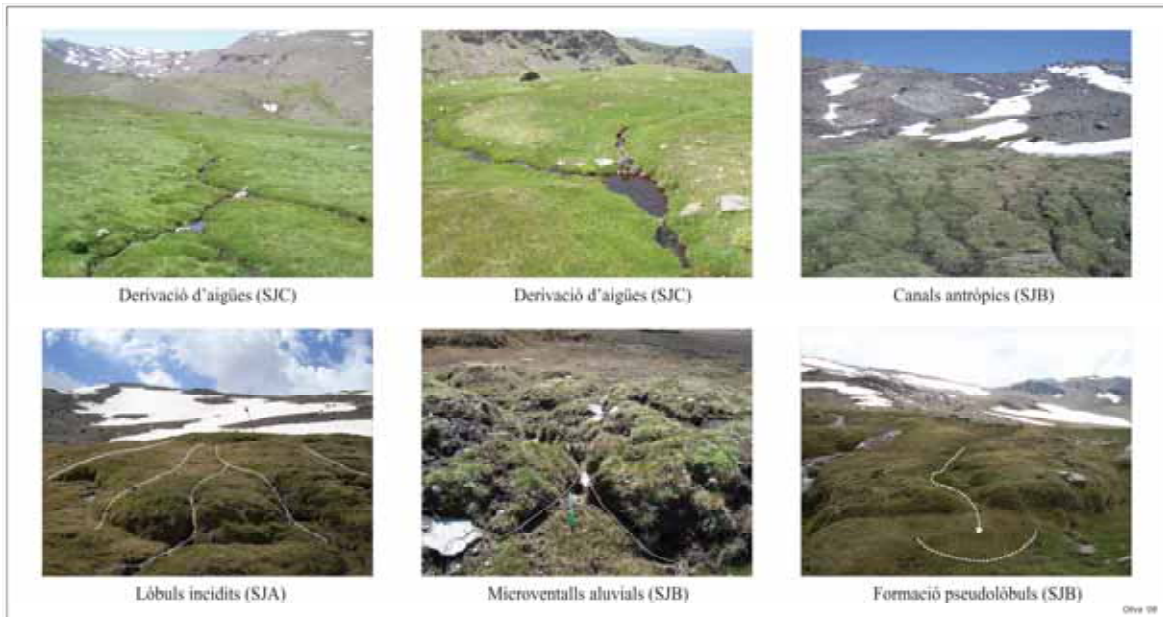


Figura 4.21. Actuacions antròpiques en els borreguiles de Sierra Nevada.

La derivació d'aigües en els *borreguiles* es basa en un complex entramat de canals cavats en la vegetació per intervenció humana. L'home ha incidit canaletes en la coberta superior dels lòbuls de solifluxió per on s'escola l'aigua de fusió, fet que permet aprofitar el salt vertical que suposen els fronts dels lòbuls per redirigir les aigües d'escorrentia ("lòbuls incidits", figura 4.21), eixamplar la superfície irrigada i possibilitar un major recobriment vegetal. Els pastors represen l'aigua amb pedres i blocs ("derivació d'aigües", figura 4.21), desviant-la i derivant-la en multitud de canals durant el desglaç, obtenint així una major superfície per a pastures. A nivell geomorfològic, aquest *careo* d'aigües ha comportat canvis en la morfologia original dels lòbuls, ja que fins a un 20,3%⁴³ del total romanen incidits per acció humana, alguns de manera múltiple (sense afectar però la classificació tipològica prèvia). Aquesta incisió ha creat microventalls al·luvials i pseudolòbuls a la boca de desguàs de les canaletes excavades per l'home (figura 4.21), tot i que no podem deduir la seva influència en el dinamisme actual dels lòbuls. Tanmateix, la manca d'evidències sedimentològiques en l'estructura interna dels lòbuls ens porta a contemplar que l'origen d'aquestes actuacions sigui relativament recent; la major pressió demogràfica en les rodalies del massís i l'extensió de la transhumància als *borreguiles* nevadenses d'altura a finals del segle XIX (Martín Civantos, 2007), en acabar les últimes pulsacions de la LIA, ens indueix a considerar que aquestes actuacions tinguin els seus inicis durant aquest període.

⁴³ SJA (28,6%), SJB (36%), SJC (12,8%), RSA (13,2%), RSB (0%).

4.3 Dinamisme actual dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada

L'ample ventall de geofomes solifluidals en ambients tan diversos com els pols o les muntanyes tropicals fa difícil d'establir mecanismes comuns de moviment en tots ells. La investigació relativa al dinamisme dels lòbuls de solifluxió va iniciar-se a les primeres dècades del segle passat, tot i que fou a tombant de segle XX quan es produí un increment notable de la recerca. Si en un principi l'interès es centrava en la descripció i morfometria dels lòbuls (Andersson, 1906; Rapp, 1960; Price, 1971; Benedict, 1976; Washburn, 1979; Chueca & Julián, 1995; Mieke, 1995; Gorbutnov & Seversky, 1999; Grab, 2000), posteriorment s'ha tendit a canalitzar l'estudi en la capa activa, la sedimentologia i la dinàmica de flux, és a dir, desxifrar què els fa moure's en determinats períodes i concretar perquè romanen immòbils en altres (Steinman, 1978; Alexander & Price, 1980; Gamper, 1983; Veit, 1988, 2002; Veit & Höfner, 1993; Harris et al., 1997, 2003, 2007; Elliott & Worsley, 1999; Mailänder & Veit, 2001; Matsuoka, 2001, 2005; Boelhouwers et al., 2003; Jaesche et al., 2003; Matthews et al., 2005; Kinnard & Lewkowicz, 2005, 2006).

Les altes latituds de l'hemisferi nord han estat l'espai on més s'ha desenvolupat la recerca, degut a la densa presència d'infraestructures i equipaments sobre *permafrost* susceptibles d'ésser afectats per aquests lents moviments de massa. En sectors d'alta muntanya de latituds mitges, la profusió de refugis, xarxes elèctriques i instal·lacions hivernals en el pis periglacial també va incentivar l'afany per conèixer els mecanismes que influeixen en la solifluxió. Per contra, en les altes muntanyes tropicals, el confinament dels processos solifluidals en els sectors culminants, ha desviat l'interès dels investigadors cap a altres expressions geomorfològiques.

Constretes entre les mitges i baixes latituds, les altes serralades de la regió mediterrània es caracteritzen per la marginalitat dels enclavaments afectats per moviments solifluidals, fet que explica perquè no han captat l'atenció de la comunitat científica. En el nostre marc geogràfic més immediat, convé mencionar els estudis referents a la solifluxió de Creus & García Ruiz (1977), Gómez Ortiz (1980), Chueca & Julián (1995) i García Ruiz et al. (2004) a Pirineus, Grimalt & Rodríguez (1994) a les Illes Balears, Palacios et al. (2003) al massís de Peñalara en el Sistema Central i Gómez Ortiz et al. (2005) a Sierra Nevada.

Entre les variables que intervenen en el desplaçament dels lòbuls cal destacar, per un costat, algunes d'estructurals, com la topografia, pendent i granulometria, i, per altra banda, altres de més temporals i efímeres, com les condicions climàtiques, que són un dels factors clau a l'hora de determinar el dinamisme de la solifluxió. El coneixement precís de l'activitat dels lòbuls de solifluxió sota el règim climàtic present permetrà establir analogies amb el seu comportament durant els darrers mil·lennis a partir de la interpretació de la seva litostratigrafia.

Taula 4.4. Taula resum de diferents paràmetres relatius als processos solifluidals estudiats per nombrosos autors en diverses àrees del planeta (a partir de Matsuoka, 2001).

PROCESSOS SOLIFLUIDALS: RANG TÈRMIC, DESPLAÇAMENT I PROFUNDITAT DE MOVIMENT						
Àmbit	Rang tèrmic (°C)		Desplaçament (cm/any)		Prof. moviment (cm)	
Latituds polars	-19	-3	0,6	6,8	12	90
Latituds subpolars	0	4	0,9	88	20	30
Muntanyes humides de lat. mitges	-3	7	0,3	25	4	50
Muntanyes àrides de lat. mitges	-6	-2	0,03	49	8	80
Muntanyes tropicals	-1	1	0,36	100	3	18

En zones amb presència de *permafrost*, la superfície de lliscament roman entre la base de la capa activa i el límit superior del *permafrost*, aprofitant la saturació del terreny derivada de la fusió nival. La taula 4.4 evidencia que, en aquests sectors amb temperatures molt negatives, les tasses de desplaçament anual són reduïdes, tot i que soliflueix una porció de sòl més profunda; en canvi, en regions amb temperatures anuals lleugerament negatives o, fins i tot positives, lligades a elevats índexs d'humitat, els moviments anuals són majors, malgrat restar més restringits als primers decímetres de la superfície (figura 4.22).

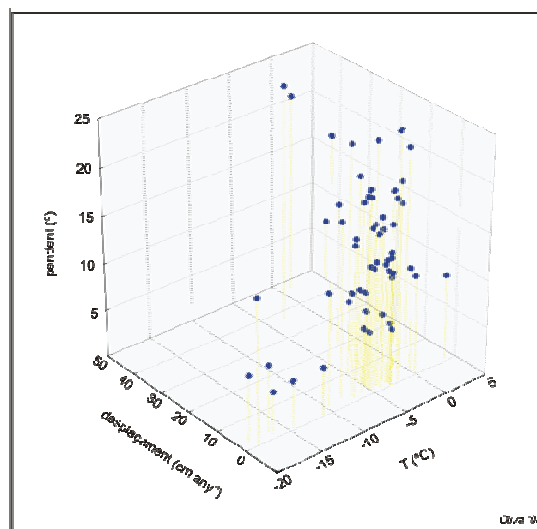


Figura 4.22. Relació entre temperatura, pendent i tasses de desplaçament en diverses àrees del planeta (a partir de Matsuoka, 2001).

Les tasses de desplaçament solifluidal depenen genèricament de factors climàtics, hidrològics, geològics i topogràfics (Matsuoka, 2001). En el cas de Sierra Nevada, aquests factors es reflecteixen en un seguit d'elements estructurals (pendent, cobertura vegetal, textura) i d'altres externs més variables (duració i espessor del mantell nival, règim tèrmic del sòl, disponibilitat hídrica):

- **Pendent**

El pendent òptim per a la solifluxió es situa entre els 5 i 35° (Ballantyne & Harris, 1994), ja que en pendents inferiors l'acció de la gravetat no és suficient per incentivar els processos i inclinacions superiors empenyen els lòbuls al col·lapse (Price, 1969; Kinnard & Lewkowicz, 2006). Els lòbuls de la Sierra s'emporten en un rang de pendents que oscil·la entre 4 i 26°.

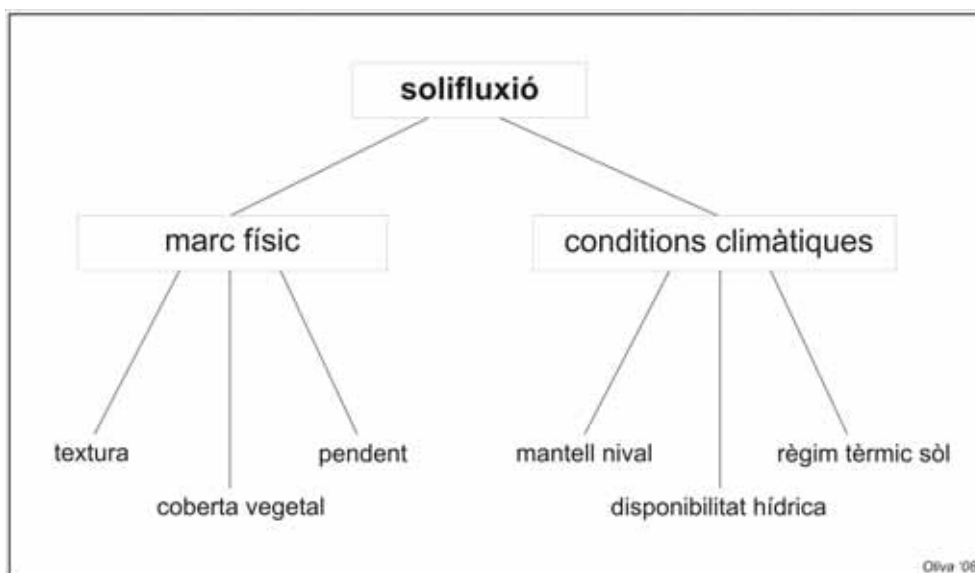


Figura 4.23. Factors decisius en la solifluxió a la Sierra.

El grau d'inclinació dels vessants condiciona el drenatge i l'escorrentia superficial; pendents més marcats evacuen més ràpidament l'aigua superficial i priven el desenvolupament dels sòls. En canvi, superfícies més planeres permeten una major retenció i infiltració de l'aigua en el terreny, fet que reforça els processos edàfics i permet una extensió de la cobertura vegetal, frenant així els processos solifluidals. Tanmateix, la disponibilitat hídrica és decisòria en la solifluxió, ja que la manca d'aigua redueix la seva eficàcia inclús en pendents elevats (King & Schmitt, 1993).

Nombrosos estudis en altes latituds quantifiquen tasses de solifluxió més elevades a mesura que augmenta el pendent⁴⁴, tot i que en latituds mitges la seva influència pot restar emmascarada per altres factors com poden ser la freqüència dels cicles de gel-desgel, la textura i la humitat (Matsuoka, 2001). Lògicament, el pendent també determina el tamany del material mobilitzable per la solifluxió; vessants molt empinats no suporten potents dipòsits de materials fins, fàcilment desplaçables, que tendiran a mobilitzar-se per gravetat cap a sectors topogràficament més planers.

- **Cobertura vegetal**

Els lòbuls de solifluxió es localitzen preferentment per sobre del *timberline*, on la cobertura vegetal arbòria i arbustiva no frena els moviments de massa lents i l'existència de sòl glaçat hi és significativa durant bona part de l'any.

Els *borreguiles*⁴⁵ són els prats higròfils on trobem els lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada i tendeixen a entapissar les capçaleres i els fons de les valls glacials de topografia plana, aprofitant el discórrer tranquil de les aigües de fusió en aquests indrets. Un 72% dels lòbuls estudiats té un recobriment vegetal pràcticament total, mentre que el restant 28% el conformen unitats amb una significativa proporció de blocs i graves. L'elevat grau de vegetaltzació dels mateixos és causa i conseqüència de la poca efectivitat dels processos solifluidals actuals a la Sierra.

La pròpia extensió de la cobertura vegetal suposa un impediment físic que alenteix o, fins i tot, paralitza la solifluxió⁴⁶; a la vegada, la presència de vegetació retroalimenta l'estabilització dels vessants, ja que inhibeix la intensitat i freqüència dels cicles de gel-desgel reduint així la solifluxió. En àrees sense vegetació, les variacions volumètriques derivades dels canvis d'estat que pateixen les partícules, promouen la translocació de les mateixes i determinen una menor estabilitat dels sediments, augmentant així la crioreptació.

⁴⁴ Amb excepcions, com Akerman (1993), que constata que el pendent no influeix en el ritme de desplaçament dels lòbuls de solifluxió, amb altes tasses de moviment interanual, més elevades com més petites i superficials són les geofomes monitorades a Svalbard (Noruega).

⁴⁵ Veure apartat 2.1.3, pàg. 38.

⁴⁶ A més, cal tenir en compte la disminució del recobriment vegetal amb l'alçada, perfectament constatable en el recobriment dels lòbuls que facilita el desplaçament solifluidal. Veure apartat 4.2, pàg. 120-123.

Ulfstedt (1993) afirma que una cobertura vegetal densa, a més de reduir la solifluxió, és determinant per atorgar a aquestes geofomes les clàssiques morfologies lobulades i percep que en aquells sectors on els sòls són més fins les formes solifluidals resultants són molt vagues.

En una conca d'alta muntanya dels Alps austríacs emplaçada en el cinturó periglacial actual, Veit (1993) evidencia el paper clau de la vegetació en la dinàmica solifluidal quantificant les variacions en el percentatge de cobertura vegetal durant l'Holocè entre una fase en què dominava la solifluxió (Neoglaciació, 38%) i una altra en què imperava l'edafogènesi (HWP, 95%). Actualment, el recobriment vegetal es situa en valors intermitjos (63%), amb tasses de desplaçament solifluidal entre 20-80 cm/any en els primers 40-50 cm de la superfície.

- **Textura**

El tamany del material mobilitzable per la solifluxió està en relació amb la fracció mineral del sòl; en el nostre cas, l'alt grau de meteorització dels esquistos que conformen el rocam de l'àrea d'estudi, facilita la seva disgregació, l'alliberament d'argiles i la posterior mobilització.

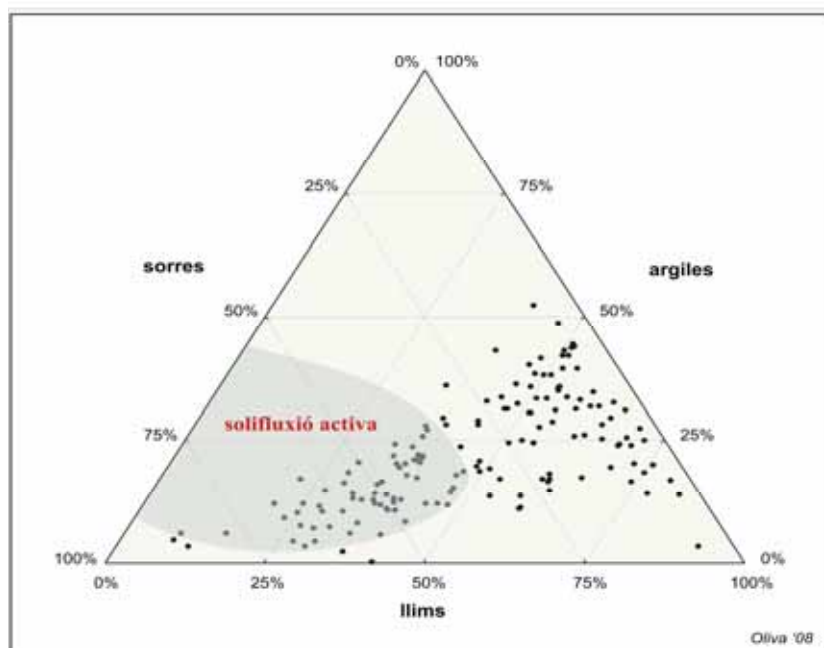


Figura 4.24 . Textura de les mostres analitzades. Ombrejada la textura efectiva per a la solifluxió (Harris, 1981).

Harris (1981), a partir de l'experimentació de laboratori, determina que una proporció elevada de sorres (> 50%) és una textura adient perquè es doni una solifluxió activa. De les 155 mostres de textura analitzades a Sierra Nevada, corresponents a les diferents unitats litostratigràfiques dels lòbuls estudiats, el 37,9% presenten una granulometria dins aquests valors experimentals (figura 4.25), textura que podria estar lligada a la fàcil disgregació del rocam, molt tectonitzat i fortament laminat⁴⁷. En canvi, King & Schmitt (1993) detecten una alta susceptibilitat dels sòls francs al gel-desgel i els defineixen com els més aptes per a la solifluxió.

A més de la matriu fina, la dinàmica pròpia dels moviments de vessant també diposita graves en major o menor abundància, sempre en funció de la capacitat de transport de cada moment. En el cas de Sierra Nevada, els esquistos mobilitzats presenten una morfologia angular pel seu poc rodatge, amb una certa imbricació respecte el pendent i assoleixen continguts d'entre 10-75% en els dipòsits solifluidals.

- **Disponibilitat hídrica**

La dualitat del ritme climàtic de la Sierra, amb hiverns freds i humits i estius càlids i secs, determina que les precipitacions hivernals en forma de neu constitueixin la principal aportació hídrica⁴⁸. Les escasses setmanes que transcorren durant la fusió nival, molt variables en funció de la irregularitat interanual de les precipitacions i temperatures, són un moment crucial per activar els processos solifluidals en el massís.

La duració i espessor del mantell nival serà determinant, doncs, per subministrar aigua als lòbuls durant l'estació de desglaç. La recerca en altres regions del planeta també considera decisiu el contingut d'aigua en el sòl, tot i que Harris et al. (2003) han constatat experimentalment que no és necessari arribar a la saturació del lòbul per activar la solifluxió. S'insinua clau així el paper de les últimes congestes de neu que subministren aigua efectiva per a la solifluxió en presència, encara, de sòl glaçat en profunditat.

⁴⁷ Veure discussió pàg. 264.

⁴⁸ Un 88% de les precipitacions que es recullen a l'Alberg Universitari de Sierra Nevada (2.507 m) cauen entre octubre i maig, majoritàriament en forma de neu.

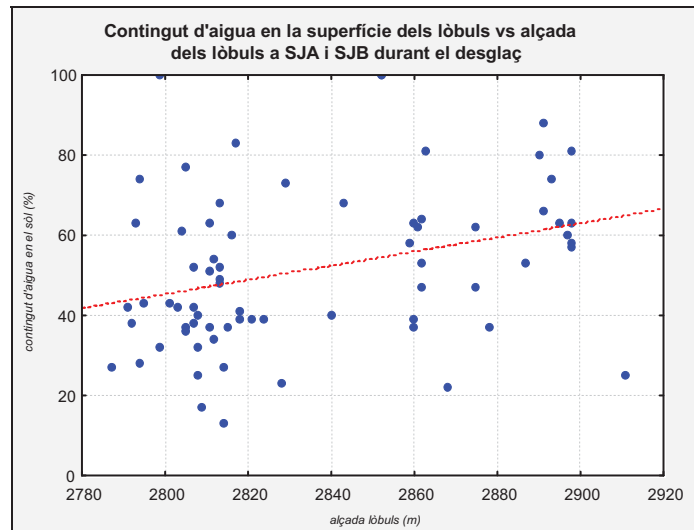


Figura 4.25. Contingut d'aigua en el sòl i alçades dels lòbuls en els sectors SJA i SJB durant el desglaç.

En altes latituds es detecta que climes més càlids i humits reactiven la solifluxió, ja que la major profusió i duració de les darreres clapes de neu anuals facilita una disponibilitat líquida més llarga i continuada (Seppälä, 1993; Matthews et al., 2005). En el cas de Sierra Nevada, els elevats continguts d'aigua en el sòl només esdevenen en el període de fusió de finals de primavera i principis d'estiu, ja que a l'epicentre d'aquesta estació i principis de tardor, la contudent manca de precipitacions limita l'escorrentia superficial i la solifluxió. A més de la menor disponibilitat hídrica en el sòl, a la tardor la inexistència de sòl glaçat subsuperficialment dificulta l'efectivitat dels processos solifluidals. Al nostre entendre, les escasses setmanes que transcorren durant la fusió nival en presència de sòl glaçat en profunditat són, doncs, el període idoni per l'activitat solifluidal a Sierra Nevada.

A mitjans de juny de 2007, es va procedir a mesurar el contingut d'aigua a la part superficial dels lòbuls de solifluxió de la vall de San Juan⁴⁹; la figura 4.27 fa referència als lòbuls dels sectors SJA i SJB, evidenciant la dependència del contingut d'aigua en el sòl de l'alçada en ple desglaç. Les aigües de fusió propicien que s'incrementi el contingut líquid en els lòbuls a les proximitats de les congestes, minvant ràpidament conforme ens allunyem de les mateixes: en un escàs centenar de metres de desnivell els lòbuls registren un contingut d'aigua en el sòl fins a un ~25% menor. La

⁴⁹ L'abundància de neu caiguda durant la primavera va privar d'arribar l'àrea d'estudi de Rio Seco i de prendre les mateixes mesures pels lòbuls de RSA i RSB.

romanència de nombroses congestes de neu per sobre dels 2.850-2.900 m durant aquest període crucial per a la solifluxió es percep en un contingut d'aigua superior en els lòbuls del sector de SJA (62,2%), decreixent de manera accelerada conforme descendim. En els lòbuls emplaçats a menor alçada, la fusió nival ja havia esdevingut dies enrere, fet que es traduïa en menors percentatges d'aigua en el sòl (SJB, 49,1%; SJC, 45,2%).

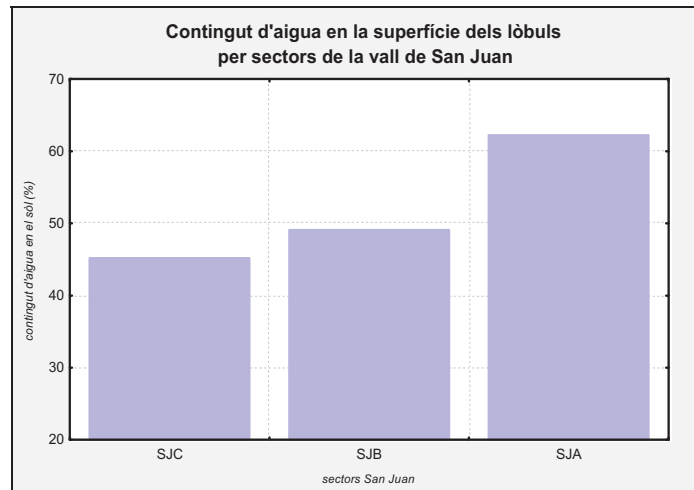


Figura 4.26. Contingut d'aigua en la superfície dels lòbuls en els sectors d'estudi de la vall de San Juan.

- **Cobertura nival**

Com s'ha comentat prèviament, la duració i extensió del mantell nival a Sierra Nevada és determinant pel contingut d'aigua en el sòl i decisiva en el desencadenament dels processos solifluidals. La concentració hivernal de les precipitacions propicia una cobertura nival que, en alçades superiors als 2.500 m, sol allargar-se de novembre a maig, lògicament en funció de les característiques nivològiques de l'any en qüestió i de la morfotopografia. A més, convé considerar la redistribució de la neu per efecte del vent, que tendeix a redipositar-la en sectors enclotats i arrecerats de fons de vall⁵⁰.

El paper de l'element blanc en la solifluxió ha estat àmpliament discutit i cal concebre'l en una doble direcció:

⁵⁰ Fet especialment evident en els sectors on s'assenten els lòbuls a la vall de San Juan.

- Per una part, la neu, com la vegetació, actua a mode d'aïllament tèrmic, de manera que hiverns nivosos i en els quals el mantell s'estabilitza aviat, redueixen la penetració del gel en profunditat; per contra, hiverns secs i freds faciliten la formació d'un pregon horitzó glaçat i augmenten l'efectivitat dels processos de gel-desgel diari durant la primavera (Matsuoka, 2001). És el cas de climes humits d'alta muntanya amb precipitacions estivals significatives, com els Alps suïssos, on Gamper (1983) considera que la solifluxió es veu afavorida per la combinació d'estius frescos i humits amb hiverns més freds i secs, menystenint el paper de l'espessor nival hivernal i emfatitzant la importància del període lliure de neu, molt especialment, la tardança de la primera nevada. Veit (1993), pels Alps austríacs, admet que hiverns de molta neu i temperatures càlides suposen una paralització de la solifluxió, destacant el paper clau de la data de la primera nevada a la tardor, que estabilitza la dinàmica de vessants. Ambdós, per tant, posen l'accent en el fet de que als Alps la manca d'una espessa cobertura nival durant l'hivern facilita la penetració de les baixes temperatures en el sòl i determina una profunda capa glaçada, la qual actua com a superfície de lliscament durant el desglaç.
- Tanmateix, hiverns humits condicionen l'abundància i duració de les congestes de fusió tardana, que suposen un input més continuat i prolongat d'aigua durant el desglaç⁵¹. És un mecanisme crucial per impulsar la solifluxió en àrees amb precipitacions escasses durant l'estació càlida de l'any, com és el cas de Sierra Nevada, diferent al que succeeix en altes muntanyes humides de mitges latituds com els Alps.

- **Règim tèrmic del sòl**

Els processos periglacials basen la seva eficàcia geomorfològica en l'activitat mecànica que es dona en la capa més superficial del terreny, aquella més exposada a l'atmosfera i que respon més sensiblement a les variacions de la temperatura de l'aire. La temperatura del sòl és un paràmetre intrínsecament lligat a la temperatura de l'aire, tot i que determinats factors (textura, mantell nival i cobertura vegetal) esmoreeixen la penetració de l'ona tèrmica en profunditat⁵². La proximitat geogràfica al Picacho del

⁵¹ A tall d'exemple, Thorn (1988), per als Alps japonesos, calcula que la crioreptació i la gelifluxió són un 50% més efectives en la proximitat a les congestes de neu, augmentant els processos de meteorització i transport.

⁵² Veure apartat 4.3.1, pàg. 141.

Veleta (3.398 m), d'on es tenen mesures tèrmiques continuades a intervals de 2 hores des de l'any 2002, permet controlar la temperatura de l'aire a les culminacions del massís. La temperatura mitjana anual del període 2003-2007 fou de 0,8°C, insinuant el perquè de la no existència de *permafrost* en el massís, excepte en enclavaments molt puntuals heretats de fases més fredes (Gómez Ortiz et al., 2005).

Els sensors tèrmics instal·lats en lòbuls de les valls de San Juan i Rio Seco denoten que l'espessor de la capa estacionalment glaçada està en funció de les característiques tèrmiques i nivològiques de cada any. La base de l'horitzó glaçat és més profunda a la cara nord (lòbul SJB.38) que a la sud (RSA.7)⁵³, tot i tenir els sensors emplaçats, en aquest cas, en un lòbul situat més de 180 m per sota. La causa rau en la diferent exposició a la radiació solar incident, ja que altres factors que intervenen en el règim tèrmic del sòl, com poden ser la cobertura vegetal i la textura, són similars en els dos lòbuls monitorats. La major insolació del vessant meridional propicia una fosa de neu ràpida, alliberament de la protecció nival i un accelerat desglaçament del lòbul, mentre que una major persistència de la neu al vessant septentrional possibilita una major durada dels valors negatius en el sòl. En ambdós casos, tot i l'existència d'horitzons glaçats d'entre 70-100 cm de profunditat, aquests no han estat suficients per activar d'una manera significativa la solifluxió, fet que ens porta a considerar la disponibilitat líquida en el sòl i la seva persistència temporal com el factor limitant clau de la solifluxió a la Sierra.



Figura 4.27. Nivell de sòl glaçat a ~50 cm de profunditat en el lòbul SJB.38 el dia 13.6.2007.

⁵³ Veure pàg. 142-143 i 145.

4.3.1. Monitoratge tèrmic del sòl

En àrees amb presència de *permafrost*, la profunditat de la capa activa i el *timing* de l'englaçament/desenglaçament del sòl es contempla com un element decisiu en l'activitat solifluidal; en zones desproveïdes de *permafrost*, la solifluxió també es veu altament condicionada pel règim tèrmic del sòl, destacant els intents de la majoria d'estudis d'interrelacionar el dinamisme i la termicitat dels lòbuls (Matsuoka, 2001). El monitoratge tèrmic a partir de *dataloggers* constitueix el mètode més àmpliament estès per controlar l'evolució de la temperatura en el sòl al llarg de l'any, que, en el cas de Sierra Nevada, s'ha dut a terme mitjançant els dispositius autònoms UTL-1 (Hoelzle et al., 1999).

A mitjans de setembre del 2006 es van instal·lar 5 aparells UTL en un lòbul a la vall de Rio Seco (RSA.7), en el vessant meridional del massís, a les profunditats de 5, 10, 20, 50 i 100 cm. Alhora, a finals d'agost de 2007 es va procedir a instal·lar 5 sensors més a les mateixes profunditats en una unitat de la vall de San Juan (SJB.38), d'exposició septentrional. La morfologia fresca del lòbul de San Juan, amb nombroses protuberàncies i col·lapses en el seu front (*mudflow-affected solifluction lobes*), insinua una activitat solifluidal destacada en el període actual o recent; en canvi, la geoforma solifluidal de Rio Seco, de límits molt retallats i front ben definit (*high solifluction lobe*), indueix a considerar la seva inactivitat sota el règim climàtic actual. Les dades obtingudes denoten la inexistència de *permafrost* actualment a les capçaleres de les valls de San Juan i Rio Seco, tot i que mostren l'existència d'una profunda capa glaçada estacional que s'allarga entre 7-8 mesos.

Els lòbuls seleccionats tenen una textura i un recobriment vegetal similar, a fi i efecte de facilitar la comparació dels valors de temperatura obtinguts en sengles unitats solifluidals. Les condicions climàtiques de cada any determinen l'espessor i la durada de la capa glaçada. A Rio Seco, la formació d'aquesta capa s'inicia a mitjans de novembre tant durant el 2006 com el 2007. Les escasses precipitacions de finals d'estiu i tardor expliquen els baixos continguts d'aigua en el sòl i faciliten la penetració de l'ona tèrmica en profunditat, amb un nivell glaçat que penetra fins a 60-70 cm entre febrer i maig de 2007 i 2008. L'assentament del mantell nival en ambdós anys facilita l'estabilització de les temperatures en valors lleugerament negatius i aïlla el sòl de valors tèrmics extrems; es constata, en general, que els sensors tèrmics emplaçats en els primers decímetres de profunditat responen de manera més sensible a les variacions tèrmiques exteriors.

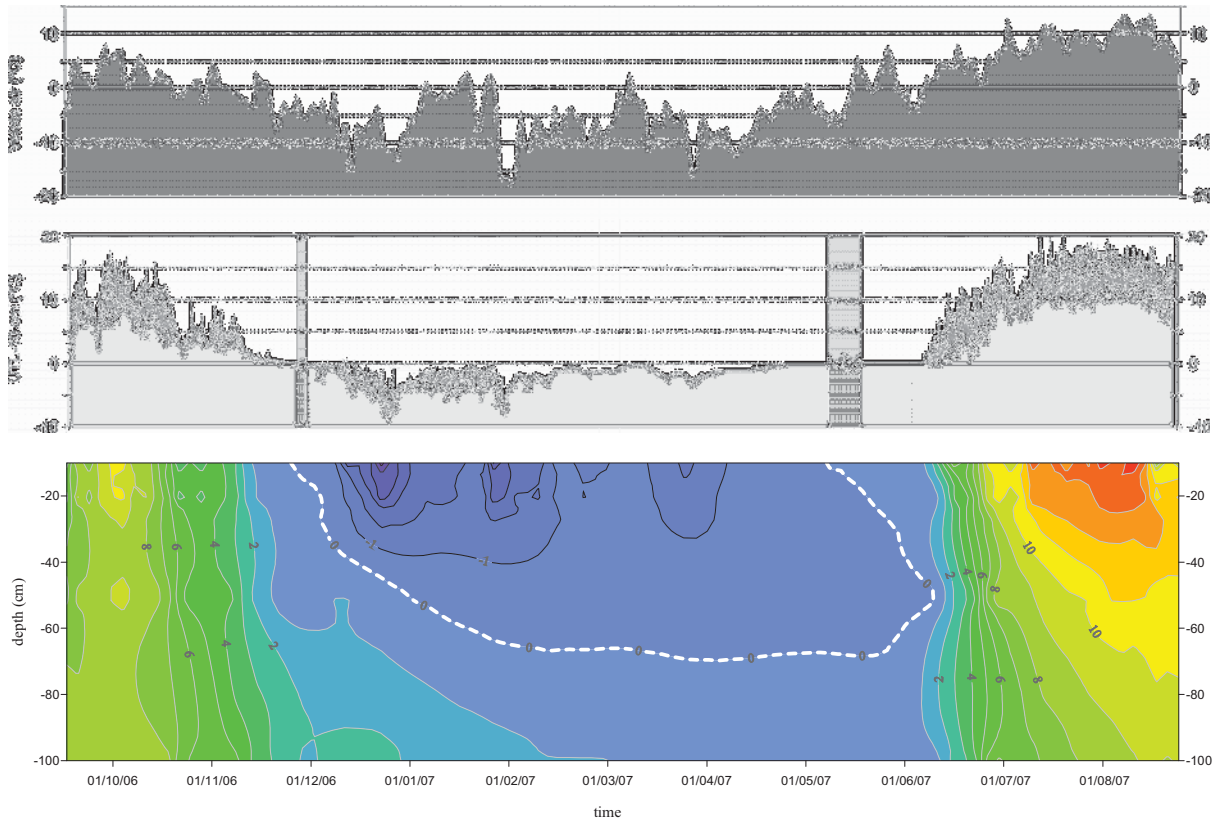


Figura 4.28. Evolució tèrmica del sòl de setembre del 2006 a agost del 2007 en el lòbul RSA.7 del circ de Rio Seco (figura inferior). Temperatura mitjana diària de l'aire al Picacho del Veleta, a 3.398 m (figura superior). Temperatura a 10 cm de profunditat en el lòbul en qüestió (figura d'enmig, on les barres ombrejades senyalen els dies amb cicles de gel-desgel).

La inèrcia tèrmica comporta que la màxima profunditat glaçada esdevingui a primavera, escasses setmanes abans que en superfície comenci el desgelament del lòbul RSA.7 (figura 4.29). A mitjans de maig de 2007, una nevada tardana amb espessors de neu humida superiors als 50 cm per sobre de 2.500 m propicia que la temperatura a 10 cm de profunditat s'estabilitzi en 0,13°C, valors lleugerament positius fins a principis de juny, en què es dona el desgelament complet del lòbul. Són aquests 7-10 dies el moment idoni per a la solifluxió a la Sierra, ja que es detecten fins a 5 cicles de gel-desgel i, a més, l'existència d'un nivell glaçat en profunditat que actua com a superfície de lliscament combinat amb elevats continguts d'aigua (propers a la saturació) derivats de la fusió nival, proveeixen les condicions més idònies al llarg de l'any per tal d'activar la solifluxió a Sierra Nevada. A la tardor, a més d'un nombre més reduït de cicles gel-desgel (només 2), la inexistència de sòl glaçat i la poca aigua present en el sòl impossibiliten els desplaçaments solifluidals⁵⁴.

⁵⁴ A l'estiu, la sequedat imperant atura l'escorrentia superficial i no permet la solifluxió, mentre que durant l'hivern i fins ben entrada la primavera el mantell nival estabilitza el vessant.

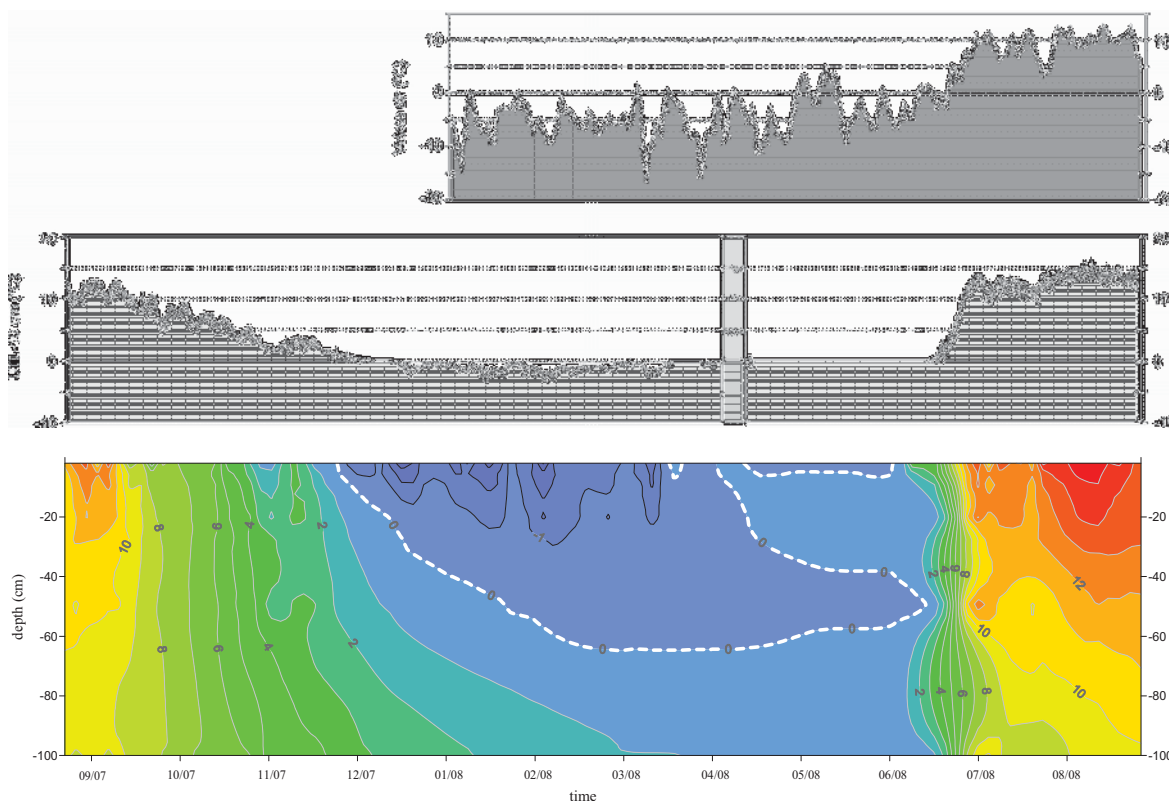


Figura 4.29. Evolució tèrmica del sòl d'agost del 2007 a agost del 2008 en el lòbul RSA.7 del circ de Rio Seco (figura inferior). Temperatura mitjana diària de l'aire projectada pel Picacho del Veleta, a 3.398 m⁵⁵ (figura superior). Temperatura a 10 cm de profunditat en el lòbul en qüestió (figura d'enmig).

El desglaçament del lòbul esdevé en una doble direcció: de profunditat en superfície canalitzat pel flux geotèrmic terrestre i de l'exterior en profunditat, amb major eficàcia per l'embat directe de la radiació, incrementat aquest pel menor albedo que té una superfície lliure de neu. Entorn a 50 cm de profunditat, destaca la presència d'un nivell glaçat fins a mitjans de juny, tot i que el desglaçament del lòbul propicia un ràpid augment tèrmic en aquest nivell, de fins a 8°C en escasses setmanes (Oliva et al., 2008). Durant l'estiu hi ha una uniformització de les temperatures, assolint valors de fins a 10°C a 100 cm de profunditat. Si bé a primavera el desglaçament ocorre en escasses setmanes, l'englaçament del lòbul a la tardor transcorre en uns 2 mesos des de que comencen a disminuir les temperatures dels sensors més superficials fins que aquests assoleixen valors negatius.

⁵⁵ El sensor instal·lat en una antena del Picacho del Veleta va ser substret i no es van obtenir dades tèrmiques específiques d'aquest punt durant l'any 2007-2008. El Parc Nacional de Sierra Nevada ha facilitat les dades de l'estació meteorològica de Pradollano, a 3.097 m d'alçada, instal·lada a inicis de novembre del 2007 (no es disposen de dades d'agost a desembre del 2007). Establert el gradient tèrmic vertical local en alçada en 0,66°C (veure apartat 2.1.2) es projecta la temperatura pel Picacho del Veleta a fi i efecte de facilitar la comparació amb els valors tèrmics registrats l'any anterior.

L'any de monitoratge 2007-2008 mostra un comportament tèrmic molt similar, amb un horitzó glaçat que es prolonga de mitjans de novembre fins a inicis de juny (figura 4.30). Entre febrer i maig la capa glaçada assoleix uns 60 cm de profunditat, tot i que la fusió del mantell nival a mitjans de març i principis d'abril propicia un desglaçament dels centímetres més superficials; noves precipitacions de neu tornen a propiciar l'englaçament del paquet superior de sòl fins a inicis de juny. La injecció de calor en el terreny de principis d'abril determina l'existència d'un horitzó no glaçat entre els 5-40 cm, comprès entre el nivell superior i inferior encara glaçats, que s'allarga durant dos mesos. El desglaçament mostra una pauta molt similar a l'any anterior, amb una ràpida inèrcia tèrmica positiva conforme la radiació embat directament la superfície lliure de neu del propi lòbul.

A la vall de San Juan els dispositius UTL-1 instal·lats en un lòbul a 2.817 m d'altura reflecteixen un comportament tèrmic sensiblement diferent, amb uns valors negatius en el sòl que s'inicien a finals d'octubre i es perllonguen fins a inicis de juny, penetrant a més de 100 cm de profunditat durant el mes de març (figura 4.31). A més, cal destacar que els valors tèrmics que es registren en els primers 20 cm de sòl assoleixen temperatures de fins a -9°C a 10 cm de la superfície, en contraposició amb els -2°C reportats a la mateixa profunditat en el lòbul de Rio Seco durant el mateix període. El desglaçament de la base del lòbul esdevé en escassos dies, tan bon punt es talla el subministrament de fred a finals de març i es veu reforçat pel flux geotèrmic terrestre. Les nevades de primavera allarguen les temperatures negatives en el sòl fins a inicis de maig en els 10 cm més superficials i prolonguen l'horitzó glaçat un mes entre els 20 i 40 cm de profunditat. Tanmateix, es percep una pauta semblant a RSA.7 durant el desglaçament del lòbul, amb un increment de temperatura a 50 cm de profunditat superior als 11°C en només tres setmanes escasses.

En el cas del lòbul de Rio Seco, malgrat l'existència d'una capa glaçada de fins a 70 cm de d'espessor, aquesta no fou suficient com per activar la solifluxió durant el període 2006-2008, suggerint que la disponibilitat hídrica és el factor crucial per a l'activitat solifluidal a Sierra Nevada. Aquest fet es veu constatat pel desplaçament de 0,5 cm/any detectat en el lòbul monitorat a San Juan durant l'interval 2007-2008, unitat que mostra un subministrament d'aigua notablement superior.

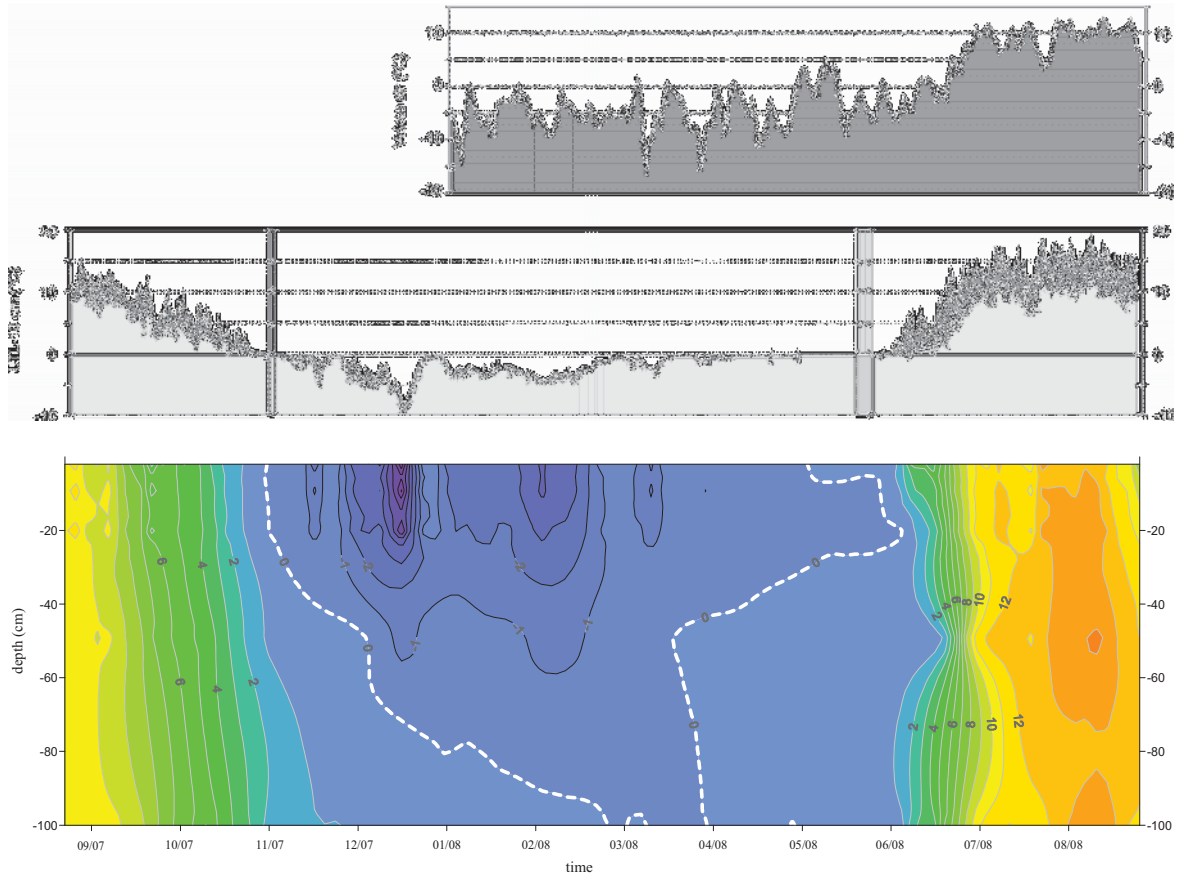


Figura 4.30. Evolució tèrmica del sòl d'agost del 2007 a agost del 2008 en el lòbul SJB.38 de la vall de San Juan (figura inferior). Temperatura mitjana diària de l'aire projectada pel Picacho del Veleta, a 3.398 m (figura superior). Temperatura a 10 cm de profunditat en el lòbul en qüestió (figura d'enmig).

4.3.2. Control dinàmic dels lòbuls

Entre els mètodes clàssics de mesura dels desplaçaments solifluidals hi ha la fixació de barres, columnes, varetes o estagues en el sòl, el desplaçament de les quals es controla periòdicament, tot i que darrerament s'han introduït mètodes elèctrics d'altíssima resolució temporal com l'inclinòmetre o el solifluxímetre (Matsuoka, 1996; Harris et al., 1997; Matsuoka & Humlun, 2003 i Matsuoka, 2006), basats en un complex sistema de sensors extremadament sensibles als desplaçaments del sòl a l'interior del lòbul.

Inclús hi ha certs intents de reproduir els mecanismes que incorren en el moviment solifluidal al laboratori i que evidencien que la solifluxió respon, en major mesura, a un moviment de característiques elàstico-plàstiques més que no pas a un flux viscos (Harris et al., 2003, 2007).

Els moviments anuals de les estagues constaten l'escassa activitat de la solifluxió actualment a Sierra Nevada. A fi i efecte d'interpretar els processos solifluidals durant l'Holocè, és determinant concretar la seva activitat sota el present règim climàtic i poder extrapolar així, a partir de les dades de temperatura i precipitació actuals, quines condicions climàtiques són propícies per a la solifluxió i per a l'edafogènesi a les capçaleres dels barrancs de San Juan i Rio Seco.

La proximitat dels processos solifluidals de la seva activitat/inactivitat requereix de sèries temporals de mesures de monitoratge dinàmic més llargues, ja que els lòbuls poden romandre estables durant anys i activar-se durant una temporada en què la conjunció d'ingredients climàtics sigui especialment propícia.

Si bé admetem la necessitat de més anys de mesura, el fet de monitorar lòbuls en diferents emplaçaments (altura, disponibilitat d'aigua, pendent, orientació) i que aquests hagin repetit un comportament similar, valida el mètode i la seva efectivitat. El control dinàmic de 17 lòbuls posa de manifest unes tasses de desplaçament solifluidal inferiors en tots els casos a 1 cm/any (taula 4.5), més destacables a la vall de San Juan (0,35-0,67 cm/any) que a Rio Seco (0,20-0,38 cm/any). En el cas de San Juan, entre el 71-93% de les estagues va registrar petits moviments, en contraposició a només el 22-62% d'aquelles instal·lades a Rio Seco. Tot i disposar de pocs anys de mesura, sembla percebre's una correlació entre aquells anys amb majors precipitacions de primavera i hivern (*in crescendo* en els tres períodes de mesura contemplats) i valors de desplaçament superiors.

Taula 4.5. Desplaçaments horitzontals mitjans de les estagues per sectors durant el període 2005-2008.

DESPLAÇAMENTS HORITZONTALS ESTAGUES 2005-2008									
Sector	2005-2006			2006-2007			2007-2008		
	n	mòbils (%)	cm/any	n	mòbils (%)	cm/any	n	mòbils (%)	cm/any
SJA	7	42,9	0,5	14	85,7	0,63	14	92,9	0,67
SJB	0	0	0	9	66,7	0,35	9	77,8	0,40
RSA	9	22,2	0,20	9	22,2	0,20	9	11,1	0,20
RSB	8	37,5	0,33	8	37,5	0,33	8	62,5	0,38

Els lòbuls que han mostrat lleugers desplaçaments de les estaquetes inserides en els seus marges han estat els mateixos en els anys de mesura, essent precisament aquelles unitats amb major subministrament líquid les que detecten una tímida activitat solifluidal en direcció paral·lela al pendent. Així, són les geofomes solifluidals emplaçades prop de les darreres congestes de neu de finals de primavera i principis d'estiu i els lòbuls ubicats vora dels cursos fluvials que canalitzen la fusió nival, aquelles unitats que mostren valors més elevats de desplaçament anual. Les precipitacions primaverals dels anys en qüestió han anat esglaonadament *in crescendo*, de manera paral·lela a un augment de les tasses de moviment reportades, insinuant el paper clau que té la disponibilitat hídrica en activar els vessants durant l'estació de desglaç en aquest massís semiàrid del sud peninsular. En general, es constata que els lòbuls de San Juan, tot i estar emplaçats a menor altura, presenten uns desplaçaments anuals superiors als de Rio Seco. L'orientació septentrional de San Juan esdevé efectiva per a una major romanència de congestes de neu tardanes que suposen un subministrament líquid major i una capa de sòl glaçada més profunda, la qual permet una tímida solifluxió del paquet de sòl més superficial. A la vegada, les mesures anuals dels moviments verticals de les estaquetes (*uplift*) evidencien uns desplaçaments lleugerament inferiors als horitzontals, amb valors que oscil·len entre els 0,24-0,36 cm/any per San Juan i 0,30-0,50 cm/any per Rio Seco, tot i que el nombre d'estaquetes en què s'ha detectat desplaçament és sensiblement superior en la primera vall (43-70%) que en la segona (19-50%). A més, en aquells lòbuls amb més presència líquida es percep la tendència de que les estaquetes verticals (8-22%) es veuen progressivament engolides pel creixement de la vegetació superficial i/o per l'assentament de l'estaca com a conseqüència de la relaxació del sòl desglaçat (*thaw settlement*).

Taula 4.6. Moviments verticals mitjans de les estaquetes per sectors durant el període 2005-2008.

UPLIFT ESTAQUES 2005-2008															
Sector	2005-2006					2006-2007					2007-2008				
	n	U (%)	cm / any	T (%)	cm / any	n	U (%)	cm / any	T (%)	cm / any	n	U (%)	cm / any	T (%)	cm / any
SJA	9	0	0	22,2	0,2	23	43,5	0,36	4,3	0,2	23	47,8	0,36	17,4	0,25
SJB	0	0	0	0	0	22	63,6	0,34	9,1	0,25	20	70,0	0,24	10,0	0,2
RSA	2	0	0	100	0,25	26	19,2	0,30	7,7	0,40	26	26,9	0,43	7,7	0,60
RSB	9	0	0	22,2	0,25	14	35,7	0,32	14,3	0,50	14	50,0	0,50	21,4	0,40

U: *uplift*; T: *thaw settlement*.

4.3.3. Dinàmica dels processos solifluidals a Sierra Nevada

De les dades de temperatura i desplaçament presentades, podem deduir els mecanismes que incentiven la solifluxió al massís. En àmbits amb presència de sòl glaçat estacional, com succeeix en el pis periglacial de la Sierra, durant l'estació freda el mantell nival aïlla tèrmicament el sòl i facilita la seva estabilitat, però a mesura que les temperatures augmenten i la fusió nival incrementa el contingut d'aigua del sòl, aquest es desglança i perd cohesió, generant-se la mobilització individual de partícules en la part més superficial per efecte del gel-desgel (crioreptació). En ambients sense *permafrost*, el desglaçament esdevé en sentit bidireccional: aire-sòl, degut a l'escalfament engendrat per la radiació incident a la part superficial i interna del sòl, amb l'acceleració tèrmica derivada d'una superfície lliure de la protecció nival, i en direcció contrària, sòl-aire, induït pel calor geotèrmic terrestre. El nivell glaçat es manté impermeable, i així, el contacte d'aquest amb la base del nivell no glaçat, esdevé la superfície de lliscament sobre la qual s'inicien els moviments de gelifluxió; a més, la fusió gradual de les congestes de neu subministren aigua que va acumulant-se en el llindar amb l'horitzó glaçat, fent més fluid el flux de la capa superior. Per tant, la crioreptació i la gelifluxió actuen simultàniament per reactivar la solifluxió durant l'estació de desglaç (Kinnard & Lewkowicz, 2005), quan l'acció d'ambdós processos té la seva màxima eficàcia morfològica. Higashi & Corté (1971), Benedict (1976)⁵⁶ i Jaesche et al. (2003) consideren que la gelifluxió té una major importància en el moviment total d'un lòbul. Harris et al. (1997, 2003) refermen la solifluxió com una reptació plàstica més que no pas com un flux viscos.

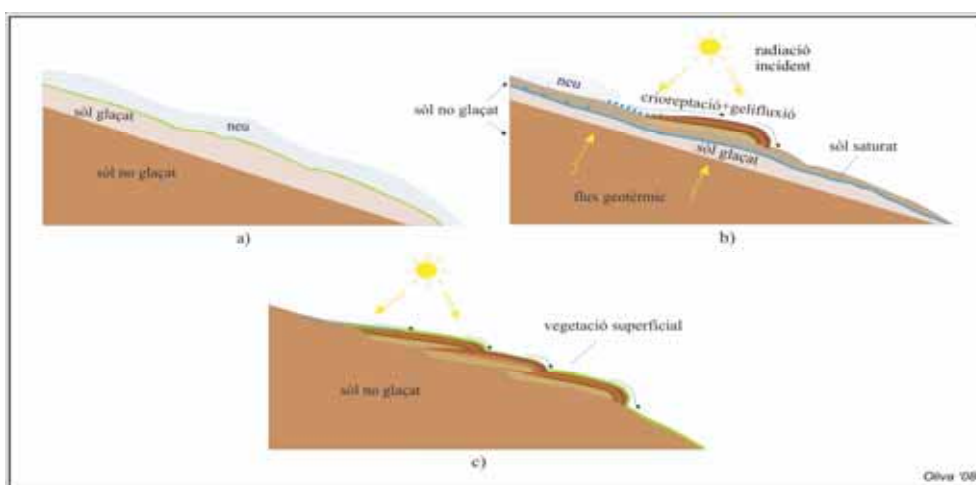


Figura 4.31 . Formació dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada: a) estabilitat del vessant durant l'estació hivernal, b) formació d'un lòbul, c) encadenament de lòbuls.

⁵⁶ Calcula que un 80% del desplaçament net d'un lòbul respon a aquest mecanisme.