

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 3

METODOLOGIA EMPRADA

3. Metodologia emprada

En aquest apartat es detallarà la metodologia utilitzada en la nostra recerca amb un extens resum dels procediments i de la finalitat dels mètodes emprats en l'anàlisi dels lòbuls de solifluxió i de les llacunes d'alçada. Les singularitats de les mostres de cada un d'aquests registres sedimentaris condicionen els mètodes usats en la determinació de les seves característiques geoquímiques i granulomètriques. Si bé alguns dels mètodes utilitzats en ambdós registres persegueixen el mateix objectiu, no s'han concretat de la mateixa manera; a tall d'exemple, la diferent disponibilitat de material en lòbuls i llacunes induïx a utilitzar diferents mètodes per a la quantificació de la textura.

3.1 Metodologia emprada per a la caracterització dels lòbuls de solifluxió

La recerca referent als lòbuls de solifluxió de Sierra Nevada ha pretès una doble finalitat: exemplificar el dinamisme dels processos periglacials actius avui a Sierra Nevada i desxifrar les fases d'activitat solifluidal durant l'Holocè. El primer objectiu ha combinat el treball de camp, amb la instal·lació de tot l'instrumental necessari, i el posterior treball de gabinet i tractament de dades; per altra banda, la segona finalitat, la reconstrucció de les fases d'estabilitat/inestabilitat de vessants, ha comportat l'anàlisi de l'estructura interna de prop d'una trentena de lòbuls durant les campanyes de camp, amb la presa de mostres de les unitats seleccionades.

Aquestes mostres han estat analitzades als laboratoris de Geografia Física de la Universitat de Barcelona, al *Geographisches Institut* de la Universitat de Berna (Suïssa) i al laboratori del Departament de Prehistòria de la Universitat Rovira i Virgili (Tarragona). Les datacions radiomètriques es van centrar en la concentració de pol·len dels horitzons orgànics considerats clau i van ser processades a l'*Angström Laboratory* de la Universitat d'Uppsala (Suècia). Posteriorment, s'ha realitzat el treball de gabinet en el Servei del Paisatge de la Universitat de Barcelona, amb la conseqüent interpretació litostratigràfica i geocronològica. La síntesi de totes aquestes etapes ha culminat en el redactat de la present tesi doctoral.

3.1.1 Treball de camp

Lògicament, en un àmbit d'alta muntanya com Sierra Nevada, en alçades properes als 3.000 m, el calendari de les campanyes de camp es limita als mesos en què la cobertura nival s'esvaeix i les condicions climàtiques són més propícies. El treball de camp s'ha realitzat, doncs, durant els mesos estivals de 2005 a 2008, amb els corresponents permisos atorgats per la direcció del Parc Nacional de Sierra Nevada per a la instal·lació temporal d'aparells (estaques i *dataloggers*) i la presa de mostres dels lòbuls de solifluxió.



Figura 3.1. Front del lòbul RSA.20.

- **Monitoratge tèrmic**

El control del règim tèrmic del sòl és un element comú en estudis de processos periglacial degut a l'estreta interrelació entre les temperatures subsuperficials i les morfologies periglacial actives (Hoelzle et al., 1999; Vieira et al., 2003). A més de la lògica influència que exerceix la temperatura de l'aire, hi ha altres factors que intervenen en el règim tèrmic del sòl: exposició, altura, profunditat, textura, humitat del sòl, etc. En el nostre cas d'estudi, però, serà especialment important el control que exerceix l'espessor, la densitat i la duració del mantell nival en la temperatura del sòl (Brown, 1973; Smith, 1975).



Figura 3.2. Control tèrmic en un lòbul de Rio Seco.

Els sensors tèrmics utilitzats són els UTL-1 (*Universal Temperature Logger*), d'alta capacitat d'emmagatzematge i resistents a l'aigua. Aquests *dataloggers* tenen un rang de temperatures de -29 a 39°C i una precisió de $\pm 0,23^\circ\text{C}$. Es poden programar a diferents intervals de temps, assumint fins a 7.944 valors de memòria; en el nostre cas, s'han programat cada 2 hores i el manteniment de les bateries s'ha realitzat anualment, minimitzant així els riscos de pèrdua de dades.

- **Monitoratge dinàmic**

El control dinàmic de la solifluxió s'ha realitzat mitjançant la instal·lació de prop d'un centenar d'estaques repartides per les valls de San Juan i Rio Seco. Les estaques són de fusta, tenen 50 cm de llargària i 3 cm de diàmetre. S'han inserit uns 45 cm en els fronts i en ambdós marges dels lòbuls, mesurant anualment les distàncies relatives entre elles i la direcció de flux. Tot i ser un sistema tradicional, el mètode emprat ens serveix per afirmar la pràctica inactivitat de la solifluxió actualment a Sierra Nevada; a més, també ens permet mesurar l'*uplift* anual de les estaques per efecte del gel-desgel. Des d'agost de 2007, el moviment de les estaques es realitza pel sistema de posicionament per satèl·lit (GPS), assolint una precisió ~ 2 cm, tot i que en la present tesi doctoral no es presenten aquests resultats, ja que requereixen d'un abast temporal superior.

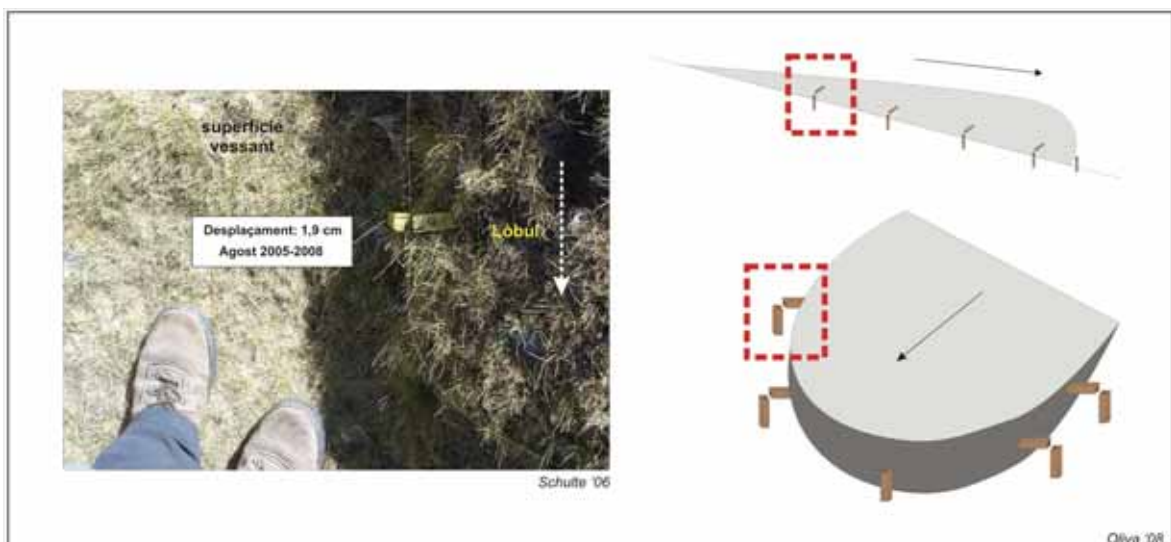


Figura 3.3. Metodologia utilitzada en el control de la solifluxió. Les estaques s'han col·locat per parelles en els laterals del lòbul, instal·lant una unitat en el vessant i una altre transversalment dins del lòbul, mesurant anualment el desplaçament acumulat en funció de les línies de referència dibuixades en les estaques. En el lòbul presentat de la vall de San Juan, monitorat pel Dr. Schulte des de 2005, es percep un desplaçament de 1,9 cm acumulat en tres anys de mesura, entre agost del 2005 i 2008 (Oliva et al., accepted).

- **Cartografia i morfometria**

La cartografia geomorfològica general de les valls de San Juan i Rio Seco s'ha basat en aquella prèviament existent de la Sierra (Gómez Ortiz et al., 2002), amb petites modificacions derivades de l'observació sobre el terreny i de l'escala de treball requerida. Els mapes de detall dels sectors d'estudi de cada vall són el resultat del treball de camp sobre l'ortofotomapa¹⁴ en funció de la llegenda presentada en l'apartat 4.1.1¹⁵.

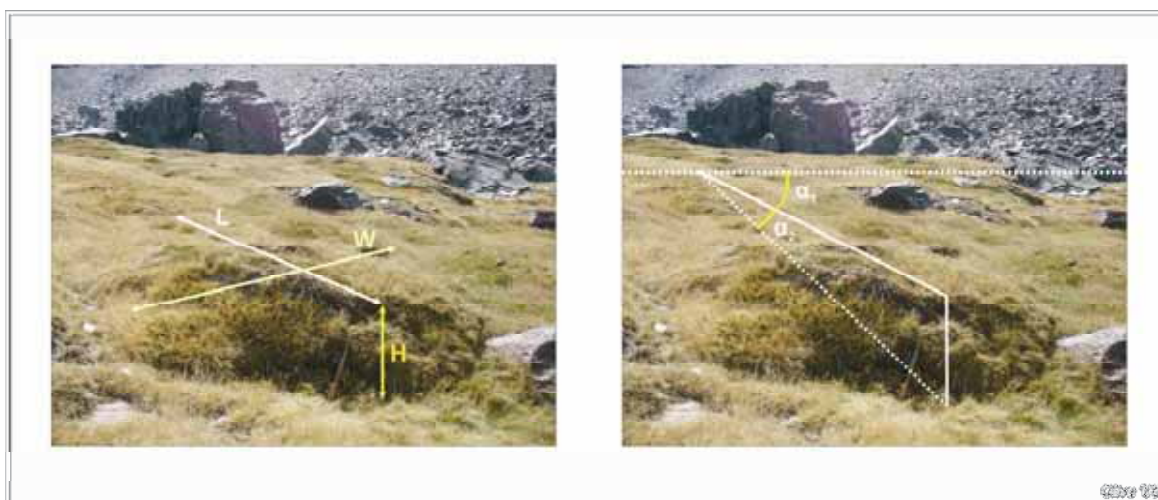


Figura 3.4. Variables geomètriques dels lòbuls considerades a Sierra Nevada.

L'anàlisi morfomètric de cada lòbul de solifluxió ha contemplat la determinació de la ubicació geogràfica (latitud, longitud, altura, orientació i pendent), longitud, amplada, potència vertical del front, angle amb el vessant, tipologia, recobriment vegetal i morfologia de cada lòbul (figura 3.4). L'instrumental utilitzat ha estat el propi del treball de camp: GPS, clinòmetre, cinta mètrica i brúixola. El contingut d'aigua de la superfície de cada lòbul es va mesurar durant l'estiu del 2007 amb un mesurador d'humitat *Delta T* de sonda *Theta ML2x*, que ofereix una estimació instantània del percentatge líquid en el sòl.

- **Anàlisi edafològic-sedimentològic**

L'estudi i caracterització sedimentològica dels lòbuls de solifluxió s'ha realitzat basant-se en la normativa FAO (2006). El color s'ha determinat sobre mostra seca a partir d'una taula Munsell; si bé tonalitats fosques són indicatives d'un enriquiment en matèria orgànica, els colors més clars poden respondre a diferents processos (Birkeland, 1999).

¹⁴ *Ortofotografia digital de Andalucía* (2004), escala 1:5.000, Junta de Andalucía.

¹⁵ Veure pàg. 106-108 i 111-112.

El procediment emprat s'ha basat en un previ sondeig dels lòbuls potencialment útils per a la nostra recerca amb una sonda manual de tipus Pürkhauer, i, en funció de la seva estructura interna, decidíem, o no, obrir un perfil en el front o en el marge dels mateixos. Un cop oberts els perfils, se n'extreia testimoni fotogràfic i 0,5 kg de mostra de cada horitzó per a la posterior analítica de laboratori. Les mostres han estat degudament identificades atenent a la vall, sector i número de lòbul cartografiat¹⁶; en total, s'han processat al laboratori un total de 155 mostres.

3.1.2 Treball de laboratori

Les mostres humides es van assecar a 60°C durant 12 hores, amb percentatges en el contingut d'aigua molt variables, depenent de l'enclavament específic del lòbul, la textura i la profunditat de les mostres en qüestió (10-80%). Els diferents anàlisis de laboratori que es detallen a continuació es van realitzar sobre mostra seca i tamisada ($\emptyset \leq 2$ mm):

- **Concreció de la textura**

La microtopografia local i les condicions climàtiques condicionen el tamany del material que soliflueix durant fases d'activitat geomòrfica. L'elevat contingut de graves d'alguns dipòsits solifluidals (10-50%), orientades en funció del pendent, és característic de la macrofàbrica de vessant. Sobre mostra seca, s'ha calculat el percentatge de graves a partir del tamisatge $\emptyset > 2$ mm.

El fet d'ésser mostres amb un elevat contingut en matèria orgànica condiciona l'analítica, especialment la detecció del tamany de la fracció mineral. Cal eliminar la matriu orgànica, ja que aquesta facilita la formació de microagregats que emmascaren la textura i desvirtuen la granulometria original. Les sorres s'han calculat per tamisatge, mentre que llims i argiles han estat processats automatitzadament amb el sistema *Micromeritics SediGraph 5100*. Combinant ambdós mètodes obtenim la quantificació de la fracció mineral fina de les mostres (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Per a la determinació de les sorres es prenen 50 g de mostra que s'introdueixen en un got de precipitats juntament amb 250 ml d'aigua destil·lada, 105 ml de peròxid d'hidrogen (H_2O_2) concentrat al 35% i unes gotes d'octanol ($C_8H_{17}OH$). Es deixa reaccionar i

¹⁶ Veure apartat 4.1 (pàg. 106-108 i 111-112) i annex (pàg. 314-321).

descansar durant 24 hores¹⁷. S'escalfen una hora les mostres a 95°C al "bany maria" afegint-hi 21 ml més de H₂O₂ i es deixen reposar un dia. Es treu l'aigua per decantació i es vessa el contingut en un Erlenmeyer, on s'afegeixen 3 g de carbonat de sodi (Na₂CO₃) que actua de dispersant i es deixa 24 hores.

Es remouen les mostres durant 2 hores i s'aboquen en un edifici de tamisos de 63, 200 i 630 µm (sorres fines, mitjanes i grans); aquest sacseja la mostra durant 10 minuts sota aigua a pressió, separant mecànicament les diferents fraccions de sorres. Les mostres humides es disposen en un vaset que es deixa durant 3 hores a l'estufa a 105°C; un cop evaporada l'aigua, de la diferència de pesades obtenim el percentatge de sorres fines, mitjanes i grans de cada mostra.

La preparació de les mostres per a la determinació de la fracció mineral més fina (llims i argiles) pel sistema Sedigraph ha requerit d'un pretractament similar. Es parteix de 10 g de mostra que s'ataca amb 21 ml de H₂O₂ i unes gotes d'octanol durant 24 hores. Quan s'ha completat la reacció es centrifuga la mostra 12 minuts a 4.000 rpm i s'aboca en un matràs petit amb 20 ml de dispersant¹⁸ i aigua destil·lada fins a 60 ml. Es deixa 24 hores.

Taula 3.1. Textura segons AG Boden (2005).

TEXTURA SEGONS AG BODEN (2005)	
Fracció	Diàmetre (µm)
Sorres grans (gS)	2000-630
Sorres mitjanes (mS)	630-200
Sorres fines (fS)	200-63
Llims grans (gU)	63-20
Llims mitjans (mU)	20-6,3
Llims fins (fU)	6,3-2
Argiles (T)	< 2

Es remouen les mostres durant 2 hores i es vessa el contingut en un vas, tamisant la mostra a 63 µm i prescindint de les sorres. S'enrasa el vas amb aigua fins a 200 ml. Es remena i es vessa al Sedigraph, que és capaç de quantificar el tamany de les partícules fines a partir de la dispersió de raigs X en una cinquantena de categories. La taula adjunta explicita les principals fraccions granulomètriques considerades.

¹⁷ En aquells horitzons més orgànics s'ha hagut de deixar més temps, fins a 3 dies.

¹⁸ Consisteix en una solució de 1.000 ml d'aigua, 33 g d'hexametfosfat sòdic (NaPO₃)₆ i 7 g de Na₂CO₃.

- **Contingut de matèria orgànica**

El desenvolupament de sòls incipients durant fases d'estabilitat geomòrfica determina una cobertura vegetal més o menys densa que, a la vegada, reforça els processos edàfics. Les variacions en el contingut de matèria orgànica es contempen com un *proxy* relatiu a la dinàmica de vessants: les condicions climàtiques favorables per al desenvolupament edàfic es manifesten en elevades proporcions de matèria orgànica i, pel contrari, la degradació d'aquestes condicions propícies per a l'edafogènesi es reflecteix en disminucions de la fracció orgànica.

Les anàlisis s'han dut a terme en el laboratori del *Geographisches Institut* de la Universitat de Berna (UBE) gràcies a un analitzador elemental (ELEMENTAR vario MACRO) sota l'auspici de la Dra. Daniela Fischer, que n'és la responsable. La preparació de cada mostra requereix d'una quantitat d'entre 150-200 mg per a l'elaboració de la pastilla, la qual serà cremada a 960°C. Prèviament, cal preparar un patró amb 80-100 mg d'àcid L-glutàmic (C₅H₉NO₄) de ràtio C/N coneguda¹⁹, l'assoliment de la qual és bàsic per assegurar uns òptims resultats. Els gasos despresos durant la seva combustió permeten determinar la relació C/N dels sediments en qüestió; en aquells lòbuls analitzats a més alta resolució, s'han realitzat dues mesures per mostra.

El carboni orgànic (C_{org}) és un paràmetre àmpliament utilitzat per quantificar la part orgànica d'una mostra, ja que el contingut de matèria orgànica en el sòl es calcula en aproximadament 1,724 vegades el percentatge de C_{org} (Birkeland, 1999). La ràtio C/N és una mesura estimativa de l'edat d'un sòl i del seu estat de desenvolupament; els microorganismes utilitzen la matèria orgànica com a font d'energia alliberant diòxid de carboni i immobilitzant els nutrients, com el nitrogen, incrementant-se així el contingut relatiu de nutrients i disminuint la ràtio C/N (Gerrard, 2000).

- **Fraccions del ferro (Fe_d i Fe_o)**

El contingut d'òxids pedogènics i hidròxids de ferro, alumini, manganès i titani generalment s'incrementa amb el grau de meteorització i l'edat del sòl. La concreció del ferro és una variable àmpliament utilitzada en estudis de caracterització de sòls, i també, en lòbuls de solifluxió (Veit, 1988; Winiger & Marti, 2006). Les fraccions del ferro

¹⁹ C/N = 4,28.

analitzades s'han concretat mitjançant els procediments estàndard (Mehra & Jackson, 1960; Schwertmann, 1964).

El ferro pedogènic (Fe_d) està intrínsecament lligat amb la formació edàfica i ens permet valorar el grau de desenvolupament del sòl i els processos de meteorització, mostrant valors més elevats en els horitzons orgànics/paleosòls (Bech et al., 1997; May et al., 2008); els augments de Fe_d són, doncs, indicatius d'edats més avançades dels sòls. En canvi, valors elevats d'oxalat de ferro (Fe_o) són relatius a una component amòrfica inorgànica i compostos complexos de ferro en presència abundant d'aigua (Mahaney & Sammugadas, 1990). Ambdues fraccions del ferro solen utilitzar-se en ràtios:

- Fe_o/Fe_d → intensitat de la meteorització i maduresa del sòl, permet establir diferents edats relatives del sòl; la ràtio decreix cap als paleosòls més antics insinuant edats més avançades i la conversió del ferro amòrfic en ferro cristal·lí. Si la relació supera la unitat és indicatiu de sòls poc desenvolupats (Mahaney & Sammugadas, 1990).
- Fe_d/Fe_{tot} → també es considera un important indicador de l'edat dels sòls en qüestió: ràtios més elevades suggereixen sòls més antics, amb elevada transformació en ferro pedogènic (Arduino et al, 1984; Mahaney & Sammugadas, 1990).

Ferro ditionit (Fe_d)

La determinació del Fe_d ha requerit d'una seqüència d'extraccions partint d'una mostra inicial de 4 g en un vas de precipitats. S'afegeix a cada recipient 40 ml de tri-sodi citrat dihidratat 0,3 M ($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$) i 10 ml de bicarbonat de sodi 1 M ($NaHCO_3$); es crea, alhora, un patró afegint-li només aquestes solucions. S'introdueix entre 10-15 minuts al "bany maria" a 60-70°C, removent les mostres i s'afegeix 3 g de ditionit de sodi, es deixa reposar 10 minuts i s'hi vessa 20 ml de sulfat de magnesi hidratat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Es centrifuga 10 minuts a 5.000 rpm.

La segona extracció requereix d'un filtre de paper acomodat en un matràs petit on s'aboca la mostra i s'enrasa amb aigua ultrapura, deixant-ho reposar durant un dia. L'endemà cal prendre 2 ml de cada mostra i addicionar-hi 5 ml d'àcid perclòric (HClO) concentrat al

60%. Es deixa reaccionar durant 5 hores al “bany maria” a temperatures de 75-80°C. S’aboca en un matràs petit i s’enrasa amb aigua fins a 25 ml.

Posteriorment, s’extreu 10 ml de cada mostra i se li afegeix 2 ml d’àcid sulfosalicílic dihidratat ($C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$) i amoníac (NH_3) fins que reacciona i canvia de color. S’enrasa amb aigua ultrapura. Es vessen 25 ml d’aquesta solució en un recipient apte per a ser mesurat amb l’espectrofotòmetre HACH D/R 2000; es fan dues lectures de cada mostra, calibrant-ho regularment amb el patró.

Ferro oxalat (Fe_o)

Es prepara prèviament una solució amb 1000 ml d’oxalat d’amoni monohidratat ($(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$) i 765 ml d’àcid oxàlic dihidratat ($H_2O_x \cdot 2H_2O$), comprovant que la solució resultant tingui un pH ~3. Vessem 100 ml de la solució i 2 g de mostra en un matràs gran. S’introdueixen les mostres en una caixa de cartró per evitar que reaccionin en contacte amb la llum i es remenen durant 2 hores.

Posteriorment, s’extreu 50 ml de cada mostra i es centrifuga durant 10 minuts a 5.000 rpm. S’aboquen en un recipient amb filtre de paper. S’extreuen 5 ml que es passen en un matràs petit i s’afegeixen 2 ml d’àcid perclòric concentrat al 60%, deixant-ho 3-4 hores al “bany maria” a 75°C.

Es vessa tota la mostra i s’enrasa un aforat de 25 ml amb aigua. S’extreuen 5 ml de la solució i s’hi afegeixen 2 ml de d’àcid sulfosalicílic dihidratat i amoníac fins que la totalitat de la mostra reacciona i canvia de color. S’enrasa amb aigua ultrapura fins a 50 ml. Es vessen 25 ml de la solució en el recipient preparat per ser mesurat amb l’espectrofotòmetre HACH D/R 2000; es fan dues lectures de cada mostra, calibrant periòdicament l’aparell.

- **Susceptibilitat magnètica**

La susceptibilitat magnètica (MS) és una mesura àmpliament estesa en la temàtica paleoambiental, especialment en registres de *loess*. En les potents seqüències sedimentàries del *Chinese Loess Plateau*, durant les fases càlides i humides hi ha una reducció dels òxids de ferro detrítics per acció bacteriana i concentracions més elevades de

magnetita ultrafina, essent els horitzons orgànics els nivells que donen valors més elevats de susceptibilitat magnètica. Mentre, en moments freds i secs, en els quals l'acció eòlica diposita potents dipòsits de *loess*, s'acumulen formes més òxiques i menys magnètiques de ferro (Maher & Thompson, 1995). A Sierra Nevada succeeix exactament el contrari, amb un comportament antagònic pel fet d'ésser registres sedimentaris diversos, sota processos i ambients deposicionals molt diferents: els nivells edàfics són aquells que mesuren una susceptibilitat més baixa.

En els lòbuls de Sierra Nevada, l'alternança entre dipòsits solifluidals i horitzons orgànics es manifesta en les variacions d'intensitat de la senyal magnètica. Durant les fases solifluidals dominen els processos d'erosió, els quals comporten un major transport de partícules minerals i, conseqüentment, registren valors de susceptibilitat més elevats; en canvi, els horitzons orgànics, amb menys proporció mineral i un tamany de gra més fi, mostren uns valors de susceptibilitat menors. Les mesures s'han pres sobre superfície llisa en mostra seca i tamisada amb un *Bartington MS2E- High Resolution Surface scanning Sensor*. S'ha repetit cada mesura tres vegades per assegurar la màxima precisió en els resultats obtinguts.

- **Fluorescència de raigs X (XRF)**

La diferent resposta dels elements químics a les condicions ambientals imperants explica l'extensió del seu ús amb finalitats paleoecològiques. Les limitacions pressupostàries han restringit la seva aplicació a aquell lòbul analitzat a més resolució (SJB.3). La preparació de les mostres es va dur a terme en el laboratori de l'*Institute of Geological Sciences* (UBe) sota la tutela del químic Sr. Basri Qerimi i el seu processament va realitzar-se a la Universitat de Fribourg (Suïssa) amb un espectrofotòmetre Philips PW-2400.

3.1.3 Datacions radiomètriques ^{14}C (AMS)

Conseqüència de la pròpia essència i dinàmica dels moviments solifluidals, les datacions en lòbuls són un problema encara no resolt i la precisió cronològica d'aquests registres cal concebre-la, doncs, com un rang temporal estimatiu de la dinàmica de vessants. Matthews et al. (1993) considera que errors de ± 200 anys ^{14}C són inherents a les datacions en lòbuls de solifluxió per la pròpia dinàmica de flux, errors de ± 500 anys ^{14}C són probables i, fins i tot, es poden esperar errors de ± 1.000 anys ^{14}C .

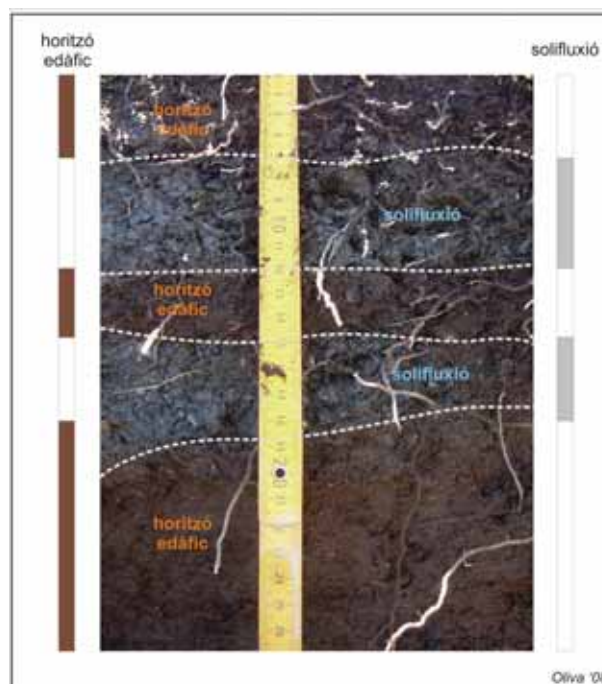


Figura 3.5. Seqüència de fases edàfiques/solifluidals.

L'alternança de sòls enterrats i dipòsits solifluidals en els lòbuls de Sierra Nevada permet estimar l'*onset/offset* de la solifluxió en els vessants del massís. Les datacions de sòls fossilitzats tenen l'avantatge de saber que s'està datant una formació *in situ*, tot i la possible remoció que la pròpia dinàmica de vessants i la crioturbaçió poden suposar en l'horitzó en qüestió. La datació de la part inferior d'un paleosòl indueix a considerar l'inici del desenvolupament edàfic i, per tant, la inactivitat solifluidal, mentre que la datació del marge superior permet inferir un canvi en les condicions existents, amb la degradació de les condicions favorables a l'edafogènesi i el posterior inici d'una etapa d'efectivitat solifluidal (figura 3.5).

La datació d'un paleosòl desenvolupat en l'estructura interna d'un lòbul de solifluxió pot veure's distorsionada per processos d'erosió; una fase solifluidal pot decapitar la part més superficial del sòl, comportant així errors i buits cronològics en la interpretació de la seqüència contínua dels esdeveniments ambientals. A més, la pròpia morfologia física dels lòbuls fa que les arrels modernes i altres fraccions orgàniques penetrin en profunditat (tant en el front com lateralment) i puguin falsejar l'edat original de les mostres datades, abocant edats massa modernes. A fi i efecte de reduir aquesta possible contaminació, s'ha procedit a realitzar la concentració pol·línica dels horitzons orgànics considerats clau dels

perfils de referència, eliminant així fraccions orgàniques i arrels que poguessin ser font d'errors i desvirtuessin la cronologia resultant. La concentració del pol·len fòssil s'ha realitzat sota la coordinació del reconegut palinòleg Dr. Francesc Burjachs, de la Universitat Rovira i Virgili, en el laboratori del Departament de Prehistòria del mateix centre.

L'agrupament pol·línic parteix de 20-30 g de material fi de cada mostra ($\varnothing \leq 2$ mm) en un vas de precipitats. S'afegeix una dissolució al 50% d'àcid clorhídric (HCl) de concentració comercial²⁰ per tal de remoure els possibles carbonats que, tot i que no apareixen en el substrat litològic de l'àrea d'estudi, arriben en ínfima part per transport eòlic²¹. Un cop ha finalitzat la reacció es traspassa la mostra en tubs d'assaig previ tamisatge a 250 μ m. Es centrifuguen els tubs durant 3 minuts a 2.500 rpm i es decanta el sobrenedant, repetint el procediment 2 o 3 vegades fins que aquest sigui transparent. S'afegeix llavors hidròxid de sodi (NaOH) diluït al 10%, homogeneïtzant la mostra i deixant-la al "bany maria" a 60°C durant 10 minuts.

Posteriorment, es repeteix el cicle de rentats fins que el sobrenedant sigui transparent²². S'elimina tota l'aigua possible i s'addiciona licor de Thoulet²³, s'homogeneïtza la mostra i es centrifuga. Es cola el sobrenedant amb filtres de vidre i una unitat d'aspiració i, posteriorment, aquests filtres xopats de mostra s'introdueixen en tubs de plàstic resistents a l'atac d'àcid fluorhídric (HF) concentrat al 70%, que elimina les restes minerals existents. Es deixa reposar una hora removent la mostra.

Passat aquest interval de temps s'afegeix HCl al 50%, es centrifuga, decanta i neteja fins que el sobrenedant resti transparent. Es disposen els tubs amb el residu boca avall, els assequem curosament i recollim el residu amb una pipeta. S'addicionen unes gotes de HCl al 50% per evitar que creixin microorganismes i preservar així la mostra. Aquesta ha estat processada per *Accelerator Mass Spectrometry* (AMS) a l'Angström Laboratory (UU) i els resultats han estat calibrats amb el programa CALIB 5.0.2 (Reimer et al., 2004).

²⁰ Normalment, HCl al 35%.

²¹ La fluorescència de raigs X en el lòbul SJB.3 quantifica el contingut de CaCO₃ entre 0,1-0,8%.

²² En cas de no aconseguir-ho al tercer rentat, s'hi vessen dues gotes de HCl al 50%.

²³ Es pot afegir qualsevol altre licor de densitat compresa entre 2-2,1 g/cm³, és a dir, valors propicis per a que el pol·len suri. Cal controlar la densitat d'aquest licor ja que periòdicament s'ha de reajustar, escalfant-lo i evaporant l'aigua. A més, també és convenient recuperar el licor de Thoulet amb una unitat d'aspiració, ja que es tracta d'una solució força costosa; un litre d'aquest licor s'aconsegueix diluint 698 g de iodur de potassi (KI) i 770 g de iodur de cadmi (CdI₂) en 612 cm³ d'aigua destil·lada.

Taula 3.2. Quadre esquemàtic de les finalitats, mètodes, informació, instrumental i centre on s'ha realitzat la recerca relativa als lòbuls de solifluxió de Sierra Nevada.

TÈCNiques UTILITZADES PER A L'ESTUDI DELS LòBULS DE SOLIFLUXIÓ DE SIERRA NEVADA					
	Finalitat	Mètode	Informació	Instrumental	Centre
TREBALL DE CAMP	Monitoratge tèrmic	Instal·lació dels <i>dataloggers</i> en un lòbul i presa de dades anual	Evolució tèrmica del sòl a intervals de 2 h a profunditats de 2, 5, 20, 50 i 100 cm.	<i>UTL-1 Datalogger</i>	Treball de camp, Servei del Paisatge (UB)
	Monitoratge dinàmic	Fixació d'estaques i seguiment anual	Medició del desplaçament horitzontal. <i>Uplift</i> de les estaques (gel-desgel).	Estaques de 50 cm de longitud i 3 cm d'amplada	Treball de camp, Servei del Paisatge (UB)
	Cartografia i morfometria	Caracterització de les tipologies de lòbuls i cartografia dels mateixos	Emplaçament, origen, gènesi, morfologia i causes del dinamisme actual dels lòbuls.	Eines bàsiques de treball de camp	Treball de camp, Lab. de Geografia Física (UB)
	Anàlisi edafològic-sedimentològic	Normativa FAO (2006)	Successió litostratigràfica. Determinació dels horitzons clau.	Eines bàsiques de treball de camp, taula Munsell	Treball de camp, Lab. de Geografia Física (UB)
TREBALL DE LABORATORI	Concreció de la textura	Sistema automatitzat per llims i argiles, tamisos per sorres i graves	Tamany del material mobilitzat. Dinàmica de vessants.	<i>Micromeritics SediGraph 5100</i> i tamisos	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Contingut de matèria orgànica	Ràtio C/N	Contingut de matèria orgànica. Grau de desenvolupament edàfic.	Analitzador Elemental vario <i>MACRO</i>	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Fraccions del ferro (Fe _d i Fe _o)	Successió d'extraccions seguint els procediments estàndard	Intensitat del desenvolupament edàfic. Grau de meteorització.	Instrumental bàsic de laboratori i espectrofotòmetre <i>HACH D/R 2000</i>	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Susceptibilitat magnètica	Escaneig mostres	Fracció mineral en els sediments. Input detrític i erosió.	<i>Bartington MS2E- High Resolution Surface scanning Sensor</i>	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Fluorescència de raigs X (XRF)	Concentració dels diferents elements	Comportament diferenciat dels elements. Erosió/mobilització de material a la conca.	Espectrofotòmetre (<i>Philips PW 2400</i>)	<i>Institute of Geological Sciences</i> (UBe i UFr)
DATACIONS	Datacions (AMS)	Concentració pol·línica dels horitzons orgànics	Concentrar pol·len fòssil per evitar contaminació de les arrels modernes.	Instrumental bàsic de laboratori	Lab. del Departament de Prehistòria (URV)
		Datacions de la concentració de pol·len	Concretar la geocronologia amb l'ambient deposicional.	AMS (<i>Accelerator Mass Spectrometry</i>)	<i>Angström Laboratory</i> (UU)

UB - Universitat de Barcelona; UBe - Universitat de Berna (Suïssa); URV - Universitat Rovira i Virgili (Tarragona); UU - Universitat d'Uppsala (Suècia); ; UFr - Universitat de Fribourg (Suïssa).

3.2 Metodologia emprada per a la caracterització dels sediments lacustres

L'estudi dels sediments lacustres extrets dels llacs d'alta muntanya de Sierra Nevada ha consistit en les campanyes de camp i la presa de mostres, l'anàlisi de laboratori i el posterior treball de gabinet. La prèvia selecció dels llacs sondejats va precedir les campanyes de camp, durant les quals es van extreure els testimonis sedimentaris. Obtinguts els *cores*, es va procedir a un minuciós estudi sedimentològic de laboratori per tal d'analitzar a alta resolució aquests sediments.

Aquesta tasca es va realitzar a cavall de diferents centres d'investigació, entre els quals cal destacar el *Geographisches Institut* de la Universitat de Berna (Suïssa), el *Limnogeology Laboratory* de l'ETH de Zürich (Suïssa), l'institut *MARUM* de la Universitat de Bremen (Alemanya), el laboratori del Departament de Prehistòria de la Universitat Rovira i Virgili (Tarragona) i el laboratori de Geografia Física de la Universitat de Barcelona. Les datacions radiomètriques, processades per l'*Angström Laboratory* (Universitat d'Uppsala, Suècia), han especificat l'evolució geocronològica dels esdeveniments ambientals ocorreguts al massís al llarg dels darrers mil·lennis.

3.2.1 Treball de camp

La consideració de Sierra Nevada com a Parc Nacional ha requerit de la corresponent autorització de pas per part de la direcció del Parc durant la presa de mostres i les campanyes de sondeig, motiu pel qual s'ha restringit la investigació als sectors més accessibles, evitant la utilització de tecnologia i instrumentals que poguessin malmetre el medi biofísic del massís. Els cossos lacustres sondejats han estat la Laguna de Aguas Verdes (AV), Laguna de Rio Seco (RS), Lagunilla de Rio Seco (LRS) i Lagunilla de San Juan (LSJ).

Durant les campanyes estivals de 2006 i 2007, a fi i efecte de reduir al mínim l'impacte ambiental a les llacunes, la presa de mostres es va realitzar de manera manual, sense plataformes de sondatge pesades que poguessin implicar la remoció dels sediments del fons del llac, augmentar la terbolesa i afectar l'estratificació vertical natural de la columna d'aigua. Com a plataforma per a l'obtenció dels sediments es va utilitzar un bot pneumàtic clàssic convenientment estabilitzat (figura 3.6).



Figura 3.6. Sondeig a la llacuna d'Aguas Verdes.

Els sediments es recollien amb tubs de PVC de 4 i 5 m de longitud i 4 cm de diàmetre, que es clavaven laboriosament al fons del llac i requerien d'una feixuga recuperació manual dels mateixos. Els *cores* extrets, degudament tapats, obturats amb esponja i precintats, foren seguidament transportats al *Geographisches Institut* de la UBe, on van romandre preservats a la nevera a 4-5°C fins que van ésser tallats i analitzats.

El treball de camp va contemplar també el càlcul de la batimetria de les llacunes sondejades. A partir de l'ortofotografia de cada llac²⁴ i donada la poca profunditat de les llacunes, es van determinar diferents transsectes al llarg dels quals s'anaven prenent diferents mesures de la fondària amb els mateixos tubs de PVC prèviament escalats. Els mapes de batimetria resultants provenen de la interpolació lineal de la malla de punts de profunditat coneguda.

3.2.2 Treball de laboratori

Gran part de l'analítica es va realitzar als potents laboratoris del *Geographisches Institut* de la UBe. Els *cores* es van obrir amb un extrusor manual (Fein Multimaster Start MSX 636 II), de ràpida execució i nítid lliscament. Un cop oberts en dues parts, es van prendre fotografies d'alta resolució a intervals de 10 cm amb una càmera NIKON D80. Els sediments lacustres, degudament retolats, es van deixar reposar i preservar a la nevera. Una de les parts es va destinar a l'analítica i l'altre es reserva de testimoniatge.

²⁴ Ídem referència de peu de pàgina 14 a la pàg. 76.

- **Descripció sedimentològica**

La caracterització sedimentològica i granulomètrica de cada *core* es va realitzar a precisió mil·limètrica atenent a la llegenda presentada en l'apartat 6.2. La descripció sedimentològica va comptar amb l'ineestimable col·laboració del Dr. Roland Zech (UBe) i del Dr. Lucien von Gunten (UBe), experts en temàtica limnogeològica, que van ajudar a resoldre els dubtes i qüestions suscitées.

Resolta la seqüenciació estratigràfica, es van prendre les mostres visibles de carbó vegetal i fragments vegetals susceptibles d'ésser datades per AMS. Concretades les diferents unitats sedimentàries i determinats els canvis de color a partir d'una taula Munsell, es va procedir al *subsampling* dels *cores* sobre mostra humida a intervals d'1 cm en cada un d'ells, resolució que permetrà comparar els canvis ambientals derivats de la interpretació dels sediments lacustres i la cronologia de la solifluxió a la Sierra.

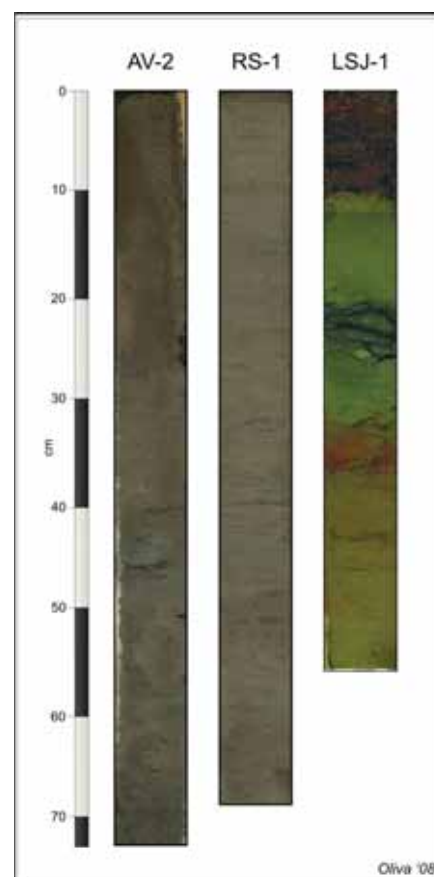


Figura 3.7. Cores AV-2, RS-1 i LSJ-1.

- **Contingut d'aigua de les mostres**

Les mostres extretes dels *cores* es van assecar durant 12 hores a 60°C en una estufa d'alta capacitat (Ehret TK/L 4250). De la diferència de pesades entre la mostra seca i humida en resulta el percentatge d'aigua que contenen les mostres, el qual s'insinua com una mesura indirecta de la granulometria. Aquelles mostres més pròximes a l'interfície aigua-sediment presenten continguts d'aigua més elevats, decreixent en profunditat degut a la inherent compactació dels sediments. El contingut de matèria orgànica condiciona el contingut d'aigua, tot i que no necessàriament influeix la granulometria (Hakanson & Jansson, 2002).

- **Susceptibilitat magnètica**

La susceptibilitat magnètica (MS) és un dels paràmetres més extensament emprats en paleolimnologia, ja que l'obtenció de dades resulta ràpida, econòmica, eficaç i és una

anàlisi no destructiu amb la mostra. La seva utilitat és especialment remarcable per a la intercomparació de diferents *cores* d'un mateix llac, ja que permet establir correlacions entre les diferents unitats litostratigràfiques (Nowaczyk, 2001). Les mesures de MS es van realitzar al laboratori del *Geographisches Institut* de la UBe amb un *Bartington MS2E-High Resolution Surface scanning*. La superfície llisa dels *cores* va ser escanejada a 0,5 cm d'interval, repetint el procediment dues vegades per tal d'afinar la precisió dels resultats. Les dades de susceptibilitat del *core* d'Agua Verdes AV-1 van ser determinades als Serveis Científico-Tècnics de la UB amb un sensor *Kappabridge KLY-2*.

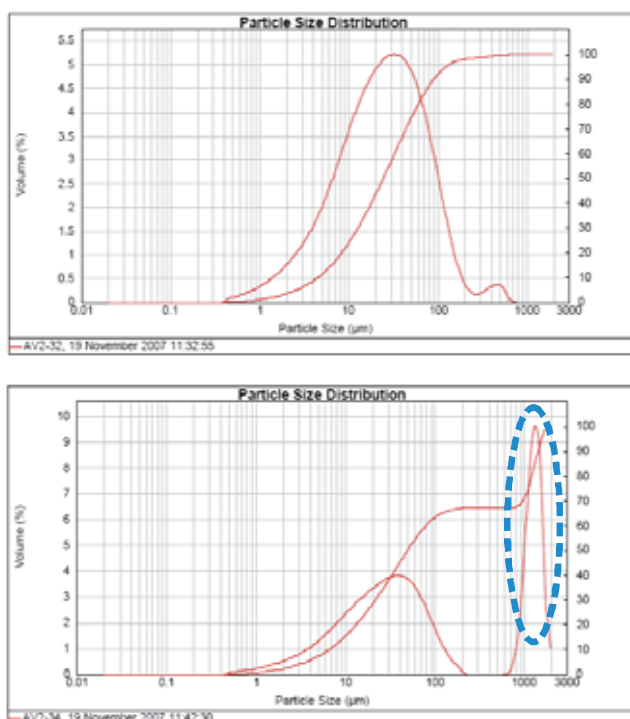
• Textura dels sediments

La granulometria es va determinar a partir de la difracció de raigs X en el *Limnogeology Laboratory* del ETH de Zürich, amb l'analitzador de partícules *Malvern laser Grain size*. La determinació de la granulometria juga un paper decisiu en sedimentologia lacustre i la interpretació geomorfològica de l'evolució paleoambiental de la conca de drenatge. El tamany de gra mobilitzat i dipositat en el fons del llac, de manera natural i sense interferència antròpica, és una funció directe de les condicions climàtiques de cada moment; canvis en la granulometria poden implicar variacions en la font dels sediments, mecanismes de transport i ambients deposicionals (O'Sullivan, 2004).



Figura 3.8. *Malvern laser grain size*.

Les més de 400 mostres analitzades dels *cores* AV-1, AV-2, RS-1, LRS-1 i LSJ-1 van requerir d'una preparació prèvia per tal d'eliminar la component orgànica i dissociar els microagregats que distorsionen la granulometria de la part mineral de la mostra. La màquina requereix de quantitats molt petites; en el nostre cas, s'ha partit de 2 g de mostra tamisada a 630 μm (sorres mitjanes), límit inferior de mesura de la màquina en qüestió.



Les mostres es van atacar amb uns 5 ml de H_2O_2 i es deixaren reposar fins que tota la part orgànica va reaccionar (entre 2-5 dies). Diàriament, es disposaren una hora al “bany maria” a $60^\circ C$ per accelerar la reacció. Un cop eliminada la component orgànica, es va centrifugar la mostra en tubs petits i decantar el sobrenedant. Posteriorment se li afegí 1 ml de dispersant²⁵ i 2-3 ml d’aigua.

Figura 3.9. Distribució d’una mostra sense error (superior) i una mostra errònia (inferior).

Quan tenim la mostra preparada i homogeneïtzada, amb una pipeta s’afegeixen 2 gotes a la màquina tenint en compte que aquesta presenti els valors de sacseig i rang d’obscuritat interns òptims per a la mesura. El *Malvern laser grain size* realitza fins a 3 mesures de cada mostra per tal d’afinar els resultats; cal copsar la distribució granulomètrica resultant detingudament, ja que un ~10% de mostres s’han hagut de repetir per problemes en la mesura, com l’explicitat en la figura 3.9, on la màquina va mesurar una bombolla d’aire enlloc de la mostra preceptiva, originant aquesta distribució bimodal incongruent.

La pròpia morfologia de les partícules analitzades tendeix a inferir errors en la mesura, essent menors en aquelles que tendeixen a l’esfericitat i en aquelles de distribució unimodal (Blott & Pye, 2006). Cal comptar, doncs, que les partícules dipositades en les capçaleres de llacs d’alta muntanya, de morfologia més angular per la manca de rodatge, induiran errors menys negligibles (Last, 2001).

²⁵ Veure apartat 3.1, ídem referència de peu de pàgina 18 a la pàg. 78.

- **Geoquímica orgànica**

Una de les variables més àmpliament mesurades en paleolimnologia és el contingut de matèria orgànica, ja que proveeix informació de la variabilitat climàtica i dels efectes antròpics en els ecosistemes locals i regionals (Meyers & Ishiwatari, 1995). La component orgànica constitueix una fracció menor però important en els sediments lacustres, englobant una complexa mixtura de lípids, carbohidrats, proteïnes i altres restes orgàniques dels organismes que viuen al voltant i dins del llac (Meyers & Teranes, 2001).

La relació C/N és un paràmetre extensament difús en estudis paleoambientals de llacs i permet relacionar la productivitat terrestre de la conca de recepció amb la pròpia producció del llac. El C_{org} total i, en extensió, la ràtio C/N, estan intrínsecament relacionats amb la productivitat lacustre i les seves concentracions varien amb la distància a la riba, associades a la granulometria i a l'input clàstic (O'Sullivan, 2004). La major proporció de C_{org} i de C/N en les plantes terrestres que en les algues aquàtiques²⁶, en les que hi ha una proporció relativa de nitrogen superior (figura 3.10), estableix una ràtio sensible a les fluctuacions ambientals. Aquesta relació s'utilitzarà com un *proxy* que ens proporcionarà informació de la història ambiental de la conca i de les variacions holocenes de la seva cobertura vegetal.

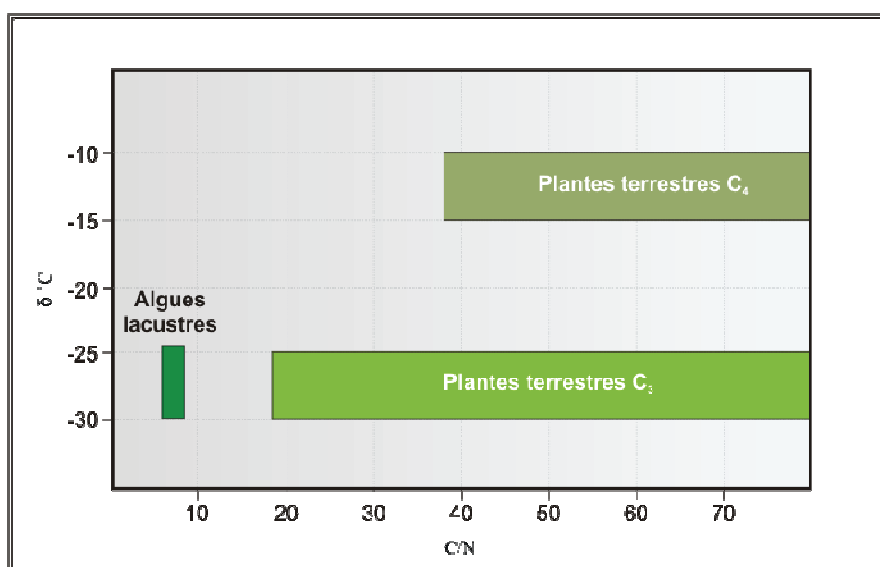


Figura 3.10. Relació C/N per diferents tipus de plantes (Meyers & Teranes, 2001).

²⁶ Sediments amb elevada presència d'algues tenen una ràtio de C/N que oscil·la entre 4-10 (Meyers & Teranes, 2001). En un estudi realitzat al llac Michigan, es va constatar que el 90% del C_{org} existent a les aigües d'aquest llac oligotròfic procedia de la producció de les algues, un 5% era transportat pels rius i un altre 5% pel vent i la precipitació (Andren & Strand, 1981).

Llacs de reduïdes dimensions, com és el cas de Sierra Nevada, tendeixen a englobar sediments més rics en C_{org} que no pas aquells molt profunds, ja que la matèria orgànica roman menys temps a la columna d'aigua abans de precipitar al fons i és menys susceptible de patir processos d'oxidació. A més, en el fons del llac, la bioturbació pot arribar a destruir fins a un 75% de la matèria orgànica, tot i que en llacs sota condicions anòxiques permanents o estacionals, la bioturbació s'afebleix o és pràcticament nul·la (Meyers & Ishiwatari, 1995).

La relació C/N s'ha determinat en el *Geographisches Institut* de la UBe a partir d'un analitzador *Elementar vario Macro* que crema la mostra seca i separa els gasos per cromatografia. El fet de que a la cresta cimera del sector occidental del massís no hi hagi material carbonatat possibilita que les mostres es puguin analitzar directament, sense pretractament anterior. La preparació de cada mostra segueix la mateixa metodologia emprada en el càlcul del C/N de les mostres relatives als lòbuls de solifluxió²⁷. A la vegada, pels *cores* AV-3 i RS-2, com a mesura estimativa del contingut de matèria orgànica, s'ha realitzat la determinació del *loss on ignition* (LOI) seguint la metodologia proposada per Heiri et al. (2000). Es va deixar una quantitat de 2 g de mostra a la mufla a 100°C durant la nit i, posteriorment, a 550°C durant 4 hores: la diferència de pesades suposa la pèrdua per ignició.

- **Fluorescència de raigs X (XRF)**

Aquests anàlisis van ser realitzats en el centre *MARUM* (Universitat de Bremen, Alemanya), on disposen d'un *XRF core scanner* capaç de mesurar el contingut de K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu i Sr. L'avantatge d'aquest sistema rau en el fet de que permet obtenir dades a alta resolució, de manera contínua, ràpida i eficient i, a més, suposa un sistema no destructiu amb la mostra, podent reaprofitar el *core* per a altres estudis posteriors (Jansen et al., 1998). Les explicacions acurades de la Dra. Ursula Röhl i de la tècnica responsable de l'aparell, Vera Lukies, van ser de gran ajuda en l'escaneig dels *cores*.

El sensor central és una font de molibdè de raigs X (3-50 kV) i un detector *PSI* refrigerat *Peltier Kevex* amb una finestra de beril·li i un analitzador multicanal de 20 eV de resolució espectral (Röhl & Abrams, 2000). Els *cores* s'emplacen en una plataforma mòbil

²⁷ Veure apartat 3.1, pàg. 79.

connectada a un processador que escaneja la superfície llisa del mateixos a un interval d'1 cm, referent a una àrea circumdant d'1 cm². A partir d'un corrent de raigs X de 0,15 mA, aplicat durant 15 segons sobre l'interval analitzat del *core*, s'obtenen les intensitats dels elements químics mencionats en *counts per second* (cps). Cal concebre aquestes dades com a estimacions semi-quantitatives de la concentració absoluta de cada un d'aquests elements: les variacions relatives dels mateixos seran utilitzades com a *proxies* paleoclimàtics. A més, l'elaboració de diferents índexs entre els elements mesurats també constitueixen paràmetres freqüentment utilitzats amb finalitats sedimentològiques (Crowdace et al., 2006).



Figura 3.11. XRF core scanner (MARUM).

- **Anàlisis pol·líniques**

Fruit d'una col·laboració amb el Dr. Willy Tinner, reconegut palinòleg del *Institute of Plant Sciences* (UBe) en temes de reconstrucció paleoambiental, s'està realitzant l'estudi dels diagrames pol·línics referents a les llacunes d'Agua Verdes i Rio Seco (AV-2 i RS-1). Els resultats no han arribat a temps per a la seva inclusió en la present tesi doctoral, tot i que contribuiran a interpretar la successió ambiental derivada dels *proxies* geoquímics i granulomètrics presentats en les pàgines següents.

3.2.3 Datacions radiomètriques ¹⁴C (AMS)

El marc geocronològic dels canvis ambientals esdevinguts els darrers mil·lennis s'ha establert mitjançant les datacions de ¹⁴C a partir d'AMS. La introducció d'aquesta tècnica va suposar una autèntica revolució en el camp de la paleolimnologia, ja que quantitats

d'entre 1-2 mg de C_{org} són suficients per aquest mètode de datació; tenint en compte les limitacions de material que sovint acompanyen les mostres lacustres, poder destinar mínimes proporcions per datar va multiplicar els estudis i va millorar significativament la precisió cronològica assolida per la paleolimnologia. Amb quantitats tan escasses de material, cal extremar les precaucions i afinar el màxim possible la idoneïtat de les mostres seleccionades, ja que petites contaminacions podrien induir errors notables. El protocol seguit per a la presa de les mostres datades estat formulat per Birks & Lotter (2000). Totes les mostres han estat processades per l'*Angström Laboratory* (UU) i els resultats han estat calibrats amb el programa CALIB 5.0.2 (Reimer et al., 2004).

Les característiques biofísiques de les llacunes de Sierra Nevada, amb una freqüent extensió de pastures higròfiles al seu voltant, propicien l'existència de nombroses restes vegetals terrestres al llarg de l'estructura sedimentària dels testimonis extrets. En els casos en què s'ha trobat suficient quantitat de material datable en el nucli axial del *core*, s'han enviat directament aquests fragments, normalment del gènere *Sphagnum*. En el cas de la llacuna de San Juan, la presència de *charcoal* a 19 cm va invitar a datar aquest material. Per a les mostres del *core* AV-1, on no es van trobar restes vegetals susceptibles d'ésser datades, es va procedir a processar la concentració pol·línica, prèviament realitzada en el Laboratori del Departament de Prehistòria (URV)²⁸. La gradual i paulatina sedimentació en ambients lacustres on la columna d'aigua és permanent suggereix l'idoneïtat de l'agrupament de pol·len per a la seva datació.



Figura 3.12. Vista de la llacuna d'Aguas Verdes des del coll de la Carigiuela.

²⁸ Veure explicació del mètode a l'apartat 3.1.3, pàg. 84.

Taula 3.3. Quadre esquemàtic de les finalitats, mètodes, informació, instrumental i centre on s'ha realitzat la recerca relativa a les llacunes de Sierra Nevada.

TÈCNiques UTILITZADES PER A L'ESTUDI DELS LòBULS DE SOLIFLUXIÓ DE SIERRA NEVADA					
	Finalitat	Mètode	Informació	Instrumental	Centre
TREBALL DE LABORATORI	Descripció sedimentològica	Estàndard	Composició sediments, estructura, canvis litostratigràfics.	Instrumental bàsic de laboratori, taula Munsell	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Contingut d'aigua de les mostres	Diferència de pesades (mostra humida/seca)	Contingut aigua. Idea indirecte de la granulometria.	Instrumental bàsic de laboratori	Laboratori de Geografia Física (UB) i <i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Susceptibilitat magnètica	Escaneig <i>cores</i>	Fracció mineral en els sediments. Input detrític i erosió a la conca.	<i>Bartington MS2E- High Resolution Surface scanning Sensor;</i> <i>Kappabridge KLY-2</i>	<i>Geographisches Institut</i> (UBe), Serveis Científico-Tècnics (UB)
	Textura dels sediments	Difracció de raigs làser	Quantificació de la granulometria. Paleoambient deposicional. Input eòlic.	<i>Malvern laser Grain sizer</i>	<i>Limnogeology Laboratory</i> (ETH)
	Geoquímica orgànica	Ràtio C/N	Contingut de matèria orgànica. Inputs terrestres/aquàtics. Productivitat lacustre.	Analitzador Elemental vario <i>MACRO</i>	<i>Geographisches Institut</i> (UBe)
		Determinació del LOI (550°C, 4 hores)	Contingut de matèria orgànica.	<i>Naberthern 30-3000°C, Controller B170</i>	Laboratori de Geografia Física (UB) i <i>Geographisches Institut</i> (UBe)
	Fluorescència de raigs X (XRF)	Quantificació de la concentració dels elements: K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu i Sr	Comportament diferenciat dels elements. Input eòlic i erosió a la conca.	<i>XRF scanning core</i>	<i>MARUM Center</i> (UBr)
Anàlisis pol·líniques	Espectres pol·línics	Evolució de la vegetació local/regional.	Instrumental bàsic de laboratori	<i>Institute of Plant Sciences</i> (UBe)	
DATACIONS	Datacions (AMS)	Concentració pol·línica	Concentrar pol·len fòssil per evitar contaminació de les arrels modernes.	Instrumental bàsic de laboratori	Laboratori del Departament de Prehistòria (URV)
		Datacions de restes vegetals, <i>charcoal</i> i concentració de pol·len	Concretar la geocronologia amb l'ambient deposicional.	AMS (<i>Accelerator Mass Spectrometry</i>)	<i>Angström Laboratory</i> (UU)

ETH - *Eidgenössische Technische Hochschule* de la Universitat de Zúrich (Suïssa); MARUM-UBr - *Marine Umweltwissenschaften*, Universitat de Bremen (Alemanya); UB - Universitat de Barcelona; UBe - Universitat de Berna (Suïssa); URV - Universitat Rovira i Virgili (Tarragona); UU - Universitat d'Uppsala (Suècia).

