

TENDENCIA A LA ARIDEZ EN SIERRA NEVADA DESDE EL HOLOCENO MEDIO INFERIDA A PARTIR DE SEDIMENTOS LACUSTRES

Marc Oliva, Antonio Gómez Ortiz y Lothar Schulte

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona

RESUMEN

Sierra Nevada es un alto macizo semiárido del sur peninsular que concentra los cuerpos lacustres más elevados del continente europeo. Los registros sedimentarios extraídos de lagos ubicados en las cabeceras meridionales de los valles occidentales evidencian un recubrimiento vegetal muy disperso y decreciente durante los últimos 4,2 ka BP, derivado de un aumento de la aridez desde el Holoceno Medio en el contexto regional. Durante estos milenios se detectan hasta ocho periodos de inestabilidad de laderas con incrementos de aporte mineral a los lagos.

Palabras clave: aridez, Holoceno Medio, inestabilidad de laderas, sedimentos lacustres, Sierra Nevada, variabilidad climática.

ABSTRACT

The massif of Sierra Nevada in southern Iberian Peninsula contains the highest lakes in Europe. Several cores extracted from southern lakes located in the headwaters of the western highest valleys show evidence of a very low vegetation cover decreasing during the last 4.2 ky BP, driven by an arid climate trend in this high semiarid massif since the Mid Holocene. During this period, we have detected eight phases of increased slope instability with more mineral input onto the lakes.

Key words: aridity, climate variability, lake sediments, Mid Holocene, Sierra Nevada, slope activity.

Fecha de recepción: junio 2009.

Fecha de aceptación: febrero 2010.

I. INTRODUCCIÓN

Ante el actual contexto de incertidumbre climática futura, el sur peninsular se concibe como una zona especialmente sensible a posibles cambios en la dinámica de la Circulación General Atmosférica imperante en el Atlántico Norte. En relación con el cambio global, los diferentes informes y modelos climáticos presentan el conjunto del Mediterráneo y, en concreto el sureste ibérico, como una zona de especial vulnerabilidad, donde la reducción de la precipitación a finales de siglo XXI puede alcanzar un 20-30% respecto de los valores actuales y la temperatura media anual aumentar en un rango de 2 a 6°C (IPCC, 2007; El cambio climático en España. Estado de situación, 2007).

La necesidad de obtener más información acerca de la dinámica climática natural en el extremo meridional peninsular nos remite a archivos sedimentarios que nos puedan proporcionar información de la variabilidad climática holocena a alta resolución. En este sentido, la potencialidad de los sedimentos lacustres en medios continentales a escala holocena es sólo comparable a la que ofrecen los glaciares polares y los casquetes de hielo de montaña. Los lagos son archivos naturales que contienen información de la evolución paleoecológica de su cuenca de drenaje considerando las influencias que aportan el clima, la geología, el impacto antrópico, etc. (O'Sullivan, 2004).

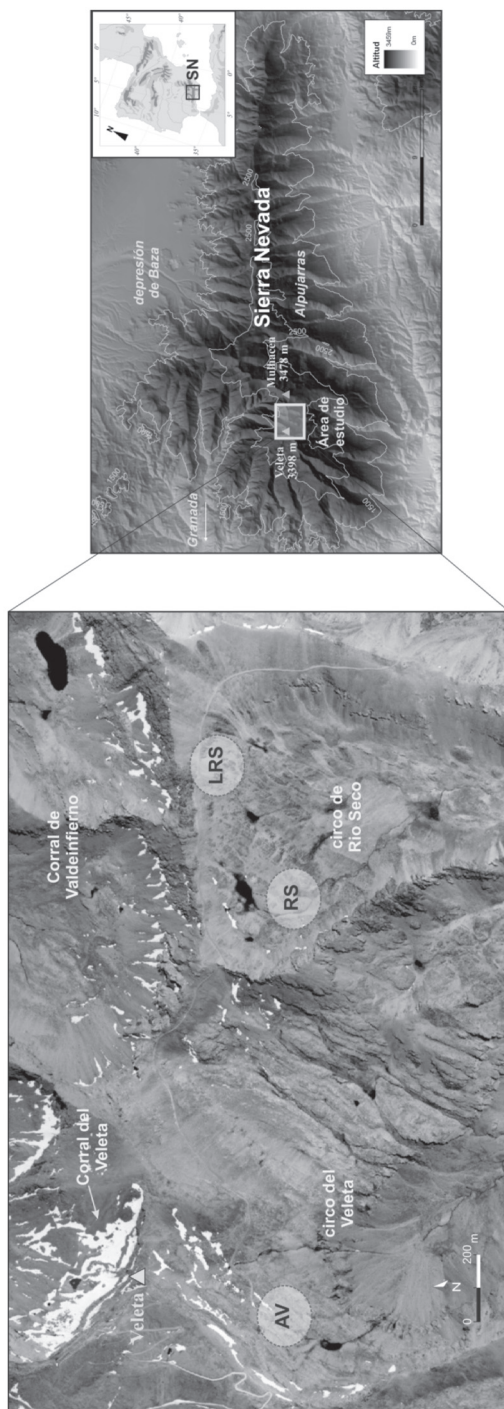
Las últimas décadas se ha constatado un auge notable de los estudios relativos a los sedimentos lacustres con finalidades paleoclimáticas, especialmente centrados en un marco temporal circunscrito al Holoceno. A partir del estudio de los *cores* extraídos en tres lagos de la vertiente sur de la Sierra, el presente artículo presenta datos de la evolución paleoecológica de las culminaciones del macizo a lo largo de los últimos 6 milenios y, en consecuencia, de la variabilidad climática que ha inducido estos cambios ambientales holocenos en Sierra Nevada.

II. ÁREA DE ESTUDIO

Sierra Nevada es el macizo más elevado de las Cordilleras Béticas con las alturas más prominentes de la Península Ibérica (figura 1). Constituye el apéndice suroccidental de la orla alpina que circunda el Mediterráneo y, junto al Atlas, conforman los relieves que cierran el flanco occidental de este mar situado a caballo de las zonas templada y subtropical. El área de estudio se focaliza en los altos valles del oeste de Sierra Nevada, donde el macizo concentra las mayores alturas y presenta una morfología glacial más evidente. La desnudez de las laderas de la Sierra, manifiesta en sus sectores culminantes, contrasta con el gran número de endemismos que se acomodan en ellas (Molero Mesa & Pérez Raya, 1987). Por encima de los 2.500 m, el recubrimiento vegetal queda confinado a sectores intensamente antropizados de fondo de valle, cabeceras de barrancos e inmediaciones de lagunas (*borreguiles*).

La escasa cobertura vegetal facilita la meteorización del substrato, ya debilitado por la intensa acción de las glaciaciones cuaternarias e incentiva la acción periglacial por encima de los 2.500 m, cinturón altitudinal donde se localizan las lagunas sondeadas. El margen occidental del macizo se ubica en el complejo litológico del Nevado-Filabres, el cuál se caracteriza por la ausencia de material carbonatado y el dominio de los micaesquistos. La única estación en altura que ofrece una serie climática relativamente continua es la del Albergue

Figura 1
LOCALIZACIÓN DE LAS LAGUNAS SELECCIONADAS EN SIERRA NEVADA



Universitario (2.507 m), que resuelve una temperatura media anual de 4,4°C y una precipitación de 702 mm, con el 80% del total concentrado entre octubre y abril mayoritariamente en forma de nieve.

La figura 1 localiza geográficamente las tres lagunas sondeadas que se presentan en este estudio: Aguas Verdes (AV), Río Seco (RS) y Lagunilla de Río Seco (LRS). Los tres cuerpos lacustres ocupan cubetas de sobreexcavación glacial labradas en los circos meridionales del circo del Veleta (AV) y de Río Seco (RS y LRS). El cuadro 1 resume las características topográficas de estas lagunas.

Cuadro 1
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LAS LAGUNAS SONDEADAS EN SIERRA NEVADA

Lago	Orientación	H _{máx} (m)	H _{mín} (m)	Pendiente (%)	Superficie cuenca (ha)	Vegetación cuenca (%)	Prof. máx. (m)
Aguas Verdes	S	3.398	3.055	29,6	26,9	2,7	2,2
Río Seco	S	3.125	3.023	24,1	12,2	3,6	2,5
Lagunilla Río Seco	SSE	3.116	2.991	32,8	9,9	2,5	1,2

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La extracción de los *cores* se realizó durante las campañas de campo estivales de 2006 y 2007, procediendo de manera manual a la recuperación de los testigos sedimentarios a partir de la inserción de tubos de PVC en el fondo del lago desde un bote neumático. Atendiendo a la consideración de Parque Nacional de los sectores cimeros de Sierra Nevada, no se usaron equipos ni instrumentales pesantes que pudiesen perjudicar la dinámica ecológica natural del lago, afectar su estratificación vertical o implicar la remoción de sus sedimentos. Se extrajeron 6 *cores* en total: 3 en AV, 2 en RS y 1 en LRS. En este trabajo se discutirán los datos relativos a los testigos AV-2, RS-1 y LRS-1, que son los más resolutivos de ellos y de donde se disponen de referencias cronológicas de control. El análisis de los *cores* se realizó a precisión centimétrica en los laboratorios del *Geographisches Institut* de la Universidad de Berna (Suiza), donde se preservaron en una nevera a una temperatura estable de 5°C hasta que se procedió al *subsampling* de los mismos a intervalos de 1 cm. Todos los análisis se realizaron sobre muestra seca y tamizada ≤ 2 mm.

La susceptibilidad magnética (SM) supone una medida muy útil para la intercomparación de *cores* de un mismo lago y la determinación de la fracción mineral de las diferentes unidades sedimentarias (Nowaczyk, 2001). La señal magnética se midió desplazando un *Bartington MS2E- High Resolution Surface scanning Sensor* cada 0,5 cm sobre la superficie del *core*, repitiendo el procedimiento dos veces para afinar los resultados. La materia orgánica se cuantificó con un Analizador Elemental Macro para concretar el contenido de carbono orgánico (C_{org}) y la relación carbono-nitrógeno (C/N), que permite deducir el origen terrestre/acuático de la fracción orgánica sedimentada (Meyers & Teranes, 2001). La granulometría de las muestras fue determinada individualmente por difracción de rayos X en el laboratorio de

Limnogeología del *Eidgenössische Technische Hochschule* de Zúrich (Suiza), aunque requirió de un pretratamiento intensivo con H_2O_2 para eliminar la componente orgánica, ya que ésta facilita la formación de microagregados y desvirtúa su textura mineral original.

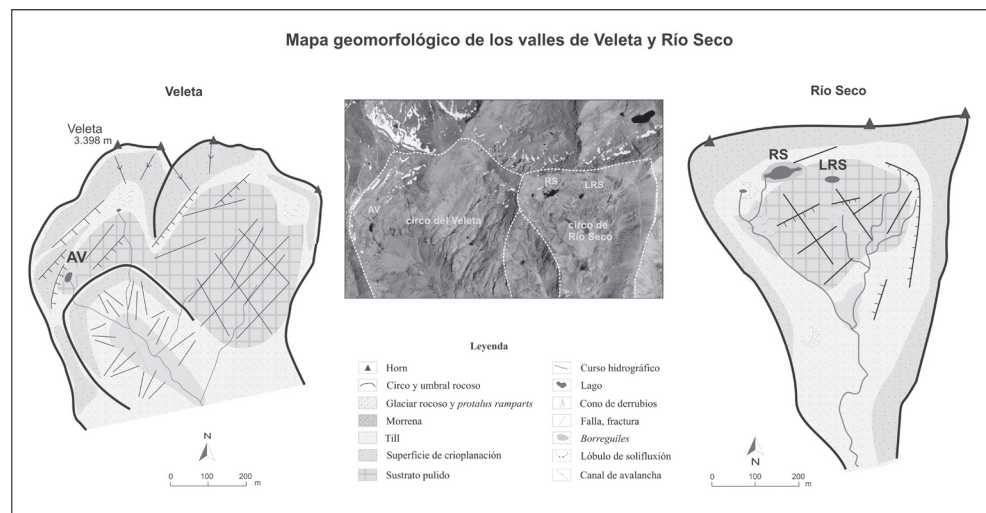
La estimación semicuantitativa del contenido de los elementos químicos presentes en los sedimentos (K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu y Sr) en *counts per second* (cps) a partir de un *XRF core scanner* se utilizará como un *proxy* con finalidades paleoclimáticas, ya que algunos de ellos reaccionan en función de las condiciones ambientales imperantes (Ca, Ti y Fe). Estos análisis se han llevado a cabo en el centro *MARUM* de la Universidad de Bremen (Alemania). El marco cronológico se precisó gracias a las dataciones por AMS realizadas en el *Angström Laboratory* de la Universidad de Uppsala (Suecia) de restos vegetales presentes en los *cores* y de polen fósil, que fue concentrado en el laboratorio del Departament de Prehistòria de la Universidad Rovira i Virgili (Tarragona). Las edades presentadas corresponden a la edad calibrada y fueron obtenidas con el programa CALIB 5.0.2 (Reimer *et al.*, 2004).

IV. RESULTADOS

Se discuten los resultados relativos a cada laguna por separado, presentando los *cores* extraídos y los diferentes *proxies* utilizados para la caracterización paleoecológica de la dinámica de cumbres en Sierra Nevada durante los últimos milenios. La figura 2 localiza geomorfológicamente las tres lagunas estudiadas en sus respectivas cuencas de drenaje.

Figura 2

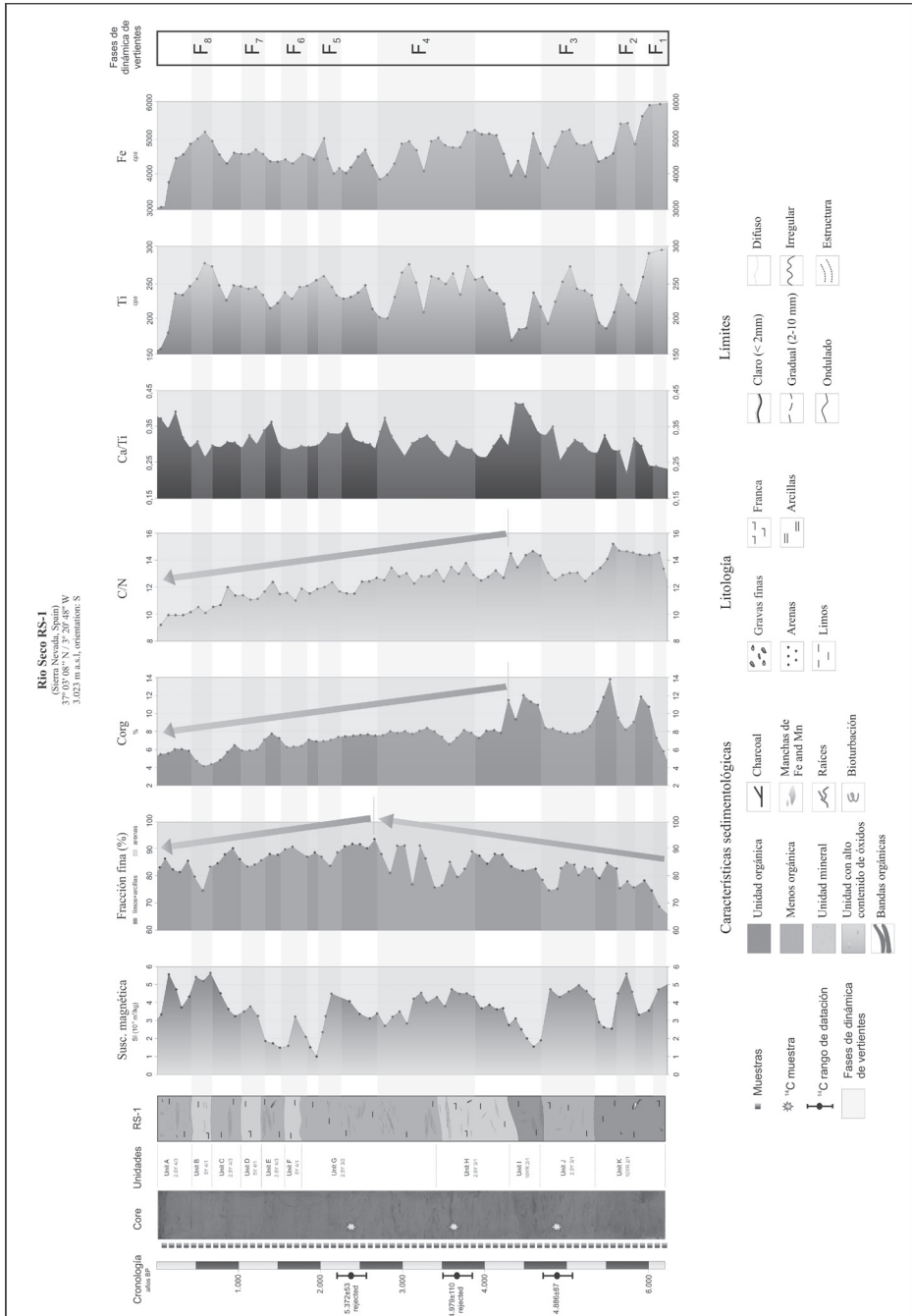
MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LOS VALLES DE VELETA Y RÍO SECO Y LOCALIZACIÓN DE LAS LAGUNAS SONDEADAS



1. Laguna de Río Seco

La Laguna de Río Seco se abre en una amplia cubeta modelada por el discurrir del glaciar en dirección NE-SW, con sólo el 3,6% de su cuenca vegetalizada. De dimensiones decamé-

Figura 3 PROPIEDADES GEOQUÍMICAS Y GRANULOMÉTRICAS DEL REGISTRO SEDIMENTARIO RS-1 DE LA LAGUNA DE RÍO SECO



tricas y profundidad máxima de 2,8 m, su morfología dibuja una amplia parte central y unos márgenes estrechos.

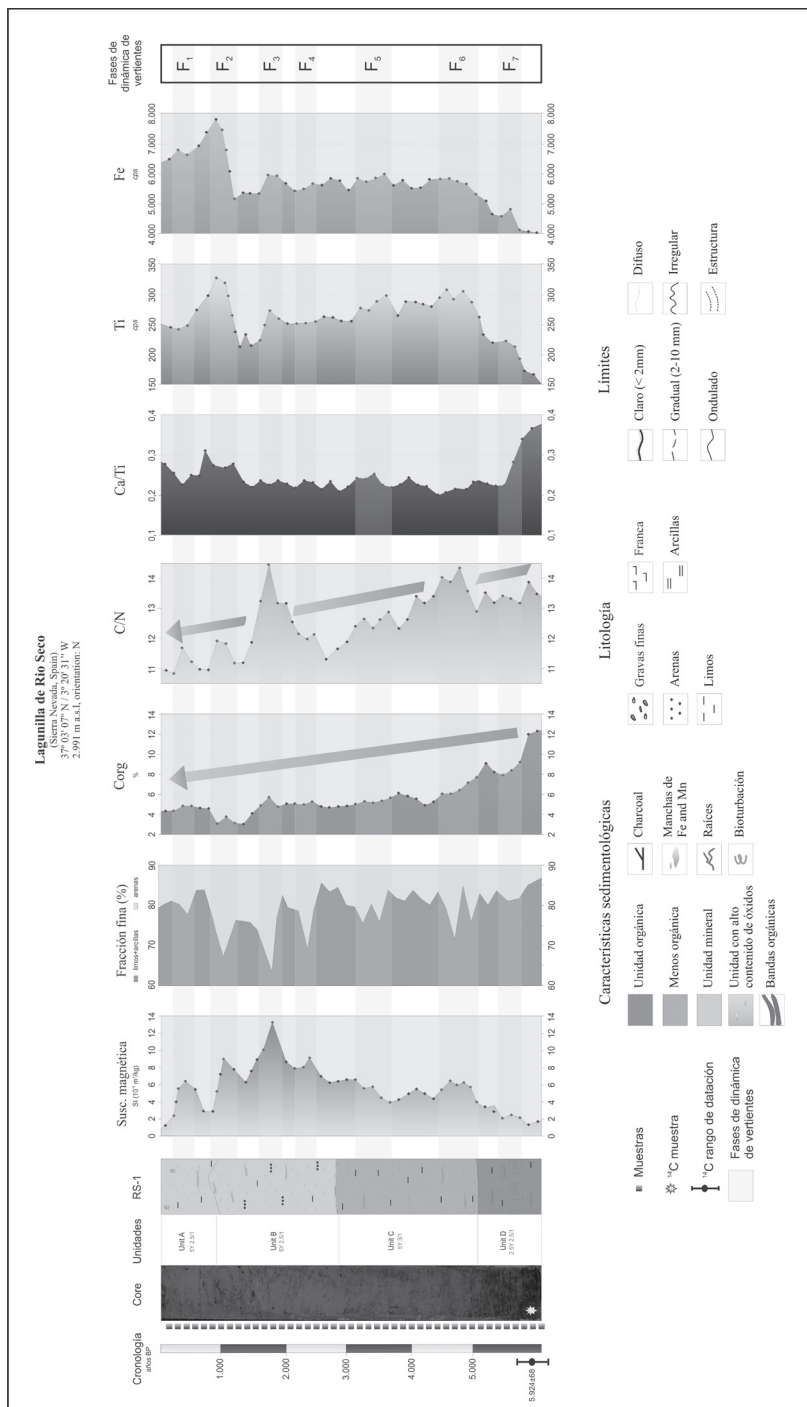
El *core* RS-1 tiene una longitud de 69 cm y cubre los últimos 6.000 años (figura 3). Destaca por ser un testigo muy homogéneo, de tonalidad marrón (5Y 4/1 y 2.5Y 4/3), algo más oscuro en la base (10YR 3/1). Las dataciones en estos lagos con tasas de sedimentación tan bajas (1 cm ~ 90 años) ofrecen resultados dispares. El hecho de que las tres dataciones se muevan en un rango temporal parecido (5,3-4,8 ka BP) y que se hayan datado fragmentos vegetales de tipo *Sphagnum* en todos ellos, induce a considerar la prevalencia de la formación turbosa en la cabecera de Río Seco durante el Óptimo Climático Holoceno y que la erosión lateral de las olas del lago haya denudado y transportado restos de esta turba hacia el fondo del mismo. Así, se puede explicar su similitud temporal e inversión cronológica; la edad más joven de ellas, emplazada a mayor profundidad, sugiere la edad mínima de formación turbosa y es aquella que parece apropiada escoger para nuestro estudio. En esta dirección, los porcentajes de C_{org} tan elevados de la unidad K ya sugieren unas condiciones ambientales favorables a la formación de turba, posiblemente conducidas por temperaturas y precipitaciones más elevadas.

RS1 presenta hasta 8 fases caracterizadas por picos de SM, disminuciones de C_{org} y C/N, máximos de Ti y Fe, caídas del contenido de Ca y aumentos en la proporción de arenas. Estas fases se interpretan como períodos proclives a la inestabilización de vertientes, con menor cobertura vegetal en los *borreguiles* que circundan el lago y mayor capacidad de movilización mineral. Por el contrario, aquellas fases definidas por disminuciones de la SM, aumentos de C_{org} y C/N, mínimos de Ti y Fe, incrementos de Ca y decrecimientos de la fracción mineral gruesa se conciben como momentos favorables a la estabilidad geomórfica, con menor aportación mineral erosionada de la cuenca de drenaje hacia los lagos y una intensificación de la edafogénesis en lugares de topografía favorable, especialmente circundando los lagos y permitiendo un denso tapiz vegetal.

Paralelamente, se detecta una tendencia gradual en el *core* hacia un menor contenido de la fracción orgánica, con una disminución del C_{org} de porcentajes del 14% (unidades K e I) hasta valores < 5% (unidades C y B), que refleja una tendencia árida desde el Holoceno Medio en Sierra Nevada. Cabe destacar la relativa estabilidad del C_{org} entre 4 y 2 ka BP, prácticamente estable, mientras el C/N sólo dibuja una tendencia muy leve a la baja. La evolución de la materia orgánica explica también la menor capacidad de arrastre mineral hacia el fondo del lago y el progresivo aumento de la fracción más fina depositada en él hasta 2,7 ka BP. Desde entonces se observa un repunte de la proporción de arenas, que asociado a la caída de la fracción orgánica, se concibe como un posible aumento de la torrencialidad en este sector de montaña.

Los lagos de la Sierra han sido definidos como muy oligotróficos por su escasa productividad autóctona (Pulido-Villena *et al.*, 2006). El hecho de que las curvas de C_{org} y C/N muestren evoluciones paralelas también induce a considerar el origen terrestre de la materia orgánica que sedimenta en sus fondos. Ambas curvas reflejan una pauta hacia una menor cobertura vegetal desde el Holoceno Medio en una cuenca que actualmente sólo tiene un 2% de la superficie vegetalizada (casi exclusivamente en torno al lago) y una menor capacidad de producción biológica del propio cuerpo lacustre.

Figura 4
PROPIEDADES GEOQUÍMICAS Y GRANULOMÉTRICAS DEL REGISTRO SEDIMENTARIO LRS-1 DE LA LAGUNILLA DE RÍO SECO



2. Lagunilla de Río Seco

Esta laguna ocupa un lugar central en el circo homónimo, una treintena de metros por debajo de la laguna principal y escorada más hacia el este. Se emplaza en una cubeta de sobreexcavación vaciada por la acción glacial durante el LGM en una zona donde el substrato aparece desnudo pero intensamente incidido, con múltiples microformas glaciares: acanaladuras, estrías, rocas pulidas, etc. La cuenca de drenaje y dimensiones de la Lagunilla son modestas, con una profundidad máxima de 1,2 m en el sector más profundo y una cobertura vegetal prácticamente nula, limitada a los escasos pastos que circundan el lago. Este *core* pone de manifiesto unas tasas de sedimentación por encima del *treeline* en Sierra Nevada aun más bajas que en el anterior lago por el hecho de disponer de una cuenca menor: en sólo 43 cm de sedimento se contemplan los últimos 6 milenios, según la datación existente en la base que resuelve una edad de 5.924 ± 68 años BP (figura 4).

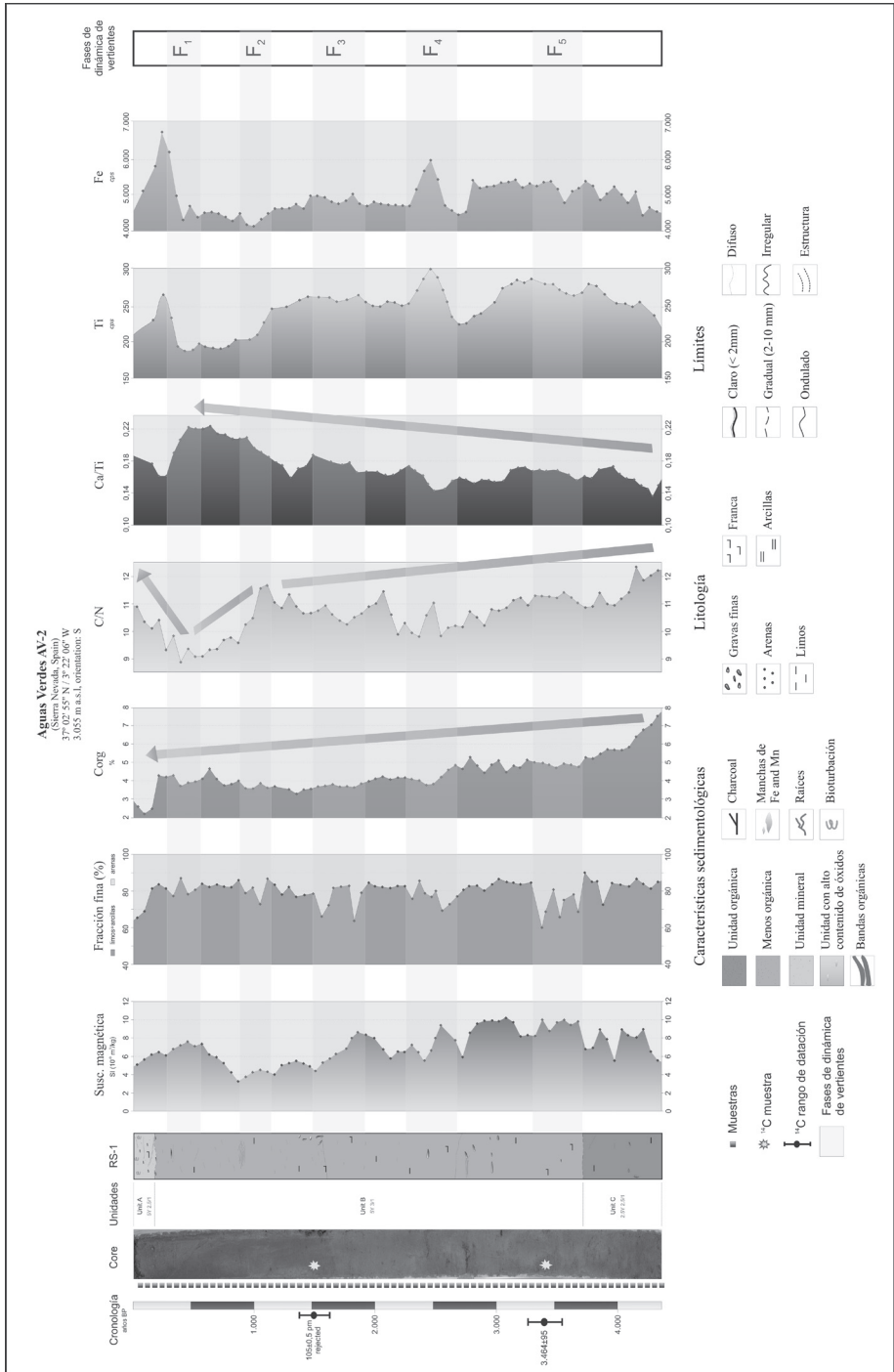
La base del testigo coincide con una tonalidad bruna (2.5Y 2.5/1), la unidad D, que representa una fase con elevados valores de C_{org} , una textura limosa con pocas arenas y bajos contenidos de Ti y Fe, ligados seguramente a un ambiente más cálido y húmedo, más proclive a la vegetalización de la cuenca; sólo tiene lugar un periodo con una inestabilidad de vertientes muy relativa (F_7), que se manifiesta en una caída del C_{org} y un ligero aumento de arenas. La unidad C tiene un color más claro (5Y 3/1), síntoma de una menor presencia de materia orgánica, que, en efecto, disminuye gradualmente: de valores de C_{org} próximos al 8% hasta el 4%, estabilizándose en esta cifra, consecuencia de una producción lacustre limitada por los nutrientes. Se detectan dos fases de aportación de vertientes (F_6 y F_5), siendo especialmente activa la primera de ellas, con elevados porcentajes de arenas y valores altos de C/N, mientras el C_{org} no dibuja oscilaciones, sólo una gradual tendencia decreciente. Las unidades superiores B y A se caracterizan por unos sedimentos de color más claro (5Y 2.5/1), siendo B de textura más gruesa. En esta unidad, destaca una sucesión de fases de vertientes (F_4 , F_3 y F_2) con contenidos de arenas del orden del 30-40%, picos de SM, Ti y Fe y repentinos incrementos de C/N, a pesar de que el C_{org} permanece en valores bajos (~3-4%), consecuencia de una mayor entrada de material clástico en el lago. Finalmente, el último pulso de vertientes se incluye en la unidad A y no es tan marcado (F_1), con pequeños incrementos de arenas y C/N. Desde entonces, la señal magnética, reflejada en caídas de Ti y Fe, tiende a disminuir aunque no se aprecia una clara evolución respecto de la granulometría y de la materia orgánica.

El *core* LRS-1 refleja una pauta muy similar de aquella detectada en RS-1 respecto de la disminución de los valores de C_{org} y C/N, confirmando una evidente tendencia a la aridez en la vertiente meridional de la Sierra desde el Holoceno Medio, que se relaciona con índices de vegetalización decrecientes en la cabecera del circo de Río Seco.

3. Aguas Verdes

Emplazada en la cabecera del valle del Veleta es una de las lagunas emplazadas a mayor altura de la Sierra, concretamente a 3.055 m, y se trata del lago más alto sondeado en la Península Ibérica y, en extensión, en Europa Occidental. Como en los otros ejemplos planteados, su cuenca es relativamente pequeña y desprovista de vegetación, que sólo cubre las inmediaciones del lago y de manera más dispersa aparece en enclaves donde la microtopo-

Figura 5
PROPIEDADES GEOQUÍMICAS Y GRANULOMÉTRICAS DEL REGISTRO SEDIMENTARIO AV-2 DE LA LAGUNA DE AGUAS VERDES



grafía lo permite. Las pendientes que rodean la laguna están tapizadas de material detrítico no estabilizado, erosionado y liberado de las agujas rocosas sobrestantes, especialmente en el margen noroccidental de la laguna, con un substrato que aflora recurrentemente en superficie.

La intensa evapotranspiración estival estabiliza el nivel de la laguna en torno a 2,5 m en la parte central más profunda. El *core* de 73 cm es un testigo muy homogéneo, sin grandes contrastes de color o textura, y engloba los últimos 4 ka BP, poniendo de relieve unas tasas de sedimentación más elevadas que en los casos anteriores (figura 5). La unidad C es la base del *core* y se caracteriza por un color oscuro (2.5Y 2.5/1) que refleja un contenido más elevado de materia orgánica, con valores de $C_{org} > 5\%$ y de $C/N \sim 12$. La unidad B se caracteriza por una tonalidad marrón muy homogénea (5Y 3/1) que se traduce en una caída de la SM y unos valores relativamente estables de C_{org} y más fluctuantes de C/N. En esta unidad, destaca una primera inestabilización de vertientes entre 3,5 y 3,3 ka BP (F_3), con menor proporción orgánica y tres marcados picos de arenas. Una nueva activación de las vertientes nevadenses acontece entre 2,6-2,4 ka BP (F_4), explicitada en un aumento de arenas, de forma paralela a una disminución del C_{org} , una recuperación del C/N y máximos de Ti y Fe, *proxies* que sugieren un periodo de intensa erosión que debió depositar restos de plantas terrestres de la cuenca en el fondo del lago.

Posteriormente a F_4 , el *core* evidencia una aportación estable de material fino (sólo 10% de arenas) que determina los bajos valores de SM. La tercera fase de actividad geomórfica (F_3) acontece posiblemente a mediados del segundo milenio (Dark Ages?), a pesar de que la datación superior no resolvió una edad lógica y no permite afinar la cronología. Este periodo presenta incrementos de arenas y SM, con una disminución muy relativa de C_{org} . Seguidamente se registra una sensible caída de la SM conducida por un tamaño de grano más fino, básicamente limos, aunque se detecta una nueva inestabilización de vertientes muy relativa (F_2). La tímida recuperación del C_{org} registrada a inicios del último milenio va paralela a un repentino incremento de la ratio C/N, que insinúa una componente terrestre y no lacustre de la fracción orgánica y evidencia una ligera recuperación del grado de cobertura vegetal en la cabecera del valle meridional del Veleta durante esta etapa.

La parte superior de la unidad B corresponde a la última fase importante de movilización mineral (F_1), con repuntes en la aportación de arenas (20%) que se traducen en elevados valores de SM, disminución de C/N y fluctuaciones del C_{org} . La unidad A es la parte superior del *core*, de tonalidad más clara (5Y 2.5/1); en la interfaz agua-sedimento se percibe la bioturbación propia de estos medios, con elevada proporción de raíces y restos de algas. Éstos no se manifiestan en el contenido de C_{org} , que registra los valores más bajos de todo el *core*, mientras que el C/N detecta una notable recuperación. Si bien la inercia térmica iniciada desde la Pequeña Edad de Hielo (PEH) ha favorecido la extensión de los *borreguiles* alrededor de la laguna, también cabe considerar el impacto antrópico existente en estos sectores húmedos de cumbres a lo largo de los últimos 100-150 años (Martín Civantos, 2007), donde la intervención humana ha podido contribuir a afectar la dinámica natural de vertientes con un transporte y sedimentación de materiales más gruesos hacia el fondo del lago.

V. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las dataciones realizadas evidencian tasas de sedimentación muy bajas en el cinturón periglacial actual de Sierra Nevada, con procesos de resedimentación que dificultan obtener resultados precisos. El escaso número de dataciones que han resultado útiles para la interpretación paleoecológica de la dinámica de cumbres durante el Holoceno obliga a utilizar una interpolación lineal de las edades calibradas contemplando una acumulación constante, hecho que enmascara cambios en las tasas de sedimentación, por lo que cabe considerar como orientativas las edades presentadas.

Figura 6
CRONOESTRATIGRAFÍA DE LA ACTIVIDAD DE VERTIENTES INFERIDA A PARTIR DE LOS LAGOS SONDEADOS EN SIERRA NEVADA

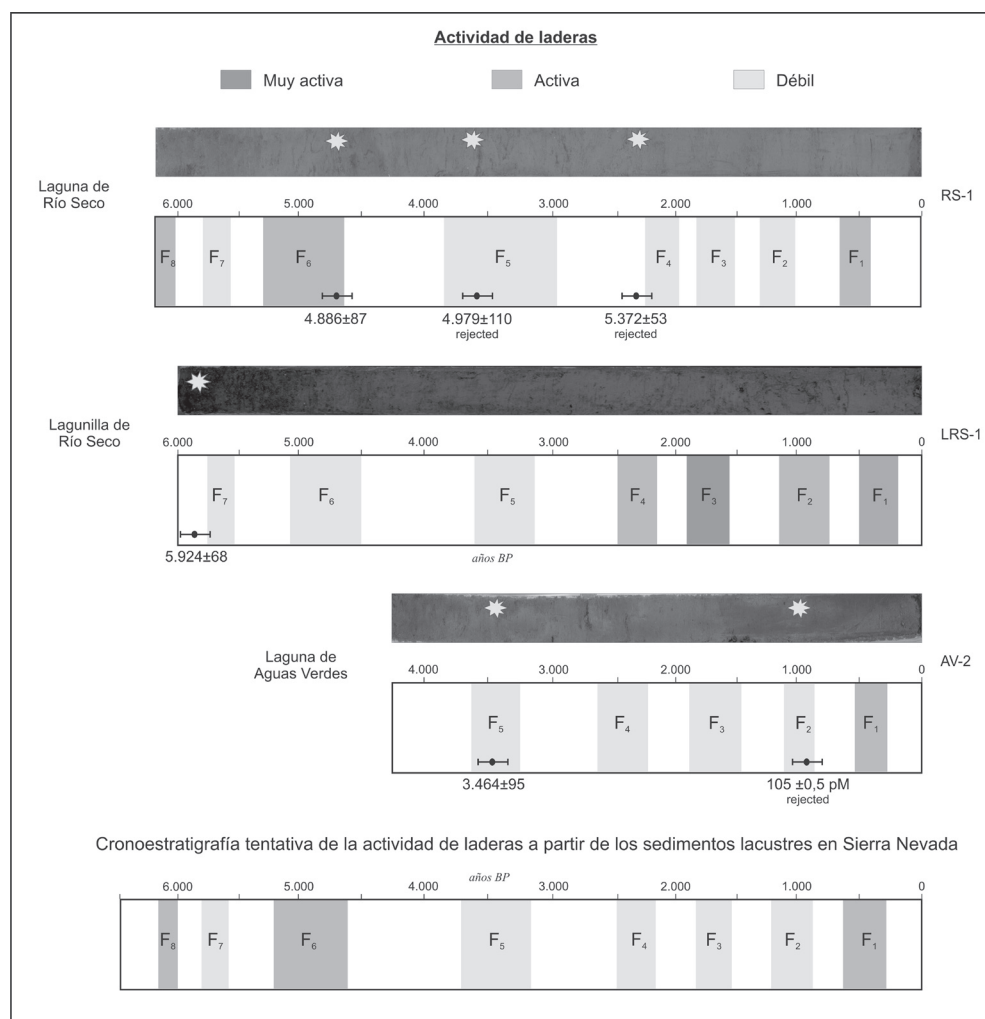
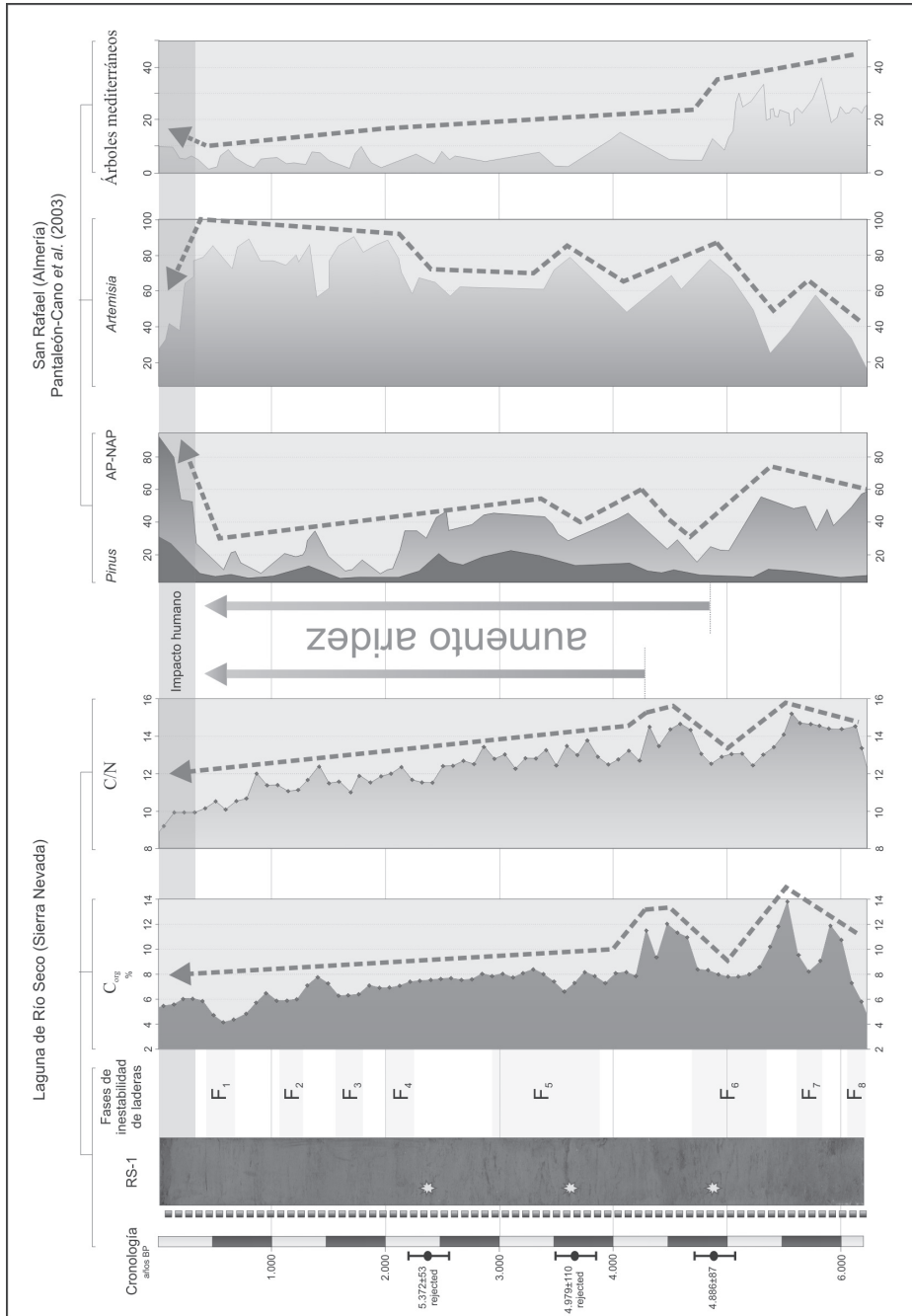


Figura 7
 COMPARACIÓN ENTRE NUESTROS PROXIES DE LA LAGUNA DE RÍO SECO Y LOS ESTUDIOS POLÍNICOS DEL SURESTE PENINSULAR (BURJACHS ET AL., 2007)



A partir de los resultados obtenidos en los tres lagos sondeados se percibe una sucesión de periodos de acusada actividad geomórfica con otros de relativa estabilidad de la dinámica de vertientes en las culminaciones de Sierra Nevada. Hasta 8 periodos con incrementos de aporte mineral más o menos intensos se han concretado durante los últimos milenios: ~6.2?-6, 5.8-5.6, 5.2-4.6, 3.7-3.2, 2.5-2.2, 1.8-1.6, 1.2-0.9 y 0.6-0.25 ka BP (Oliva, 2009). Estos cambios ambientales se conciben como consecuencia directa de la variabilidad climática holocena. Condiciones más húmedas y frías que las actuales debieron implicar una mayor movilidad y transporte de los sedimentos hacia las lagunas, mientras que condiciones de humedad similares o superiores asociadas a temperaturas más elevadas condicionaban un mayor grado de vegetalización en las cabeceras de los altos valles meridionales y una menor sedimentación mineral en las lagunas. El hecho de que no haya carbonatos en Sierra Nevada implica que el Ca medido debe tener una procedencia eólica con un origen en otras regiones más o menos distantes. La existencia del Sáhara, una de las fuentes de aerosoles más importantes del planeta y con amplias zonas ricas en carbonatos a escasos centenares de kilómetros de la Sierra (Löye-Pilot et. al., 1986), nos induce a interpretar que el Ca depositado puede tener su origen en el continente africano. El hecho de que los aumentos de Ca vayan paralelos a incrementos del contenido de materia orgánica puede ser indicativo de unas condiciones más cálidas posiblemente conducidas por una mayor dominancia de vientos de componente sur que atenuaban las temperaturas en altura e implicaban más recurrencia de *dust plumes*, las cuáles aportaban más Ca a las cabeceras de los valles nevadenses.

Se detecta una clara correlación entre estos periodos de acrecentada actividad geomórfica constatada a partir de sedimentos lacustres y aquellas fases de activa soliflucción durante el Holoceno Medio y Tardío determinadas en los análisis cronoestratigráficos de los lóbulos de soliflucción (Oliva et al., *in press*). La figura 6 sintetiza una tentativa cronológica de las fases con mayor actividad de laderas en la Sierra a partir de los tres *cores* anteriormente comentados con una graduación relativa de estas fases de inestabilidad de vertientes a lo largo de los últimos 6 milenios considerando los cambios de granulometría en los *cores* estudiados.

VI. CONCLUSIONES

Los testigos sedimentarios extraídos de los lagos más altos del sur de Europa ponen de manifiesto sensibles cambios ambientales en las culminaciones de Sierra Nevada durante los últimos 6.000 años. Los registros lacustres de Aguas Verdes, Río Seco y Lagunilla de Río Seco también muestran hasta 8 periodos de inestabilidad de vertientes desde el Holoceno medio, con incrementos en la aportación de material clástico hacia los lagos entre ~6.2?-6, 5.8-5.6, 5.2-4.6, 3.7-3.2, 2.5-2.2, 1.8-1.6, 1.2-0.9 y 0.6-0.25 ka BP (Oliva, 2009). Se percibe también la PEH como uno de los períodos posiblemente más fríos y húmedos desde el Holoceno Medio hasta nuestros días, con abundante aporte mineral al fondo de los lagos. En contraposición, también se han detectado periodos biotásticos intercalados entre estas fases geomórficas caracterizadas por momentos más cálidos con menor movilización de material en cabecera. A su vez, los tres testigos muestran una clara tendencia hacia una menor vegetalización del macizo desde el Holoceno Medio consecuencia de menores índices de humedad en la Sierra. La menor cobertura vegetal en el macizo es paralela a una disminución de las especies arbóreas en el sureste ibérico y a la recuperación de los taxones del género *Arte-*

misia, indicativo de una vegetación arbustiva más abierta y raleada en este sector (figura 7). Según nuestros registros, este aumento gradual de la aridez en el sur peninsular se intensifica a partir de 4,2 ka BP, misma tendencia observada en el norte de África y extremo sureste peninsular durante los últimos 4,6 ka BP (Gasse, 2000; Pantaleón-Cano *et al.*, 2003).

AGRADECIMIENTOS

Cabe agradecer el apoyo ofrecido por el Parque Nacional de Sierra Nevada en el trabajo de campo y el amparo del Grupo de Investigación Consolidado «*Paisatge i reconstrucció ambiental de la muntanya mediterrània*» y de los proyectos «*Degradación de hielo fósil y permafrost y cambio climático en Sierra Nevada*» (018-2007) y «*Fluvalps-3000*» (CGL2006-01111). Es de recibo agradecer también las facilidades dadas por el Dr. Heinz Veit para el uso de los potentes laboratorios del *Geographisches Institut* de la Universidad de Berna. Esta investigación se ha financiado con la beca/contrato disfrutada entre 2005-2008 en el marco del programa de Formación de Personal Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- BURJACHS, F.; EXPÓSITO, I. & YLL, I.E. (2007): Tendencias, crisis y desfases de la vegetación y el clima en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica durante el Holoceno. I Congreso Nacional sobre Cambio Global. Universidad Carlos III de Madrid. Póster. Getafe, 25-27 abril 2007.
- EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA. ESTADO DE SITUACIÓN (2007): Informe de expertos de la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático.
- GASSE, F. (2000): Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, nº 19, págs. 189-211.
- IPCC (2007): *Intergovernmental Panel on Climate Change*. World Meteorological Organization.
- LÖYE-PILOT, M.D.; MARTIN, J.M. & MORELLI, J. (1986): Influence of Saharan dust on the rainfall acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, nº 321, págs. 427-428.
- MARTÍN CIVANTOS, J. M. (2007): *Poblamiento y territorio medieval en el Zenete (Granada)*. Universidad de Granada. 773 pp.
- MEYERS, P.A. & TERANES, J.L. (2001): Sediment organic matter. In: Last, W.M. & Smol, J.P (eds). *Tracking Environmental Changes Using Lake Sediments*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Vol. 2, págs. 239-270.
- MOLERO MESA, J. & PÉREZ RAYA, F. (1987): *La flora de Sierra Nevada*. Universidad de Granada.
- NOWACZYK, N.R. (2001): Logging of magnetic susceptibility. In: Last, W.M. & Smol, J.P (eds). *Tracking Environmental Changes Using Lake Sediments*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Vol.1, págs. 155-170.
- OLIVA, M. (2009): *Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 343 pp.

- OLIVA, M.; SCHULTE, L. & GÓMEZ ORTIZ, A. (2009): Morphometry and Late Holocene activity of solifluction landforms in the Sierra Nevada, Southern Spain. *Permafrost and Periglacial Processes*, nº 20, págs. 369-382.
- O'SULLIVAN, P. (2004): Paleolimnology. In: O'Sullivan, P.E. & Reynolds, C.S. (Eds.). *The lakes handbook. Limnology and limnetic ecology*. Vol. 1. Blackwell Publishing. UK. 699 pp.
- PANTALEÓN-CANO J. YLL E.I., PÉREZ-OBÍOL R. & ROURE J.N. (2003): Palynological evidence for vegetational history in semi-arid areas of the Western Mediterranean (Almería, Spain). *The Holocene*, nº 13 (1), págs. 109-119.
- PULIDO-VILLENA, E.; RECHE, I. & MORALES-BAQUERO, R. (2006): Significance of atmospheric inputs of calcium over the southwestern Mediterranean region: High mountain lakes as tools for detection. *Global Biogeochemical Cycles* 20, GB2012, doi:10.1029/2005GB002662.
- REIMER R.W.; REMMELE S.; SOUTHERN J.R.; STUIVER M.; TALAMO S.; TAYLOR F.W.; VAN DER PLICHT J. & WEYHENMEYER C.E.. (2004): IntCal04 Atmospheric radiocarbon age calibration, 26-0 ka BP. *Radiocarbon*, nº 46, págs. 1026-1058.