

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 7

RECONSTRUCCIÓ PALEOAMBIENTAL HOLOCENA DE SIERRA NEVADA: DISCUSSIÓ I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

7. Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada: discussió i interpretació de resultats

Un cop presentats els resultats relatius als lòbuls de solifluxió i llacunes sondejades a Sierra Nevada, cal una curosa interpretació de les dades en clau paleoambiental, objectiu de la present recerca. El fet de que ambdós registres romanguin ubicats en capçalera permet conèixer els canvis ambientals esdevinguts en els sectors cimers del paisatge nevadense durant els darrers mil·lennis. Mentre que els lòbuls de solifluxió engloben informació paleoambiental dels darrers ~4 ka BP a escala centenària i més enllà dels últims 7 ka BP a menor resolució, les datacions realitzades sobre els sediments lacustres de la Sierra aboquen una cronologia menys precisa i permeten una aproximació temptativa als darrers 6 ka BP.

El solapament dels registres sedimentaris solifluidals i lacustres ofereix la possibilitat d'integrar la informació paleoambiental derivada d'ambdós i extreure un millor coneixement de la dinàmica de vessants holocena en aquest massís. Finalment, es pretén deduir la sensibilitat dels processos geomorfològics de Sierra Nevada a la dinàmica climàtica local, regional i global mitjançant la contrastació dels nostres resultats amb *proxies* regionals, hemisfèrics i globals.

7.1 Canvis ambientals inferits a partir dels lòbuls de solifluxió

La gènesi dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada és un procés relativament recent amb nou diferents fases d'activació de vessants constatades durant l'Holocè. A excepció de casos puntuals en els sectors de RSA i SJC, on es detecten lòbuls que es van formar durant l'Holocè inferior i el Tardiglacial, la majoria de lòbuls sondejats es van desenvolupar durant l'Holocè mitjà i superior. Cal considerar que els lòbuls holocens poden haver recobert altres generacions de lòbuls desenvolupats amb anterioritat.

Actualment, el moment de l'any idoni per activar la solifluxió a Sierra Nevada és el període que transcorre a finals de primavera i principis d'estiu quan encara hi ha congestes de neu en presència de sòl glaçat en profunditat. Avançat l'estiu i a principis de tardor, la contudent manca de precipitacions⁷² es reflexa en l'escassa escorrentia superficial que

⁷² Veure climograma, pàg. 35.

priva els desplaçaments solifluidals. A la tardor, a més del paper primordial de la data de la primera nevada per estabilitzar els vessants (Veit, 1993) i facilitar la penetració del gel en profunditat, es percep un menor nombre de cicles de gel-desgel que a la primavera⁷³ ja que la manca de protecció nival fa més efectiva la penetració del fred en profunditat; a més, no hi ha un horitzó glaçat per sota que actui a mode de superfície de lliscament i la disponibilitat líquida en el sòl és sensiblement menor.

La fusió nival permet el desglaçament dels primers centímetres del sòl i subministra aigua al sòl en presència encara d'una capa glaçada subsuperficialment. El desglaç de l'horitzó més exposat a la radiació facilita l'activació dels cicles de gel-desgel que incentiven la crioreptació especialment del material més fi. Depenent de les condicions climàtiques, la duració d'aquest horitzó glaçat en profunditat pot variar sensiblement d'un any a l'altre⁷⁴, essent determinant a Sierra Nevada per activar la gelifluxió de la part superficial del lòbul.

Actualment, però, el control dinàmic manifesta uns processos solifluidals actuals molt dèbils a les culminacions del massís. Cal lligar doncs l'existència de centenars de lòbuls de solifluxió inactius sota l'actual règim climàtic a unes condicions climàtiques més propícies per a la seva formació i desenvolupament (Oliva et al., *accepted*). La successió d'horitzons orgànics i dipòsits solifluidals és testimoni de canvis paleoecològics en la nostra àrea d'estudi, conduïts, indefectiblement, per fluctuacions paleoclimàtiques durant els últims mil·lennis. Condicions climàtiques més fredes i humides comportaven una major innivació a l'hivern que es traduïa en una major persistència del mantell nival durant la primavera amb nombroses congestes de fusió tardana a finals d'aquesta estació i principis d'estiu per sobre dels 2.500 m (figura 7.1). La major existència i romanència de les congestes de neu són decisives en els moviments solifluidals com ja s'ha apuntat en zones d'Escandinàvia (Morin & Payette, 1988; Matthews et al., 2005), ja que posposen el desglaçament de la capa glaçada en profunditat, prolonguen el subministrament líquid, essent més abundant i durador, i, conseqüentment, escurcen el cicle vegetal de les plantes herbàcies que recobreixen els lòbuls, reduint així la cobertura vegetal dels mateixos. Una vegetació més dispersa suposa un impediment físic menor pels moviments solifluidals i incrementa l'efectivitat dels cicles gel-desgel, que promouen la translocació de les

⁷³ Veure apartat 4.3.1.

⁷⁴ A l'any 2007 es va allargar durant tres setmanes, mentre que a l'any 2008 va durar pràcticament dos mesos (veure apartat 4.3.1).

partícules i la poca estabilitat dels sediments (Vliet-Lanoë, 1993). Per contra, condicions més càlides indueixen la formació de sòls, que seran més o menys desenvolupats a tenor del grau d'humitat imperant: climes més humits faciliten sòls més estructurats d'alt contingut orgànic, assolint inclús valors torbosos, mentre que condicions més seques propiciaran una edafogènesi menys activa.

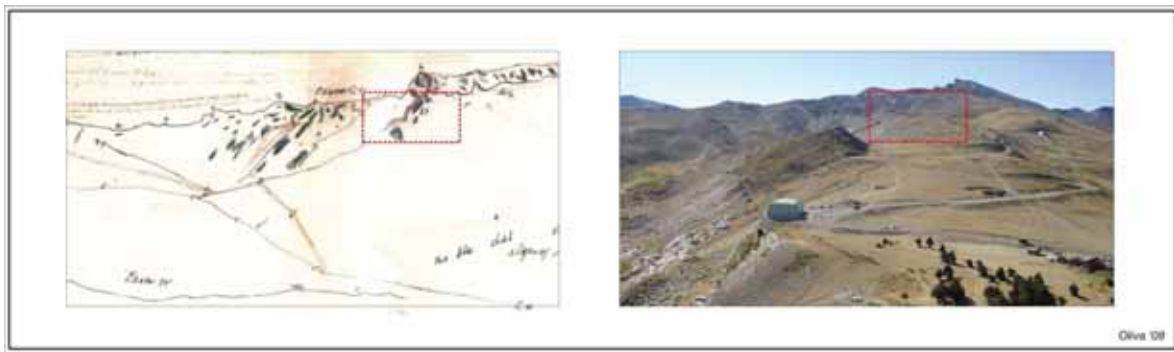


Figura 7.1. Comparació de les recurrents congestes de neu assenyalades amb taques de color negre en un esquema de 1804-1809 de Rojas Clemente (esquerre) i les inexistents en una fotografia actual (dreta), corresponents ambdues a l'epicentre de l'estació càlida. El requadre senyala la capçalera de la vall de San Juan, on es percep la clara diferència entre les nombroses clapes de fusió tardana a inicis de s. XIX i la manca de les mateixes a l'actualitat.

Les figures 7.2 i 7.3 resumeixen la cronologia de la recerca referent a la solifluxió holocena per ambdós valls d'estudi i la figura 7.4 fa referència al conjunt de Sierra Nevada. Els lòbuls de San Juan semblen presentar certa correlació amb l'alçada, essent més antics aquells disposats a menor alçada. Els resultats obtinguts permeten afinar la cronologia de la solifluxió dels darrers 4 ka BP a resolució centenal-decadal i només permeten una lleugera aproximació a la resta de l'Holocè. Si bé els registres sedimentaris de San Juan permeten cobrir els darrers 7 ka BP, a Rio Seco els lòbuls només assoleixen la dinàmica de vessants dels darrers 2 ka BP.

Tal i com s'ha comentat en l'apartat 5.3, la duració de les diferents fases de solifluxió-edafogènesi per als lòbuls estudiats s'ha realitzat extrapolant una sedimentació contínua de les datacions obtingudes que, tenint en compte les característiques inherents als registres solifluidals, pot induir errors en la interpretació geocronològica resultant. Així doncs, cal prendre els intervals temporals com estimacions aproximades i relatives. La inexistència de diferents tipologies de sòls contrastades i temporalment ben delimitades com en el cas dels Alps (Veit, 1988) o d'una voluminosa base de datacions (Gamper, 1983) no permet afinar més la cronologia de la solifluxió a Sierra Nevada.

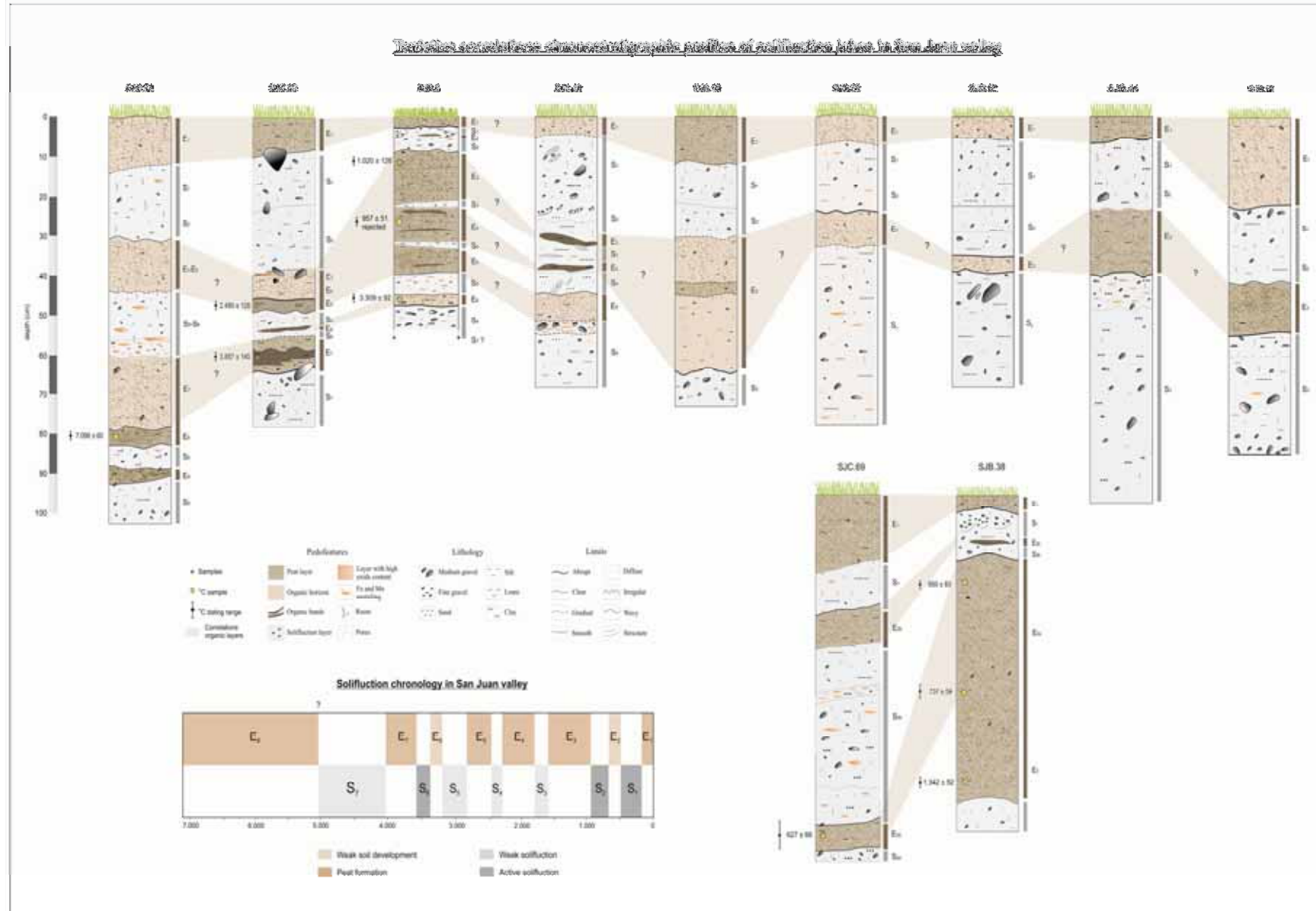


Figura 7.2. Cronostratigrafia dels diferents lòbuls analitzats i cronologia de la solifluxió a la vall de San Juan.

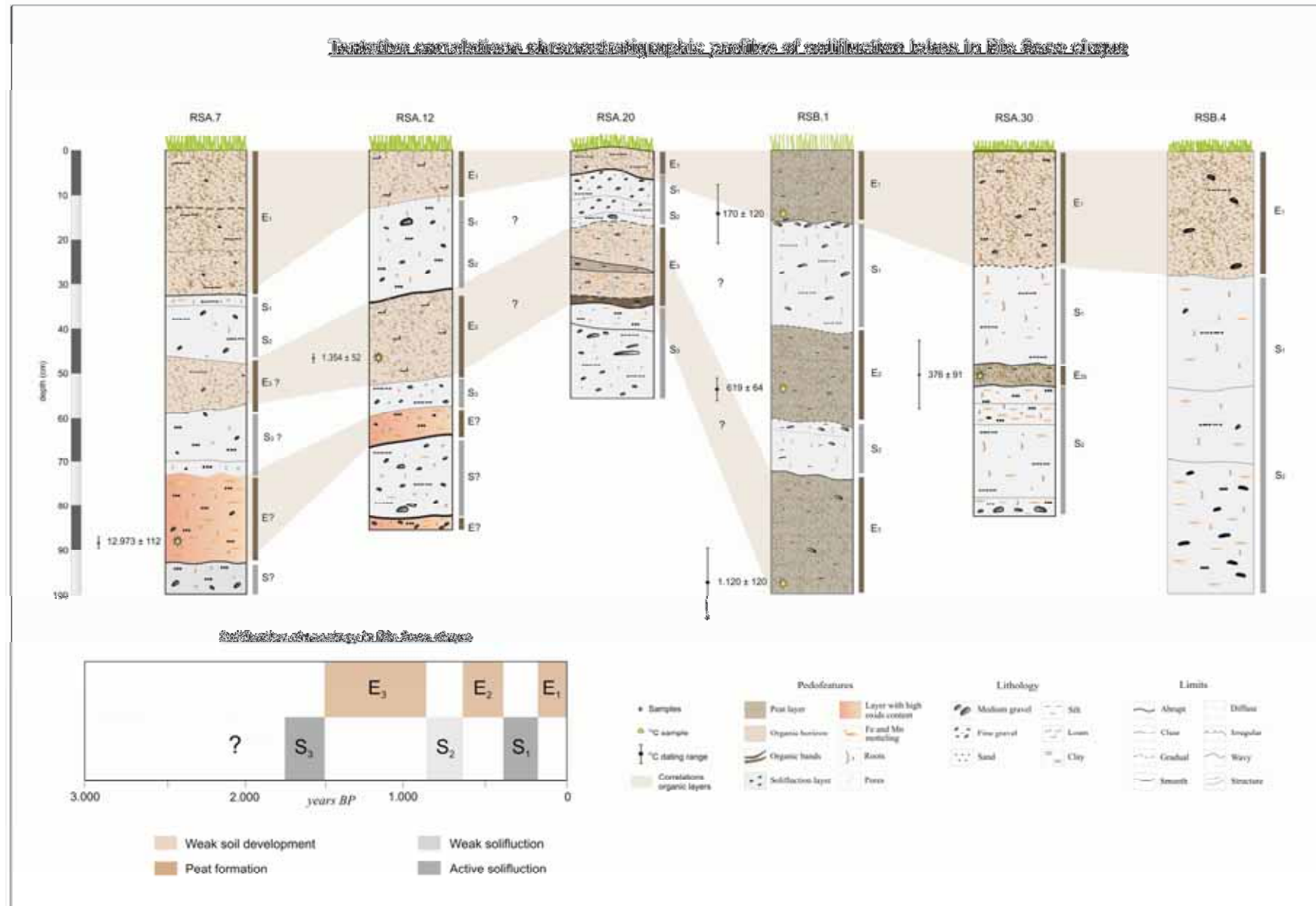


Figura 7.3. Cronostratigrafia dels diferents lòbuls analitzats i cronologia de la solifluxió a la vall de Rio Seco.

Els lòbuls del sector més planer de SJC tenen un origen que es remunta a l'Holocè inferior i mitjà, amb el paleosòl més antic datat en 7.098 ± 60 anys BP que es correspon amb el desenvolupament edàfic E₈. El lòbul SJC.54 també conté un sòl més antic, inserit entre dues fases solifluidals anteriors a la datació mencionada, tot i que no és possible limitar la seva extensió temporal.

L'existència de la datació inferior a SJC.39 permet situar cronològicament l'horitzó orgànic E₇ entre 4-3,6 ka BP, posterior a la fase solifluidal prèvia (S₇). Una nova inestabilització de vessants ocorre entre 3,6-3,4 ka BP amb l'avanç solifluidal S₆, que sembla enllaçar amb el dipòsit de vessant de gran potència existent en el lòbul SJB.3, emplaçat en el sector més distal i a menor altitud de SJB i que va iniciar la seva agradació durant la Neoglaciació, amb anterioritat a 3,4 ka BP.

La solifluxió es veié estroncada per la formació d'un regosòl dèbilment estructurat a SJB.3, assentat sobre potents dipòsits de vessant, que es va desenvolupar entre 3,4-3,2 ka BP i es correspon amb E₆. Posteriorment, esdevé un nou avanç solifluidal que només diposita material fi a SJB.3, bàsicament sorres, amb poques graves (S₅), denotant una substancial menor capacitat de mobilització mineral que durant S₆. Atenent a l'estructura d'aquest mateix lòbul, que semblen correlacionar-se efectivament amb altres lòbuls de San Juan, durant els òptims climàtics RWP i MWP domina la formació de potents horitzons orgànics (E₅-E₃), torbosos en aquells sectors amb major disponibilitat hídrica, només truncats per impulsos solifluidals relatius entorn a 2,5-2,3 i 1,8-1,6 ka BP (S₄ i S₃).

Les darreres tres fases d'activa solifluxió i de desenvolupament orgànic segueixen una cronologia molt similar tant a San Juan com a Rio Seco. El MWP es reflecteix en ambdós valls amb una extensió dels processos edàfics que propicia elevats continguts de matèria orgànica en aquests sòls, amb presència de valors torbosos a Rio Seco (E₃). Entre els segles XII i XIII es detecta una primera fase de la LIA (S₂) amb una significativa aportació de material de vessant que disminueix dràsticament entre els segles XIV i XVI, període en què domina una incipient edafogènesi a la vall de San Juan i la formació torbosa a Rio Seco (E₂).

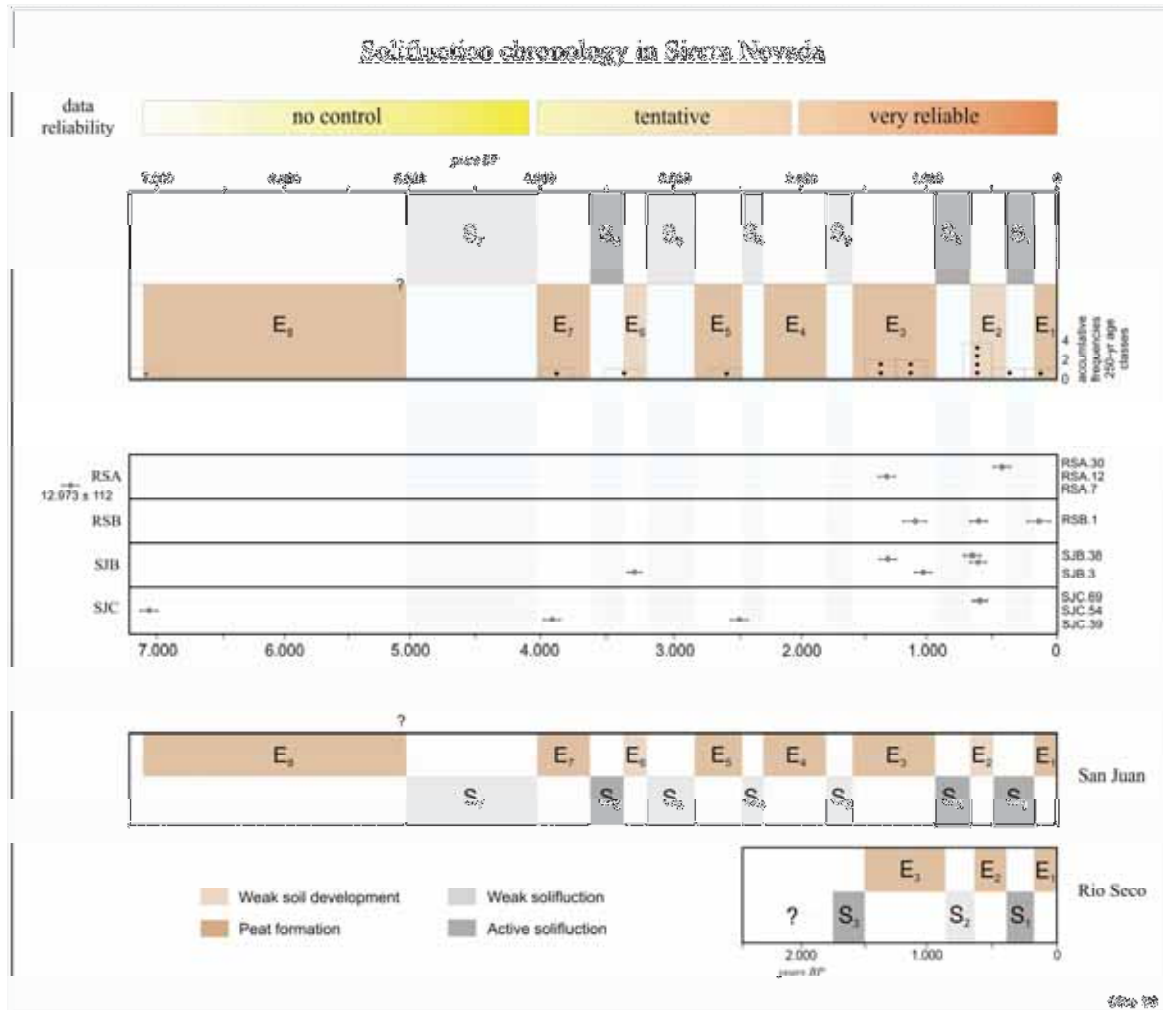


Figura 7.4. Datacions dels horitzons orgànics en els diferents lòbuls estudiats a Sierra Nevada (fig.d'enmig),cronologia de la solifluxió en el massís (fig. superior) i en sengles valls (fig. inferior).

En sengles valls, però, la fase més activa de la LIA esdevé entre els segles XVII i primera meitat del XIX (S₁), amb una aportació de graves mitges considerable, indicativa d'una important inestabilització dels vessants en els sectors cimers de Sierra Nevada. Aquest marcat avanç solifluidal és congruent amb les reconstruccions de precipitació històrica (Rodrigo et al., 1999) i CGA imperant durant aquest període al sud peninsular (Oliva et al., 2006), que situen els decennis entre 1590-1650 com la fase més humida de la LIA a la Península Ibèrica.

La tendència a l'augment tèrmic iniciada en acabar la LIA, a mitjans de segle XIX, propicia un nou desenvolupament edàfic i un fre dels processos solifluidals a Sierra Nevada (E₁).

Els resultats posen de manifest les limitacions de les datacions en registres solifluidals i la dificultat evident de correlacionar les diferents unitats litostratigràfiques en els lòbuls estudiats. Tot i això, aquests arxius sedimentaris també posen de relleu que els vessants de les culminacions de Sierra Nevada han experimentat, doncs, sensibles canvis paleoecològics durant l'Holocè i, en especial, durant els darrers 4 ka BP. En aquelles fases en què imperava la solifluxió, els pendents nevadenses restaven nus de vegetació i una intensa activitat de vessant hi dominava durant els escassos mesos en que s'esvaïa la cobertura nival; una crioclàstia més efectiva en els crestalls cimers proveïa de clastos heteromètrics als vessants que evacuaven activament material cap a sectors més planers. Conforme disminuïa el pendent, la mobilització de material era menor, tot i que l'escassa vegetació, la romanència del sòl glaçat en profunditat i un major subministrament líquid, derivat de la major presència de congestes de neu de fusió tardana en els fons de vall, facilitaven una solifluxió activa.

Quan les condicions climàtiques es tornaven gradualment més propícies per a la formació de sòls, la vegetació inicialment s'escampava dispersa pels fons de vall originant sòls molt poc desenvolupats (regosòls), fet que progressivament minvava l'eficàcia de la solifluxió. Si les condicions eren prou favorables, el tapís vegetal es densificava en el fons de vall, esmorteint la penetració del fred en profunditat i frenant la dinàmica solifluidal, formant-se així sòls més estructurats (histosòls). A més, la cobertura vegetal també colonitzava els pendents més empinats de manera dispersa, tendint a estabilitzar els dipòsits de vessant escampats en les alçades del massís.

7.2 Implicacions paleoambientals derivades dels sediments lacustres

En àrees de muntanya no glaçades de mitges latituds, els sediments que emmagatzemen els llacs són el registre sedimentari que proporciona una informació paleoambiental de l'Holocè més precisa, continuada i a alta resolució. Els llacs a la Sierra tendeixen a recloure's en les cubetes modelades per l'acció glacial quaternària i que han romàs lliures de glaceres, com a mínim, durant l'Holocè en el vessant septentrional i, molt possiblement, des del LGM en el meridional. Els sediments que acullen les llacunes nevadenses cobreixen, amb escreix, el nostre marc temporal d'estudi, tot i que els *cores* d'elles extrets es limiten als darrers 6 ka BP.

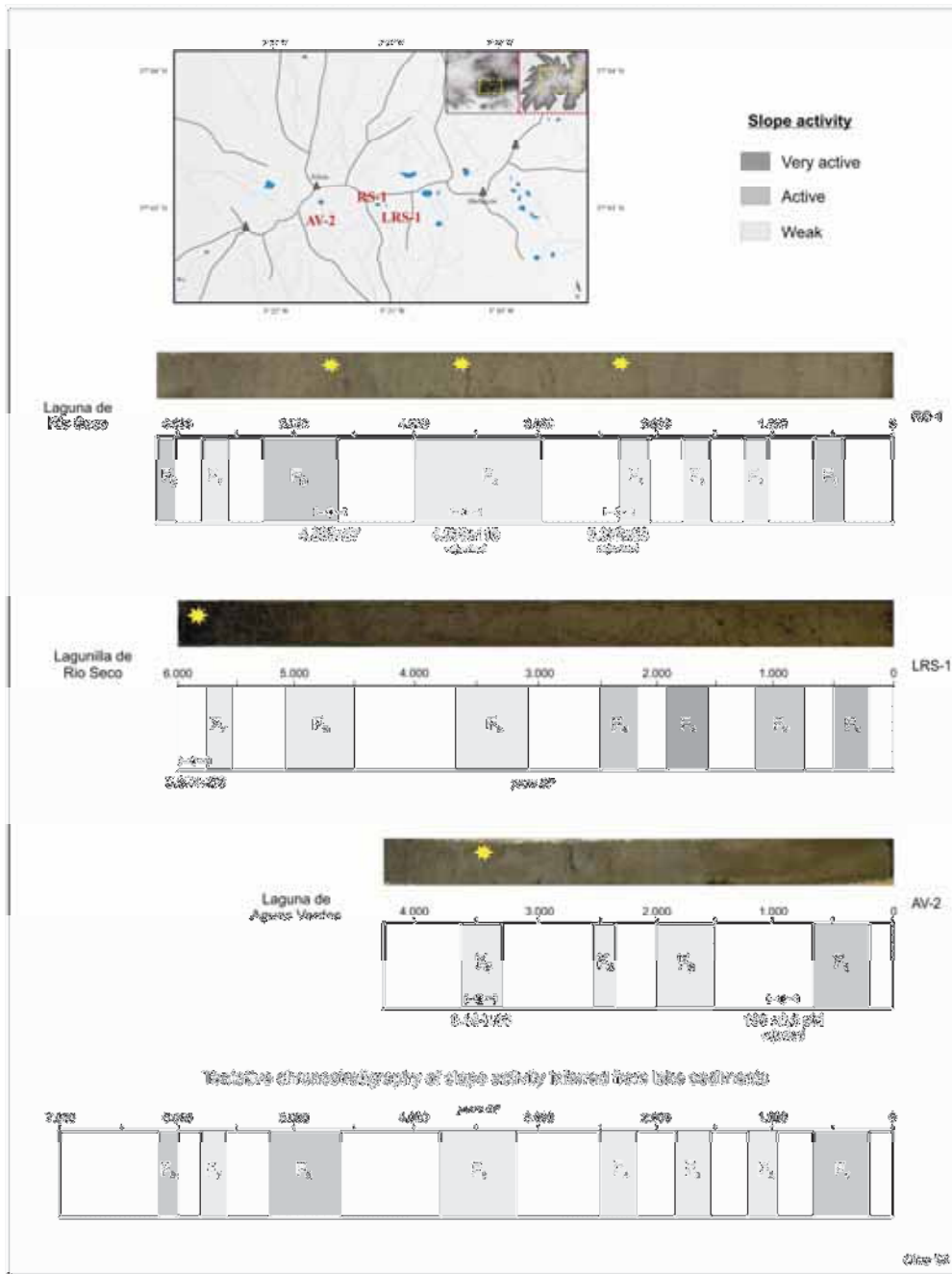


Figura 7.5. Geocronologia de les fases d'instabilitat de vessants inferides dels cores datats.

Tenint en compte els problemes metodològics comentats a l'apartat 6.3 i la discussió de la validesa de les datacions que s'ha desgranat específicament per a cada una d'elles, la cronologia dels canvis paleoecològics esdevinguts en les capçaleres dels barrancs de la Sierra durant els darrers mil·lennis cal contemplar-la com una finestra temporal orientativa i requereix de la seva contrastació amb la cronologia holocena dels registres solifluidals per copsar si la instabilitat de vessants que denoten els períodes amb solifluxió activa es correspon amb la geocronologia que evidencien els sediments lacustres.

La figura 7.5 reflecteix la seqüenciació de les fases d'activitat de vessants estimades pel conjunt del massís a partir dels tres *cores* dels quals es disposa almenys una datació (AV-1, RS-1 i LRS-1) i que corresponen tots ells a llacunes de la cara sud de la Sierra. Per la Lagunilla de San Juan, de la qual no es disposa cap referència cronològica, la figura 7.6 pretén sintetitzar una temptativa de correlació amb la dinàmica de vessants inferida pel conjunt de llacs del vessant meridional, tot i que cal admetre que sense datacions precisar el *timing* de l'evolució paleoecològica és una empresa certament difícil.

El primer període d'inestabilitat de vessants es percep en el *core* RS-1 (figura 7.5), que detecta la fase F₈ entorn a 6 ka BP, pulsació caracteritzada per un increment de la mobilització mineral possiblement conduït per un augment de la precipitació i una sensible disminució de la coberta vegetal a la conca després d'un període de certa estabilitat geomòrfica que havia expandit els *borreguiles* en sectors de topografia favorable. Seguidament, els *cores* RS-1 i LRS-1 evidencien una clara recuperació del tapís vegetal a la capçalera dels vessants meridionals, que contribueix a estabilitzar els vessants. El *core* LRS-1 sembla insinuar que les temperatures més elevades d'aquest període van venir condicionades per una major recurrència dels vents de component sud, que transportaven aerosols rics en Ca des del Sàhara fins a les alçades nevadenses, tot i que no es percep la mateixa tendència a RS-1.

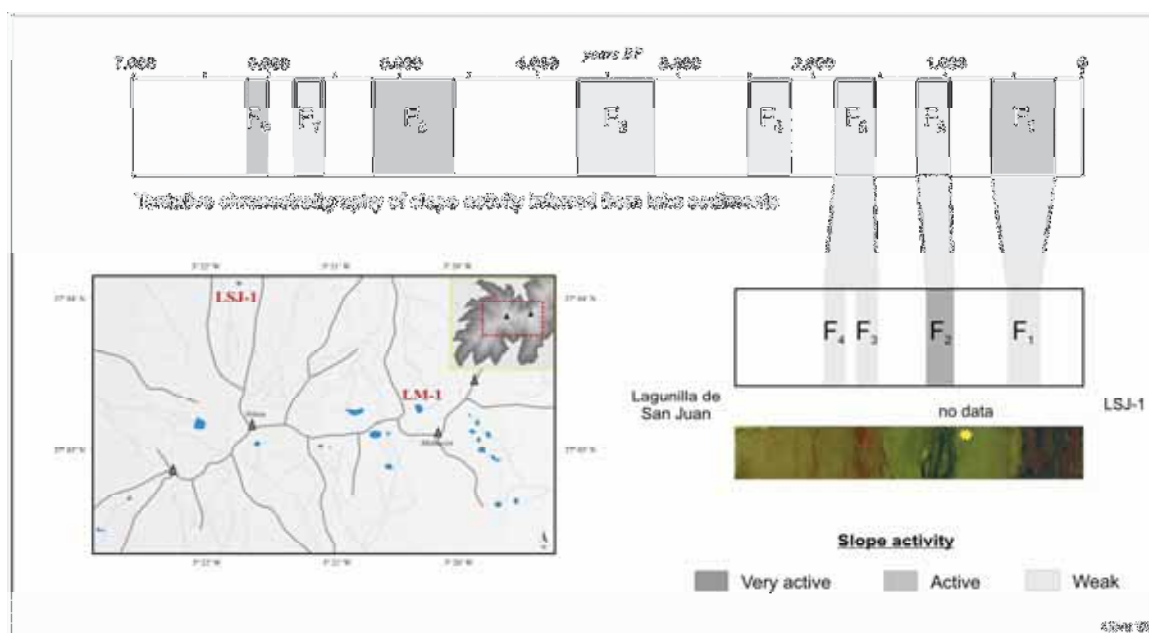


Figura 7.6. Reconstrucció de les fases d'inestabilitat de vessants dels *cores* no datats a partir de la correlació amb la geocronologia de les fases definides pel conjunt del massís en la figura 7.5.

F₇ és una pulsació curta que esdevé entre 5,8-5,6 ka BP i es caracteritza per una disminució vegetal de la conca i de la productivitat interna dels llacs. Un augment d'humitat lligat a temperatures lleugerament més baixes condicionaria major romanència de la coberta nival en les culminacions del massís, major escolament superficial durant el desglaç i una mobilització mineral superior; a la vegada, s'escurçaria l'estació lliure de gel a les llacunes que, indefectiblement, tendrien a disminuir la seva producció biològica. Sobtadament, però, un increment de temperatures notable entorn a 5,5 ka BP escampa el recobriment vegetal i impulsa la productivitat lacustre amb valors molt elevats de C_{org} i C/N, tendència molt evident a RS-1.

L'estabilitat dels pendents nevadenses es trunca, però, entre ~5,3-4,6 ka BP (F₆) amb una fase d'aportació mineral prolongada que induiria una caiguda de la cobertura herbàcia i majors índexs d'erosió. A continuació esdevé un període d'estabilitat geomòrfica que perdura fins a 3,8-3,7 ka BP, amb increments de la cobertura vegetal de la conca i menor mobilització mineral derivat d'unes temperatures superiors conduïdes per una major dominància de les adveccions de component sud.

D'aleshores ençà, es registra una tendència general de decreixement gradual de la capacitat de producció biològica dels llacs meridionals i del grau de vegetaltzació de les respectives conques de drenatge, amb una menor sensibilitat als canvis paleoambientals: el rang de variabilitat climàtica esdevingut durant l'Holocè tardà es tradueix en variacions menys evidents dels *proxies* geoquímics dels *cores* d'Aguas Verdes i Rio Seco. La Lagunilla de Rio Seco, en canvi, mostra una major variabilitat durant els últims 1.500 anys; en aquesta llacuna d'escassa profunditat, la tendència àrida d'ençà l'Holocè mitjà ha anat reduint la columna d'aigua, de manera que la llacuna és gradualment més sensible a entrades de material terrestre.

Seguidament, tots els registres detecten un augment erosiu amb major mobilització de sorres i una caiguda relativa de la part orgànica (F₅). Entre 3,2-2,5 ka BP torna a haver-hi una etapa de domini de la rexistàsia, disminuint la remobilització i el transport mineral fins al fons dels llacs; destaca també la caiguda de la productivitat lacustre i de la vegetació dispersa en el vessant meridional del massís, símptoma d'un augment de l'aridesa.

Les fases F₄, F₃ i F₂ esdevenen aproximadament entre 2,5-2,3, 1,8-1,6 i 1,3-1,0 ka BP i es caracteritzen per lleugers augments de l'erosió que comportaren major input clàstic fins als llacs. Només a LRS-1, tal i com s'ha discutit anteriorment, es percep una mobilització mineral notable insinuant precipitacions més elevades i temperatures més baixes durant F₂ i F₃. Inserides entre aquestes fases, destaquen breus períodes de recuperació del recobriment vegetal, sempre escàs, a les culminacions del massís, que contribuïen a frenar els processos dinàmics de vessant.

La darrera fase d'aportació mineral a les llacunes esdevé durant la LIA (F₁) i es caracteritza per una inestabilització dels vessants tant al vessant septentrional com al meridional. Si bé a la cara sud es detecta una caiguda de la productivitat lacustre, un augment de l'erosió i una major sedimentació mineral, a la cara nord els escrits d'època relaten l'aparició d'un petit aparell glacial al Corral del Veleta, fet que indueix a considerar que les temperatures més baixes devien inhibir o, si més no dificultar, el creixement de la incipient cobertura vegetal. Des de mitjans de segle XIX, l'augment tèrmic propicia la fusió dels focus glacials arrecerats als circs més elevats del vessant septentrional de la Sierra i determina una fase de domini de la biostàsia, amb certa recuperació del recobriment vegetal, menor erosió i caiguda de la fracció mineral que sedimenta a les llacunes.

La delimitació cronològica dels esdeveniments ambientals que engloba el *core* LSJ-1 constitueix una empresa difícil sense datacions⁷⁵. La interessant reconstrucció ambiental explicitada en l'apartat 6.2 denota successives fases d'expansió i encongiment de la llacuna, segurament induïdes no tant per les temperatures com pel règim d'humitat regnant en cada moment a la Sierra. A la vegada, fases més fredes devien condicionar un recobriment vegetal menor del vessant que connecta amb el llac, inestabilitzant la potent coberta de material clàstic que recobreix l'acusat pendent i precipitant la seva mobilització per gravetat fins a la llacuna. El potent dipòsit de graves (F₁) considerem que respon a aquest mecanisme de desplaçament i deu estar vinculat amb la LIA, possiblement el període de recuada viscut a finals del segle XVI i principis del XVII. Una segona pulsació d'aquesta fase devia esdevenir a principis del segle XIX, mentre que la recuperació tèrmica iniciada d'aleshores ençà ha permès la colonització torbosa present.

⁷⁵ Tot i que es va enviar una mostra a datar, la manca de material mesurable pel laboratori priva de tenir referències absolutes per LSJ-1. Veure discussió a la pàg. 227.

FASES DE DINÀMICA DE VESSANTS A PARTIR DELS SEDIMENTS LACUSTRES DE SIERRA NEVADA				
	Aguas Verdes	Rio Seco	Lagunilla Rio Seco	Lagunilla de San Juan
	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	Terraplenament de la llacuna. Formació de torba
F₁	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	Terraplenament de la llacuna. ↑ erosió / input clàstic
	↑ lleuger productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió ↑ Increment aridesa	Inici de terraplenament de la llacuna, condicions palustres → lacustres → palustres. ↓ erosió / input clàstic
F₂	-	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	Canvi condicions lacustres ↔ palustres. ↑↑ erosió / input clàstic
	-	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	Canvi condicions palustres → lacustres. Expansió de la llacuna. ↓ erosió / input clàstic
F₃	↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació, ↓ temperatures ↑ congestes de neu tardanes	Fase assecament llacuna → aquífer. ↑ erosió / input clàstic
	≈ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	Condicions palustres. Lleugera expansió de la llacuna. ↓ erosió / input clàstic
F₄	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	Terraplenament llacuna, canvi condicions lacustres → palustres. ↑ erosió / input clàstic

FASES DE DINÀMICA DE VESSANTS A PARTIR DELS SEDIMENTS LACUSTRES DE SIERRA NEVADA				
	Aguas Verdes	Rio Seco	Lagunilla Rio Seco	Lagunilla de San Juan
	≈ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica Increment aridesa	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica Increment aridesa	↑ productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica Increment aridesa	Condicions lacustres. Estabilitat geomòrfica
F₅	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació, ↓ temperatures	↑ lleuger erosió / input clàstic ↑ precipitació	-
	↑ lleuger productivitat, ↓ erosió estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓↓ erosió ↑↑ vegetació conca, ↑ temperatures, vents de sud estabilitat geomòrfica	↓ erosió, estabilització productivitat → F ₂ estabilitat geomòrfica	-
F₆	-	↑↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació, ↓ temperatures ↓↓ vegetatització conca	↑↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació, ↓ temperatures ↓↓ vegetatització conca	-
	-	↑ productivitat, ↓↓ erosió ↑↑ vegetació conca, ↑ temperatures estabilitat geomòrfica	↑ lleuger productivitat ↓ erosió, ↑ vegetació conca, ↑ temperatures estabilitat geomòrfica	-
F₇	-	↓ productivitat, ↑ erosió Canvi condicions dominants, ↓ vegetatització conca	↓ productivitat, creixent erosió Canvi condicions dominants, ↓ vegetatització conca	-
	-	↑ productivitat, ↓↓ erosió ↑↑ vegetació conca, ↑ temperatures estabilitat geomòrfica	↑ productivitat, ↓↓ erosió ↑↑ vegetació conca, ↑ temperatures, vents de sud estabilitat geomòrfica	-
F₈	-	↑↑ erosió / input clàstic ↑ precipitació, ↓ temperatures ↓↓ vegetatització conca	-	-

Taula 7.1. Quadre-resum dels principals esdeveniments ambientals d'època holocena inferits a partir dels sediments lacustres a Sierra Nevada. Cal considerar les fases senyalades en aquesta taula com orientatives donada la resolució de les datacions existents.

7.3 Integració dels registres terrestres i lacustres

La cronologia de la solifluxió a Sierra Nevada s’allarga amb relativa precisió assumint els darrers 4 ka BP i de manera orientativa arriba a cobrir els últims 7 ka BP. Per la seva banda, la reconstrucció de les fases d’activitat de vessants inferides a partir dels sediments lacustres suposa una aproximació als darrers 6 ka BP.

El solapament temporal d’ambdós registres permet intentar determinar si els canvis ambientals que reflecteixen els lòbuls i les llacunes reproduïxen inestabilitat de vessants durant les mateixes finestres temporals.

L’evident sincronia que mostra la figura 7.7 entre sengles arxius sedimentaris analitzats demostra que les condicions climàtiques propícies per a una menor vegetaltització de les culminacions de la Sierra significaven l’activació dels vessants: la inexistència del fre que la coberta vegetal suposa per al dinamisme de vessant implicava una intensificació de la solifluxió, una major mobilització mineral i sedimentació de partícules de textura més grollera (amb més proporció de sorres) en el fons dels llacs.

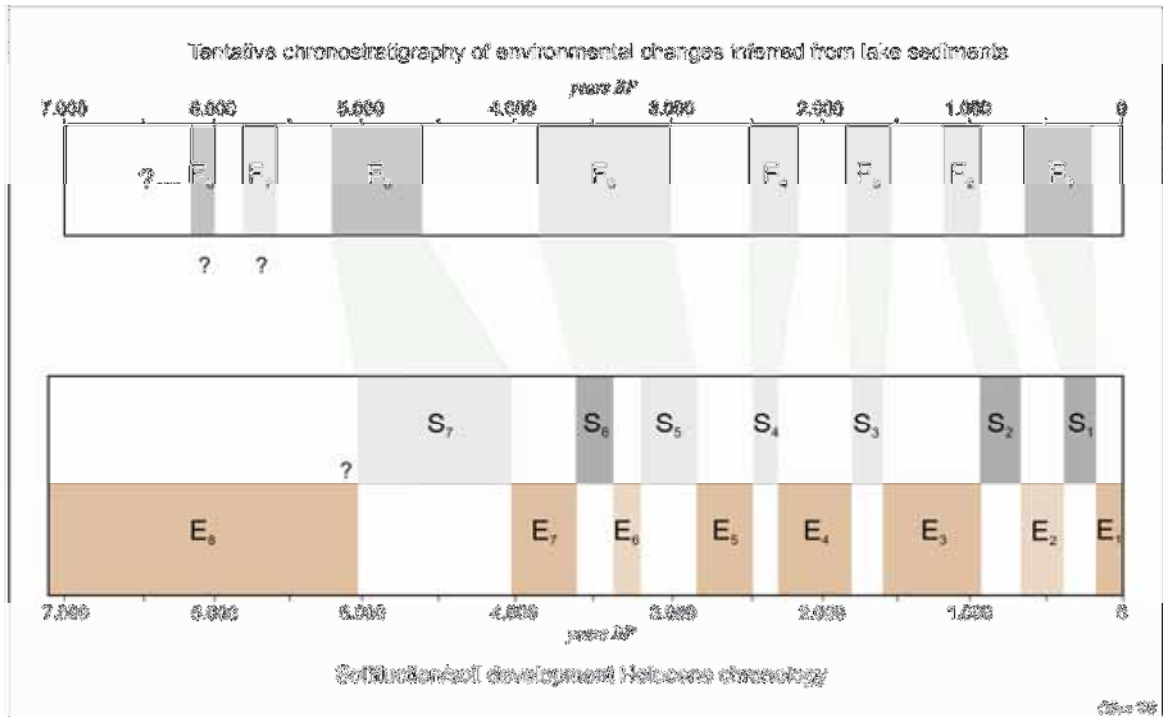


Figura 7.7. Activitat de vessants inferida a partir dels sediments lacustres i cronologia solifluidal holocena.

La contrastació temporal dels registres solifluidals i lacustres presenta un cert desfasament s conseqüència de l'escassetat de datacions disponibles i al fet que són arxius sedimentaris diferents i no necessàriament han de respondre sincrònicament ni de la mateixa manera a les fluctuacions climàtiques holocenes.

La sincronia entre les fases geomòrfiques dels darrers 5 ka BP definides en els llacs i en els lòbuls és notable. Un primer impuls es detecta durant el 5è mil·lenni (F₆-S₇), seguit d'un període de relativa tranquil·litat geomorfològica (E₇). La degradació manifesta de les condicions climàtiques, amb precipitacions superiors i temperatures sensiblement més baixes, remarquen un període d'instabilitat de vessants entre ~3,6-2,8 ka BP, que es correlaciona amb dos impulsos solifluidals (F₅-S₆ i S₅). Enmig i posteriorment a la segona pulsació hi destaquen breus fases de desenvolupament edàfic (E₆ i E₅), associades a una suavització dels rigors climàtics.

La següent instabilitat en els pendents de la Sierra esdevé entre ~2,5-2,3 ka BP (F₄-S₄) amb un impuls relatiu que es trunca durant el RWP, fase en la qual unes temperatures més elevades imposen una estabilització de la mobilització mineral (E₄). Una nova degradació de les condicions climàtiques molt semblant a l'anterior té lloc entre 1,8-1,6 ka BP (F₃-S₃), truncada pel notable repunt tèrmic constatat durant el MWP, que intensifica la formació edàfica en sectors de topografia favorable a les culminacions de Sierra Nevada (E₃).

Durant el darrer mil·lenni es constaten dues fases evidents d'instabilitat de vessants. Tot i que la cronologia referent als sediments de les llacunes no és prou precisa, sí que ho és la relativa a la solifluxió, que ens permet constatar un primer impuls de la LIA en el massís entorn als segles XII i XIII amb instabilització de vessants (F₂-S₂), seguit d'un període de desenvolupament orgànic sobtat en capçalera entre els segles XIV i XVI (E₂). La pulsació més intensa de la LIA (F₁-S₁) esdevé entre els segles XVII i la primera meitat del XIX, comportant una activa solifluxió i abundant aportació de material erosionat al fons de les llacunes. La tendència tèrmica iniciada des d'aleshores estén una incipient coberta vegetal en alçades que circumden els 3.000 m, disminueix l'erosió i el transport de material en suspensió i dissolució fins als llacs, comportant així una fase de relativa estabilitat geomòrfica (E₁).

Les condicions climàtiques que afavoreixen la solifluxió durant l'Holocè a Sierra Nevada estan lligades a unes temperatures més baixes i/o a un augment dels índexs d'humitat en el sòl durant la primavera tardana. Aquests vindrien induïts especialment per increments de les precipitacions hivernals, les quals proporcionen una major persistència de la coberta nival, prolonguen la durada del sòl glaçat subsuperficialment i determinen una reducció de la coberta vegetal, ja que les espècies vegetals veuen significativament reduït el període necessari per completar el seu cicle vital.

Aquestes condicions es tradueixen en un allargament de la protecció de gel que cobreix les llacunes actualment fins ben entrada la primavera i una major quantitat de congestes de neu que perllonguen la seva romanència a les capçaleres de les valls. Més neu significa més aigua: s'incentiva així la meteorització física, l'erosió i augmenta la capacitat de transport de partícules minerals denudades de la conca per una esorrentia superficial més enèrgica durant l'estació de desglaç, la qual arrossega també restes vegetals incapaces d'adaptar-se a les noves condicions imperants. A més, la combinació de fred i humitat comportaria l'aparició de petits focus glacials en les circs septentrionals, tal i com els escrits d'època constaten en el Corral del Veleta (Gómez Ortiz, 1997).

Si climes més freds i/o humits indueixen l'activació dels vessants, la combinació de temperatures més atenuades i índexs de precipitació semblants o inferiors propicien una estabilització del dinamisme geomòrfic. El factor limitant clau de la vegetació herbàcia en alçades properes als 3.000 m és la temperatura; per tant, un allargament del període lliure de neu en aquestes cotes permetria una recuperació de la coberta vegetal malgrat que els índexs de precipitació fossin lleugerament inferiors. Més vegetació i menys aigua en circulació a la conca determinen una disminució de la solifluxió i de les aportacions minerals als llacs, posant de manifest un fre dels processos de vessant en el massís.

7.4 Cronologia ambiental a Sierra Nevada en relació amb proxïes regionals, hemisfèrics i globals

En l'apartat 2.1 s'han detallat les característiques geogràfiques que determinen les condicions climàtiques que avui assetgen Sierra Nevada. Actualment, el massís es troba immers a cavall de la influència subtropical concretada per la plasmació de l'anticicló de

les Açores sobre el sud peninsular i l'escombratge de pertorbacions associades als *westerlies* de mitges latituds durant el semestre fred de l'any.

El desplaçament, reforçament i debilitament dels centres d'acció directors de la CGA a l'Atlàntic Nord durant l'Holocè han determinat una variabilitat climàtica complexa en el context de la Península Ibèrica, implicant canvis significatius en el paisatge del massís. El fet de restringir l'àrea d'estudi al cinturó periglacial actual (~2.500-3.000 m), molt sensible a les fluctuacions climàtiques (Veit, 1993) i de ràpida resposta paleoecològica a la dinàmica atmosfèrica dominant, permet inferir canvis en el desplaçament vertical dels processos geomorfològics associats al fred durant els últims mil·lennis. Les variacions de l'estructura o intensitat del camp de pressió a l'Europa occidental, bàsicament conduïdes en el marc peninsular per la interacció de la baixa d'Islàndia i l'anticicló de les Açores, s'han concretat en les culminacions del massís amb una resposta geomorfològica que primava la solifluxió i la inestabilitat de vessants o, per contra, afavoria una certa estabilitat geomòrfica i una intensificació de l'edafogènesi en aquells sectors cimers topogràficament més favorables.

7.4.1 Cronologia de la solifluxió a Sierra Nevada comparada amb altres muntanyes de l'orla alpina

En els capítols anteriors hem discutit els problemes existents en la cronostatigrafia de la solifluxió a Sierra Nevada, resumits en el control geocronològic i la discontinuïtat dels registres. La contrastació de la cronologia de la solifluxió a la Sierra amb l'existent per altres muntanyes de latitud mitges, bàsicament als Alps, denota la importància del component local. En efecte, les cronologies prèvies de Steinmann (1978), Gamper (1983) i Veit (1988) relatives als períodes favorables als processos solifluidals i al desenvolupament de sòls en sectors d'alta muntanya dels Alps suïssos i austríacs constaten les notables diferències existents entre àrees properes, essent difícil la comparació amb els registres de Sierra Nevada (figura 7.8).

Els registres alpins detecten desenvolupament de sòls (podsòls) que es corresponen amb la nostra formació edàfica E₈ (histosòl). Entre ~5-4 ka BP a la Sierra es denota un domini dels processos solifluidals que no es correspon amb el desenvolupament edàfic predominant als Alps, tot i breus avenços solifluidals asincrònics. La formació torbosa que

domina entre ~4-3,7 ka BP a Sierra Nevada (histosòls) sembla respondre a unes condicions climàtiques que determinaren també la prevalença de la formació edàfica als Alps, tot i que la degradació climàtica que experimenta la Sierra entre ~3,7-2,8 ka BP, amb les fases solifluidals S₆ i S₅, només sembla reflectir-se en els registres dels Alps suïssos, on Gamper (1983), reporta uns períodes dominats per la solifluxió més prolongats que aquells manifestats en els Alps austríacs per Steinmann (1978) i Veit (1988). Aquest darrer autor destaca una pulsació més freda entre ~3,2-2,9 ka BP, amb existència de *permafrost* i que es correspon amb la fase solifluidal S₅ de la Sierra.

El desenvolupament de sòls ben estructurats i d'elevat contingut orgànic (histosòls) domina a Sierra Nevada entre 2,8-0,8 ka BP (E₅-E₃), amb dos períodes d'activació relativa de la solifluxió entre 2,5-2,3 i 1,8-1,6 ka BP (S₄ i S₃). L'estructura sedimentària en els lòbuls dels Alps reflexa notables variacions entre els diferents sectors estudiats, destacant-se un període de domini edàfic entre 2,2-1,7 ka BP (cambisòls) i remarcant-se una fase d'instabilitat de vessants entre 1,7-1,2 ka BP, interval en què prevalen els processos edàfics a Sierra Nevada amb continguts orgànics propers a valors torbosos. Veit (1988) posa de manifest el retorn a condicions de *permafrost* durant aquest període als Alps, amb un repunt prolongat de la solifluxió.

Durant l'etapa baixmedieval es registra la fase S₂ a Sierra Nevada, que es correspon amb dos avenços de la solifluxió als Alps suïssos, però amb un domini de l'edafogènesi als Alps austríacs. El desenvolupament de sòls en el registre de Steinmann (1978) cobreix pràcticament la totalitat dels darrers 1.000 anys BP, mentre Veit (1988) descriu una inestabilització de vessants entre 600-300 anys BP i els registres de Gamper (1983) als Alps suïssos no cobreixen l'últim mil·lenni. Caldria analitzar la problemàtica geocronològica amb major detall, considerant els efectes de la topografia i de les característiques microclimàtiques en aquests tres indrets; cronologies tan diferents ressalten el complex paper que juguen les nombroses variables que intervenen en la solifluxió i serveixen per demostrar que unes condicions climàtiques poden activar la solifluxió en un sector i, en un altre indret proper, aturar-la i propiciar el desenvolupament de sòls. La darrera fase constatada a Sierra Nevada (S₁) constitueix un període d'activa solifluxió i d'aleshores ençà hi domina una incipient edafogènesi tal i com succeeix en sectors dels Alps amb formació de sòls poc estructurats (regosòls).

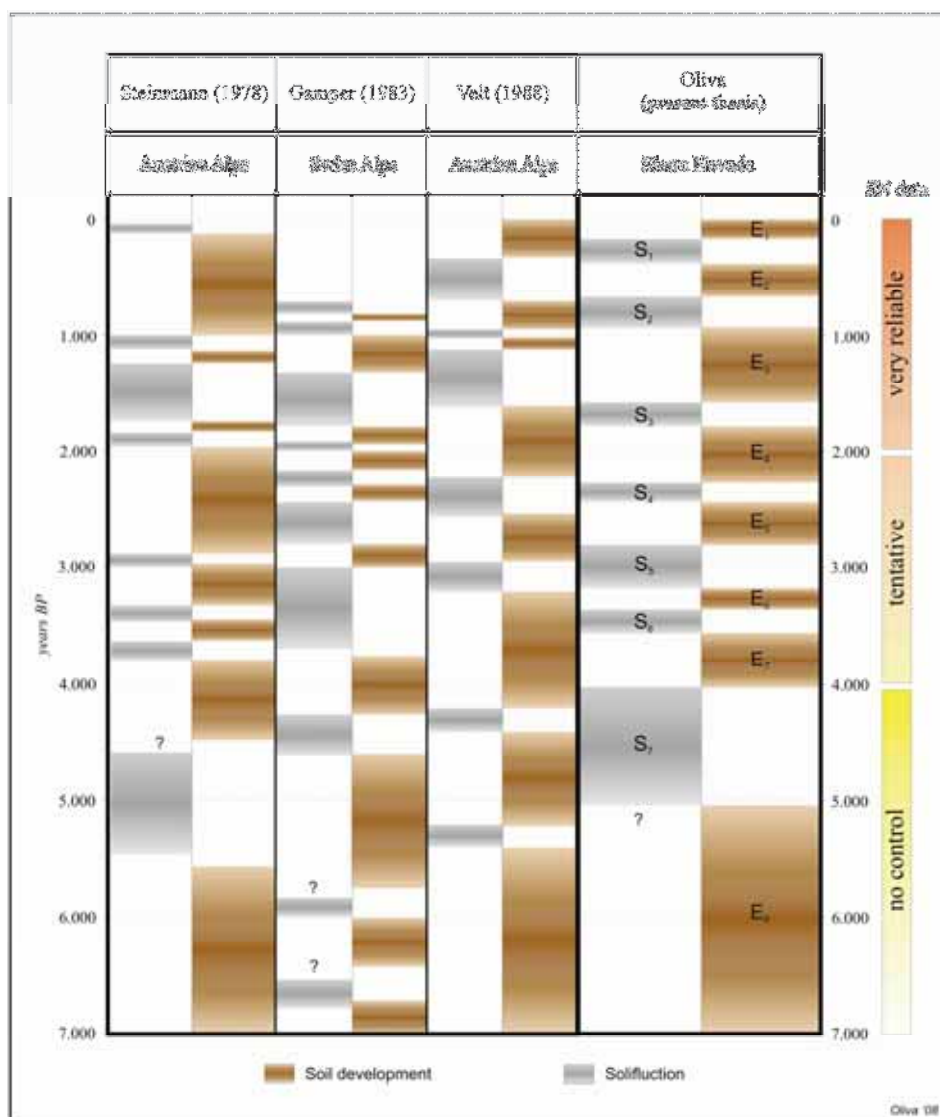


Figura 7.8. Cronologia holocena comparativa dels processos solifluidals/edàfics als Alps i Sierra Nevada.

7.4.2 Cronologia de la inestabilització de vessants a Sierra Nevada en relació amb proxies regionals, hemisfèrics i globals

Sota l'etiqueta de present interglacial, l'Holocè ha estat tradicionalment definit com un període caracteritzat per uns valors tèrmics elevats, allunyat dels rigors climàtics que imposaven les glaciacions quaternàries. No obstant, la recerca està demostrant que l'Holocè amaga una variabilitat climàtica gens menyspreable, amb períodes sensiblement més càlids i freds, combinats amb fases més humides i d'altres més àrides. Aquestes condicions han estat propícies per a la florida de les primeres civilitzacions a les ribes de la mar Mediterrània, però també han arribat a ser extremes i algunes d'elles han arribat a col·lapsar (Nüzhet Dalfes et al., 1996; deMenocal, 2001).

Com ja hem comentat anteriorment, la solifluxió i, en extensió, la inestabilitat de vessants a Sierra Nevada⁷⁶, es veu afavorida per la combinació de temperatures més baixes i/o majors índexs d'humitat, mentre l'edafogènesi en altura es veu incentivada per períodes més càlids i humits. L'existència de diferents *proxies* que cobreixen l'Holocè a resolucions decadal-centenals permet la intercomparació d'aquests amb els nostres registres nevadenses. A tal efecte s'han escollit diferents *proxies* regionals: períodes d'aridesa a la Mediterrània occidental (Jalut et al., 2000); *proxies* hemisfèrics: cicles de Bond (Bond et al., 2001) i *proxies* globals: anomalies de radiocarboni (Stuiver et al., 1997).

Els desfasaments que es detecten a la figura 7.9 entre els registres solifluidals i les anomalies de radiocarboni, més reduïts durant els últims 2.000 anys, es deuen al fet de contrastar *proxies* de diferents resolucions temporals i a les pròpies limitacions de la resolució assolida en la nostra cronologia.

La fase edàfica E₇ esdevé a Sierra Nevada entre 4-3,7 ka BP i es caracteritza per ésser un període de certa estabilitat geomòrfica a les culminacions del massís amb predomini del desenvolupament edàfic, motivat per un repunt de la temperatura i una marcada tendència a l'aridesa (Jalut et al., 2000). Precisament, aquesta caiguda de les precipitacions al sud-est peninsular acaba amb la civilització argàrica en una interacció de factors climàtics i inducció antròpica (Carrión et al., 2007).

Durant la Neoglaciació (~3,5-3 ka BP), període que es correspon amb un període d'avenç de les glaceres després de mil·lennis reculant, la combinació de majors precipitacions i temperatures més baixes activa també els vessants de Sierra Nevada en dues pulsacions (S₆ i S₅), que es correlacionen amb una fase molt freda i humida constatada al nord d'Àfrica (Cheddadi et al., 1998) i un cicle de Bond (Bond et al., 2001). Entremig, destaca un breu període d'una certa estabilització dels vessants (E₆) amb formació de regosòls que recobrien els fons de vall i capçaleres de barrancs de la Sierra.

⁷⁶ L'apartat 7.3 posa de manifest la sincronia entre aquells períodes en què domina la solifluxió a la Sierra i la inestabilitat de vessants que reflecteixen els sediments lacustres. Per tal de correlacionar aquestes fases geomòrfiques amb altres *proxies* relatius a diferents escales utilitzarem la cronologia de la solifluxió, més precisa que la derivada dels sediments lacustres, refermant la correspondència temporal entre ambdues.

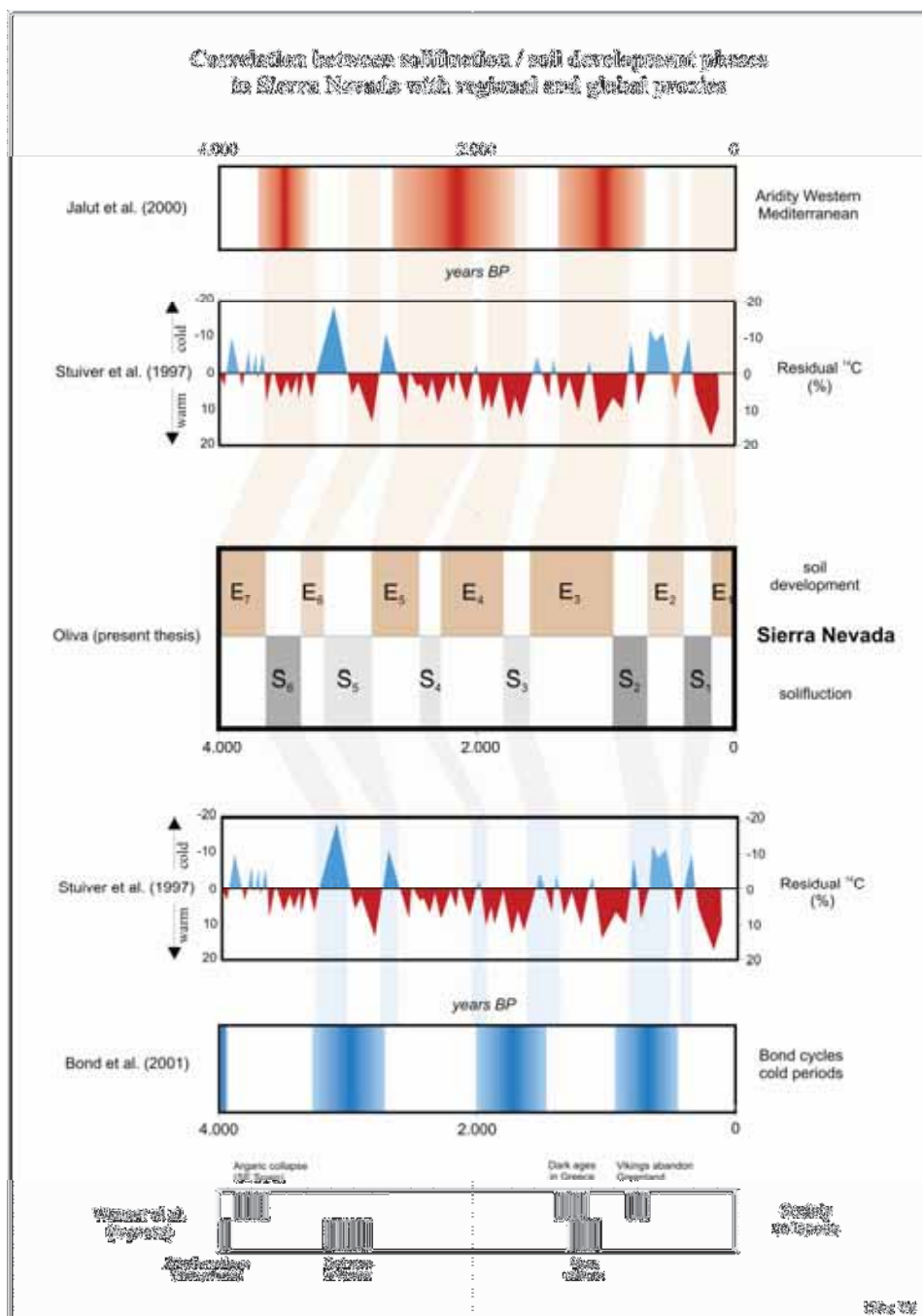


Figura 7.9. Cronologia dels processos de vessant a Sierra Nevada i comparació amb proxies climàtics de diferents escales.

Durant el RWP i el MWP hi ha una clara prevalença de les condicions àrides i càlides en el massís, fet que es reflexa en el desenvolupament edàfic dominant (E₅-E₃), en detriment de la remobilització mineral imperant durant la Neoglaciació. Es detecta una evident sincronia entre el retrocés de les glaceres als Alps i l'estabilització de l'activitat de vessants en el cinturó periglacial de la Sierra (Hormes et al., 2006).

Aquesta aridesa va paral·lela a una major radiació incident en la superfície terrestre (Stuiver et al., 1997), que va condicionar un retrocés de les glaceres alpines (Hormes et al., 2006) i una intensificació dels incendis al sud-est de la Península Ibèrica (Carrión et al., 2007). En aquest llarg període de domini edàfic trobem dos impulsos solifluidals enmig d'un cicle que Bond et al. (2001) constaten de temperatures relativament més fresques a l'Atlàntic. El primer d'ells (S₄) té lloc entre 2,5-2,3 ka BP i es caracteritza per ésser una fase solifluidal relativa conduïda per unes precipitacions modestes; el segon (S₃) esdevé entre 1,8-1,6 ka BP i és causat per un increment de la humitat i valors tèrmics menors.

Durant el darrer mil·lenni es perceben dues fases d'intensa dinàmica de vessants (S₂ i S₁) amb l'aparició secular de la glacera del Corral del Veleta (Gómez Ortiz et al., 2008), gràcies a unes temperatures inferiors conduïdes per mínims consecutius de radiació solar (mínims de Spörer, Maunder i Dalton; Stuiver et al., 1997) i al darrer cicle de Bond durant la LIA. Entre S₂ i S₁ destaca un període de desenvolupament edàfic a les culminacions del massís que estabilitza temporalment els vessants (E₂).

Des de les últimes fases fredes i humides de la LIA, el continent europeu registra una tendència tèrmica a l'alça que ha conduït a un increment de la vegetalització a les parts altes de la Sierra, reduint l'erosió i la mobilització mineral i intensificant l'edafogènesi a l'àrea d'estudi (E₁).

