

~~T. Prob. 24/88~~  
T 10/58

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**Departamento de Edafología y Química Agrícola**

UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Fecha 29/11/01.....
ENTRADA NUM. 4667.....



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
GRANADA
N.º Documento 613382913
N.º Copia 16370430

**RECONSTRUCCION PALEOAMBIENTAL DE  
LA DEPRESION DE GRANADA A TRAVES  
DEL ESTUDIO DE PALEOSUELOS**

**Irene Ortiz Bernad**



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Departamento de Edafología y Química Agrícola

**Reconstrucción paleoambiental de la Depresión de Granada  
a través del estudio de paleosuelos**

*Memoria que, para optar al grado de Doctor, presenta*

*Irene Ortiz Bernad*

*Carlos Fernando Dorronsoro Fernández, Catedrático de la Universidad de Granada, como co-director del trabajo da el visto bueno a la presente Memoria de Tesis Doctoral.*

*Mariano Simón Torres, Profesor Titular de la Universidad de Granada, como co-director del trabajo da el visto bueno a la presente Memoria de Tesis Doctoral.*

Fdo. Carlos F. Dorronsoro Fernández

Fdo. Mariano Simón Torres

Granada, 2001



## Agradecimientos

La escritura de una Tesis Doctoral es, por lo general, la culminación de varios años de trabajo durante los cuales el doctorando, a pesar de la escasa experiencia del principio, adquiere un cierto grado de formación científica. En mi caso, esto hubiera sido del todo imposible sin la inestimable ayuda de mis directores, los Profs. Carlos Dorronsoro Fernández y Mariano Simón Torres. Ambos son respetados no sólo por su extensa actividad científica sino, casi más importante, por la extraordinaria labor docente que año tras año desempeñan y gracias a la cual sus alumnos hemos disfrutado de esta bella ciencia que es la Edafología. A los dos quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su dedicación, orientación y, muy especialmente, por la confianza que depositaron en mí al comienzo de este trabajo.

También quiero mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que me han apoyado durante estos años y que han hecho posible que esta memoria vea la luz.

A la Prof. Emilia Fernández Ondoño, por ayudarme y guiarme en el laboratorio desde el primer momento y por estar ahí siempre que la he necesitado. Creo que personas como ella son las que hacen más fácil y agradable el trabajo diario.

A la Prof. Inés García Fernández, por su constante ánimo y cariño y por sus siempre acertados consejos durante la realización de este trabajo.

Al Prof. José Aguilar Ruiz, por su entera disposición para solucionarme cualquier problema y por el interés que siempre ha demostrado por mi trabajo y mi formación.

Al Prof. Juan Fernández García y al Dr. Rafael Bellver Mancheño, por las numerosas veces que me han ayudado en cuestiones informáticas.

Al Dr. Angel Iriarte Mayo, por su colaboración en la toma de muestras y la realización de los monolitos y por toda la ayuda que me ha prestado a lo largo de estos años.

A Francisco Martín Peinado, mi compañero de fatigas y de despacho, cuyos comentarios siempre útiles y anteriores trabajos han ayudado considerablemente a mejorar esta Memoria. Su extraordinaria forma de ser no tiene precio.

A Manoli, por la realización de las láminas delgadas de micromorfología estudiadas en este trabajo y a Encarnita, por su ayuda a la hora de solucionar cualquier

cuestión burocrática o administrativa. A las dos les quiero agradecer su amistad y su cariño.

A Lourdes y Chío, por sus ánimos en todo momento, y a Pablo y Juan Carlos, los del otro lado del Atlántico, por todo el apoyo que me han mostrado desde que llegaron al Departamento.

A todos los miembros del Departamento de Edafología y Química Agrícola y a todos los que han pasado por él durante estos años y que, de una forma u otra, me han hecho sentir como en casa.

Al Prof. George Stoops, por haberme aceptado tan amablemente en su laboratorio y supervisar mi trabajo en el Departamento de Geología y Ciencia del suelo de la Universidad de Gante en Bélgica.

Al Prof. George Sposito, por permitirme realizar una estancia en el Environmental Geochemistry Group de la Universidad de Berkeley en Estados Unidos.

Al Prof. Francisco Valle Tendero, por la colaboración prestada en la revisión del capítulo de vegetación.

A mi amigo Angel Hernánsaez, por su ayuda en la realización de la portada de esta Memoria.

Al Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, por concederme una Beca de Formación de Profesorado Universitario que me ha permitido realizar este trabajo y desarrollar estancias temporales en las Universidades de Gante y Berkeley.

A la Dirección General de Investigación, Ciencia y Tecnología, por la financiación de este trabajo a través del Proyecto PB96-1385.

A Manuel y Africa, por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos.

A los “niños del Zaidín”, Chechu, Silvia, Marian, Mari Carmen, Antonio, David y Patri, por su amistad y sus ánimos. Todos formamos una gran familia.

A Abraham, por todo su apoyo y sus siempre indispensables comentarios científicos que han sido un constante estímulo durante estos años.

A mi familia, en especial a mi padre, el Prof. Roque Ortiz Silla, por todos sus sabios consejos.

# Indice

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	19
<b>3. Objetivos</b>	23
<b>4. Localización y Factores formadores</b>	25
4.1. Localización de la zona de estudio	25
4.2. Geología	25
4.3. Relieve	35
4.3.1. Depresión de Granada	35
4.3.2. Sierra Nevada	37
4.4. Clima	40
4.4.1. Depresión de Granada	41
4.4.2. Sierra Nevada	44
4.5. Vegetación	46
4.5.1. Depresión de Granada y áreas adyacentes	46
4.5.2. Sierra Nevada	50
<b>5. Materiales y Métodos</b>	53
5.1. Selección de los sectores estudiados	53
5.2. Métodos	56
5.2.1. Métodos de campo	56
5.2.2. Métodos analíticos de laboratorio	56
5.2.2.1. Carbono Orgánico (CO)	57
5.2.2.2. Carbonato cálcico equivalente (CaCO <sub>3</sub> )	57
5.2.2.3. Análisis Granulométrico	57
5.2.2.4. Densidad aparente (Da)	57
5.2.2.5. Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE)	58
5.2.2.6. pH	58
5.2.2.7. CIC y bases de cambio	58
5.2.2.8. Total de óxidos de hierro y aluminio y formas amorfas	58
5.2.2.9. Análisis elemental	58
5.2.3. Métodos mineralógicos	59
5.2.3.1. Mineralogía de la fracción arcilla	59
5.2.4. Cálculo de Índices	59
5.2.4.1. Índice de enrojecimiento (Rr)	59
5.2.4.2. I <sub>a</sub> y IFe <sub>d</sub>	59
5.2.5. Estimación de la edad de los suelos	60
<b>6. Grado de Homogeneidad/Heterogeneidad entre los suelos</b>	61
6.1. Horizontes C	61
6.2. Horizontes B	67
6.3. Análisis comparativo de los horizontes C y B	71

<b>7. Análisis del grado de evolución de los suelos</b> .....	73
7.1. Grupo <i>Ia</i> .....	75
7.1.1. Características macromorfológicas .....	75
7.1.2. Resultados analíticos .....	75
7.1.3. Micromorfología .....	79
7.1.4. Clasificación .....	81
7.1.5. Procesos de Edafogénesis .....	82
7.1.6. Edad de los suelos .....	83
7.1.7. Relación grado de evolución – edad .....	87
7.2. Grupo <i>Ila</i> .....	88
7.2.1. Características macromorfológicas .....	88
7.2.2. Resultados analíticos .....	89
7.2.3. Micromorfología .....	92
7.2.4. Clasificación .....	93
7.2.5. Procesos de Edafogénesis .....	94
7.2.6. Edad de los suelos .....	94
7.2.7. Relación grado de evolución – edad .....	94
7.3. Grupo <i>Iib</i> .....	95
7.3.1. Características macromorfológicas .....	95
7.3.2. Resultados analíticos .....	96
7.3.3. Micromorfología .....	100
7.3.4. Clasificación .....	101
7.3.5. Procesos de Edafogénesis .....	101
7.3.6. Edad de los suelos .....	102
7.3.7. Relación grado de evolución – edad .....	102
7.4. Grupo <i>IIIb</i> .....	103
7.4.1. Características macromorfológicas .....	103
7.4.2. Resultados analíticos .....	103
7.4.3. Micromorfología .....	106
7.4.4. Clasificación .....	107
7.4.5. Procesos de Edafogénesis .....	108
7.4.6. Edad de los suelos .....	108
7.4.7. Relación grado de evolución – edad .....	108
7.5. Grupos <i>c</i> .....	110
7.1.1. Características macromorfológicas .....	112
7.1.2. Resultados analíticos .....	113
7.1.3. Micromorfología .....	122
7.1.4. Clasificación .....	126
7.1.5. Procesos de Edafogénesis .....	127
7.1.6. Edad de los suelos .....	128
7.1.7. Relación grado de evolución – edad .....	129

<b>8. Consideraciones generales</b> .....	131
<b>9. Conclusiones</b> .....	141
<b>10. Bibliografía</b> .....	143
<b>11. Apéndice</b> .....	163
Sector de Colomera (COL) .....	163
1. Macromorfología .....	163
2. Datos analíticos .....	171
Sector de Almanjáyar (ALM) .....	179
1. Macromorfología .....	179
2. Datos analíticos .....	182
Sector de Haza Grande (HG) .....	186
1. Macromorfología .....	186
2. Datos analíticos .....	188
Sector del LLano de la Perdiz (LLP) .....	190
1. Macromorfología .....	190
2. Datos analíticos .....	193
Sector de Otura (OT) .....	195
1. Macromorfología .....	195
2. Datos analíticos .....	200
Sector de Dúrcal (DUR) .....	204
1. Macromorfología .....	204
2. Datos analíticos .....	205
Sector de Nigüelas (NIG) .....	206
1. Macromorfología .....	206
2. Datos analíticos .....	210
Sector de la Cuesta del Desmayo (CD) .....	214
1. Macromorfología .....	214
2. Datos analíticos .....	215
Sector de Sierra Nevada (SN) .....	217
1. Macromorfología .....	217
2. Datos analíticos .....	218

## Índice de Figuras

<b>Figura 4.1.</b> Localización de la zona de estudio y situación de los sectores donde se han muestreado los suelos .....	26
<b>Figura 4.4.</b> Ficha climática correspondiente a la Depresión de Granada.....	43
<b>Figura 5.1.</b> Mapa geológico simplificado de la zona de estudio .....	54
<b>Figura 6.1.</b> Dendograma obtenido a partir del Análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes C de todos los suelos estudiados. ....	62
<b>Figura 6.2.</b> Dendograma obtenido a partir del Análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes B más evolucionados de todos los suelos estudiados .....	68
<b>Figura 6.3.</b> Comparación entre los horizontes C y B de los distintos grupos de suelos establecidos mediante el Análisis de conglomerados jerárquicos .....	72
<b>Figura 7.</b> Diferencias en los contenidos de arcilla y total de óxidos de hierro ( $Fe_d$ ) entre los horizontes B y C de todos los suelos estudiados .....	74
<b>Figura 7.1.1.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt y C de los suelos del grupo <i>Ia</i> .....	77
<b>Figura 7.1.2.</b> Índices de acumulación de arcilla ( <i>Ia</i> ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos del grupo <i>Ia</i> .....	77
<b>Figura 7.1.3.</b> Esquema de los depósitos y suelos de Nigüelas .....	84
<b>Figura 7.1.4.</b> Periodos fríos y cálidos de los últimos 900.000 años establecidos en el registro de $\delta^{18}O$ para latitudes bajas .....	85
<b>Figura 7.2.1.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt y C de los suelos DUR-1, LLP-1, LLP-2 y SN-1 .....	90
<b>Figura 7.2.2.</b> Índices de acumulación de arcilla ( <i>Ia</i> ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos DUR-1, LLP-1, LLP-2 y SN-1 .....	91
<b>Figura 7.3.1.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt y C de los suelos enterrados del sector de Nigüelas .....	97
<b>Figura 7.3.2.</b> Índices de acumulación de arcilla ( <i>Ia</i> ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos enterrados del sector de Nigüelas .....	98
<b>Figura 7.3.3.</b> Relación entre el índice de acumulación de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) y el índice de enrojecimiento ( <i>Ir</i> ) en los horizontes Bt más evolucionados de los suelos enterrados de Nigüelas .....	99
<b>Figura 7.4.1.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt y C de los suelos DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2 .....	105
<b>Figura 7.4.2.</b> Índices de acumulación de arcilla ( <i>Ia</i> ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2 .....	105

<b>Figura 7.5.</b> Dendograma obtenido a partir del análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas, fisico-químicas y contenido en elementos traza de los horizontes C de los suelos de los sectores de Otura, Almanjáyar, Haza Grande y Colomera .....	111
<b>Figura 7.5.1.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes B y C de los suelos del grupo <i>IIC</i> .....	115
<b>Figura 7.5.2.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt (Bw para ALM-3) y C de los suelos del grupo <i>IIIC</i> .....	115
<b>Figura 7.5.3.</b> Razones $Fe_t+Al_t/Si_t$ en los horizontes Bt y C de los suelos del grupo <i>IVC</i> .....	115
<b>Figura 7.5.4.</b> Índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe <sub>d</sub> ) de los suelos de los sectores de Otura (OT-5 y OT-4), Haza Grande y Almanjáyar .....	121
<b>Figura 7.5.5.</b> Índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe <sub>d</sub> ) de los suelos OT-3 y OT-1 y los suelos OT-2, NIG-4, NIG-3 y NIG-2 .....	121
<b>Figura 8.1.</b> Esquema del grado de evolución de los suelos a lo largo de los periodos de edafización .....	138
<b>Figura 8.2.</b> Variación del grado de evolución de los suelos con el tiempo.....	140

## Figure Index

<b>Figure 4.1.</b> Location of the study area and situation of the sectors where the soils have been sampled .....	26
<b>Figure 4.4.</b> Climatic data of the Granada Basin.....	43
<b>Figure 5.1.</b> Simplified geological map of the study area .....	54
<b>Figure 6.1.</b> Dendogram obtained from the Hierarchical Cluster Analysis of the physical, chemical and physico-chemical properties of the C horizons in all the soils studied .....	62
<b>Figure 6.2.</b> Dendogram obtained from the Hierarchical Cluster Analysis of the physical, chemical and physico-chemical properties of the most developed B horizons in all the soils studied .....	
<b>Figure 6.3.</b> Comparative study between the C and B horizons of the different groups of soils established from the Hierarchical Cluster Analysis.....	
<b>Figure 7.</b> Differences in the contents of clay and total iron-oxides ( $Fe_d$ ) between the B and C horizons of all the soils studied .....	
<b>Figure 7.1.1.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for soils of group <i>Ia</i> .....	
<b>Figure 7.1.2.</b> Clay-accumulation ( <i>Ia</i> ) and iron-oxide-accumulation ( $IFe_d$ ) indices for soils of group <i>Ia</i> .....	
<b>Figure 7.1.3.</b> Vertical section of the deposits and soils at the Nigüelas sector .....	
<b>Figure 7.1.4.</b> Cold and warm periods from the last 900,000 years in the low-latitude $\delta^{18}O$ stack .....	
<b>Figure 7.2.1.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for soils DUR-1, LLP-1, LLP-2 and SN-1 .....	
<b>Figure 7.2.2.</b> Clay-accumulation ( <i>Ia</i> ) and iron-oxide-accumulation ( $IFe_d$ ) indices for soils DUR-1, LLP-1, LLP-2 y SN-1 .....	
<b>Figure 7.3.1.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for the buried soils located at the Nigüelas sector .....	
<b>Figure 7.3.2.</b> Clay-accumulation ( <i>Ia</i> ) and iron-oxide-accumulation ( $IFe_d$ ) indices for the buried soils located at the Nigüelas sector .....	
<b>Figure 7.3.3.</b> Relationship between the iron-oxide-accumulation index ( $IFe_d$ ) and the redness index ( <i>Ir</i> ) of the most developed Bt horizons in the buried soils located at the Nigüelas sector.....	
<b>Figure 7.4.1.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for soils DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2 .....	
<b>Figure 7.4.2.</b> Clay-accumulation ( <i>Ia</i> ) and iron-oxide-accumulation ( $IFe_d$ ) indices for soils DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2 .....	
<b>Figure 7.5.</b> Dendogram obtained from the Hierarchical Cluster Analysis of the physical, chemical and physico-chemical properties and	

trace elements content of the C horizons in soils located at Otura, Almanjáyar, Haza Grande and Colomera sectors .....	
<b>Figure 7.5.1.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for soils of group <i>IIC</i> .....	
<b>Figure 7.5.2.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt (Bw for ALM-3) and C horizons for soils of group <i>IIIc</i> .....	
<b>Figure 7.5.3.</b> The $Fe_t+Al_t/Si_t$ ratio of the Bt and C horizons for soils of group <i>IVc</i> .....	
<b>Figure 7.5.4.</b> Clay-accumulation (Ia) and iron-oxide-accumulation (IFe <sub>d</sub> ) indices for soils located at Otura (OT-5 y OT-4), Haza Grande and Almanjáyar sectors.....	
<b>Figure 7.5.5.</b> Clay-accumulation (Ia) and iron-oxide-accumulation (IFe <sub>d</sub> ) indices for soils OT-3 and OT-1 and soils OT-2, NIG-4, NIG- 3 and NIG-2 .....	
<b>Figura 8.1.</b> Development degree of the soils over alternating pedogenic episodes .....	138
<b>Figura 8.2.</b> Variation of the development degree of the soils over time .....	140

# 1. Introducción

Como es sabido, la formación de un suelo o edafogénesis es el resultado de la interacción de cinco factores formadores: clima, organismos, relieve, material original y tiempo (Jenny, 1941). Estos factores, a través de los procesos edafogenéticos que inducen, determinan su evolución desde un estado inicial o inmaduro hasta un estado de madurez o de equilibrio dinámico. De acuerdo con esto, las posibles variaciones que cabe esperar en los suelos o en sus propiedades habrá que atribuir las a una combinación de diferentes factores. Aunque las posibles combinaciones de factores pueden llegar a ser infinitas, no todas ellas inducen distintos procesos de edafogénesis, sino que en la mayoría de los casos conducen a diferentes intensidades dentro de un mismo proceso o procesos.

El clima es uno de los factores más relevantes a la hora de determinar las propiedades de muchos suelos. Sus variaciones, a escala mundial, son las que fundamentalmente dirigen la implantación de los grandes procesos de edafogénesis y, con ellos, la distribución de los suelos. Precipitación y temperatura son los dos parámetros más importantes del clima a la hora de controlar las propiedades de los suelos. La humedad está implicada en la mayoría de los procesos físicos, químicos y bioquímicos que se producen en el suelo, controlando tanto la meteorización como el lavado y la translocación de materia. La temperatura, por su parte, influye fundamentalmente en la velocidad de los procesos químicos y bioquímicos (Birkeland, 1999), además de condicionar también diversos procesos físicos. Las principales propiedades del suelo que se correlacionan con el clima son: la estabilidad mineral, el pH, el grado de saturación, el contenido y grado de transformación de la materia orgánica, el contenido y naturaleza de la fracción arcilla, las formas de los minerales de hierro, el color, algunos extractos químicos y la presencia o ausencia de carbonato cálcico y sales solubles.

De acuerdo con lo anterior, hay regiones macroclimáticas caracterizadas por un tipo de suelo zonal que representa el estado clímax. No obstante, como consecuencia de variaciones en el resto de los factores formadores, o incluso variaciones microclimáticas, es posible que el suelo retrase su evolución o presente desviaciones respecto al suelo zonal, apareciendo entonces toda una serie de suelos asociados. Esta dinámica se puede complicar más aún en el caso de que una zona determinada haya experimentado importantes cambios climáticos a lo largo de su historia, hecho este que suele ser frecuente. Así, es relativamente normal encontrar suelos cuyas génesis respondan no a una combinación de factores dentro de un macroclima, sino a macroclimas diferentes.

Por otra parte, dado que los factores formadores también regulan los procesos geomorfológicos de creación del relieve, los suelos estarán íntimamente relacionados con las superficies geomorfológicas sobre las que se desarrollan, por lo que se puede afirmar que la evolución del paisaje está íntimamente relacionada con el desarrollo de los suelos (McFadden y Kneupfer, 1990).

De acuerdo con la teoría bio-resistáxica del medio natural (Erhart, 1955), los procesos de morfogénesis o de creación del relieve (procesos erosivos) están ligados a periodos de resistaxia, mientras que los procesos de edafogénesis están asociados a periodos de biostaxia. Un suelo formado en un determinado periodo de biostaxia podrá o no permanecer en el paisaje dependiendo de la intensidad de los posteriores procesos de resistaxia. Así, Bertrand (1968) estableció dos niveles de intensidad:

a) Uno más intenso, en el que la destrucción de la vegetación y del suelo que la sustenta es total. Como resultado, se crean nuevas superficies sobre las cuales se implantan nuevos procesos de edafogénesis durante el posterior episodio de biostaxia, los cuales serán concordantes con las nuevas condiciones climáticas.

b) Otro menos intenso, cuando el proceso erosivo sólo afecta fundamentalmente a la vegetación y a los primeros centímetros del suelo, permitiendo en muchos casos la conservación del suelo primitivo. En este caso, este suelo actúa de testigo de las condiciones climáticas bajo las cuales se formó, las cuales pueden ser o no diferentes a las que se implanten durante la nueva etapa de edafogénesis o biostaxia.

Estos dos niveles de intensidad se pueden combinar tanto en el tiempo como en el espacio. Así, es posible que a lo largo del tiempo se den episodios con distinta intensidad, de igual forma que también es posible que un mismo episodio muestre distintas intensidades de unas zonas a otras.

Al instaurarse un nuevo episodio de biostaxia, se produce una nueva edafogénesis que actúa tanto sobre las formas erosivas o deposicionales creadas durante el anterior episodio de resistaxia, como sobre los suelos heredados de otro episodio anterior de biostaxia. En el caso de que el nuevo periodo de biostaxia actúe sobre suelos heredados de edafogénesis anteriores, el que se conserven o no los rasgos de la edafogénesis primitiva dependerá de la intensidad del nuevo periodo de biostaxia. Si la nueva edafogénesis es menos intensa que la que dio lugar a esos suelos heredados, independientemente de que los procesos de edafogénesis sean o no los mismos, difícilmente se llegarán a borrar todos los rasgos del suelo heredado; mientras que si la nueva edafogénesis es más intensa, sí se borrarán las características del suelo primitivo.

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, las propiedades del suelo son el resultado de los procesos de edafogénesis que, a su vez, están gobernados por los factores formadores. Por tanto, es posible obtener información sobre las características

del clima bajo el cual se formó un suelo (paleoclima) a partir de los procesos edafogénicos deducidos del estudio de su morfología y propiedades. Este hecho es importante en estudios sobre el Cuaternario, ya que en muchos lugares los suelos representan hiatos en el registro deposicional que pueden constituir el único registro existente de determinados intervalos de tiempo. En concreto, la presencia de suelos puede ser el único indicador de la existencia de periodos de estabilidad del paisaje dentro de los ciclos de erosión y depósito (Blecker *et al.*, 1997). No obstante, antes de realizar cualquier interpretación paleoambiental, es necesario tener la seguridad de que el rasgo o rasgos observados en el suelo han sido el resultado de la actuación de un clima del pasado y no están relacionados con otros factores de formación del suelo.

En los últimos años, el deseo de conocer los cambios climáticos acaecidos en el pasado ha dado lugar a un interés cada vez más creciente a cerca de la Paleoedafología. Recientemente, en 1998, tuvo lugar el Second International Symposium on Paleopedology, cuyo principal objetivo fue tratar de aunar esfuerzos para conseguir elaborar una terminología común en el estudio de los paleosuelos. El término de Paleoedafología fue introducido por Polynov (1927) para el estudio de suelos antiguos, pero hoy día no hay uniformidad entre los autores a la hora de decidir la edad que tiene que tener un suelo para ser considerado un paleosuelo en contraste con un suelo mucho más joven o neosuelo (Reuter, 2000). Para intentar solventar este problema, algunos autores han sugerido establecer un límite de edad mínimo para los denominados paleosuelos, determinado por la última época en la que las condiciones de formación del suelo cambiaron lo suficiente para dar lugar a diferencias considerables en las características del suelo de una zona concreta. Sin embargo, no se ha llegado a un acuerdo sobre dónde emplazar ese límite. Duchaufour (1982) define los paleosuelos como suelos formados antes del último periodo frío del Pleistoceno (el Würm), debido a que los suelos formados en periodos interglaciares contienen a menudo rasgos edáficos relictos diferentes a cualquiera de los debidos a los procesos de edafogénesis acaecidos durante el Holoceno. Por otro lado, en muchas regiones de latitudes intermedias, la época más reciente en la que las condiciones ambientales cambiaron significativamente fue hacia el final del Würm, y esto haría más lógico establecer el límite de edad para los paleosuelos en 10.000 años. No obstante, también hay autores (Catt, 1989; Tarnocai y Valentine, 1989) que han estudiado rasgos edáficos relictos del Holoceno. Con todo esto y debido a la imposibilidad de llegar a un acuerdo general sobre la definición de paleosuelo, Catt (1979) llegó a sugerir incluso que se abandonase el término, aunque esta sugerencia fue del todo impracticable dada la popularidad que este concepto iba adquiriendo. A pesar de la aparente necesidad de establecer un límite de edad definido para los paleosuelos, es importante recalcar que lo más significativo de ellos radica en el hecho de que se trata de suelos cuya evolución está marcada por variaciones en las condiciones de edafogénesis.

Actualmente, el término Paleosuelo (del griego *palaios*, antiguo; del latín *solum*, suelo) se aplica tanto a un suelo formado en un paisaje del pasado (Ruhe, 1956; Yaalon, 1971) como a un suelo formado bajo condiciones ambientales cambiantes, fundamentalmente climáticas, y con cambios asociados en el tipo de vegetación. Estas definiciones incluyen no sólo a los suelos enterrados o fósiles, sino también a los suelos relictos que empezaron a formarse cuando las condiciones de formación eran diferentes a las actuales y que todavía se encuentran lo suficientemente cercanos a la superficie como para seguir evolucionando en el presente (Bronger y Catt, 1989).

De acuerdo con Nettleton (2000), existen tres tipos de paleosuelos, definidos en función de su posición en relación a la superficie sobre la que se encuentran: enterrados, relictos y exhumados. Según Ruhe (1965, 1975), los paleosuelos enterrados son suelos que se formaron sobre paisajes preexistentes pero que fueron después enterrados por sedimentos o rocas más jóvenes. Los paleosuelos relictos son suelos formados también sobre un paisaje preexistente, pero que no han sido enterrado por sedimentos más jóvenes. Los paleosuelos exhumados son aquellos que fueron enterrados pero que han sido de nuevo expuestos en la superficie por erosión de los materiales suprayacentes.

Parece ser que hay uniformidad entre los autores a la hora de considerar lo que se entiende por suelo enterrado. Se trata de un suelo enterrado por sedimentos más jóvenes, lo suficientemente potentes para que cualquier edafogénesis posterior al depósito no lo haya afectado. Esta capa de sedimentos más jóvenes es lo que hace que sean fácilmente reconocibles en el campo. Los paleosuelos enterrados formados bajo las mismas condiciones climáticas pueden ser muy diferentes según el grado de evolución que tuvieran en el momento de su enterramiento, el cual llega a detener los procesos de edafogénesis incluso aunque el depósito sea poco potente (Kraus, 1997). Estos paleosuelos son especialmente útiles a la hora de hacer correlaciones entre las propiedades del suelo y las del medio. Las propiedades de estos paleosuelos han sido fosilizadas por los sedimentos posteriormente depositados encima; pueden haber sufrido cambios secundarios como depósito de hierro, manganeso o carbonato cálcico y la materia orgánica puede haberse oxidado, pero generalmente estos cambios son menores (Gerrard, 1981). No obstante, debido a los cambios diagenéticos tras el enterramiento y a las frecuentes dificultades impuestas por la limitada extensión de exposición de estos suelos, las interpretaciones paleoambientales de los suelos enterrados son a menudo muy problemáticas (Bronger y Heinkele, 1989). Sin embargo, los suelos relictos no presentan estas dificultades, a pesar de que sí hay problemas a la hora de definirlos y reconocerlos.

Los paleosuelos relictos y, especialmente, los exhumados presentan grandes dificultades a la hora de reconocerlos y su identificación se suele realizar a partir de datos geomorfológicos y estratigráficos. Los paleosuelos exhumados sólo se reconocen

claramente cuando se puede constatar una continuidad estratigráfica con un paleosuelo enterrado. A veces, la presencia de suelos muy diferentes situados en la misma posición del relieve puede hacer pensar también en la existencia de suelos exhumados. Los paleosuelos relictos se encuentran sobre paisajes antiguos que han permanecido estables a lo largo del tiempo, sin ser objeto de intensos procesos de erosión desde que comenzara la formación del suelo. Además, se debe constatar la presencia de rasgos o propiedades que no estén claramente relacionados con las condiciones presentes de edafogénesis. Estas propiedades son similares a las de suelos enterrados formados durante el mismo intervalo de tiempo (Catt, 1989).

Un suelo relicto poco evolucionado estará sujeto a la alteración de sus características por subsecuentes edafogénesis más intensas, las cuales borrarán los rasgos de la edafogénesis anterior. Por tanto, los paleosuelos poco desarrollados sólo se pueden identificar cuando se encuentran inmediatamente debajo de depósitos no edafizados. Por el contrario, si un suelo relicto alcanza un alto grado de evolución, las edafogénesis sufridas en posteriores episodios de formación de suelo, si son menos intensas, apenas modificarán sus características primitivas. Como los suelos relictos contienen normalmente rasgos formados durante dos o más periodos de edafogénesis, bajo condiciones ambientales diferentes, se pueden considerar suelos poligenéticos, carácter que también tienen muchos suelos enterrados (Gerrard, 1981).

Retallack (1988, 1990, 2001) propone tres tipos de rasgos para identificar paleosuelos. El primero es la existencia de trazas de raíces. Si están presentes, indican (1) la posición de una antigua superficie, (2) que había vegetación y (3) el tipo de raíces o el tipo de vegetación. En segundo lugar, la presencia de horizontes de suelo y, por último, la presencia de estructuras y rasgos asociados como películas de arcilla. No obstante, lo más útil a la hora de reconocer paleosuelos es constatar la existencia a lo largo de un perfil de rasgos tales como cambios texturales bruscos asociados a diferentes horizontes edáficos de distinta evolución.

Una de las conclusiones del informe emitido por el grupo de estudio sobre el origen y naturaleza de los paleosuelos, tras el 1<sup>st</sup> International Paleopedology Symposium celebrado en Holanda en 1971, fue que la micromorfología es una técnica muy útil, y probablemente esencial, para el estudio de los paleosuelos. Desde entonces, se han publicado muchos trabajos científicos y revisiones sobre la aplicación de la micromorfología para este propósito (Mücher y Morozova, 1983; Kemp, 1985a; Fedoroff *et al.*, 1990; Retallack y Wright, 1990; Kemp *et al.*, 1994). No obstante, tal y como Kemp (1998) sugiere, es necesario revisar continuamente estas aplicaciones sobre el estudio de paleosuelos, en especial en lo que se refiere al muestreo, descripción e interpretación.

Las propiedades del suelo varían en su utilidad a la hora de usarlas como herramientas para realizar interpretaciones paleoclimáticas. Si el suelo ha permanecido en superficie desde el cambio climático, es necesario que las propiedades usadas para descifrar los posibles cambios climáticos hayan persistido en el suelo sin verse alteradas durante siguientes episodios de edafogénesis. Lógicamente, propiedades como el pH o grado de saturación, que se pueden ver modificadas por cambios en las condiciones medioambientales, no pueden ser indicadores de climas pasados. Lo mismo ocurre para los suelos enterrados. En ellos, además, las propiedades adquiridas durante la edafogénesis deben ser resistentes a la alteración diagenética para su utilización en las reconstrucciones paleoambientales.

Las propiedades de los diferentes horizontes de los paleosuelos también se han utilizado para determinar la edad de los suelos (Levine y Ciolkosz, 1983; Harden, 1982; Harrison *et al.*, 1990) y, por ende, para calcular aproximadamente la edad de las superficies sobre las que se forman (Semmel, 1989). Estas determinaciones están basadas en la cuantificación de propiedades que se incrementan con el tiempo, como el espesor del solum, la meteorización de minerales primarios, la iluviación de arcilla, el lavado y acumulación de carbonatos en profundidad (Arkley, 1963), etc. Estas propiedades se combinan en un índice de evolución del suelo que se correlaciona con el tiempo (Harden, 1982). No obstante, para que estas determinaciones se puedan considerar válidas, las condiciones climáticas deben de permanecer relativamente estables a lo largo del periodo de edafogénesis. Es por esto, que este tipo de dataciones se complica en el caso de superficies geomorfológicas que hayan estado sujetas a grandes fluctuaciones climáticas. Tal es el caso de regiones húmedas de latitudes medias y altas, donde los factores medioambientales no han permanecido constantes a lo largo del tiempo. Los cambios climáticos debidos a periodos glaciares-interglaciares durante el Cuaternario y los cambios asociados bióticos, geomorfológicos y sedimentarios, han complicado enormemente las relaciones entre las propiedades de los suelos y el tiempo (Bronger y Catt, 1998).

Los paleosuelos estudiados en esta memoria se encuadran dentro del nombre genérico de Suelos Rojos Mediterráneos. Este ambiguo término fue introducido por geógrafos, que asociaron el clima mediterráneo con un tipo específico de suelos. Así, establecieron el grupo de Suelos Rojos Mediterráneos como el tipo de suelos dominante en la región climática mediterránea (Yaalon, 1997), denominación que, sin embargo, no está justificada en los estudios edafológicos (Eswaran *et al.*, 1995). Es más, estos suelos no son los más abundantes en la zona mediterránea, aunque bien es cierto que son los que presentan características más “peculiares” que han llamado tradicionalmente la atención de investigadores de todo el mundo. En la literatura y mapas antiguos, el término general de Suelos Rojos Mediterráneos, ocasionalmente llamados Terra Rossa, fue ampliamente utilizado para designar a los suelos de esta región. No obstante, la

impropiedad de utilizar un término geográfico para la clasificación de suelos y la gran diversidad de suelos que se encuentran en la región mediterránea, probablemente mayor que en cualquier otra región climática (Ibáñez *et al.*, 1995), provocaron que Mancini (1966) y otros autores propusieran descartar el nombre de suelos mediterráneos de los sistemas de clasificación de suelos. Esta iniciativa fue discutida en la Conferencia sobre Suelos Mediterráneos Españoles celebrada en Madrid en 1966 y, aunque no hubo unanimidad, esta sugerencia ha sido ampliamente aceptada después (Yaalon, 1997).

Aunque los Suelos Rojos Mediterráneos han sido objeto de estudio en cinco Congresos Internacionales, el último de los cuales se celebró en Barcelona en 1999, todavía no existe una definición clara de su concepto. Lo que sí está ampliamente aceptado es que están caracterizados por un color rojo, un hue más rojo que 5YR y croma mayor de 5 (Yaalon, 1997), y por presentarse en regiones mediterráneas. Esta coloración rojiza ha sido atribuida por numerosos autores a los compuestos de hierro liberados por la alteración mineral y fuertemente deshidratados (Torrent *et al.*, 1983; Torrent y Schwertmann, 1987; Boero y Schwertmann, 1987; Schwertmann y Taylor, 1989; Boero y Schwertmann, 1989). No obstante, esta coloración también puede ser debida en ocasiones al material parental, dando suelos litocromos (Guerra, 1972; Blodgett *et al.*, 1993; Yassoglou *et al.*, 1997).

Los Suelos Rojos son típicos de las regiones de clima mediterráneo, localizadas en latitudes medias (30°-40°) bordeando las costas y extendiéndose raramente más allá de unos cientos de kilómetros tierra adentro. En general, estas regiones están limitadas por los desiertos de latitudes bajas y por las franjas templadas-húmedas de latitudes medias. El clima mediterráneo se caracteriza por inviernos húmedos y frescos y veranos cálidos y secos. Típicamente, se presenta en las regiones que rodean el Mar Mediterráneo, pero también en la costa central de California, Chile central, algunas áreas del sur y suroeste de Australia y en la zona más meridional de Suráfrica. El concepto de clima mediterráneo engloba un amplio abanico de condiciones climáticas (Papadakis, 1980). De hecho, la temperatura media anual varía entre 10°C y 20°C, existiendo un fuerte contraste entre las temperaturas estivales e invernales. Desde el punto de vista del suelo, no es la precipitación total anual el parámetro más importante (de 200 a 1000 mm, e incluso 2000 mm en las zonas de alta montaña), sino su distribución estacional. La precipitación invernal triplica a la estival. Este fuerte contraste estacional de la precipitación da lugar a que el suelo permanezca seco durante el verano, a menudo durante varios meses, y sirve de base para definir el régimen de humedad xérico (del griego *xeros*, seco) (Soil Survey Staff, 1999). Este régimen de humedad, típico de climas mediterráneos, viene determinado por la duración del periodo seco. En concreto, "la sección control del suelo, en años normales, se encuentra seca en todas partes durante 45 ó más días consecutivos en los 4 meses que siguen al solsticio de verano, y se encuentra húmeda en todas partes durante 45 ó más días consecutivos en

los 4 meses que siguen al solsticio de invierno". Además, en años normales, "la sección control del suelo permanece húmeda en alguna de sus partes durante más de la mitad de los días acumulados por año en los que la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm de la superficie es superior a 6°C ó durante 90 ó más días consecutivos en los que la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm es superior a 8°C. La temperatura media anual del suelo es inferior a 22°C y los valores medios de las temperaturas de verano e invierno difieren en 6°C ó más a una profundidad de 50 cm de la superficie o hasta un contacto dénsico, lítico o paralítico si se encuentre a menor profundidad". Por tanto, el régimen de humedad xérico se encuentra entre los regímenes de humedad údico (del latín *udus*, húmedo) y arídico o tórrido (del latín *aridus*, seco, y *torridus*, cálido y seco), regímenes que también se pueden dar en regiones mediterráneas. En cuanto al régimen de temperatura, estos suelos presentan un régimen méxico (temperatura media anual entre 8° y 15°C) o térmico (temperatura media anual entre 15° y 22°C) (Soil Survey Staff, 1999).

Los Suelos Rojos Mediterráneos se desarrollan sobre una amplia variedad de materiales litológicos, típicamente materiales sedimentarios pero también metamórficos e ígneos. En concreto, en España aparecen sobre cualquier tipo de material geológico, excepto aquellos cuyas propiedades físicas frenan su formación (impermeabilidad o descarbonatación impedidas). Esta diversidad litológica y las distintas propiedades físicas, fisico-químicas y condiciones de formación y sedimentación, ocasionan también una amplia diversidad de relieves donde es posible encontrar estos suelos. Cada tipo de material geológico condiciona un tipo de relieve en el que estos suelos se presentan más o menos erosionados, apareciendo tanto en zonas montañosas como en valles terciarios, penillanuras, mesetas y cuencas fluviales. Suelos de este tipo se han descrito a distintas alturas, desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1500 m de altitud. Los tipos de vegetación que pueden soportar son muy variados debido a la dependencia que la vegetación, como factor formador, tiene con el clima general, la naturaleza del material original y la topografía. No obstante, el papel de la vegetación en la génesis de estos suelos es limitada (Guerra, 1972).

El proceso de iluviación de arcilla, que da lugar al desarrollo de un horizonte de diagnóstico árgico, es el principal proceso de formación de la mayoría de los Suelos Rojos Mediterráneos. Este horizonte árgico se hace más arcilloso y rojo conforme aumenta la edad del suelo (Heilman, 1972; Bornand, 1978; Remmelzwaal, 1978, 1979; Cremaschi, 1987). Basándonos en la presencia de este horizonte árgico, el perfil más característico de los Suelos Rojos Mediterráneos sería del tipo A-E-Bt-C o A-Bt-C, siendo este último el más frecuente dada la facilidad con la que estos suelos aparecen erosionados, bien por agentes atmosféricos o bien por su puesta en cultivo.

Los Suelos Rojos Mediterráneos se desarrollan típicamente sobre superficies geomorfológicamente estables y siempre lo suficientemente antiguas como para que los procesos de edafogénesis que han dado lugar a estos suelos hayan tenido el tiempo suficiente para desarrollar ampliamente el perfil hasta su estado de madurez. Está ampliamente aceptado que la mayoría de ellos se formaron mucho antes de el Holoceno y, por tanto, han estado expuestos a lo largo de su evolución a diversas fluctuaciones climáticas (Fedoroff, 1997; Yaalon, 1997). El hecho de que estos suelos aparezcan en zonas en las que actualmente no se dan las condiciones climáticas apropiadas para su formación, en especial las condiciones de precipitación, ha hecho que numerosos autores los consideren paleosuelos policíclicos, cuya evolución posterior dependerá de las direcciones del cambio climático (Guerra, 1972).

El término de Suelos Rojos Mediterráneos no se incluye en las clasificaciones modernas de suelos. No obstante, se puede establecer una correspondencia entre ellos y las clasificaciones de suelos más utilizadas en la actualidad (Tabla 1.1). La mayoría de los autores encuadran a los Suelos Rojos Mediterráneos dentro de los grupos de los Luvisoles según la clasificación de la FAO (1998) y de los Alfisoles según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), basándose en la característica principal de que posean un horizonte de diagnóstico subsuperficial árgico. No obstante, los Suelos Rojos Mediterráneos en los que no se ha producido el proceso de iluviación de arcilla, generalmente suelos poco o medianamente evolucionados, muestran horizontes B que sólo cumplirían los requisitos de un horizonte cámbico (Cambisoles según la FAO, e Inceptisoles según la Soil Taxonomy).

En el sistema de clasificación de la FAO (1998), los Suelos Rojos Mediterráneos se corresponden fundamentalmente con los Grupos de suelos de los Luvisoles y Alisoles, que presentan un horizonte árgico con una capacidad de intercambio catiónico igual o superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y una saturación en bases  $>50\%$  en el caso de los Luvisoles y  $<50\%$  en los Alisoles. En zonas donde el clima es más árido, se pueden presentar Calcisoles lúvicos, caracterizados por poseer un horizonte cálcico con un horizonte árgico calcáreo a techo y, raramente, Gypsisoles lúvicos, con un horizonte gypsico y un horizonte árgico impregnado de yeso. En lugares con una cobertura vegetal densa o en zonas de umbría, el desarrollo de un epipedón móllico permite encontrar Kastanozems o Phaeozems lúvicos, caracterizados por presentar un horizonte árgico y diferenciándose ambos grupos de suelos en que tengan o no concentraciones de carbonato cálcico secundario, respectivamente.

Tabla 1.1. Tipos de suelos de las clasificaciones de la FAO (1998) y de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) que se corresponden principalmente con los Suelos Rojos Mediterráneos.

	<i>Grupos de suelos</i>	<i>Unidades menores</i>	
<b>FAO (1998)</b>	Luvisoles*	Varias	
	Alisoles	Varias	
	Calcisoles	Lúvicos	
	Gypsisoles	Lúvicos	
	Phaeozems	Lúvicos	
	Kastanozems	Lúvicos	
<b>Soil Taxonomy (1999)</b>	<i>Orden</i>	<i>Suborden</i>	<i>Grandes Grupos</i>
	Alfisoles*	Xerals*	Rhodoxerals* Palexerals* Haploxerals*
		Udalfs	Paleudalfs Rhodudalfs Hapludalfs
		Argids	Petroargids Paleargids Gypsiargids Calciargids Haplargids
	Mollisoles	Calcids Gypsids	Petrocalcids Argigypsids
		Xerolls	Palexerolls Argixerolls
		Udolls	Paleudolls Argiudolls
		Albolls	Argialbolls

\* los más frecuentes

En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), los Suelos Rojos Mediterráneos se corresponden principalmente con el Orden de los Alfisoles, caracterizados por poseer un horizonte árgico y una saturación en bases del 35% ó

mayor. Fundamentalmente, se clasifican en el Suborden de los Xeralfs, por ser el régimen de humedad xérico el característico del clima mediterráneo. Dentro de estos, los Grandes Grupos más frecuentes son los Rhodoxeralfs (con un hue en el horizonte árgico de 2,5YR o más rojo y un value en húmedo de 3 ó menor), los Palexeralfs (con un horizonte petrocálcico o con un horizonte árgico potente con un cambio textural brusco en su límite superior) y los Haploxeralfs (otros Xeralfs con un horizonte árgico poco potente). No obstante, dadas las variaciones pluviométricas que se producen en el clima mediterráneo, es posible el desarrollo de otro tipo de suelos rojos:

- En zonas de alta montaña donde las precipitaciones son más abundantes, la presencia de un régimen de humedad údico permite el desarrollo de suelos pertenecientes al Suborden de los Udalfs. Dentro de estos, los Grandes Grupos más característicos son los Paleudalfs (con un solum potente en el que el contenido en arcilla no decrece en más de un 20% respecto del contenido máximo dentro de los primeros 150 cm), los Rhodudalfs (con un solum menos potente que el anterior y con un hue en el horizonte árgico de 2,5YR o más rojo y un value en húmedo de 3 ó menor) y los Hapludalfs (otros Udalfs con un horizonte árgico poco potente).

- En zonas mediterráneas con régimen de humedad arídico, se corresponden con el Orden de los Aridisoles, principalmente dentro del suborden de los Argids, caracterizados por tener un horizonte árgico dentro de los 100 primeros centímetros. Los Grandes Grupos más característicos son los Petroargids (con horizonte petrocálcico), Paleargids (con un cambio textural brusco o una distribución de arcilla que no decrece significativamente), Gypsiargids (con un horizonte gypico dentro de los 150 primeros centímetros), Calciargids (con un horizonte cálcico bajo el horizonte árgico), y Haplargids (sin ningún otro horizonte de diagnóstico subsuperficial distinto de un horizonte árgico poco potente). También es posible encontrar suelos clasificados como Petrocalcids (Calcids con horizontes árgico y petrocálcico) y, en muy raras ocasiones, Argigypsid (Aridisoles con horizontes gypico o petrogypico y árgico).

- Bajo una cobertura vegetal densa o en zonas de umbría, se encuentran suelos pertenecientes al Orden de los Mollisoles, caracterizados por poseer un epipedón móllico. Se corresponden con los Subórdenes de los Xerolls, con un régimen de humedad xérico (Palexerolls, con un horizonte árgico potente en el que la arcilla decrece lentamente con la profundidad, y Argixerolls, con un horizonte árgico delgado en el que el porcentaje de arcilla decrece rápidamente con la profundidad) y de los Udolls, con un régimen de humedad údico (Paleudolls, con un horizonte árgico potente o profundo en el que la arcilla decrece lentamente con la profundidad, y Argiudolls, con un horizonte árgico relativamente delgado o en el que el porcentaje de arcilla decrece rápidamente con la profundidad). En las raras ocasiones en las que el horizonte árgico conservara a techo un horizonte álbico, dado el frecuente proceso de erosión al que se ven sometidos estos suelos, se clasificarían dentro del Suborden de los Albolls (Argialbolls).

La única clasificación de suelos que utilizaba las características del clima mediterráneo como criterio diferenciador es la propuesta por Duchaufour (1982), en la que los Suelos Rojos Mediterráneos se corresponden con los llamados Suelos Fersialíticos. Estos suelos se desarrollan bajo un clima (húmedo) mediterráneo y sobre un amplio abanico de materiales, presentando un horizonte árgico y una capacidad de intercambio catiónico de  $25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla (arcillas tipo 2:1). Además, algunos sistemas de clasificación nacionales de varios países, como Israel o Italia, siguen utilizando el término de Terra Rossa para designar a los Suelos Rojos formados a partir de calizas endurecidas (Yaalon, 1997).

Este tipo de suelos alcanza una amplia representación en el territorio español, lo que unido a sus particulares características y al hecho de que su génesis esté ligada a unas condiciones climáticas relictas diferentes a las actuales, ha motivado que hayan sido objeto de numerosos estudios.

Los trabajos sobre Suelos Rojos en España fueron iniciados por Guerra y Monturiol en el año 1954. De ahí en adelante, los Suelos Rojos han sido estudiados en distintas regiones por diversos autores: González (1962, 1963, 1971) en el Valle del Guadalquivir, García y Forteza (1964) en el Valle del Duero, Sánchez y Artés (1966) en el sureste español, Alías y Pérez (1969a, 1969b), Alías *et al.* (1969) en Granada. Es de destacar el estudio de Guerra (1972) sobre Suelos Rojos españoles y su clasificación. Otros trabajos, son los de Torrent (1976) en terrazas fluviales del norte de España, Alías y Albaladejo (1978a, 1978b) en el sureste español, Bech y Vallejo (1984) en la depresión central catalana, e Ibáñez *et al.* (1987, 1988a, 1988b, 1989) en el Sistema Central. Alcalá y Monturiol (1988) estudian la variabilidad de los diferentes tipos de Suelos Rojos en España, Benayas *et al.* (1991) describen paleoprocesos edáficos en superficies pliocuaternarias del centro de España y Ortiz *et al.* (1993) y Fernández *et al.* (1994) estudian la mineralogía y génesis de algunos de estos suelos en el sureste de España. Otros estudios más recientes son los de Aguilar *et al.* (1993, 1995) en Granada, Bech *et al.* (1993, 1995) en Cataluña, Dorronsoro y Alonso (1993) y García y Santos-Francés (1993) en Salamanca, Roquero *et al.* (1993), en el Sistema Central, Delgado *et al.* (1994) en Jaén, Santos-Francés y García (1995) en Salamanca, García Giménez *et al.* (1995) en el páramo de Madrid, Faz (1997) en la Sierra de Carrascoy (Murcia), Schulte y Julià (1999) en la Cuenca de Vera (sureste español), Roquero *et al.* (1999) en la cuenca de Madrid, Temsamani-Mirabet *et al.* (1999) en el Complejo Bético-Mogrèbide y García *et al.* (2000) en Extremadura.

En general, los Suelos Rojos son el resultado de la actuación de cuatro procesos básicos: meteorización, lavado, iluviación y rubefacción.

*Meteorización*

La génesis de cualquier suelo mineral comienza por la desagregación física (meteorización física) y alteración de los minerales primarios (meteorización química) del material original. La meteorización química está ligada a la presencia de agua en el suelo, que actúa como agente de transporte de las sustancias químicas producto de las distintas reacciones, y a la temperatura, que regula la velocidad de dichas reacciones químicas. Esta estrecha dependencia hace que el proceso de meteorización sea tanto más intenso cuanto mayor sea la precipitación y la temperatura.

Como consecuencia del proceso de meteorización química, se produce la liberación a la solución del suelo de constituyentes que anteriormente estaban formando parte de las estructuras minerales. La dinámica posterior de estos constituyentes estará condicionada por su propia naturaleza y por las características del medio de alteración. Esta liberación de sustancias al medio será tanto más elevada cuanto más intenso sea el proceso de meteorización química, por lo que las características cuantitativas y cualitativas de este proceso pueden ser estimadas a partir de la cantidad y calidad de los productos de alteración. Otro resultado de este proceso es el incremento de la fracción arcilla (argilización), que crece en proporción directa a su intensidad. El pequeño tamaño de partícula de esta fracción ( $<2\mu$ ) hace que sean muy susceptible a la alteración química, por lo que el tipo, proporción y origen de los minerales de la arcilla, es sumamente útil a la hora de valorar los aspectos cualitativos y cuantitativos del proceso de meteorización.

De acuerdo con lo anterior, las particularidades del proceso de meteorización pueden ser estimadas a partir del incremento de la fracción arcilla, la proporción de sus distintos minerales, la cantidad y forma de los constituyentes liberados en el proceso, etc. Así, en los suelos rojos, la fuerte argilización (con valores de arcilla que superan el 35% del total de la tierra fina) y liberación de hierro (el hierro libre puede llegar a alcanzar el 90% del hierro total) que se produce en los horizontes B indican que han sufrido un intenso proceso de meteorización química y que, por tanto, se han formado bajo unas condiciones climáticas relativamente cálidas y húmedas. Por otro lado, la elevada cristalinidad de la mayor parte del hierro libre revela la existencia de intensos periodos de desecación durante o posteriormente al proceso de meteorización.

Asimismo, el bajo contenido en materia orgánica de los horizontes B y la gran evolución de los compuestos húmicos, indican un intenso proceso de mineralización y humificación atribuibles a una elevada actividad biológica y, por ello, a condiciones climáticas nuevamente cálidas y húmedas. No obstante, en ocasiones se presentan contenidos en materia orgánica mucho más elevados debido a la intervención de un proceso de empardecimiento actual (Duchaufour, 1977), resultado de condiciones

climáticas claramente diferentes (más frías y/o secas) que las que debieron dar lugar a estos suelos.

### *Lavado*

Las condiciones de elevada humedad requeridas para la génesis de estos suelos también se reflejan en el proceso de descarbonatación del solum, en el caso de que se desarrollen sobre material carbonatado, y en el incremento en caolinita que suele producirse en la fracción arcilla.

La descarbonatación, unida a la disminución de las bases en la solución del suelo, son requisitos previos para la formación de estos suelos. Ambos procesos requieren una elevada cantidad de agua de drenaje libre, es decir, un clima húmedo. Además, la descarbonatación precisa que el agua lleve disuelta una elevada cantidad de CO<sub>2</sub> necesaria para la transformación del carbonato cálcico relativamente insoluble en bicarbonato cálcico soluble. Este dióxido de carbono tendría su origen más probable en la elevada actividad biológica y mineralización de la materia orgánica que, igualmente, invocarían condiciones de alta temperatura y humedad.

Aunque sería de esperar que la elevada humedad diera lugar a un fuerte lavado de bases y a la intensa desaturación del complejo de cambio, la mayoría de los Suelos Rojos presenta un pH neutro o cercano a la neutralidad y una saturación del complejo de cambio superior al 50%. Este hecho ha sido explicado por algunos autores (Lamouroux, 1971) mediante un ciclo biogeoquímico muy activo que mantuviese un alto contenido en bases en los horizontes superficiales, o bien por la existencia de un periodo seco que hiciese ascender por capilaridad parte de las bases que hubieran percolado por lavado. Ambos procesos podrían tener lugar consecutivamente en un clima cálido y húmedo con periodos de desecación. Sea cual sea el mecanismo que permite la permanencia de las bases en estos suelos, lo cierto es que los Suelos Rojos suelen ser menos ácidos que los suelos pardos desarrollados sobre el mismo tipo de roca (Duchaufour, 1977; Terreros, 1985).

En relación a la mineralogía de la fracción arcilla, la elevada proporción de caolinita, neoformada (Benayas *et al.*, 1991) o de transformación (García González y Aragonese, 1991), que suele darse en los horizontes Bt de estos suelos (Espejo, 1985; 1986; Espejo *et al.*, 1991) es indicativa de un medio abierto y lavado con una relación Si:Al de 1:1. En ocasiones, la esmectita también ha sido citada como mineral predominante en algunos de estos suelos, siendo en ese caso reflejo de medios relativamente confinados, con alto contenido en bases, en los que se darían síntomas de hidromorfia (Benayas *et al.*, 1991; Espejo *et al.*, 1991).

## *Iluviación*

Los suelos evolucionados en las superficies estudiadas en esta memoria deben sus principales rasgos morfológicos y gran parte de sus propiedades físicas y químicas a la actuación de este proceso, generalizado con mayor o menor intensidad en todos ellos. Por esta razón, la iluviación de arcilla se considera como el proceso más representativo de estos suelos.

El proceso de iluviación de arcilla constituye el aspecto del suelo que probablemente haya suscitado mayor atención a lo largo de la historia de la edafología. Esto se ha puesto de manifiesto por la existencia de numerosas e interesantes revisiones acerca de este tema (Brewer, 1968; McKeague y Arnaud, 1969; Brewer y Sleeman, 1970; Fedoroff, 1973; Soil Survey Staff, 1975; Arnold, 1979; Eswaran, 1979; Buol, 1980; Isbell, 1980; McKeague, 1983; Avery, 1985; Bullock y Thompson, 1985; Stoops y Eswaran, 1986; Dorronsoro y Aguilar, 1988; Fedoroff, 1997).

Este proceso se manifiesta por la existencia de una acumulación de arcilla a una determinada profundidad en el perfil. Este hecho está justificado fundamentalmente por la acción de las aguas de infiltración que arrastran parte de la arcilla de los horizontes superiores y la depositan en las zonas más profundas. No obstante, además de la traslocación, el incremento de la arcilla en el horizonte B también ha sido atribuido a una o más de las siguientes causas: discontinuidad textural del material original, formación de arcilla por alteración in situ, síntesis a partir de la solución del suelo, concentración relativa por eliminación de los carbonatos, destrucción química de la arcilla en el horizonte superficial y pérdida de arcilla por arrastre lateral superficial.

En la translocación de sustancias se distinguen dos procesos: uno inicial, de movilización y pérdida de materiales de los horizontes superficiales (eluviación), y otro posterior, de deposición e inmovilización con ganancia de sustancias en determinados horizontes subsuperficiales más o menos profundos (iluviación). El conjunto de los dos procesos, referido exclusivamente a los filosilicatos de la fracción arcilla del suelo y siendo el agua el medio de transporte, recibe el nombre de ilimerización.

El agua de precipitación moviliza a la arcilla de los horizontes superficiales y esta, al dispersarse, pasa a la solución del suelo en forma de suspensión. Para que se produzca la dispersión de arcilla, es necesario la ausencia de estructura que se producirá cuando los cationes presentes en la solución del suelo sean insuficientes para unir entre sí todas las partículas negativas (arcilla, limo y materia orgánica), quedando las más finas dispersas en la solución del suelo y moviéndose con ella. Es por esto que este proceso se ve favorecido por el lavado de los cationes coagulantes, especialmente divalentes, y por un incremento de la fracción arcilla. Ambos procesos se darán

conjuntamente bajo un clima relativamente húmedo, que favorezca el fuerte lavado de las bases coagulantes, y cálido, que permita una fuerte meteorización y formación de arcilla.

Por la acción de la gravedad, las suspensiones de arcilla se infiltran en profundidad a través de los macroporos y cuando llegan a una zona desecada, el agua de las suspensiones es succionada por los microporos de las zonas circundantes. Las paredes de los macroporos actúan como filtros, puesto que las partículas de arcilla no son capaces de atravesar los microporos, quedando retenidas y concentradas en forma de delgadas películas acuosas rodeando las paredes de los macroporos. Cuando la totalidad del agua del macroporo es succionada, las partículas de arcilla quedan aplastadas sobre sus paredes, dando lugar a finas películas con las partículas dispuestas paralelamente entre sí y paralelas a su vez a las paredes del poro. Este proceso se repite en una siguiente fase de humectación, formándose así periódicas películas de arcilla cada vez más espesas. Estas películas han recibido el nombre de córtanes de arcilla, por su naturaleza, e iluviales, por su origen (Brewer, 1964). De igual forma, al entrar el agua de las suspensiones en el interior de los agregados estructurales, va depositando sobre su superficie a las partículas de arcilla, formando también arcilanes de iluviación que recubren los agregados.

En el proceso de ilimerización se han establecido dos fases (Fedoroff, 1973; Jamagne y Jeason, 1978), que pueden actuar sucesivamente. La primera fase, la iluviación primaria o normal, se presenta sobre suelos formados sobre materiales poco consolidados, bien drenados, en medios débilmente humíferos, neutros o débilmente ácidos y biológicamente activos. Si las características climáticas son las adecuadas, las partículas de arcilla se unen al hierro formando complejos estables que pueden migrar conjuntamente a capas más profundas, dando lugar a ferriarcilanes de colores rojizos o amarillentos. La segunda fase, secundaria o hidromórfica, que se puede dar directamente o como consecuencia de la primera, se caracteriza por una drástica reducción de la porosidad al rellenarse completamente los poros del suelo debido a la acumulación de arcilla. Como consecuencia, la estructura comienza a degradarse y van apareciendo propiedades hidromórficas, el medio se acidifica progresivamente y disminuye la actividad biológica. Se provoca una cierta reducción, con la consiguiente transformación del hierro férrico en ferroso que, dado su mayor solubilidad, se separa de la arcilla. Ahora la arcilla se compleja con la materia orgánica, formando complejos muy estables que pueden migrar a zonas mucho más profundas que en la fase anterior. Esta fase se caracteriza por la presencia de arcilanes de color blanco o gris verdoso, más heterogéneos, con bastante limo y materia orgánica, que dificultan la orientación de las partículas de arcilla.

De la génesis anteriormente descrita, se deduce que el proceso de iluviación de arcilla requiere que el suelo pase por fases de humedad lo suficientemente intensas como para que el agua de gravedad se infiltre en el perfil y favorezca el fuerte lavado de los cationes coagulantes, así como unas condiciones cálidas que permitan una fuerte meteorización y formación de arcilla. Además, es necesario que también se produzcan períodos de sequedad que permitan la desecación de los macroporos de los horizontes subsuperficiales. Conjuntamente con estos requerimientos climáticos, la roca tiene que suministrar suficiente cantidad de arcilla, el suelo ha de ser lo suficientemente poroso como para permitir la libre circulación de las suspensiones y, dado que este proceso se desarrolla muy lentamente en el tiempo, las superficies que soportan a estos suelos han de ser geomorfológicamente estables y suficientemente antiguas.

### *Rubefacción*

Es un proceso por el cual el suelo adquiere una coloración rojiza, asociada a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, más o menos deshidratados. Los compuestos de hierro liberados durante el proceso de meteorización química de los minerales, incluidos los oxihidróxidos de hierro, precipitan en forma de ferrihidritas poco cristalizadas o hematites de grano muy fino ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), recubriendo las partículas de arcilla y de granos más gruesos. Es importante recalcar que la goethita (marrón) no puede transformarse directamente en hematites (rojo) pero la ferrihidrita sí (Yaalon, 1997). Las cantidades de estos oxihidróxidos de hierro, generalmente determinadas como  $\text{Fe}_d$  mediante la extracción con ditionito, son pequeñas pero, sin embargo, le confieren al suelo ese color rojizo característico, incluso con un contenido inferior al 3% de  $\text{Fe}_d$ . Por ello, la rubefacción implica: a) una fuerte meteorización química que dé lugar a una elevada proporción de hierro libre (clima relativamente cálido y húmedo); b) una fuerte deshidratación del hierro (marcada estación seca); y c) una elevada mineralización de la materia orgánica de forma que esta no proteja al hierro de la deshidratación y no enmascare el color rojo (clima relativamente cálido y húmedo).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, tanto las características morfológicas como analíticas de los Suelos Rojos Mediterráneos ponen de evidencia que su desarrollo tuvo que producirse bajo condiciones climáticas relativamente cálidas y húmedas, con una estación seca marcada. Esto los convierte en suelos zonales, cuya génesis está regulada fundamentalmente por el clima.

Los paleosuelos estudiados en esta memoria cumplen los requisitos anteriores y la mayoría de ellos presentan acumulaciones fuertemente calcáreas. En la actualidad, la práctica totalidad de los investigadores está de acuerdo en que para que tenga lugar un proceso de iluviación de arcilla en materiales calcáreos es necesario que se produzca un proceso previo de descarbonatación. A este le seguiría la fase de iluviación propiamente

dicha y en estos suelos rojos, tan abundantes en el área mediterránea, un proceso de rubefacción que también podría ser simultáneo al proceso de iluviación (Aguilar *et al.*, 1986). Dorronsoro y Aguilar (1988) estudian suelos con abundante iluviación de arcilla en el interior de horizontes fuertemente calcáreos y encuentran que esta iluviación ha estado siempre asociada a suelos que en algún momento han sufrido decapitaciones de una parte importante del perfil. Por ello, concluyen que la ilimerización dentro de suelos altamente calcáreos ha de ser atribuida a suelos policíclicos, en los que los arcilanes iluviales incluidos en la matriz calcárea son el resultado del desarrollo de una segunda fase de iluviación de arcilla.

## 2. Antecedentes

A escala mundial, el clima es el factor formador que fundamentalmente dirige la implantación de los grandes procesos edafogénicos y, con ellos, la distribución y propiedades de los suelos. La Cuenca Mediterránea, a lo largo de su historia, ha conocido diferentes episodios climáticos que han quedado reflejados en la evolución de sus superficies y en los suelos desarrollados sobre ellas. Al mismo tiempo, su latitud condicionó episodios morfogenéticos menos intensos que en el resto de Europa y permitió la conservación de parte de estas superficies y de sus suelos. Es por ello que el estudio de los suelos de cada una de estas superficies sea tan importante a la hora de reconstruir tanto las condiciones climáticas que dieron lugar a su formación como los cambios climáticos que sufrieron a lo largo de su historia.

La Depresión de Granada, por sus especiales características geomorfológicas, ha permitido la conservación de superficies sobre las cuales se formaron paleosuelos que fueron enterrados o que han permanecido en superficie hasta nuestros días. Estos paleosuelos han sido estudiados por diversos autores (Comisión Organizadora del V<sup>th</sup> International Working Meeting on Soil Micromorphology, 1977, en el Llano de la Perdiz; Ortega y Aguilar, 1980, en Dúrcal; Aguilar *et al.*, 1981, en Otura; Simón *et al.*, 1993a, sobre superficies de edades comprendidas entre el Mioceno Superior y el Pleistoceno), concluyendo todos ellos que se trata de suelos antiguos, con elevado grado de evolución, cuya génesis está ligada a periodos cálidos y húmedos que alternaron en el tiempo con periodos menos edafizantes. Delgado *et al.* (1990) abordan el estudio de un suelo fersialítico de la Formación Alhambra, haciendo énfasis en la distribución en el perfil de las fases mineralógicas y concluyendo que es posible la formación de caolinita y esmectita en la actualidad.

En las altas cotas de Sierra Nevada, se ha detectado la presencia de suelos rojos muy evolucionados y asociados a las zonas de interfluvios, poco afectadas por los episodios morfogenéticos glaciares (Sánchez Gómez, 1990). Asimismo, en sedimentos lagunares se han descrito suelos rojos por debajo de los depósitos glaciares (Simón *et al.*, 1996). Martín-García *et al.* (1997) estudian la naturaleza de las micas dioctaédricas de un Haploxeralf Ultico en Sierra Nevada, cuya evolución cristalocímica consideran simultánea a la evolución edáfica. Otros estudios sobre la mineralogía de suelos rojos en Sierra Nevada se pueden encontrar en los trabajos de Martín-García *et al.* (1998) y Martín-García *et al.* (1999).

Durante el Cuaternario, las relaciones suelo-geomorfología de diversos sectores de Sierra Nevada (Granada-Almería) han puesto de manifiesto la existencia de un mínimo de cuatro episodios morfogenéticos glaciares-periglaciares, cuyas intensidades

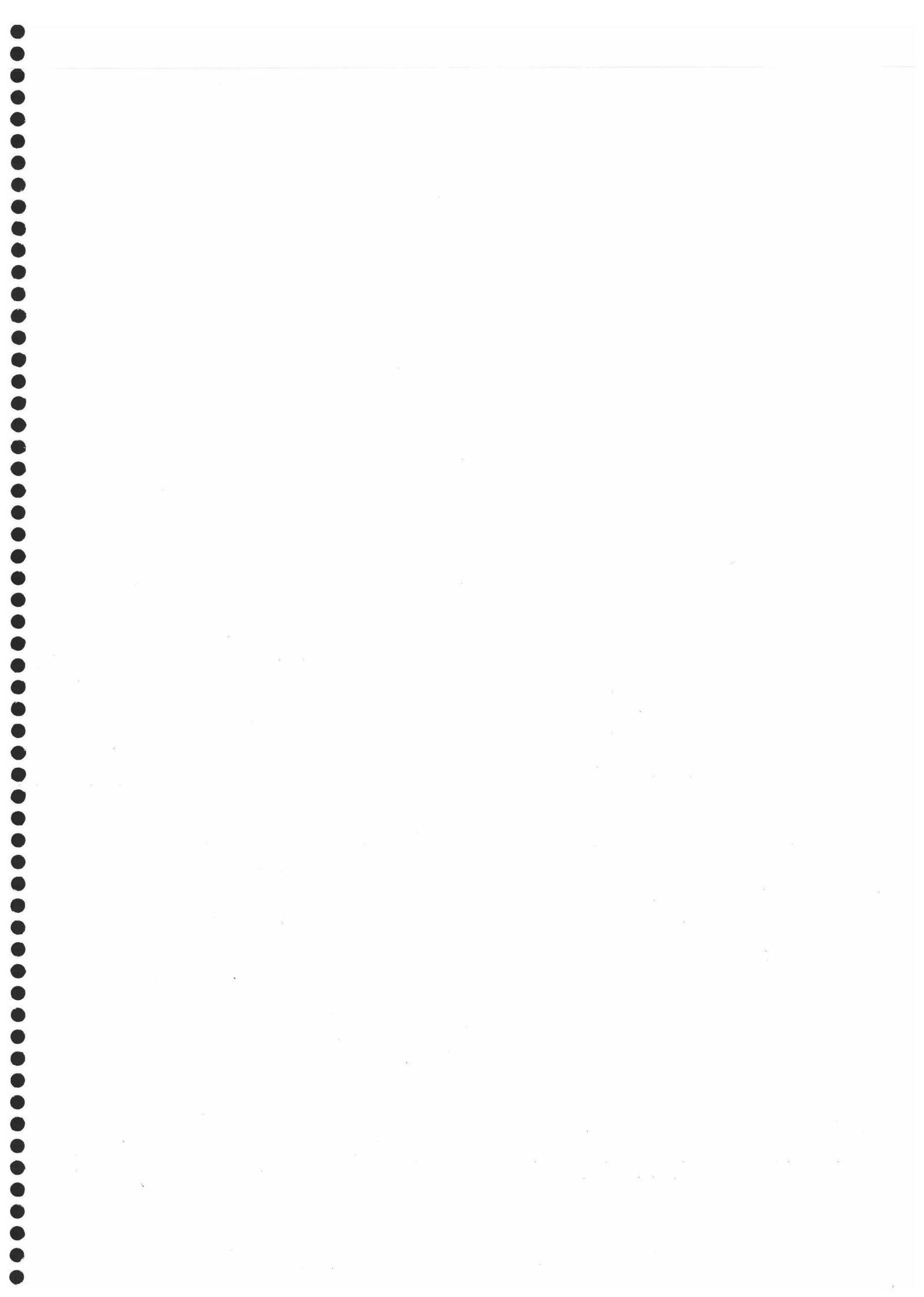
decrecen progresivamente en el tiempo (Sánchez *et al.*, 1988; Simón *et al.*, 1989; Simón *et al.*, 1992; Simón *et al.*, 1993b). Entre los episodios morfogenéticos se intercalaron episodios edafogenéticos en los que se desarrollaron suelos cuyo grado de evolución decrece igualmente en el tiempo (Simón *et al.*, 1996). Estos hechos estarían ligados a un progresivo cambio climático, tanto en los episodios morfogenéticos como edafogenéticos, hacia condiciones presumiblemente más frías y/o más secas al acercarse hasta nuestros días.

Martín Peinado (1994) estudia suelos rojos de los sectores de Sierra Nevada y Sierra Morena, concluyendo que estos suelos se desarrollaron sobre superficies muy antiguas cuyas edades datan, como mínimo, de la transición Plio-Pleistoceno; mientras que en superficies más jóvenes, los suelos rojos desaparecen y en su lugar se desarrollan suelos pardos. Asocia estos suelos rojos a suelos relictos cuya formación debió de estar ligada a unas condiciones climáticas distintas de las que rigen el actual episodio edafogenético. Esto se opone a la idea expresada por Martín-García (1994) en su extenso estudio sobre la génesis de los suelos rojos de Sierra Nevada, en el que concluye que estos suelos se pueden formar actualmente en este macizo montañoso, enmarcados en el proceso de la fersialitización.

Simón *et al.* (2000) abordan el estudio de doce suelos formados sobre superficies preglaciares y depósitos glaciares de varias edades. Los suelos se distribuyen en cuatro sectores de Sierra Nevada, en los que el material original en todos los casos está formado por micaesquistos. Distinguen dos grupos de suelos bien diferenciados: a) suelos de aproximadamente 85.000 años (principios del Pleistoceno terminal), con horizontes Bt muy desarrollados, de color rojo, textura arcillosa, abundantes cútanos de arcilla y con alto contenido en caolinita; b) suelos de edad inferior a 15.000 años (Pleistoceno terminal-Holoceno), con horizontes Bw menos evolucionados, de color marrón, sin evidencias de iluviación de arcilla y bajo contenido en caolinita. El grado de desarrollo de este último grupo de suelos es menor a medida que la superficie sobre las que se encuentran es más joven. Concluyen que la diferenciación macromorfológica de los suelos, el contenido en arcilla y hierro libre ( $Fe_d$ ) y, especialmente, los índices de acumulación de arcilla y óxidos de hierro, aumentan con la edad de la superficie. No encuentran suelos de edad intermedia, entre 85.000 y 15.000 años, aparentemente debido al episodio frío que tuvo lugar en este intervalo de tiempo, que habría limitado la meteorización química y la edafogénesis. Estos autores apuntan igualmente que, en Sierra Nevada, se han preservado algunas superficies de edad superior a los 85.000 años, probablemente formadas durante el periodo glacial del Riss (Hempel, 1960; Messerli, 1965; Lhenaff, 1977), pero sus suelos están muy erosionados y no pueden utilizarse para hacer estudios de las relaciones suelo-tiempo.

Al contrario que en Sierra Nevada, en los depósitos de abanicos aluviales de la Depresión de Granada sí se conservan superficies estables y suelos de principios del Pleistoceno, además de superficies no estables sobre las cuales se han ido alternando a lo largo del Pleistoceno Medio y Superior episodios sucesivos de depósito alternados con episodios de edafogénesis.

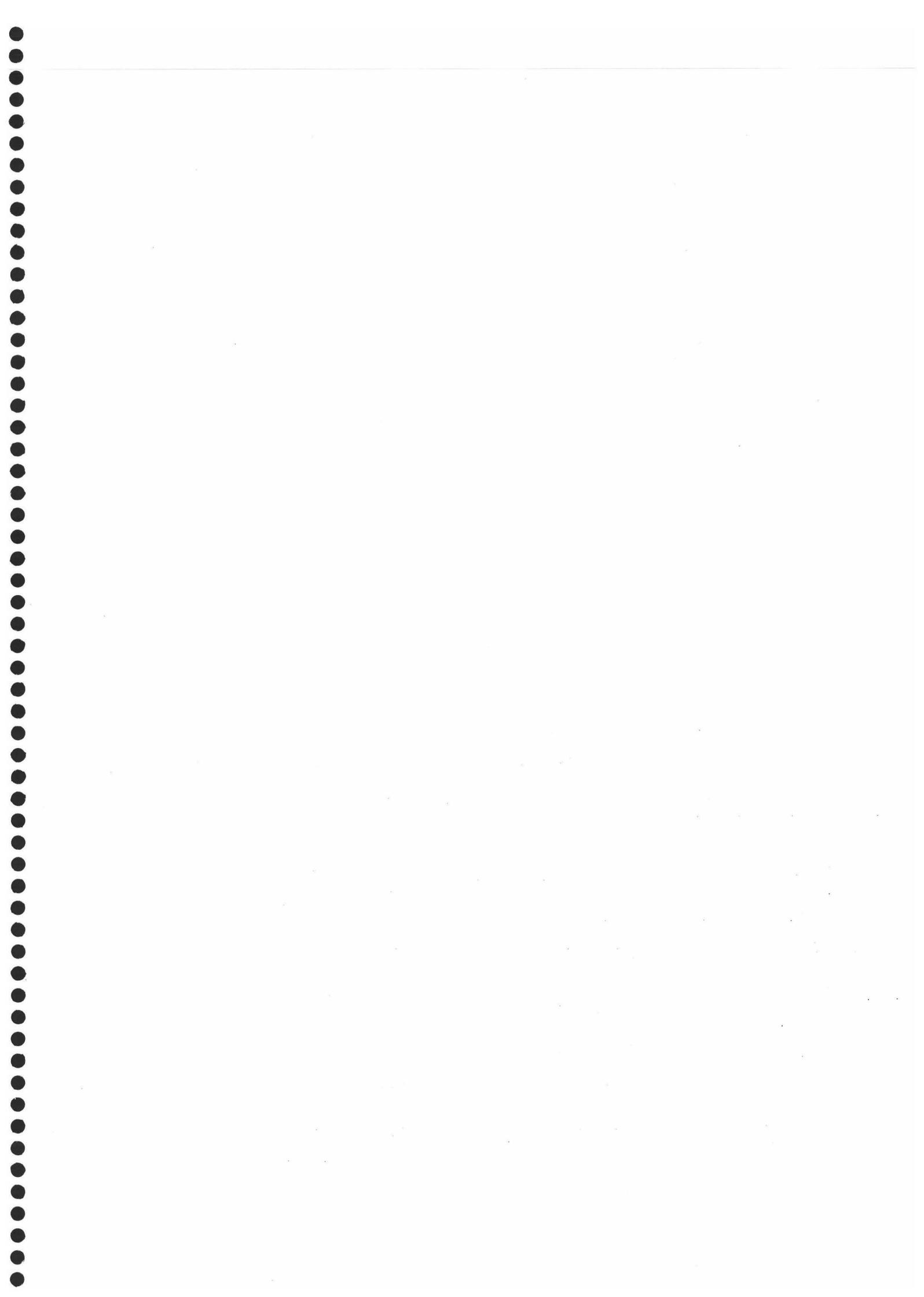
En este contexto, Günster *et al.* (2001) y Günster y Skowronek (1998, 2001) estudian en la Depresión de Granada secuencias alternantes de sedimentos-suelos que ponen de manifiesto los posibles cambios climáticos habidos durante el Plioceno y el Cuaternario. Sugieren que ha habido periodos húmedos con desarrollo de edafogénesis interrumpidos por periodos secos marcados por la erosión y deposición de materiales. El análisis de las propiedades de los suelos les lleva a pensar que hubo un clima mediterráneo? subtropical en esta zona desde comienzos del Plioceno, con episodios menos húmedos durante el Plioceno Medio-Superior y finales del Pleistoceno y más húmedos en la transición Plio-Pleistoceno.



### 3. Objetivos

Al igual que los depósitos estratigráficos son utilizados para la reconstrucción paleogeográfica de los episodios morfogenéticos o erosivos, el estudio de paleosuelos puede ser empleado para las reconstrucciones paleoambientales de los episodios edafogenéticos o de estabilidad. Ambos tipos de episodios, al intercalarse en el tiempo, permiten que los estudios estratigráficos y edáficos se complementen a la hora de la reconstrucción paleoambiental. En nuestra zona han sido ampliamente estudiadas las fases morfogenéticas, pero la información a cerca de las fases edafogenéticas es todavía escasa. Esta laguna es la que pretendemos cubrir con este estudio.

El objetivo fundamental de este trabajo es estudiar las características físicas, químicas, fisicoquímicas, macro y micromorfológicas, así como la mineralogía de la fracción arcilla, de diversos paleosuelos desarrollados en la Depresión de Granada y en Sierra Nevada desde finales del Mioceno que, por sus especiales rasgos geomorfológicos, han permitido la conservación de estos suelos. Estos datos se utilizarán para interpretar los procesos de edafogénesis que dieron lugar a la formación de estos suelos e inferir las condiciones ambientales reinantes durante su génesis. Así, este estudio permitirá establecer la evolución paleoambiental de la Depresión de Granada desde finales del Mioceno hasta la actualidad.



## **4. Localización y Factores formadores**

### **4.1. Localización de la zona de estudio**

Desde el punto de vista geográfico, los suelos estudiados se localizan en la Depresión de Granada, en el sector centro-oriental de Andalucía, y están comprendidos en las Hojas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 n° 19-41 (1009) “Granada” (ALM, COL y HG), n° 19-42 (1026) “Padul” (OT) y n° 19-43 (1041) “Dúrcal” (DUR y NIG). Sólo el suelo SN-1, muestreado en Sierra Nevada, se ubica fuera de esta zona, dentro de la Hoja del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 n° 20-42 (1027) “Güejar-Sierra”. Todos estos mapas están realizados por el I.G.M.E. En la Figura 4.1 se puede ver con más detalle el ámbito de la zona y puede usarse de referencia en el estudio de los factores.

### **4.2. Geología**

La Cordillera Bética constituye, junto con el Rif del norte de Marruecos, la cadena alpina más occidental y ambas forman los dos mayores sistemas montañosos que rodean el Mediterráneo Occidental. Esta cordillera ocupa una franja en el sur y sudeste de España de aproximadamente 600 km de largo y 200 km de ancho y está constituida por varios dominios importantes: las Zonas Externas, las Zonas Internas, el Complejo del Campo de Gibraltar y las cuencas Neógenas (Sanz de Galdeano y Vera, 1992).

Esta formación montañosa es el resultado de la colisión intracontinental bajo régimen transcurrente de dos elementos esenciales: el Paleomárgen Ibérico Sudoeste, constituido por materiales sedimentarios del Mesozoico y Terciario Inferior (Zonas Externas), y el bloque de Alborán (Zonas Internas), que se desplazó hacia el oeste-sudoeste desde posiciones más orientales. Las Zonas Externas están subdivididas en Zona Subbética y Zona Prebética. Ambas contienen generalmente rocas sedimentarias marinas, pero la Zona Subbética muestra facies más pelágicas y la Zona Prebética sedimentos marinos más someros (Sanz de Galdeano y Vera, 1992). Las Zonas Internas están formadas por la superposición de tres Complejos tectónicos: Nevado-Filábride, Alpujarride y Maláguide. Los Complejos Nevado-Filábride y Alpujarride están constituidos por rocas sedimentarias o metamórficas de grado medio o bajo del Precámbrico, Paleozoico y, especialmente, del Triásico. El Maláguide corona la estructura y está formado por rocas no metamórficas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

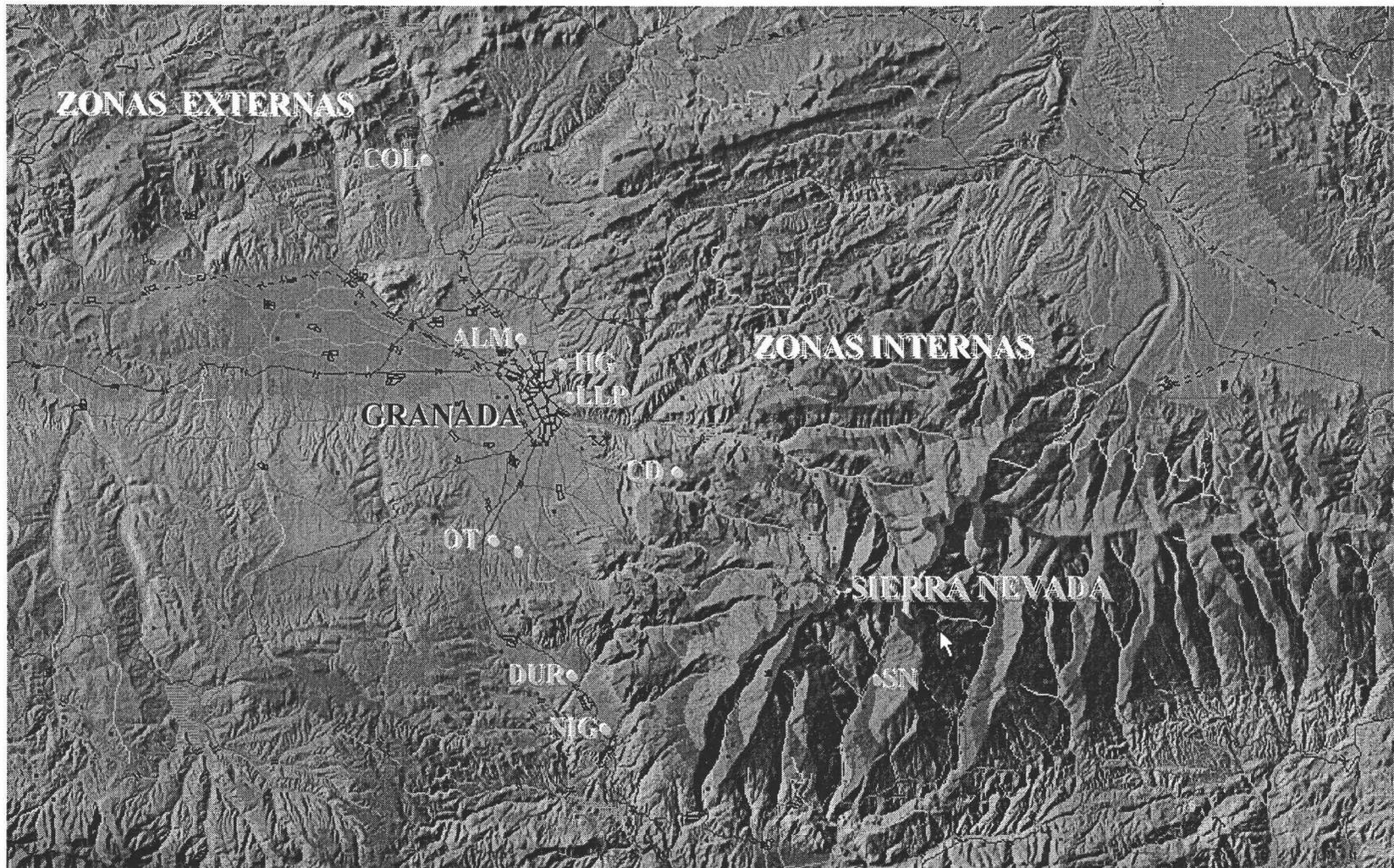


Figura 4.1. Localización de la zona de estudio y situación de los sectores donde se han muestreado los suelos.

El Complejo Nevado-Filábride está formado, de muro a techo, por:

1. El Manto del Veleta, que presenta una composición bastante uniforme de micaesquistos feldespáticos y grafitosos, con cloritoides y biotitas, incluyendo niveles más o menos potentes de cuarcitas, anfíbolitas, serpentinitas y epidotitas (Pérmico y Trías inferior).
2. El Manto del Mulhacén, constituido fundamentalmente por micaesquistos feldespáticos y anfíbolíticos, con distena, estaurolita, cloritoides y granates, con niveles de mármoles con granate, mármoles conglomeráticos y metacineritas, anfíbolitas y serpentinitas (Díaz de Federico y Puga, 1980).

El Complejo Alpujárride comprende un cierto número de mantos de corrimiento superpuestos unos a otros. Todas las rocas alpujárrides se pueden clasificar en dos grandes formaciones litológicas: una formación detrítica basal y una formación carbonatada suprayacente. Se pueden distinguir tres unidades litoestratigráficas, todas ellas afectadas por metamorfismo de grado creciente conforme se pasa a rocas más antiguas:

1. Una formación inferior, constituida esencialmente por metapelitas más o menos grafitosas, generalmente micaesquistos, de coloraciones oscuras y formadas esencialmente por cuarzo, mica incolora, biotita, granate y grafito. Entre los micaesquistos se encuentran algunas intercalaciones cuarcíticas, generalmente de pequeñas potencias, y de otros materiales (Paleozoico).
2. Una formación constituida por metapelitas de mayor o menor grado de metamorfismo, generalmente filitas, constituidas esencialmente por cuarzo, micas incoloras y clorita. Presenta intercalaciones lenticulares de cuarcitas irregularmente distribuidas y, por lo general, de pocos decímetros de espesor y, eventualmente, de rocas piroclásticas (Pérmico y Trías Inferior).
3. Otra superior, constituida casi totalmente por calizas y dolomías fuertemente recristalizadas y localmente enriquecidas con yeso, afectadas en mayor o menor grado por los procesos de metamorfismo del ciclo alpino (Trías Medio y Superior) (Fontboté *et al.*, 1980).

El Complejo Maláguide que no está representado en nuestra zona de estudio, está constituido por tres unidades tectónicas (IGME, 1988), formadas por:

1. Pizarras, areniscas (grauvacas), calizas y conglomerados, de edad Silúrico-Carbonífero.
2. Pelitas, areniscas y conglomerados rojos, asignadas al Pérmico-Trías Medio.
3. Dolomías de estratificación gruesa datadas del Trías Superior.

**Sierra Nevada**, la elevación montañosa más importante de la zona de estudio, forma parte de las Zonas Internas y en ella afloran rocas de los Complejos Nevado-Filábride y Alpujárride. El conjunto orográfico de la sierra constituye un vasto domo

integrado por una serie de mantos de corrimiento superpuestos, en cuya parte central, desmantelada por la erosión, afloran las unidades más profundas del Complejo Nevado-Filábride. El núcleo cristalino, que es donde se instaló el glaciario, está constituido por el Manto del Veleta, unidad que ocupa la posición más baja en el edificio estructural y que aparece como una gran ventana tectónica. Cabalgando esta unidad se encuentra el Manto del Mulhacén, que la rodea por completo y de la que quedan numerosos islotes sobre los materiales del Manto del Veleta. El Complejo Alpujárride aflora en los bordes de Sierra Nevada, rodeando el Complejo Nevado-Filábride.

Discordantes con los materiales alpujárrides y de carácter postorogénico, se encuentran los materiales neógenos. En general se trata de depósitos miocénicos conglomeráticos arenosos con limos y arcillas. Sobre estos materiales, en clara discordancia erosiva, se depositan otros materiales detríticos muy heterométricos que constituyen la denominada Block Formation (Von Drasche, 1879), también llamada Formación de Torrente (Lhenaff, 1965) o Formación de Pinos Genil (González Donoso, 1967). Con este nombre se alude a unos afloramientos conglomeráticos de origen continental que se interpreta como depósitos de abanicos aluviales. Su edad no está bien establecida pero la presencia de un Tortoniense Superior en la base (Rodríguez Fernández, 1982) y de un Tuoliense Inferior y medio en los niveles de techo (Dabrio *et al.*, 1978; Dabrio y Ruiz-Bustos, 1979) permiten asignarlos al Mioceno Superior. Litológicamente, está constituida fundamentalmente por conglomerados de cantos metamórficos procedentes del núcleo de Sierra Nevada, normalmente redondeados y de 5-15 cm de diámetro, de matriz areno-limosa muy rica en micas, entre los que se intercalan frecuentemente niveles lenticulares de arena con estratificaciones cruzadas y niveles detríticos más finos (arenas, areniscas, limos, margas y arcillas). De acuerdo con Ortega-Huertas *et al.* (1979), la asociación mineral está formada por moscovita, paragonita, clorita, caolinita y montmorillonita. Del mismo modo, deducen que la Block Formation tiene un carácter fundamentalmente heredado, con ausencia de diagénesis y de transformaciones químicas significativas. Por lo general, los conglomerados son de aspecto desorganizado pero se pueden observar cicatrices poco continuas que marcan una difusa estratificación. En las áreas alejadas de los relieves circundantes, es frecuente la presencia generalizada de canales con estratificaciones cruzadas y secuencias positivas. El área fuente es de composición bastante uniforme, si bien el tipo de transporte y el depósito de estos materiales no fue regular ni homogéneo, sino que correspondió a un régimen torrencial (González Donoso, 1967; Sanz de Galdeano, 1976; Dabrio *et al.*, 1978; Ortega-Huertas *et al.*, 1979). La observación de los distintos niveles que forman la Block Formation conduce a la idea de un depósito condicionado por transporte fluvial de gran energía, que pudo corresponder perfectamente a un régimen de arrollada, rítmico, en el que los materiales se depositan en diferentes avalanchas (Ortega-Huertas *et al.*, 1979). Por la distribución de sus afloramientos y por el hecho de que se observan acúñamientos laterales se puede deducir que no se formó a

partir de una sola corriente de agua, sino que fueron varias. Parece claro que esta formación corresponde a un periodo en el que la inestabilidad tectónica fue muy acusada.

En la transición Plio-Pleistoceno, aparecen formaciones aluviales de entre las que destaca la llamada Formación Alhambra (Aguirre, 1957). Está constituida por un depósito conglomerático de tipo debris flow, formado por materiales metamórficos y carbonatados procedentes de los Complejos Nevado-Filábride y Alpujárride, y presenta la peculiaridad de conservar un suelo rojo a techo. Las facies sedimentológicas más típicas en áreas próximas a los relieves circundantes consisten en conglomerados desorganizados, con cantos de hasta 1,5 m de diámetro y frecuentes amalgamaciones. En áreas más alejadas de los relieves, las secuencias presentan un predominio de facies canalizadas con una generalizada tendencia granodecreciente a techo. Estas secuencias positivas se integran en otras megasecuencias estrato y grano decrecientes a techo, que terminan con episodios de desarrollo de suelos. Una interpretación general del conjunto permite diferenciar unas facies proximales y otras intermedias, de uno o varios abanicos aluviales, que migrarían lateralmente, originando las megasecuencias antes descritas.

El metamorfismo que afecta al Complejo Nevado-Filábride es polimetamórfico, polifásico y plurifacial. Díaz de Federico y Puga (1980) lo dividen en: un metamorfismo prealpino, consistente en metamorfismo regional y posterior metamorfismo de contacto; y un metamorfismo alpino, con varias fases de metamorfismo regional. Por su parte, los materiales del Complejo Alpujárride fueron afectados, en mayor o menor grado, por los procesos de metamorfismo del ciclo alpino, sin excluir que pudieran haber sido afectadas anteriormente por procesos metamórficos prealpinos, cuyas correspondientes paragénesis podrían haber quedado obliteradas por la edad alpina (Fontboté *et al.*, 1980).

Los eventos tectónicos más importantes de Sierra Nevada son alpinos, pero durante el Neógeno experimentó grandes deformaciones que contribuyeron a su levantamiento y configuraron su actual relieve. Esto es especialmente evidente en su borde occidental, donde se presentan numerosas fallas con desplazamiento normal que dieron como resultado un levantamiento de la Sierra inscrito dentro de un contexto compresivo de dirección N-S, con extensión prácticamente perpendicular. Las etapas de este levantamiento de alrededor de 3500 m serán descritas más adelante.

El contacto entre el Paleomárgen Ibérico Sudoeste y el bloque de Alborán constituye una sutura compleja que actuó bajo régimen transgresivo durante el Mioceno Inferior y Medio. Sobre esta sutura se generaron, hacia el comienzo del Mioceno Superior, un conjunto de cuencas o depresiones, de las que la Depresión de Granada es una de las más grandes y características (Rodríguez-Fernández *et al.*, 1989).

La **Depresión de Granada** es una cuenca intramontañosa, situada entre las Zonas Internas y Externas de la Cordillera Bética (sur y sudeste español) y formada con posterioridad a la etapa de plegamiento principal. Se extiende unos 60 km de este a oeste y unos 40 km de norte a sur y está rellena por materiales neógenos y cuaternarios que ocultan parte del contacto entre las Zonas Internas y Externas. Los materiales de base en la parte N-NO están relacionados con las Zonas Externas y son materiales sedimentarios mesozoicos y terciarios. Las Zonas Internas limitan la parte E-SE de la Depresión y están formadas por los complejos Nevado-Filábride y Alpujárride que, generalmente, presentan materiales metamórficos de grado medio y alto del Paleozoico y Triásico, así como materiales del Mioceno Inferior y Medio. Sus límites están controlados por sistemas de fallas NW-SE, NNE-SSW y E-W, que fueron los responsables no sólo de la formación de la cuenca en su conjunto sino también de la creación de distintos sectores subsidentes con gran espesor de sedimentos.

En conjunto, la Depresión de Granada se puede interpretar como el resultado del movimiento durante el Mioceno de una serie de bloques en distintas fases, con distintas intensidades y no necesariamente de forma sincrónica. Sus límites actuales no coinciden con los iniciales. En un principio, la cuenca era mucho más extensa pero las fallas marginales, funcionando durante el Cuaternario, facilitaron el desmantelamiento de las zonas periféricas. Así, las zonas que establecían la continuidad entre la Depresión de Granada y otras cercanas se fueron erosionando, si no completamente, sí al menos en parte. La actual cuenca puede dividirse en una serie de sectores (Norte, Nororiental, Suroriental, Occidental y Central), determinados por variaciones del medio de sedimentación que se reflejan en cambios litológicos más o menos considerables según los sectores (González-Donoso, 1968).

La gran variedad de áreas fuente de sedimentación, así como la falta de sincronización y diferencia de magnitud de los movimientos que han afectado a la cuenca, son los responsables de la heterogeneidad, tanto horizontal como vertical, de los materiales de la Depresión de Granada. Los materiales sedimentarios más antiguos corresponden al Tortoniense Inferior mientras que los más recientes se han datado del Pleistoceno Medio (Ruiz Bustos *et al.*, 1990). Durante el Holoceno y probablemente también durante el Pleistoceno Superior, los procesos de erosión y sedimentación han estado relacionados con el sistema fluvial actual (Viseras y Fernández, 1992).

Los distintos autores consultados parecen estar de acuerdo en que el relleno de la depresión se inició en el Serravalliense-Tortoniense y, a partir de entonces, los depocentros se fueron desplazando progresivamente hacia el norte; de forma que, a partir del Turolense terminal, la sedimentación se produjo sobre todo en la mitad norte de la depresión. Dicha sedimentación estuvo gobernada por la tectónica de los bordes y la existencia de focos subsidentes (ocupados por lagos), alineados según el accidente

Cádiz-Alicante. En este contexto, durante el Turolense terminal-Pleistoceno, los sistemas de drenaje de las sierras que bordeaban la Depresión, alimentados abundantemente por materiales, desarrollaron formaciones aluviales que hacia el centro de la cuenca conectaron con unidades lacustres, a las que nutrieron de sedimentos detríticos. Las características de estas formaciones difieren por su litología, tipo y organización de facies y localización. Así, mientras en los bordes norte, noreste y sureste se desarrollan orlas de abanicos aluviales, los depósitos de ríos braided están ampliamente distribuidos al sur de las zonas lacustres (Fernández y Soria, 1986-1987).

### *Sedimentología*

En el relleno de la Depresión de Granada se puede constatar un ciclo sedimentario transgresivo-regresivo desde el Tortoniense Superior hasta el Cuaternario (Rodríguez-Fernández, 1982). Según Fernández *et al.* (1996), desde el punto de vista estratigráfico se pueden distinguir seis secuencias deposicionales: las dos más antiguas (Tortoniense) se corresponden con el relleno durante la fase de sedimentación marina, la tercera (Tortoniense Superior) representa la transición marino-continental, y las otras tres (post-Tortoniense) resultan de la sedimentación continental.

La secuencia deposicional I (Tortoniense inferior) constituye el relleno de la paleogeografía irregular que existía después de las primeras fases de creación del relieve e individualización, con lo que presenta grandes variaciones en cuanto a espesor. La asociación sedimentaria más representativa está formada por rampas carbonatadas con depósitos de calcarenitas bioclásticas en las áreas más someras y margas foraminíferas dentro de la cuenca.

La secuencia deposicional II (Tortoniense superior) está formada por margas en el centro de la cuenca que hacia el margen sur cambian a abanicos deltaicos. El límite inferior es una discontinuidad que, desde el punto de vista sedimentario, está marcada por un cambio abrupto en la polaridad de sedimentación, que implica el paso de una regresión a una transgresión marina. En la parte superior, la comunicación con el mar abierto se fue restringiendo, dando lugar así a un aumento de temperatura en la cuenca y un cambio en las condiciones paleoecológicas. Así, se produjo la aparición de las primeras formaciones arrecifales que colonizaron las zonas más superficiales de los abanicos deltaicos.

La secuencia deposicional III (límite Tortoniense-Messiniense) se enmarca dentro de una bajada eustática que condicionó la ascensión de áreas marginales. Se reconoce una asociación de facies (Dabrio *et al.*, 1982) que, desde los márgenes al centro de la cuenca, está constituida por: abanicos aluviales relacionados con el drenaje de Sierra Nevada y Sierra Arana, representados por conglomerados que cambian

distalmente a arenas; una llanura lutítica con desarrollo de estromatolitos mineralizados por celestina; y una zona de cuenca marina somera con depósitos de selenita en las zonas marginales y halita en el centro.

Hacia el final del Tortoniense Superior se produjo la continentalización de la cuenca por medio de una bajada eustática que condicionó una reestructuración tectónica, caracterizada por la expansión de la cuenca y la migración de los depocentros. Esta reestructuración se asoció con la actividad de sistemas principales de fallas y con el ajuste isostático que implicó el levantamiento de Sierra Nevada y su plegamiento, dentro del contexto de compresión NNW-SSE (Sanz de Galdeano, 1983; Fernández *et al.*, 1991). Durante la continentalización, el relleno de la cuenca fue marcadamente asimétrico, con sus ejes longitudinales cercanos al margen norte y coincidiendo con las áreas de sedimentación lacustre. La estratigrafía, a partir de este momento, es el resultado del apilamiento de las secuencias deposicionales IV, V y VI.

La secuencia deposicional IV está representada por materiales del Turolense Superior-Ventense y presenta grandes variaciones de espesor, con acúñamientos generalmente hacia el centro de la cuenca. La secuencia deposicional V implica una extensión en relación con la secuencia deposicional IV y data aproximadamente del Plioceno Inferior. Los depocentros de la secuencia anterior se acentúan y migran hacia el norte, recalando así su asimetría. Finalmente, la secuencia deposicional VI, que también se caracteriza por una expansión, tiene un volumen de materiales considerablemente menor aunque ocupa un intervalo de tiempo similar, la mayoría del Plioceno Superior y el Pleistoceno.

La organización interna de estas secuencias deposicionales es el resultado de la interrelación de varios sistemas deposicionales (Viseras, 1991):

- El sistema longitudinal originado en Sierra Nevada, representado por depósitos de abanicos aluviales que cambian distalmente a depósitos fluviales de características diferentes según su ubicación (Fernández y Soria, 1986-87; Fernández *et al.*, 1989).
- Los sistemas de drenaje transversales de las Zonas Internas y Externas. El sistema transversal interno desarrolla sistemas fluviales de baja sinuosidad, con importantes canales conglomeráticos y amplias llanuras de inundación. El sistema transversal externo se desarrolla sobre abanicos deltaicos lacustres y abanicos aluviales con una evolución longitudinal considerablemente menor (Fernández y Dabrio, 1983; Fernández *et al.*, 1991).
- El sistema lacustre, representado por diferentes subambientes de sedimentación fluvio-lacustre (Arribas *et al.*, 1988) y coincidente con el sistema longitudinal y con los ejes paleogeográficos de la cuenca.

El contexto más común durante este relleno continental fue la compresión nort-sur y la actividad de sistemas de fallas NW-SE, NNE-SSW y N70E, con movimientos verticales y el levantamiento isostático de Sierra Nevada. La actividad tectónica de los márgenes y las fluctuaciones en el nivel lacustre fueron los factores que controlaron la arquitectura estratigráfica resultante. Desde el Pleistoceno Superior en adelante, los procesos de erosión y sedimentación estuvieron relacionados con la actividad de la red fluvial actual, con depósito de materiales aluviales. Una formación aluvial de singular importancia en la Depresión de Granada es lo que se ha denominado Vega Baja. Está íntimamente relacionada con la actividad del río Genil y representa una acumulación con más de 250 m de espesor de depósitos en una zona deprimida y actualmente subsidente según un eje NW-SE. Hacia esta Vega Baja discurren los afluentes del río Genil, con pequeño desarrollo de depósitos aluviales. En el conjunto de estas formaciones se puede diferenciar un máximo de tres niveles de terrazas entre 4 y 20 m de altura respecto a los cauces.

#### *Etapas de creación del relieve*

A comienzos del Tortonense, la Cordillera Bética experimentó una relevante transgresión marina que dio lugar al depósito de los sedimentos tortonienses sobre el anterior substrato de bajo relieve. Durante el Tortonense Superior, se produjo un importante levantamiento en Sierra Nevada y fue entonces cuando el núcleo Nevado-Filábride de la Sierra Nevada se erosionó fuertemente, depositándose así los materiales de la Block Formation.

La Block Formation descansa sobre los sedimentos tortonienses, aunque localmente también lo hace sobre el basamento Alpujarride. Aparece en los bordes de los sectores norte, noreste y sureste de la Depresión de Granada. Durante el depósito de esta formación, en la Depresión de Granada y zonas adyacentes se produjo una regresión que marcó el paso desde la sedimentación marina a la sedimentación continental (Dabrio y Ruiz-Bustos, 1979). Esto indica que el anterior levantamiento, muy importante en Sierra Nevada, también afectó a otras zonas de forma menos patente. Los sedimentos messinienses en la Depresión (de 6,5 a 5,3 Ma) están formados por materiales de grano fino, fundamentalmente constituidos por margas y carbonatos lacustres, indicando así un periodo de quietud tectónica.

Durante el Plioceno, se produjo una nueva etapa de levantamiento (Estévez y Sanz de Galdeano, 1983) que probablemente dio lugar al depósito, a comienzos de Pleistoceno, de nuevos materiales detríticos gruesos procedentes de Sierra Nevada. Estos materiales están especialmente representados por la Formación Alhambra en la Depresión de Granada y por los depósitos del suroeste de Sierra Nevada, en el sector del Padul. A partir de este nuevo levantamiento, Sierra Nevada se fue progresivamente

extendiendo e incorporando los anteriores sectores marginales de las cuencas circundantes.

Hacia el Pleistoceno Inferior (Medio?) tuvo lugar un tercer evento de creación y reorganización del relieve. Las zonas bajas del borde de Sierra Nevada se levantaron y se incorporaron a las zonas marginales de la Sierra, con la consiguiente erosión atestiguada por la creación de amplios abanicos aluviales. Este evento está registrado en el borde occidental de Sierra Nevada, donde, desde el Tortoniense hasta el Plioceno, sólo se habían depositado materiales procedentes del Complejo Nevado-Filábride. Después de este tercer levantamiento, esta área comenzó a aportar sedimentos de grano grueso ahora constituidos fundamentalmente por materiales alpujárrides. Estos materiales procedían de los nuevos afloramientos del Complejo Alpujárride, situados en la franja occidental de Sierra Nevada, que ahora habían sido expuestos a la erosión. Tal es el caso del abanico aluvial de La Zubia, de edad no conocida exactamente pero, en cualquier caso, posterior a la Formación Alhambra. En ese momento, los materiales procedentes del Complejo Nevado-Filábride se drenaban principalmente hacia el sur, en el área de Nigüelas-Dúrcal.

Estos levantamientos descritos han ido produciendo un fuerte encajamiento de la red fluvial durante el Cuaternario, dando lugar al desarrollo en algunos casos de cañones de hasta 550 m de profundidad, probablemente excavados hacia el Pleistoceno Medio?-Pleistoceno Superior. Este proceso de encajamiento continúa en la actualidad.

En resumen, el actual relieve de Sierra Nevada, construido durante un periodo de aproximadamente ocho millones de años, no constituye un proceso continuo sino que ha estado controlado por pulsos de levantamiento tectónico separados por etapas de quietud tectónica.

Además de los levantamientos anteriormente descritos, en el borde occidental de Sierra Nevada se han producido importantes desplazamientos verticales condicionados por fallas, con saltos de hasta 800 m como la falla de Dúrcal-Nigüelas. Esto ha marcado el desarrollo de zonas subsidentes que, a lo largo del Cuaternario, han sufrido una alternancia de episodios de depósito de materiales procedentes de la erosión de Sierra Nevada con episodios de desarrollo de suelos. Así, en zonas adyacentes a la localidad de Nigüelas, es posible reconocer paleosuelos enterrados por paquetes conglomeráticos de naturaleza metamórfica y de espesor variable, de forma que estas series contienen el registro de gran parte de las alternancias de episodios de erosión-depósito y edafogénesis acaecidas durante el Cuaternario.

### 4.3. Relieve

#### 4.3.1. Depresión de Granada

A grandes rasgos, se pueden distinguir tres tipos de relieves estrechamente relacionados con la naturaleza de los materiales que constituyen el substrato e influenciados por su estructura geológica: el relieve de la Vega, los relieves erosivos y las elevaciones.

Los materiales que ocupan la zona de Vega, caracterizados por la acumulación de materiales aluviales recientes, abarcan una gran extensión morfológicamente llana comprendida entre las cotas de 530 y 760 m, ocupando un área aproximada de 100 km<sup>2</sup>. Estos materiales superan en algunos puntos los 250 m de espesor. En la Vega de Granada se puede diferenciar dos unidades, denominadas Vega Alta y Vega Baja. La primera se configura en una gran banda que circunda a la segunda y está formada principalmente por los materiales detríticos que forman amplios conos de deyección de edad atribuible al Pleistoceno Superior (Lhenaff, 1979) y que muestran una suave pendiente hacia el curso del río Genil. La unidad de la Vega Baja está formada por los sedimentos ligados al río Genil, que configuran una superficie plana con un suave desnivel del 4% según la dirección del río. Estos materiales se configuran en diferentes terrazas fluviales indiferenciadas que han quedado totalmente desmanteladas por las prácticas agrícolas. Dentro de esta unidad, son de destacar dos hechos importantes. Por un lado, la presencia de zonas endorreicas que podrían corresponder a extintos medios palustres y, por otro lado, la existencia de un polo de subsidencia actualmente activo y cuyo funcionamiento data desde el Tortonense, como el que aparece próximo a la confluencia entre el río Genil y Monachil, lo que explicaría las anomalías de la red de drenaje del borde este de la depresión.

Los relieves predominantemente erosivos afectan a sedimentos terciarios y/o cuaternarios, sobrepasando los 1.200 m con pendientes altas y medias. El tercer tipo de relieve lo constituyen pequeños macizos montañosos situados en el interior y en los bordes de la Depresión, formados por materiales tanto paleozoicos como mesozoicos, que configuran los parajes más escarpados.

En rasgos generales, el relieve se configura desde la Depresión de Granada, elevándose suavemente hasta enlazar con las sierras. Como relieves más destacables cabe mencionar: al noroeste la Sierra de Moclín; al nordeste, Sierra Arana; en el centro, Sierra Elvira; y en el borde oriental, un conjunto que comprende la Sierra de Alfacar y Víznar, la Sierra de la Yedra, la Sierra de Cogollos y Sierra Nevada. El tránsito entre los relieves y la Depresión se realiza por medio de glacis y lomas suaves que enrasan con las vertientes calizas de dichas sierras a una altitud media de unos 900 m. Sólo a la

entrada de la Depresión y al pie de los relieves más acusados, el encajamiento de los ríos ha disectado los materiales circundantes, quedando zonas elevadas, en algunos casos a más de mil metros, en las proximidades de las sierras.

Como relieve más destacado en la parte occidental resalta la Sierra de Moclín, de pendientes escarpadas aunque no alcanza alturas excesivas (1.307 m). Hacia el este se pasa de forma progresiva a los pasillos naturales de los ríos Frailes, Colomera y Cubillas. Este tránsito se realiza mediante un paisaje colinado y disectado por las vegas de los ríos anteriores. Al sur de dicha sierra aparecen colinas con relieves más marcados, aunque no se pierden las morfologías onduladas. Este paisaje se continúa con descensos progresivos de altura hasta enlazar con la Vega.

En Sierra Arana se alcanza la cota de mayor altitud de la Depresión (Collado del Espino, 1.741 m). Este relieve carbonatado presenta en algunos puntos pendientes muy escarpadas que enlazan con importantes piedemontes y glacis muy afectados por la red hidrográfica del río Cubillas. Esta red se ha ido encajando progresivamente, de forma que la primitiva superficie se ha ido modelando en formas generalmente poco marcadas, con cubiertas cuaternarias al pie de los relieves más escarpados y en las zonas de vega de los ríos más importantes. El relieve configurado sólo se hace más abrupto en el piedemonte de Sierra Arana, donde el encajamiento de los barrancos ha dejado pendientes convexas.

Las superficies más elevadas se encuentran en el arranque de los glacis sobre las calizas de Sierra Arana, a unos mil metros de altura. Este nivel enrasa con el valle del río Cubillas a unos 760 m, aunque la parte baja ha sido remodelada, originando colinas suavemente onduladas propias de la acción erosiva sobre materiales de escasa competencia.

A partir de esta sierra y en dirección sur, se van alineando la Sierra de Cogollos (1.663 m), con un extenso glacis disectado por numerosos arroyos que enlaza con el embalse del Cubillas; la Sierra de la Yedra (1.486 m), con pendientes elevadas en sus laderas y cumbres morfológicamente suaves; y la Sierra de Alfacar y Víznar (1.606 m), que constituye el relieve montañoso más próximos a Granada, con una morfología caracterizada por laderas abruptas junto con zonas de relieve más suave.

Descendiendo más al sur, cercano a la ciudad de Granada, se configura un relieve en el que se dan encajamientos marcados en los materiales neógenos y cuaternarios de la red fluvial de los ríos Beiro y Darro. Se individualizan una serie de colinas y lomas que alcanzan los 1.000 m de altura y que están bien limitadas por cauces abarrancados. En el interfluvio entre los ríos Darro y Genil, destaca una extensa colina culminada por una superficie plana subhorizontal desarrollada sobre los

conglomerados de la Formación Alhambra (Llano de la Perdiz), que se extiende hasta los límites de la ciudad donde se corta bruscamente.

Al norte de la Depresión, se eleva el relieve subbético de Sierra Elvira, de morfogénesis kárstica debido a su naturaleza carbonatada, alcanzando su cota máxima a los 1.102 m. Su piedemonte enlaza suavemente con el de las sierras del borde este y algo más bruscamente con la llanura de la Vega de la que se separa por contacto mecánico.

Sobre la llanura aluvial del río Genil se desarrolla la Vega de Granada, de morfología simple caracterizada por una topografía suave y cortada en su centro por el cauce del río.

La red de drenaje de la Depresión de Granada, de tipo radial, está regulada por el importante papel que la neotectónica ha jugado en su morfogénesis. En el sector Norte, con una morfogénesis muy activa como consecuencia de un basculamiento hacia el norte de los depósitos conglomeráticos localizados allí, se dibuja una red paralela donde las cabeceras de sus cauces se sitúan en la Sierra de la Yedra y en las Sierras de Alfacar y Víznar. Son cauces que carecen de sinuosidades y con una notable diferencia de cota en muy poco espacio entre el nivel de base de la Vega y sus cabeceras, lo que da lugar a una evacuación rápida y a la aparición de numerosas avenidas e inundaciones de carácter estacional. En el sector Noreste-Este, zona subsidente que comprende desde el río Darro hasta el río Dílar, la mayor parte de la red responde a un tipo dendrítico con fenómenos de captura y erosión remontante, provocados por la existencia de un polo de subsidencia. El sector Sur, que constituye un borde de levantamiento que configura el cierre de la Depresión, está caracterizado por una red de tipo paralela con cauces rectos y poco encajados que se adapta a las orientaciones estructurales de determinados sistemas de fractura. Por último, el sector Noroeste, configurado también como un borde de surrección, queda dibujado por el horst de Sierra Elvira, provocando una individualización tectónica con respecto a la Vega. Su red de drenaje es de tipo centrípeto, con una importante concentración de cauces.

#### **4.3.2. Sierra Nevada**

Presenta un intervalo un intervalo altitudinal que va desde los 700 m cerca de la ciudad de Granada hasta los 3.483 m del Mulhacén, el pico más alto de la Península Ibérica. Sus cimas montañosas presentan un alineamiento este-oeste a lo largo de una distancia de aproximadamente 90 km, descendiendo gradualmente hacia el oeste (Veleta, 3.394 m; Mulhacén, 3.483 m; Alcazaba, 3.371 m; Picón del Jerez, 3.090 m; San Juan, 2.788 m; Almirez, 2.517 m).

El relieve está caracterizado fundamentalmente por una asimetría de sus vertientes, bajo una morfología típica en domo y condicionada por la propia estructura del substrato metamórfico.

La vertiente sur, con planos de esquistosidad paralelos a la superficie, se caracteriza por pendientes más o menos inclinadas, modificadas principalmente por procesos glaciares y periglaciares en altura y por la actuación de los demás procesos erosivos en el resto de las zonas. La vertiente norte, con planos de esquistosidad perpendiculares a la superficie, está dominada por escarpes o pendientes abruptas en sus partes más elevadas y por una gran variedad de depósitos sedimentarios en las partes inferiores.

La zona del Complejo Nevado-Filábride o núcleo de la Sierra ocupa la mayor extensión de las vertientes norte y sur. Abarca las cotas que van desde los 1.000 m hasta los 3.483 m del Pico del Mulhacén. Tiene un aspecto general alomado, aunque en detalle existen abundantes abarrancamientos, escarpes, tajos y multitud de accidentes orográficos. Las grandes lomas son generalmente de pendientes escarpadas, salpicadas de zonas más allanadas, moderadamente escarpadas e inclinadas. Asimismo, las partes más llanas aparecen en las cabeceras y valles de los ríos como base de las antiguas artesas y circos glaciares. Las pendientes más escarpadas se ubican en las zonas más internas y recientes de los valles fluviales, paredes de circos glaciares, altas cumbres, etc. La mayor parte del ámbito tiene un paisaje fluvial, estando los ríos en sus etapas juveniles. En la vertiente norte se encuentran las cuencas altas de los ríos Dílar, Monachil, Genil, Maitena, Alhama y Verde, y en la vertiente sur las de los ríos Dúrcal, Lanjarón, Torrente, Chico, Mulhacén, Lagunillos y Trevélez. La red de drenaje no es muy densa y es de tipo dendrítico, aunque poco angulosa. Los cursos fluviales recogen las aguas del deshielo y deben la mayor parte de su caudal a la coalescencia de los arroyos que nacen en sus cumbres, en un paisaje claramente glaciario. En íntima relación con ellos se encuentran multitud de lagunas de origen glaciario, como Laguna de las Yeguas, Lagunillas de la Virgen, Laguna del Caballo, Laguna Cuadrada, Laguna de Lanjarón, etc. En la actualidad, las áreas más altas tienen un régimen de modelado periglaciario que se atenúa al bajar en el relieve (Messerli, 1965; Soutade y Baudiere, 1970), destacando el papel de la erosión lineal del agua y la erosión eólica (Delgado *et al.*, 1988).

En la zona ocupada por el Complejo Alpujárride, si bien persiste el abombamiento general, el paisaje es más intrincado que en el núcleo, de forma que se pierde en gran medida la clara sucesión de barrancos rectilíneos y elevaciones alomadas. Las formas son más caóticas y relativamente desordenadas, con mayor densidad y jerarquización de la red de drenaje y barrancos más pronunciados que los del Complejo Nevado-Filábride. Todo ello conduce a una fisiografía de aspecto más

abrupto que la del núcleo. Las cotas que se alcanzan oscilan entre los 950 m y los 2.215 m del vértice Cañadillas. Las cuencas hidrográficas existentes pertenecen a los ríos Monachil, Genil, Dúrcal y Torrente. Las pendientes escarpadas son las dominantes, con mucha menor representación de las inclinadas y moderadamente escarpadas en algunas laderas suaves o altos montañosos. Las pendientes muy escarpadas son frecuentes, situándose en las vertientes de los cauces fluviales. Debido al control litológico, los materiales más sueltos dan un paisaje de tipo ruiforme, incluso de tipo bad-land, mientras que las rocas más coherentes dan paisajes más alomados, de aspecto redondeado y con laderas de fuerte rocosidad superficial, conservando en algunas áreas formaciones kársticas como dolinas, simas, etc. En la actualidad, este ámbito carbonatado está siendo modelado por un régimen semiárido, caracterizado por la acción del agua, la disgregación mecánica, los movimientos en masa, etc. Las formas del paisaje se presentan como conos de deyección, pendientes abruptas con gruesos detritus, bad-lands, etc., a los que habría que sumar los rasgos periglaciares, responsables de los procesos de gelifracción aún activos a estas cotas (Pascual, 1975; Gómez *et al.*, 1992).

En general, la erosión de la red de drenaje es muy marcada en toda la Sierra y de tipo remontante, de forma que se observan claras diferencias en la actividad erosiva de una y otra vertiente, atribuibles a las diferencias de cota entre sus niveles de base relativos. Así, mientras que el del río Genil se sitúa en torno a los 500 metros, el del río Lanjarón lo hace a unos 230 metros.

El relieve precuaternario de Sierra Nevada, fuertemente desarrollado, está caracterizado por formas de modelado redondeadas (Fontboté, 1970), con valles relativamente amplios y poco profundos. Debido a su baja latitud (37°N) y a su relativo clima seco (en comparación con latitudes más altas), los glaciares sólo se desarrollaron en los valles situados por encima de los 2.300 m. En los valles más elevados (>3.000 m), los glaciares no superaron los 8 km de longitud ni descendieron por debajo de los 1.500 m. En los valles más bajos (2.300 m), raramente excedieron el 1,5 km de longitud (Gómez *et al.*, 1992). Los rasgos de periodos glaciares incluyen circos glaciares, valles en forma de U, rocas pulidas y estriadas, y morrenas. Estas últimas se depositaron en las laderas más llanas de los valles mientras que en las laderas más escarpadas, donde se formaron glaciares de segundo orden, predominó la erosión glacial. El pequeño tamaño de los glaciares permitió que se preservaran superficies preglaciares en los puntos más elevados de los bordes de los valles, al tiempo que los procesos periglaciares erosionaban las laderas. Durante los episodios fríos, las superficies preglaciares por encima de los 2.900 m fueron fuertemente afectados por la acción del hielo. Algunas de estas superficies de crioplanación (por ejemplo, pandero del Mulhacén) presentan pequeños afloramientos pulidos y estriados, los cuales llevaron a Gómez *et al.* (1992) a

proponer la hipótesis de que estas superficies pudieran haberse formado durante un episodio frío temprano en el que el hielo no estuvo limitado a las zonas de los valles.

En este contexto geomorfológico, se observan superficies que de una u otra forma han quedado preservadas de la erosión. La permanencia de estas antiguas superficies ha hecho posible la conservación de los suelos rojos desarrollados sobre ellas. Estas superficies se encuentran principalmente en: a) zonas de interfluvio, situadas entre dos cuencas hidrográficas adyacentes; b) superficies originadas en las sucesivas etapas erosivo-deposicionales que se han desarrollado al pie de los relieves y en el borde de la Depresión de Granada, permitiendo el desarrollo de una serie de formaciones detríticas aluviales que han enterrado, o bien conservan a techo, determinados eventos edáficos caracterizados por la presencia de suelos rojos.

#### 4.4. Clima

Con objeto de analizar el clima actual de la zona de estudio, hemos considerado, por un lado, una serie de estaciones meteorológicas situadas en la Depresión de Granada y, por otro lado, estaciones que caracterizan el clima de la Sierra Nevada. En la Depresión de Granada, se han recogido datos de nueve estaciones termopluviométricas y de cinco estaciones pluviométricas, mientras que en Sierra Nevada se ha tomado datos de seis estaciones termopluviométricas. Todos los datos han sido obtenidos del I.N.M. (1991).

Con los datos de temperaturas medias mensuales se ha calculado la Evapotranspiración Potencial (ETP), utilizando la ecuación de Thornthwaite (1948, 1955), expresada como:

$$ETP = 16 (10t_j/I)^a \times f_j$$

siendo:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

$t_j$  = Media de las Temperaturas medias mensuales ( $^{\circ}\text{C}$ ) de todas las estaciones consideradas.

$f_j$  = Duración media de la luz solar por comparación a un mes de 30 días y 12 horas de luz, obtenida en función de la latitud del lugar (Tabla 4.4).

$I$  = Índice de calor anual =  $\sum_{1...12} (t_j/5)^{1/5}$

$a = 0,49239 + 0,01792I - 771 \times 10^{-7}I^2 + 675 \times 10^{-9}I^3$

Tabla 4.4. Valores de  $f_j$  en función de la latitud .

Meses	Latitud								
	36°	37°	38°	39°	40°	41°	42°	43°	44°
Enero	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,81
Febrero	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82
Marzo	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02
Abril	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13
Mayo	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27
Junio	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
Julio	1,24	1,25	1,25	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	1,30
Agosto	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20
Septiembre	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Octubre	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95
Noviembre	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,82	0,81	0,80
Diciembre	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76

#### 4.4.1. Depresión de Granada

En las siguientes tablas se muestran los datos geográficos y termopluviométricos, así como los años y tipos de muestreo, de las estaciones meteorológicas seleccionadas para caracterizar el clima de la Depresión de Granada.

Tabla 4.4.1.1. Datos de altitud (m), latitud (°) y longitud (°), así como los años y tipos de muestreo (T=Temperatura; P=Precipitación) de estaciones meteorológicas de la Depresión de Granada.

Estacion	Altitud	Latitud	Longitud	Tipo de muestreo (años)
Granada (B. aérea)	680	370810	33750	T (51-89); P (51-89)
Granada (Cartuja)	720	371135	33605	T (51-76); P (51-76)
Atarfe (SEA)	598	371320	34115	T (72-89); P (71-89)
Granada (C. de A.)	685	371040	33555	P (55-89)
Albolote	654	371310	33920	P (53-88)
Armillá	680	372300	61205	T (31-60); P (31-60)
Pantano Cubillas	630	371645	34015	T (67-88); P (52-88)
Colomera (El Le.)	860	372230	34250	T (78-89); P (78-89)
Colomera	866	372215	34250	P (51-88)
Colomera (L. Tor.)	680	371940	34230	P (59-76)
Padul	753	370130	33737	T (55-91); P (61-90)
Dúrcal Central	890	370030	33324	T (86-91); P (61-90)
Nigüelas	931	365900	33215	T (60-79); P (61-90)
Albuñuelas	730	365540	33755	P (62-86)

Tabla 4.4.1.2. Temperaturas medias mensuales y anuales (°C) de las estaciones termoplumiométricas de la Depresión de Granada.

Estación	E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Granada (Base aérea)	7,0	8,0	10,3	12,6	16,4	21,0	25,1	24,9	21,4	15,8	10,7	7,6	15,1
Granada (Cartuja)	7,5	8,0	10,4	12,5	17,1	21,3	25,2	25,2	21,6	15,6	10,9	7,8	15,3
Atarfe (SEA)	5,4	7,0	9,7	11,4	14,3	20,0	22,8	22,7	19,2	14,0	9,6	5,9	13,5
Armillá	7,0	8,0	11,0	14,0	16,0	22,0	25,0	25,0	22,0	16,0	11,0	7,0	15,3
Pantano Cubillas	7,2	8,3	10,8	12,1	16,1	21,2	25,3	25,3	21,8	16,6	11,1	7,5	15,3
Colomera (El León)	5,9	7,0	9,4	9,8	14,3	21,2	25,1	24,9	21,9	15,8	10,5	6,9	14,4
Padul	8,2	9,5	11,7	13,2	16,8	21,2	25,1	25,1	22,1	16,6	11,6	9,0	15,8
Dúrcal Central	6,6	9,0	11,2	11,3	16,4	21,2	25,1	25,5	22,1	15,3	11,0	8,5	15,3
Nigüelas	7,6	8,0	9,2	11,7	15,0	19,0	23,1	23,1	19,8	14,7	10,2	7,2	14,0

Tabla 4.4.1.3. Precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) de las estaciones pluviométricas de la Depresión de Granada.

Estación	E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Granada (Base aérea)	46,6	44,9	45,4	42,5	30,5	16,3	3,9	3,5	16,9	38	50,5	55,1	393,9
Granada (Cartuja)	52,9	54,6	61,5	50,7	42,2	15,4	2,7	4,4	23,7	53,9	53,0	62,7	477,6
Atarfe (SEA)	50,3	48,2	40,5	51,2	36,1	15,4	5,9	2,4	12,2	36,2	52,0	51,3	401,8
Granada (C. de A.)	58,7	55,2	65,7	47,7	40,1	16,3	3,5	4,6	20,6	53,7	57,6	69,1	492,8
Albolote	59,6	58,6	57,0	44,9	35,2	17,1	4,8	4,8	18,5	48,8	59,4	68,6	477,3
Armillá	44,0	43,0	53,0	46,0	38,0	11,0	3,0	6,0	20,0	43,0	41,0	54,0	402,0
Pantano Cubillas	64,2	61,4	57,5	55,9	40,3	24,7	4,5	5,2	20,8	46,6	67,4	76,9	525,5
Colomera (El León)	77,6	88,4	63,5	61,9	44,7	22,0	7,6	10,0	21,5	31,9	114,6	101,9	645,6
Colomera	77,0	80,1	72,0	60,9	40,7	20,6	4,5	7,3	20,4	47,3	78,3	89,5	598,6
Colomera (Las Torres)	72,6	63,4	61,7	47,0	43,1	28,5	6,6	5,3	24,7	59,7	66,3	83,6	562,5
Padul	50,9	49,7	42,7	42,4	28,1	20,5	1,5	1,8	20,8	39,6	66,8	58,4	423,2
Dúrcal Central	63,8	56,6	55,3	51,9	33,2	21,6	1,6	2,2	20,6	53,2	73,8	75,4	509,1
Nigüelas	62,3	56,6	47,7	51,3	30,0	22,8	3,5	2,8	22,5	54,2	68,8	67,1	489,6
Albuñuelas	66,2	64,6	47,1	46,6	23,8	13,8	4,1	1,4	15,9	58,5	62,8	92,4	497,3

Tabla 4.4.1.4. Valores medios de las medias mensuales y anuales de temperatura (°C), precipitación (mm) y ETP (mm) de todas las estaciones de la Depresión de Granada.

	E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Temperatura	6,9	8,1	10,4	12,1	15,8	20,9	24,6	24,6	21,3	15,6	10,7	7,5	14,9
Precipitación	60,5	59,0	55,0	50,1	36,1	19,0	4,1	4,4	19,9	47,5	65,2	71,9	492,6
ETP	14,5	18,0	32,7	43,8	74,0	114,8	150,6	140,8	99,1	57,5	28,2	15,8	789,9

Tabla 4.4.1.5. Datos climáticos medios de la Depresión de Granada según la estación del año.

	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Temp. (°C)	12,8	23,4	15,9	7,5
Prec. (mm)	141,2	27,5	132,6	191,4
ETP (mm)	150,5	406,2	184,8	48,3

De acuerdo con los datos de las tablas anteriores, la precipitación media anual se encuentra en torno a los 500 mm, repartidos entre invierno (38,8%), primavera (28,6%) y otoño (26,9%), mientras que el verano es claramente una época de gran escasez de agua. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 14°C y los 15,8°C, siendo julio el mes más caluroso, seguido de agosto y junio, mientras que enero es el mes que presenta medias más bajas, junto con diciembre y febrero. Por su parte, los valores medios de ETP anuales casi doblan los de precipitación. Si bien durante más de seis meses al año la ETP es superior a la precipitación (Tabla 4.4.1.4), en verano la ETP es casi 15 veces superior a la precipitación, lo que nos llevaría a clasificar esta zona dentro del clima Mediterráneo con sequía estival marcada (Rivas Martínez, 1987).

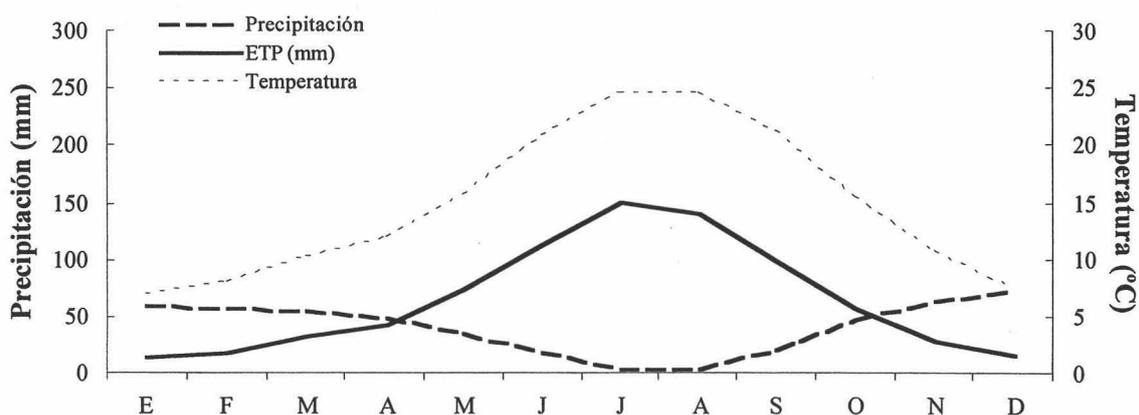


Figura 4.4. Ficha climática correspondiente a la Depresión de Granada.

Los datos actuales de temperatura y precipitación medias anuales permiten encuadrar a la Depresión de Granada en un Régimen de Temperatura Mésico-Térmico y de Humedad Xérico (Soil Survey Staff, 1999).

#### 4.4.2. Sierra Nevada

El estudio del clima de Sierra Nevada presenta varios problemas fundamentales como: escasez de estaciones meteorológicas, datos incompletos, dispersión de la información y la propia complejidad del macizo (el hecho de que la temperatura y la precipitación varíen con la altitud y la orientación, y la existencia de microclimas en función de ciertos caracteres del relieve). Gil de Carrasco (1988) estableció una diferenciación entre el clima de las vertientes norte y sur de la Sierra. En este estudio se han seleccionado los datos climáticos de aquellas estaciones que se localizan en la vertiente meridional, que es donde se encuentra el sector analizado en esta memoria. Se trata de seis estaciones con datos completos de precipitación y temperatura a lo largo de una serie cronológica de 25 años. En las siguientes tablas se muestran los datos termopluviométricos y geográficos de estaciones meteorológicas utilizadas para caracterizar el clima de la zona de estudio.

Tabla 4.4.2.1. Datos de altitud, latitud y longitud de las estaciones meteorológicas de la vertiente sur de Sierra Nevada.

Estación	Altitud (m)	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)
Cerecillo	1780	0507600	41006000
Monterrey	1222	0508100	40990000
M. Bombarón	1200	0486400	40933000
Laujar	921	0509800	40944000
Ugíjar	559	0456300	40866000
Lanjarón	710	0495500	40910000

Tabla 4.4.2.2. Temperaturas medias mensuales y anuales (°C) de las estaciones meteorológicas de la vertiente sur de Sierra Nevada.

Estación	E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Cerecillo	3,3	4,0	6,0	8,1	11,2	15,2	18,7	18,9	16,1	11,4	7,2	4,1	10,3
Monterrey	5,9	6,6	8,7	11,1	14,3	18,5	22,0	22,0	19,2	14,4	9,8	6,6	13,2
M. Bombarón	7,4	6,5	9,4	13,7	18,1	23,1	25,1	26,4	20,4	16,9	9,5	6,9	15,3
Laujar	6,7	7,5	9,6	11,8	15,2	19,0	22,5	22,7	20,0	15,3	10,6	7,3	14,0
Ugíjar	14,3	17,3	18,1	21,2	23,8	27,5	28,9	28,4	25,7	21,4	17,9	15,4	21,6
Lanjarón	8,7	9,5	10,7	12,1	15,3	18,6	22,0	22,2	19,6	15,4	11,4	8,9	14,5

Tabla 4.4.2.3. Precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) de las estaciones meteorológicas de la vertiente sur de Sierra Nevada.

Estación	E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Cerecillo	100,0	82,0	68,0	78,0	44,0	31,0	5,0	8,0	31,0	71,0	68,0	88,0	674,0
Monterrey	75,0	73,0	68,0	64,0	42,0	17,0	5,0	4,0	19,0	68,0	63,0	93,0	591,0
M. Bombarón	79,0	79,0	73,0	67,0	40,0	22,0	4,0	4,0	24,0	71,0	63,0	102,0	628,0
Laujar	65,0	61,0	66,0	60,0	33,0	13,0	4,0	3,0	23,0	66,0	57,0	90,0	541,0
Ugijar	44,0	39,0	45,0	42,0	24,0	7,0	0,0	5,0	16,0	48,0	45,0	62,0	377,0
Lanjarón	65,8	66,7	62,4	57,2	37,6	17,0	3,1	2,0	17,6	57,4	66,2	86,9	539,9

Tabla 4.4.2.4. Valores medios de las medias mensuales y anuales de temperatura (°C), precipitación (mm) y ETP (mm) de las estaciones meteorológicas de la vertiente sur de Sierra Nevada.

	E	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Anual
Temperatura	7,7	8,6	10,4	13,0	16,3	20,3	23,2	23,4	20,2	15,8	11,1	8,2	14,8
Precipitación	71,5	66,8	63,7	61,4	36,8	17,8	3,5	4,3	21,8	63,6	60,4	87,0	558,5
ETP	17,6	19,2	31,8	47,7	74,8	105,5	131,4	124,8	87,4	56,6	28,8	17,8	743,3

La temperatura presenta máximos en todas las estaciones durante los meses de verano y mínimos durante los meses de invierno. Los meses de verano son secos, concentrándose la precipitación durante el invierno y una parte importante del otoño y la primavera. Al tratarse de una zona de alta montaña, una parte de las precipitaciones que crece esta con la altitud cae en forma de nieve. A partir de los 2.500 m de cota, el porcentaje de nieve es de al menos el 75% (Messerli, 1965).

Sánchez Gómez (1990) establece ecuaciones de correlación múltiple (mensuales y anuales) entre los datos termopluviométricos de las estaciones meteorológicas de Sierra Nevada y sus parámetros geográficos (altitud, longitud y latitud). Mediante el empleo de estas ecuaciones, obtiene las variaciones de precipitación y temperatura que, dentro de cada sector de Sierra Nevada, se producen en función de la altitud (Tabla 4.4.2.5).

A la cota de 500 m, la precipitación media anual suele situarse en torno a los 500 mm y la temperatura media alrededor de los 18°C. A partir de ahí, ambos parámetros varían más o menos regularmente con la altitud, disminuyendo la temperatura en torno a 0,75°C e incrementándose la precipitación unos 25 mm por cada 100 m ascendidos. En función de esta dinámica, el Régimen de Humedad se puede definir como Xérico en las

cotas más bajas, o Udico en cotas altas, cuando la precipitación estival es suficiente para compensar la evapotranspiración. En cuanto al Régimen de Temperatura, varía considerablemente con la altitud: Térmico hasta los 800 m, Mésico desde los 800 hasta los 2.000 m, Frígido entre 2.000 y 2.200 m y Críco por encima de los 2.200 m (Soil Survey Staff, 1999).

Tabla 4.4.2.5. Variaciones medias estacionales y anuales de precipitación (PMA) y temperatura (TMA) con la altitud en distintos sectores de Sierra Nevada (Sánchez, 1990).

Sector	Altitud (m)	PMA (mm)	TMA (°C)	Pp media estacional (mm)				T media estacional (°C)			
				Verano	Otoño	Invierno	Primav.	Verano	Otoño	Invierno	Primav.
C. Veleta	3150	1132	-2,4	90,8	263,9	478,3	299,0	8,2	-0,9	-11,6	-5,4
Lanjarón	3100	1115	-1,7	89,1	261,0	472,0	292,9	8,9	-0,3	-10,9	-4,7
Lanjarón	2900	1057	-0,2	82,5	249,6	444,3	280,6	10,1	1,2	-8,9	-3,4
Lanjarón	1500	722	10,1	42,8	177,4	299,2	202,6	18,3	11,0	3,1	8,1
Mulhacén	2500	971	2,6	73,0	231,0	406,4	260,6	12,4	3,9	-5,5	0,1
Mulhacén	2700	1017	1,2	78,3	240,6	428,1	270,0	11,2	2,5	-7,3	-1,7
Laguna S.	2280	808	5,3	40,2	220,9	318,5	228,4	13,7	7,0	-2,2	2,7

## 4.5. Vegetación

### 4.5.1. Depresión de Granada y áreas adyacentes

La serie climatofila de vegetación que se extiende por la zona (Valle, 1985; Ruiz de la Torre, 1990) es la del *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae* (Serie mesomediterránea bética, marianense y araceno-pacense seca basófila de la encina o *Quercus rotundifolia*). Está distribuida ampliamente por la zona de estudio pero, debido a la fuerte acción antrópica a la que se ha visto sometida en favor de los cultivos, dominan los estadíos seriales sobre las comunidades forestales. La mayoría de estos bosques han sido desplazados por cultivos agrícolas de cereales, almendrales, olivares, vides, etc.

En el hipotético caso de que el hombre no hubiera actuado en este territorio, la comunidad clímax sería un **encinar** perteneciente a la asociación del *Paeonio-Quercetum rotundifoliae*. Esta comunidad está compuesta por un bosque pluriestratificado, cuyo estrato arbóreo lo forma casi en exclusiva la encina (*Quercus rotundifolia*), asociada en los lugares más húmedos con quejigos (*Quercus faginea*) y dando lugar a una variante de dicha asociación (*quercetosum fagineae*). Bajo este

estrato que posibilita la existencia de un microclima nemoral, se desarrolla un sotobosque rico en arbustos y lianas, siendo los más representativos el enebro (*Juniperus oxycedrus*), el rusco (*Ruscus aculeatus*), el torvizco (*Daphne gnidium*), el jazmín de monte (*Clematis flammula*), la lonicera (*Lonicera etrusca*), la hiedra (*Hedera Helix*), *Phyllirea angustifolia* y *Asparagus acutifolius*. El último eslabón lo forman las especies herbáceas, anuales o vivaces, como son las peonías (*Paeonia coriacea*, *Paeonia broteroï*), primaveras (*Primula vulgaris*), violetas (*Viola* sp.), *Bupleurum rigidum*, *Adonis vernalis*, etc.

A partir de la comunidad clímax, las siguientes formaciones son etapas de sustitución cuya composición florística depende del grado de degradación al que ha sido sometido el territorio, permitiendo la existencia de comunidades más o menos evolucionadas.

La primera etapa está formada por un **coscojar**. Se trata de un matorral alto o bosque perteneciente a la asociación *Crataego monogynae-Quercetum cocciferae*, donde domina la coscoja (*Quercus coccifera*), acompañada por otras especies como el majuelo (*Crataegus monogyna*), espino negro (*Rhamnus spiculosa*) y rosales silvestres (*Rosa canina*, *Rosa pouzinii*). Si los suelos aún son forestales pero las especies propias del bosque han desaparecido por completo, se presenta el **retamal**, asentado sobre suelos profundos con poca inclinación y todavía poco degradados. Las especies más destacadas son la retama (*Retama sphaerocarpa*) e hiniestas (*Genista cinerea* subsp. *speciosa*, *Chronathus biflorus*). Fitosociológicamente, se incluye en la asociación *Genisto speciosae-Retametum sphaerocarphae*. Se trata de una comunidad que, aunque sea pobre en especies, tiende a cubrir gran cantidad de suelo.

Cuando la degradación del bosque original es aún mayor, se instalan matorrales seriales ocupando los biotopos más desfavorables. Estas comunidades están muy extendidas en todo el territorio. El **espartal**, constituido por gramíneas vivaces hemicriptófitas, se desarrolla sobre suelos poco inclinados, margosos y calizos. Domina el esparto (*Stipa tenacissima*), junto a otras especies como *Dactylis glomerata*, *Helictotrichon filifolium*, *Avenula bromoides*, etc. Esta comunidad se incluye en la asociación *Thymo gracile-Stipetum tenacissimae*. En el horizonte superior del piso mesomediterráneo empieza a aparecer el lastón (*Festuca scariosa*), marcándose el tránsito hacia los lastonares supramediterráneos (*Helictotricho-Festucetum scariosae*).

Etapas más degradadas que los espartales dentro de la secuencia dinámica son los romerales y tomillares, muy extendidas por todo el territorio. Constituyen comunidades muy variadas dentro del punto de vista florístico, especialmente en plantas aromáticas y melíferas. En los suelos más degradados, rocosos y xéricos, aparecen los **romerales**, donde predominan especies como el romero macho (*Cistus clusii*), romero

(*Rosmarinus officinalis*), aulaga (*Ulex parviflorus*), tomillo (*Thymus zygis* subsp. *gracilis*), lavanda (*Lavandula lanata*), jaras (*Cistus albidus*) y jarillas (*Fumana ericoides*). Estas comunidades se incluyen en la asociación *Thymo gracile-Lavanduletum lanatae*. En las zonas de cierta influencia continental aparece *Genista scorpius* acompañando o sustituyendo a *Ulex parviflorus*. Por degradación de los matorrales anteriores o por decapitación de los suelos, se posibilita la introducción de especies de menor talla que constituyen los **tomillares**. Son las comunidades que aparecen en los suelos más degradados, presentan una escasa cobertura y en ellos dominan las diferentes especies de tomillos (*Thymus zygis gracilis*, *Thymus mastichina*) y jarillas (*Helianthemum cinereum*, *H. croceum*, *H. Hirtum*). Esta comunidad se incluye en la asociación *Phlomido-Brachypodietum retusii*.

Como último estadio de esta serie aparecen los **pastizales-eriales**, ocupando suelos poco evolucionados en los claros que quedan entre las formaciones anteriores. Estos pastizales terofíticos efímeros están formados por especies de pequeña talla, sin interés forrajero, que dan escasa biomasa. Destacan especies como *Hornungia petraea*, *Campanula erinus*, *Clypeola jonthlaspi*, *Helianthemum sailcifolium*, *Bombycilaena erecta*, *Arenaria serpyllifolia*, etc. Esta comunidad se incluye en la asociación *Saxifrago-Hornungetum petraea*. En los suelos algo más favorables y con una nitrificación moderada, estos prados son sustituidos por comunidades gramínoideas de floración primaveral más tardía. Generalmente ocupan cultivos abandonados y calveros del matorral donde se ha producido aporte de materia orgánica procedente del pastoreo. Esta comunidad se incluye dentro de la asociación *Ononido crotalarioidis-Aegilopetum geniculatae*, presidida por especies como *Aegilops geniculata*, *A. triuncialis*, grama (*Poa bulbosa*), *Bromus madritensis*, *Coronilla scorpioides*, alfalfa (*Medicago minima*), tréboles (*Trifolium stellatum*, *T. campestre*), etc.

En terrenos abandonados que han sufrido una fuerte acción antropozoógena, donde la alteración ha sido intensa (cultivos abandonados, movimientos de tierra, etc.), se establecen los tomillares nitrófilos. Entre ellos, predominan fundamentalmente las santolinas (*Santolina canescens*) y las artemisias (*Artemisia campestris*), junto a otras especies como *Helichrysum serotinum*, *Andryala integrifolia*, *Eryngium campestris*, *Foeniculum vulgare*, etc. Fitosociológicamente, se incluye en la asociación *Artemisio-Santolinetum canescentis*.

Además de las comunidades y especies comentadas, en esta zona se presentan otras, formando parte de lo que se denomina **series riparias o edafohigrófilas**, cuyo mantenimiento viene determinado por la presencia de agua en el suelo de manera permanente o casi permanente. Así, en esta zona estas series quedan reducidas a cursos fluviales, fuentes y áreas de embalse de agua.

La Geoserie riparia meso-supramediterránea bética sobre sustratos básicos y suelos eutrofizados (*Saliceto triandro-angustifoliae: Rubio-Populeto albae: Aro-Ulmeto minoris*) se extiende por la Vega de Granada y por todos los cauces fluviales presentes en la zona de estudio. La vegetación potencial estaría representada por olmedas, alamedas y saucedas, pero, debido a su enorme valor productivo, estas tierras han sido utilizadas tradicionalmente para cultivos hortícolas y de explotación maderera, quedando muy reducidos los restos de vegetación natural. La vegetación riparia está constituida por comunidades azonales, ajenas al macroclima reinante, cuya dinámica depende fundamentalmente de la distancia al agua, su estado dinámico y grado de pureza o contaminación, así como a la existencia de períodos de desecación. Se distinguen tres niveles en función de la distancia al río, desde el lecho del río hacia tierra, encontrándose saucedas, alamedas y olmedas.

En las saucedas (*Salicetum triandro-angustifoliae*) alternan distintas especies de mimbres y sargatillos, entre las que se encuentran *Salix atrocinerea*, *Salix purpurea* subsp. *lambertiana*, *Salix eleagnos* subsp. *angustifolia*, *Salix fragilis*, *Salix discolor*, y a las que acompañan otros elementos como zarzamora (*Rubus ulmifolius*), nueza negra (*Tamus communis*), jazmín de monte (*Clematis vitalba*), junco (*Scirpus holoschoenus*), etc.

En las alamedas (*Rubio tinctoriae-Populetum albae*) predomina el álamo blanco (*Populus alba*), aunque puede estar acompañado por *Populus nigra* y *P. deltoides*. En zonas montañosas sobre suelos más o menos rocosos, dominan los fresnos (*Fraxinus angustifolia*) y sauces (*Salix fragilis*, *S. atrocinerea*, *S. alba*). Además, aparece zarzamora, aro (*Arum italicum*), rubia (*Rubia tinctorum*), *Bryonia dioica*, etc.

Las olmedas (*Aro italicum-Ulmetum minoris*) están constituidas fundamentalmente por *Ulmus minor*, mientras que en el sotobosque aparece abundantemente *Arum italicum*.

En aquellas zonas donde domina un ombroclima semiárido y los cursos de agua son temporales, inconstantes y algo salinos, se desarrollan comunidades dominadas por tarays o atarfes (*Tamarix africana* y *Tamarix canariensis*). Además, hay dos comunidades herbáceas relativamente frecuentes dentro del areal de esta serie. Una es producto de la degradación de la alameda por tala y en ella predomina la gramínea *Brachypodium phoenicoides*. La segunda se desarrolla sobre suelos húmedos y nitrificados, con especies como *Ranunculus bulbosus*, *Lathyrus pratensis*, *Ranunculus acris*, etc.

Por último, podemos decir que la vegetación actual que se observa en el área de estudio difiere en mayor o menor medida de la vegetación potencial, siendo el tipo de

roca el factor principal que genera esas variantes. Todas las propiedades de los suelos en los que se va a instalar la vegetación cambian en función de la composición química, estructura, textura, erosionabilidad y fragilidad de la roca y, por tanto, de las características ecológicas que van a permitir un tipo de vegetación u otra. Hay un cúmulo de situaciones ecológicas muy particulares de la zona de estudio que alteran las líneas básicas de la vegetación potencial o que permiten la instalación de comunidades algo distintas de las típicas.

#### 4.5.2. Sierra Nevada

El gran desnivel altitudinal, la variada litología y lo accidentado de su relieve, posibilitan un amplio mosaico de comunidades vegetales y una excepcional riqueza florística. Losa Quintana *et al.* (1986) diferencian hasta un total de 9 ecosistemas, de entre los que cabe destacar:

##### 1. Dominio de los pastizales psicroxerófilos de alta montaña mediterránea.

Unico lugar en el sur de la Península Ibérica donde se desarrolla. Está representado por un pastizal de escasa envergadura, en el que predominan los hemicriptófitos, alternando con algunos nanocaméfitos. Se sitúa por encima de los 2.700 metros y en él no se han encontrado Suelos Rojos. A pesar de la homogeneidad del piso crioromediterráneo nevadense, tanto por el clima como por el substrato, existen condicionamientos fundamentalmente topográficos que provocan diversas modificaciones de la vegetación clímax, pudiéndose distinguir varias comunidades vegetales dentro del mismo dominio climático.

##### 2. Dominio de los enebrales rastreros silicícolas

Abarca el matorral presente por encima de los 1800-2000 metros, sobre substratos formados por micaesquistos y cuarcitas más o menos ácidas, ocupando grandes extensiones y manifestándose muy uniforme en todo el piso oromediterráneo silicícola nevadense. Desde esta cota hasta el nivel del mar ya se pueden encontrar Suelos Rojos. Se corresponde con la llamada serie oromediterránea nevadense silicícola de *Juniperus nana*, quedando incluida como comunidad clímax la asociación *Genista versicoloris-Juniperetum nanae*.

Se trata de una formación arbustiva de carácter xerófilo-espinoso, a veces muy densa, aunque poco elevada, en la que predomina *Juniperus communis subsp. nana* y *Genista versicolor*, acompañadas de *Juniperus sabina* y, esporádicamente, de *Cytisus oromediterraneus*. Se extiende hasta las zonas próximas a los 2700 metros de altura y, pese al acusado pastoreo que soportan, al efecto del fuego y a la aridez estival, el

recubrimiento medio en amplias superficies abarca un porcentaje de hasta el 90% ó 100% en muchos casos. Dentro del dominio de esta comunidad clímax, se pueden reconocer etapas seriales y comunidades permanentes.

### 3. Dominio de los encinares silicícolas nevadenses

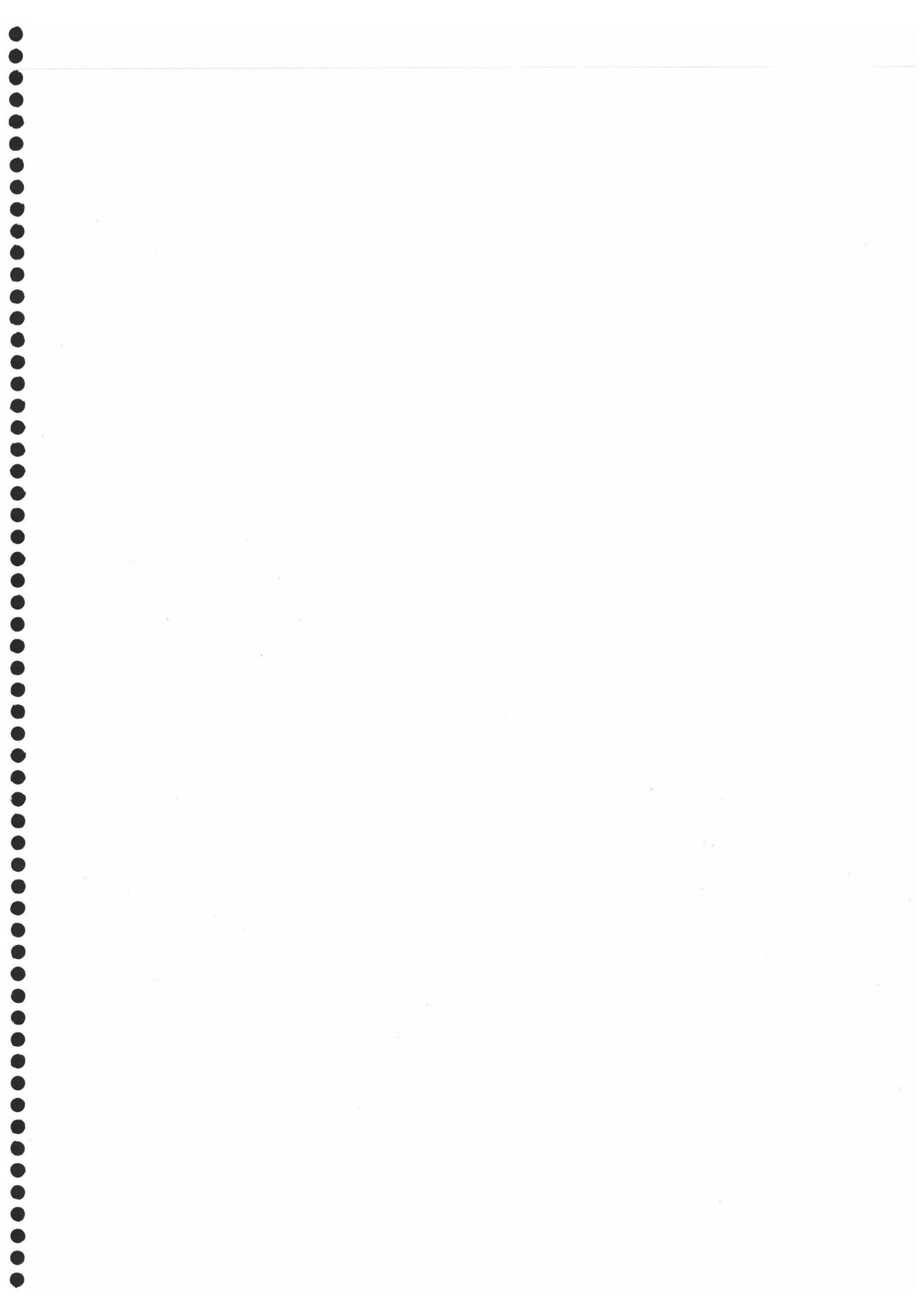
Se corresponde con la serie meso-supramediterránea filábrido-nevadense silicícola de la encina, perteneciente al *Adenocarpus decorticans-Querceto rotundifoliae sigmetum*, que tiene como asociación madura o clímax *Adenocarpus-Quercetum rotundifoliae* (Rivas Martínez, 1982).

Como ecosistema, abarca el territorio potencial del encinar desarrollado sobre sustratos ácidos. En la actualidad, el encinar natural se encuentra muy alterado debido a la fuerte acción antrópica. Las talas indiscriminadas, cultivos y repoblaciones han llegado a destruir en gran parte estos bosques, de forma que en el momento presente dominan las comunidades seriales y sólo se conservan fragmentos de bosquetes más o menos abiertos en los que la encina prácticamente es el único componente arbóreo. La presencia de *Adenocarpus decorticans* en estas comunidades transitorias diferencian estos encinares de los desarrollados sobre sustrato básico.

### 4. Dominio de los encinares mesomediterráneos basífilos

Comprende la formación arbórea de las encinas (*Quercus rotundifolia*), que ocupa potencialmente el piso mesomediterráneo de Sierra Nevada, así como sus comunidades seriales y subseriales. Todas ellas se incluyen en la serie mesomediterránea bética y mariánicomonchiquense basífila de la encina, denominada *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae sigmetum* (Rivas Martínez, 1964).

Es el piso más ampliamente ocupado y explotado por el hombre, por lo que el aspecto actual del territorio se muestra falto de todo tipo de formación arbórea, apareciendo la vegetación como un matorral-tomillar bajo y quedando al descubierto el sustrato rocoso en amplias extensiones.



## 5. Materiales y Métodos

### 5.1. Selección de los sectores estudiados

Después de un minucioso estudio de la zona se seleccionaron aquellos sectores que, por sus especiales características geomorfológicas, conservaban paleosuelos representativos de la dinámica de la Depresión de Granada.

Basándonos en el estudio geológico y geomorfológico de la Depresión de Granada, hemos seleccionado ocho áreas de diferentes edades sobre las que se desarrollan suelos rojos, generalmente sobre superficies geomorfológicas que han permanecido relativamente estables a lo largo del tiempo (Fig. 5.1). Asimismo, hemos estudiado un suelo rojo en Sierra Nevada, en la falda del pico del Mulhacén (3.487 m). Los suelos se han designado con la abreviatura de su sector correspondiente: ALM = Almanjáyar; CD = Cuesta del Desmayo; COL = Colomera; DUR = Dúrcal; HG = Haza Grande; LLP = Llano de la Perdiz; NIG = Nigüelas; OT = Otura; SN = Sierra Nevada. Los suelos enterrados están numerados en orden creciente, desde el más antiguo al más moderno.

El primer sector se localiza en las cercanías de la población de Colomera, a unos 5 km al NW del Pantano de Cubillas. En él se pueden diferenciar hasta 10 suelos superpuestos. La base está formada por nueve suelos enterrados (COL-9 hasta COL-1) cuyos materiales originales son muy similares y están formados por sedimentos carbonatados de grano fino y edad pliocena, procedentes de las Zonas Externas. Parecen tratarse de depósitos asociados a antiguas llanuras de inundación. El techo está constituido por un abanico aluvial de principios del Pleistoceno (Fernández y Soria, 1986-1987) y formado por materiales carbonatados de grano grueso procedentes también de las Zonas Externas. Sobre estos materiales se desarrolla el suelo de superficie COL-10.

El segundo sector estudiado se encuentra situado al NW de Granada capital (Polígono del Almanjáyar) y se corresponde con lo que morfológicamente se ha denominado Vega Alta (Lupiani y Soria, 1985). Está constituido por tres suelos superpuestos y enterrados por sedimentos recientes (ALM-1, ALM-2 y ALM-3), cuyos materiales originales están formados por sedimentos aluviales limo-arcillosos, carbonatados y con gran desarrollo de llanura de inundación. Algunos autores (Lhenaff, 1979) los atribuyen al Pleistoceno Superior.

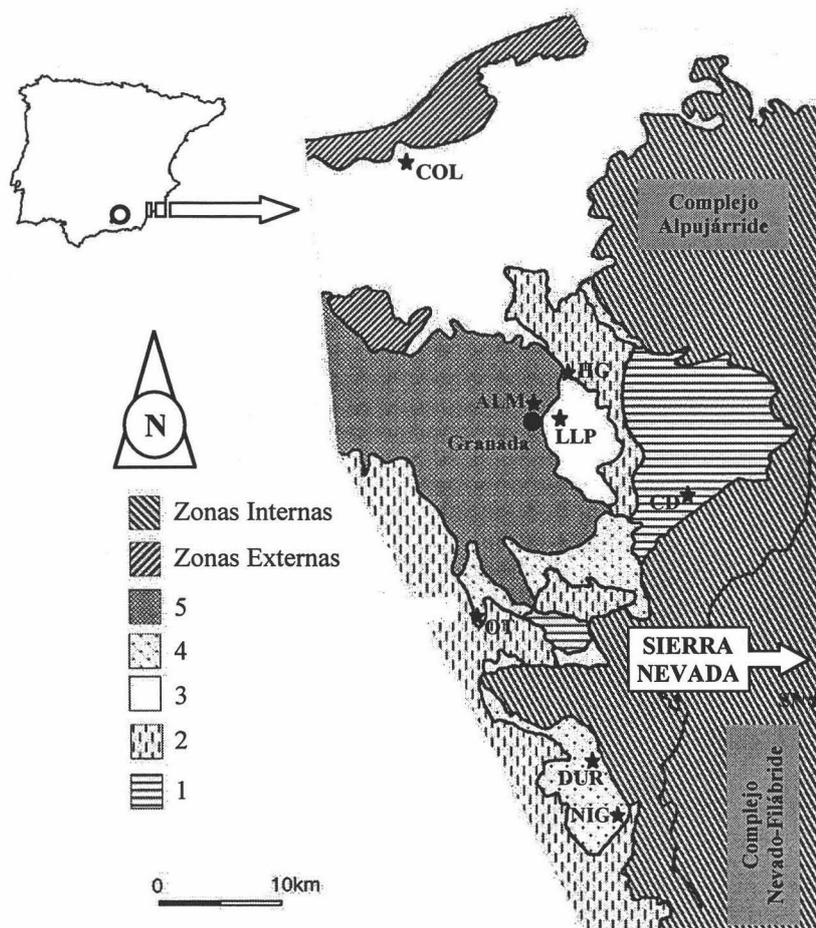


Figura 5.1. Mapa geológico simplificado de la zona de estudio. (1) Block Formation, Tortoniense Superior; (2) Margas, Tortoniense-Messiniense; (3) Formación Alhambra y conglomerados calcáreos procedentes de las Zonas Externas, Plio-Pleistoceno; (4) Abanicos aluviales, Pleistoceno-Holoceno; (5) Depósitos aluviales, Pleistoceno Superior-Holoceno.

El tercer sector se localiza al E de Granada capital, en la zona denominada Llano de la Perdiz. Aquí se desarrollan una serie de abanicos aluviales, cuya génesis parece responder a depósitos de debris flow. Estos abanicos, según los puntos, estarían nutridos tanto de Sierra Nevada como de otros relieves calizos. En uno de estos abanicos aluviales hemos estudiado el suelo de superficie LLP-1. Se desarrolla sobre materiales de la Formación Alhambra, constituida por conglomerados metamórficos del Complejo Nevado-Filábride con una cierta proporción de materiales carbonatados (calizas y dolomías del Complejo Alpujarride) y datada de principios del Pleistoceno (Aguirre, 1957; Ruiz Bustos *et al.*, 1992). Dada la imposibilidad de alcanzar el horizonte C, también se ha muestreado, en una zona próxima más erosionada, un segundo suelo (LLP-2) cuyo horizonte C ha servido como referencia del material original de ambos perfiles.

Al N de Granada capital se localiza la cuarta zona de estudio, en el paraje conocido como "Haza Grande". La base está constituida por dos suelos superpuestos (HG-1 y HG-2) cuyos horizontes C están formados por un material detrítico fino y carbonatado, similar morfológicamente a los del segundo sector, aunque se localizan unos 200 m por encima de aquel. Su edad no está bien definida, pero probablemente se trate de materiales margosos del Tortoniense-Messiniense (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999) ya que están enterrados por la Formación Alhambra (techo de la zona) sobre la que se desarrolla un suelo similar a los descritos en el Llano de la Perdiz.

En las cercanías de la población de Otura, a unos 9 km de Granada capital en dirección SW, se ha establecido la quinta zona de estudio. A la entrada de Otura viniendo de Dílar, se han estudiado tres suelos superpuestos y enterrados por depósitos conglomeráticos fuertemente carbonatados (OT-1, OT-2, OT-3), desarrollados sobre abanicos aluviales cuaternarios cuyos materiales proceden de Sierra Nevada (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999). A la salida de la población en dirección a La Malahá, en una superficie afectada por numerosos basculamientos, se estudiaron otros dos suelos superpuestos (OT-5 y OT-4) que, en este caso, estaban desarrollados sobre un material de naturaleza margosa, parecidos a los estudiados en el sector de Haza Grande. Se encuentran enterrados por sedimentos recientes.

El sexto sector estudiado está ubicado en el Valle de Lecrín, al NE de Dúrcal. Se trata de un suelo de superficie (DUR-1) desarrollado sobre un abanico aluvial datado de principios del Pleistoceno (Aguirre, 1957; Ruiz Bustos *et al.*, 1992; Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999) y constituido por un conglomerado de materiales metamórficos (micasquistos y cuarcitas del Complejo Nevado-Filábride) con una cierta proporción de materiales carbonatados (calizas y dolomías del Complejo Alpujárride), equivalente a la Formación Alhambra.

Entre Huetor-Vega y El Purche, en una ladera de elevada pendiente (34%) conocida como Cuesta del Desmayo, se localiza el séptimo sector. En él se ha estudiado el suelo CD-1, formado sobre un abanico aluvial de cantos metamórficos pertenecientes a la Block Formation (Von Drasche, 1879) y cuya edad más probable es Turolense Inferior (Tortoniense Superior) (Dabrio *et al.*, 1978; Lhenaff, 1979; Alcalá *et al.*, 1988). El suelo se presenta enterrado por depósitos más frescos de los mismos materiales metamórficos.

Junto a la carretera general Granada-Motril, en las proximidades de la población de Nigüelas, se seleccionó el octavo sector. Se trata de una sección vertical de aproximadamente 12 metros de altura, donde es posible distinguir cinco episodios de deposición de materiales conglomeráticos, equivalentes a los de los suelos DUR-1, LLP-1 y LLP-2 (micasquistos y cuarcitas del Complejo Nevado-Filábride con una

pequeña proporción de calizas y dolomías procedentes del Complejo Alpujárride). Estos episodios de deposición se alternan con episodios edafogenéticos, pudiéndose distinguir cinco suelos superpuestos (NIG-1, NIG-2, NIG-3, NIG-4 y NIG-5). La edad de estos materiales no está perfectamente definida, pero se interpreta que se han ido depositando a lo largo de los periodos fríos del Pleistoceno Medio-Superior (Sanz de Galdeano y López Garrido, 1999).

El noveno y último sector estudiado se localiza en la falda del Mulhacén (Alto del Chorrillo). Se trata de un interfluvio entre los ríos Mulhacén y Trevélez que no ha sido afectado por los episodios glaciares. En él se ha estudiado el suelo de superficie SN-1, desarrollado sobre micaesquistos del Complejo Nevado-Filábride y con signos evidentes de haber sido afectado por procesos periglaciares.

## **5.2. Métodos**

### **5.2.1. Métodos de campo**

En cada uno de los suelos muestreados se llevó a cabo una descripción macromorfológica siguiendo la guía de la FAO (1977) y las tablas Munsell (1954) para la caracterización del color. De cada horizonte, se tomaron muestras de agregados estructurales que fueron incluidas en resina (vinilbenceno estireno, con peróxido de benzoilo, naftenato de cobalto y monómero de estireno). Una vez solidificado el conjunto suelo-resina, se cortó y pulió hasta formar láminas delgadas en la que se estudiaron las características micromorfológicas según la metodología propuesta por Bullock *et al.* (1985).

### **5.2.2. Métodos analíticos de laboratorio**

En la preparación de las muestras para su análisis en el laboratorio se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Extensión sobre papel de filtro y secado al aire.
- Selección de agregados estructurales para su posterior estudio.
- Molienda con rodillo de madera y posterior tamizado con un tamiz de luz de malla de 2 mm.
- Lavado de la fracción grava, secado al aire y posterior pesada.
- Molienda fina de parte de cada muestra con un mortero de ágata.

En la fracción tierra fina (<2 mm) se llevaron a cabo una serie de determinaciones analíticas siguiendo los métodos que se describen a continuación.

#### 5.2.2.1. Carbono Orgánico (CO)

Método de Tyurin (1951), consistente en la oxidación de la materia orgánica de una muestra de suelo finamente molida con una disolución oxidante compuesta por volúmenes iguales de dicromato potásico ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0,4N y ácido sulfúrico concentrado (98%), utilizando sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) como catalizador. A continuación se valora el exceso de oxidante con Sal de Mohr ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) 0,1N, utilizando ácido fenilantranílico ( $C_{13}H_{11}O_2H$ ) como indicador. Los resultados se han expresado en % de carbono orgánico y los valores de materia orgánica se han obtenido multiplicando los de carbono orgánico por el factor 1,724.

#### 5.2.2.2. Carbonato cálcico equivalente ( $CaCO_3$ )

Método manométrico descrito por Barahona (1984), consistente en la medida de la presión de  $CO_2$  desprendido al reaccionar el carbonato cálcico de la muestra de suelo finamente molida y de peso conocido con una disolución de HCl al 50%. La medida se ha realizado con un calcímetro de dos columnas: una de mercurio, para medir el desprendimiento de  $CO_2$  de las muestras más carbonatadas, y otra con una disolución acuosa saturada en  $CO_2$  para las muestras menos carbonatadas. El contenido total de carbonato cálcico se expresa en porcentaje.

#### 5.2.2.3. Análisis Granulométrico

La fracción grava (>2mm), tras lavado y secado al aire, se ha pesado y viene expresada en porcentaje en peso referido al total de la muestra. El cálculo de los porcentajes de cada fracción granulométrica de la fracción fina (<2mm) se ha realizado tras la eliminación de la materia orgánica con  $H_2O_2$  y posterior dispersión con hexametáfosfato sódico (10%) (Loveland and Whalley, 1991). Las fracciones limo grueso (50-20 $\mu$ m), limo fino (20-2 $\mu$ m) y arcilla (<2 $\mu$ m) se han separado mediante la extracción con la Pipeta de Robinson (Soil Conservation Service, 1972), mientras que las fracciones de arena (2000-1000 $\mu$ m, 1000-500 $\mu$ m, 500-250 $\mu$ m, 250-100 $\mu$ m, 100-75 $\mu$ m y 75-50 $\mu$ m) se han separado mediante tamizado en una cascada de tamices de luz de malla progresivamente menor.

#### 5.2.2.4. Densidad aparente (Da)

Se ha determinado sumergiendo el agregado estructural en una resina "saran", que tiene la particularidad de ser hidrófoba y, por tanto, impermeabiliza el agregado. Una vez impregnado, el agregado se pesa en seco ( $P_s$ ) y se sumerge en agua ( $P_a$ ), calculándose la densidad aparente a partir de la ecuación:

$$Da = P_s / (P_s - P_a)$$

#### *5.2.2.5. Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE)*

Se ha utilizado el método de Richards (1954), basado en la preparación de una pasta saturada de tierra fina con agua destilada. Tras dejarla en reposo durante 24 horas, se ha filtrado al vacío en un embudo Buchner, obteniéndose así el extracto acuoso. La medida de la conductividad eléctrica se ha realizado en dicho extracto acuoso, utilizando un Conductivímetro Crison 522 con electrodo de vidrio, calibrado con una disolución de KCl 0,01M. Los valores de la conductividad eléctrica se han expresado en  $\text{dS m}^{-1}$  a 25°C.

#### *5.2.2.6. pH*

Se ha determinado en una suspensión de tierra fina:agua destilada en relación 1:2.5, medido con un pH/mVmetro Crison digit 501 con electrodo de vidrio.

#### *5.2.2.7. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases de cambio*

Se han determinado sobre la misma muestra y de forma sucesiva. Las bases de cambio se han obtenido saturando la tierra fina con acetato amónico 1N a pH 7,0, en tubos de percolación y utilizando como obturador lana de vidrio. En el lixiviado se han medido Ca y Mg mediante espectrofotometría de absorción atómica, con un equipo Perkin-Elmer 305B, y Na y K mediante fotometría de llama, utilizando un Fotómetro de llama Meteor-Nak II. La capacidad de intercambio catiónico se ha obtenido saturando posteriormente la muestra de suelo con acetato sódico 1N a pH 8,2, lavando con alcohol y desplazando de nuevo el Na con acetato amónico 1N a pH 7,0. La medida se ha realizado por fotometría de llama con el mismo equipo descrito anteriormente. Los resultados se han expresado en  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ .

#### *5.2.2.8. Total de óxidos de hierro y aluminio y formas amorfas*

El total de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_d$ ) y aluminio ( $\text{Al}_d$ ) se han extraído con citrato y ditionito sódicos (Holmgren, 1967) y las formas amorfas ( $\text{Fe}_o$  y  $\text{Al}_o$ ) con oxalato amónico y ácido oxálico (Schwertmann y Taylor, 1977). El hierro y aluminio en los extractos se han medido por espectrofotometría de absorción atómica en un equipo Perkin-Elmer 305B. Los resultados se han expresado en porcentaje.

#### *5.2.2.9. Análisis elemental*

Se ha realizado mediante Fluorescencia de R-X sobre una muestra perlada con tetraborato de litio ( $\text{B}_4\text{O}_7\text{Li}_2$ ) y yoduro de litio (LiI) en una proporción 1:10, fundida en

una perladora Philips PERL'X<sub>2</sub> sobre un crisol de platino. El equipo utilizado consta de un Espectrómetro de Fluorescencia de R-X Philips PW-1404.

Con esta metodología, se han determinado los porcentajes totales de Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti y P, así como el contenido en Zr (ppm).

El contenido en elementos traza (As, Ba, Br, Co, Cr, Mo, Ni, Rb, Y, Sr, V, Cu, Pb, Zn y Th) se ha determinado en la fracción <2 mm finamente molida, mediante INNA (Instrumental Neutron Activation Analysis) y digestión ácida con HF, HClO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> y HCl utilizando la técnica ICP-MS.

### 5.2.3. Métodos mineralógicos

#### 5.2.3.1. Mineralogía de la fracción arcilla

Se han realizado difracciones de R-X de agregados orientados, solvatados con etilenglicol y con dimetilsulfóxido, en un equipo Philips PW-1700 y utilizando radiación CuK $\alpha$ . Para el estudio semicuantitativo se han empleado los poderes reflectantes de Schultz (1964) y Barahona (1974).

### 5.2.4. Cálculo de Índices

#### 5.2.4.1. Índice de enrojecimiento (Rr)

Se ha calculado a partir de los datos de hue, chroma y value estimados para cada horizonte. La expresión utilizada (Hurst, 1977) ha sido:

$$Rr = (\text{Hue} \times \text{Chroma}) / \text{Value}$$

donde el hue toma los siguientes valores: 10YR = 0,0; 7,5YR = 2,5; 5YR = 5,0; 2,5YR = 7,5; 10R = 10,0.

#### 5.2.4.2. Índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>)

Con objeto de estimar el grado de desarrollo de cada perfil, se ha calculado un índice de acumulación de arcilla mediante la expresión (Levine y Ciolkosz, 1983):

$$Ia = \Sigma (B-C) \times T$$

donde:

B = Contenido en arcilla del horizonte B (%).

C = Contenido en arcilla del horizonte C (%).

T = Espesor del horizonte B (cm).

Asimismo, se ha calculado un índice de acumulación de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ), utilizando la misma expresión anterior, pero en la que:

B = Contenido en  $Fe_d$  del horizonte B (%).

C = Contenido en  $Fe_d$  del horizonte C (%).

T = Espesor del horizonte B (cm).

### **5.2.5. Estimación de la edad de los suelos**

La edad de los suelos (años) se ha estimado a partir de la ecuación de Levine y Ciolkosz (1983):

$$\log(\text{edad}) = 1,81 + 0,998 \times \log(Ia)$$

## 6. Grado de homogeneidad/heterogeneidad entre los suelos

### 6.1. Horizontes C

Con objeto de evaluar el grado de homogeneidad/heterogeneidad del material original de todos los suelos estudiados, se ha realizado un análisis estadístico de las diferentes propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes C de cada uno de los distintos suelos. Para ello, se ha llevado a cabo un Análisis de conglomerados jerárquicos (Cluster), que identifica grupos relativamente homogéneos basándose en las características seleccionadas. Se ha seleccionado la distancia euclídea al cuadrado como medida de distancia o similitud empleada en la aglomeración. Para evaluar la cohesión de los conglomerados formados y proporcionar información sobre el número adecuado de conglomerados que deben considerarse (en este caso, grupos de suelos), se ha construido el dendograma de la Figura 6.1.

El análisis anterior ha permitido distribuir los horizontes C de los distintos suelos en cinco grupos (conglomerados) estadísticamente homogéneos: el *grupo 1* está formado por todos los suelos de Nigüelas (de NIG-5 a NIG-1), el de la Cuesta del Desmayo (CD-1) y el de Sierra Nevada (SN-1); el *grupo 2* está constituido por los suelos de Haza Grande (HG-2 y HG-1) y parte de los de Otura (OT-5 y OT-4); el *grupo 3* lo forman los suelos del Llano de la Perdiz (LLP-1 y LLP-2) y el de Dúrcal (DUR-1); el *grupo 4* está formado por los suelos de Almanjáyar (de ALM-3 a ALM-1), el resto de los de Otura (OT-1, OT-2 y OT-3) y los suelos enterrados de Colomera (de COL-1 a COL-9); por último, *el grupo 5* está sólo constituido por el suelo COL-10. Los valores medios de las distintas propiedades consideradas en los horizontes C para los cinco grupos de suelos resultantes se recogen en la Tabla 6.1.1

Además de separar los distintos suelos en función de las semejanzas que muestran sus horizontes C, se ha procedido a estudiar estadísticamente sus propiedades (variables), considerando los grupos de suelos obtenidos a partir del Dendograma como una variable más. Así, se ha utilizado el procedimiento denominado Modelo Lineal General Univariante (SPSS v. 10.0). Este proporciona un análisis de regresión y un análisis de varianza para una variable dependiente mediante un factor o variable. Al mismo tiempo, se han empleado las pruebas “post hoc” para evaluar las diferencias entre las medias específicas de cualquier variable que haya mostrado diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Estas pruebas no han podido realizarse con el grupo 5 puesto que consta tan sólo de una muestra (COL-10). No obstante, los valores de sus propiedades también se ha comparado con los del resto de los otros grupos de suelos. Los resultados de este tratamiento estadístico han permitido establecer, para cada propiedad, las diferencias significativas entre los distintos grupos de suelos

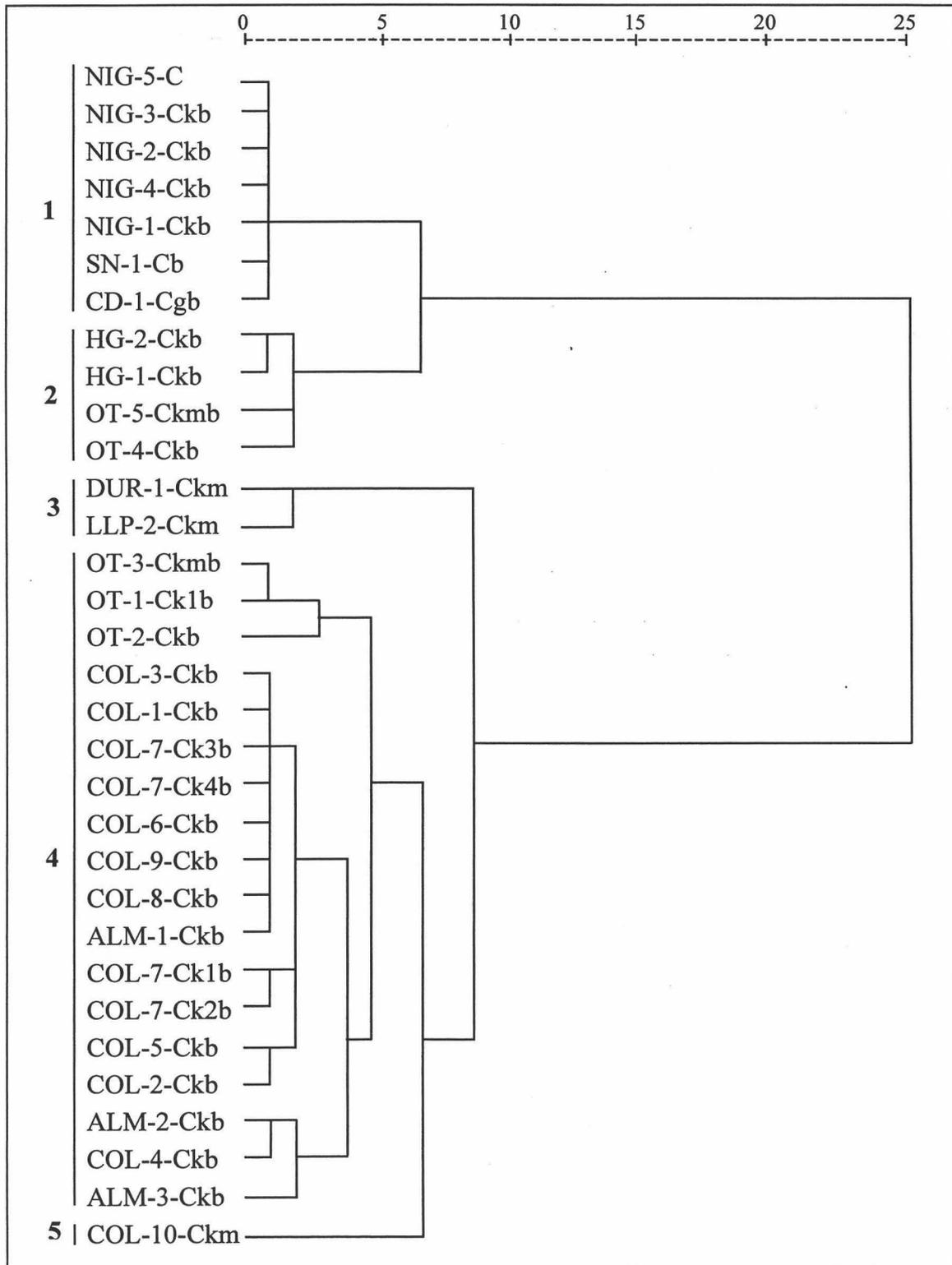


Figura 6.1. Dendrograma obtenido a partir del Análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes C de todos los suelos estudiados.

Tabla 6.1.1. Valores medios de las propiedades de los horizontes C de los cinco grupos de suelos establecidos en el Análisis de conglomerados jerárquicos. (CO= Carbono orgánico; CE= Conductividad eléctrica; CIC= Capacidad de intercambio catiónico). El símbolo geométrico hace referencia a la significación de la variación de la propiedad entre los distintos grupos de suelos: diferente = significativa, igual = no significativa.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Grava (%)	48,9	39,7	52,1	26,2	44,3
Arena (%)*	55,8	35,7	69,7	17,4	46,3
Limo (%)*	30,8	42,7	22,3	57,1	38,8
Arcilla (%)	13,4	21,5	7,9	25,5	14,9
pH	7,8	8,9	8,5	8,8	8,7
CO (%)	0,19	0,11	0,32	0,16	0,02
CaCO <sub>3</sub> (%)*	4,6	34,2	33,3	54,8	80,0
CE (dS m <sup>-1</sup> )	1,65	1,51	0,83	0,36	0,30
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,07	0,12	0,12	0,07	0,05
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,06	0,11	0,09	0,23	0,10
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	7,85	21,55	19,86	30,31	39,25
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	4,15	6,42	1,00	2,51	0,50
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	8,12	7,67	4,73	11,59	6,30
SiO <sub>2</sub> (%)*	61,88	44,37	44,30	25,51	12,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	18,14	9,36	9,00	6,71	2,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	7,14	4,02	4,41	2,92	1,53
MnO (%)	0,09	0,05	0,08	0,04	0,04
MgO (%)	1,40	3,15	1,65	1,64	0,86
CaO (%)*	2,95	17,50	19,27	32,49	44,64
Na <sub>2</sub> O (%)*	1,31	0,58	0,67	0,26	0,22
K <sub>2</sub> O (%)*	2,44	1,54	1,27	1,00	0,15
TiO <sub>2</sub> (%)*	1,01	0,58	0,45	0,32	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,09	0,08	0,06	0,05	0,02
Zr (ppm)*	271,3	202,9	128,0	87,9	28,4
Fe <sub>d</sub> (%)*	1,93	0,12	0,55	0,12	0,17
Fe <sub>o</sub> (%)	0,26	0,01	0,02	0,01	0,09
Al <sub>d</sub> (%)*	0,22	0,06	0,06	0,07	0,07
Al <sub>o</sub> (%)	0,06	0,01	0,04	0,03	0,03

\* diferencias significativas en el conjunto de los grupos (p < 0,05)

De acuerdo con estos resultados, existen diferencias significativas entre los distintos grupos de suelos en cuanto a la textura, el contenido en  $\text{CaCO}_3$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio, algunos elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ ), el contenido en zirconio y los valores del total de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_d$ ) y de óxidos de aluminio ( $\text{Al}_d$ ).

### *Textura*

En relación a las características texturales, estos cinco grupos muestran diferencias significativas en el contenido en arena y limo. Los grupos 1, 3 y 5 son más arenosos y menos limosos, mientras que los grupos 2 y 4 presentan cantidades muy inferiores de arena y sensiblemente superiores de limo. Las diferencias en el contenido en arcilla y gravas no son significativas, pero se observa que los grupos 2 y 4 contienen más arcilla y son menos gravosos. Los suelos de los grupos 1 y 3 se desarrollaron sobre los abanicos aluviales procedentes de las Zonas Internas y están formados por materiales gravosos de naturaleza predominantemente metamórfica (Complejo Nevado-Filábride, con menor proporción de materiales carbonatados del Complejo Alpujárride). Los suelos de los grupos 2 y 4 se formaron tanto sobre abanicos aluviales cuyos materiales proceden de la erosión de los relieves carbonatados de las Zonas Externas (COL) como sobre depósitos lutíticos de antiguas llanuras de inundación y depósitos marinos someros de naturaleza margosa (ALM, HG y OT). El suelo COL-10 (grupo 5) se formó sobre el mismo tipo de materiales que los suelos que tiene topográficamente por debajo (COL-9 a COL-1) pero, tal y como se ha expuesto anteriormente, su textura es mucho más grosera que la de estos últimos y se asemeja más a la de los suelos formados sobre los materiales procedentes de las Zonas Internas. Estas diferencias pueden ser debidas a una mayor energía de las aguas durante el depósito del material original del suelo COL-10.

### *CaCO<sub>3</sub>*

El grupo 1 presenta el contenido más bajo, seguido por los grupos 2 y 3, el grupo 4 y COL-10 (grupo 5), que es el que muestra el valor más alto. En general, como es lógico, el contenido en  $\text{CaCO}_3$  es mayor en los materiales procedentes de las Zonas Externas. No obstante, los suelos del grupo 3, cuyos materiales proceden de las Zonas Internas, presentan contenidos relativamente altos en  $\text{CaCO}_3$ . Esto podría ser atribuido a que, o bien el material original de los suelos de este grupo tiene una mayor proporción de materiales carbonatados del Complejo Alpujárride en relación al de los suelos del grupo 1, o bien a que los horizontes C incrementaron su contenido durante el proceso de evolución por lavado de los horizontes superiores o por aporte de las aguas de escorrentía. De forma similar, el gran contenido en carbonato cálcico del material original del suelo COL-10, además de por su procedencia de las Zonas Externas, podría

deberse a que también en él han actuado los procesos de acumulación descritos anteriormente.

#### *Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> intercambiable*

Las diferencias en el contenido en carbonato cálcico entre los materiales originales de los distintos grupos de suelos serían también los responsables de los valores del Ca<sup>2+</sup> intercambiable. Este presenta valores mínimos en los suelos del grupo 1, intermedios en los de los grupos 2 y 3 y máximos en los grupos 4 y 5. Por su parte, el Mg<sup>2+</sup> de cambio es menor en los grupos 3, 4 y 5 y bastante más alto en los grupos 1 y 2; lo que parece indicar que los materiales carbonatados de las Zonas Internas son más ricos en materiales dolomíticos que los de las Zonas Externas.

#### *Elementos totales*

Los contenidos en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub> están inversamente relacionadas con el contenido en CaCO<sub>3</sub>, por lo que este constituyente ejerce un papel de dilución respecto a los demás. De hecho, si establecemos el contenido medio en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> respecto al material no carbonatado, en todos los grupos de suelos se sitúan en torno al 64% y 14% respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Por el contrario, como es lógico, el contenido en CaO se incrementa al aumentar el contenido en CaCO<sub>3</sub>.

#### *Oxidos totales de hierro y aluminio*

Estos óxidos, al igual que las formas totales, se ven influenciados por el contenido en CaCO<sub>3</sub>; no obstante, en general, los materiales procedentes de las Zonas Internas suelen tener un mayor contenido en estos óxidos.

Dado que el grupo 4 está compuesto por un número elevado de suelos (Fig. 6.1.2), se han analizado también las diferencias que existen entre ellos. Esto ha llevado a subdividir el grupo 4 en tres subgrupos relativamente homogéneos: el *subgrupo 4.1*, formado por los horizontes Ck de los suelos OT-1, OT-2 y OT-3; el *subgrupo 4.2*, compuesto por los horizontes C de ALM-1 y los horizontes C de los suelos enterrados de Colomera, excepto COL-4; y el *subgrupo 4.3*, que incluye a los horizontes C de ALM-2, ALM-3 y COL-4.

A los tres subgrupos anteriores se les ha vuelto a aplicar el Modelo Lineal Univariante y las pruebas "post hoc" (Tabla 6.1.2), con objeto de evaluar nuevamente las diferencias entre las medias específicas de cualquier variable que haya mostrado diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Tabla 6.1.2. Valores medios de las distintas propiedades de los horizontes C de los tres subgrupos del grupo 4 (CO= Carbono orgánico; CE= Conductividad eléctrica; CIC= Capacidad de intercambio catiónico). El símbolo geométrico hace referencia a la significación de la variación de la propiedad entre los distintos grupos de suelos: diferente = significativa, igual = no significativa.

	Grupo 4.1	Grupo 4.2	Grupo 4.3
Grava (%)*	64,5	15,4	6,0
Arena (%)*	35,8	11,8	8,8
Limo (%)	47,4	62,8	50,3
Arcilla (%)*	16,7	25,4	40,8
pH	9,0	8,7	8,6
CO (%)	0,22	0,13	0,19
CaCO <sub>3</sub> (%)*	60,8	56,2	39,3
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,49	0,33	0,33
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,11	0,05	0,08
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	0,08	0,26	0,39
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	26,97	31,32	31,83
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	2,46	1,93	4,93
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	4,69	13,99	13,50
SiO <sub>2</sub> (%)*	22,81	24,02	35,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	5,44	6,21	10,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	2,46	2,79	4,24
MnO (%)*	0,02	0,05	0,07
MgO (%)*	1,33	1,28	3,62
CaO (%)*	35,72	34,25	20,05
Na <sub>2</sub> O (%)	0,27	0,22	0,38
K <sub>2</sub> O (%)*	0,73	0,91	1,81
TiO <sub>2</sub> (%)*	0,27	0,30	0,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,03	0,05	0,08
Zr (ppm)*	92,6	76,8	125,0
Fe <sub>d</sub> (%)	0,15	0,10	0,13
Fe <sub>o</sub> (%)	0,01	0,01	0,01
Al <sub>d</sub> (%)*	0,03	0,09	0,10
Al <sub>o</sub> (%)	0,03	0,02	0,04

\* significativo al nivel de probabilidad 0,05 (p < 0,05)

De acuerdo con la Tabla 6.1.2, existen diferencias significativas, aunque lógicamente de menor rango, entre los distintos subgrupos en: textura, contenido en  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio, la capacidad de intercambio catiónico, algunos elementos mayoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), el contenido en zirconio y el total de óxidos de aluminio ( $\text{Al}_d$ ).

En relación a las características texturales, estos tres subgrupos muestran diferencias significativas con respecto al contenido en gravas, arena y arcilla. El subgrupo 4.1 es el más gravoso y arenoso, mientras que el 4.3 es más arcilloso. Con respecto al contenido en  $\text{CaCO}_3$ , son los subgrupos 4.1 y 4.2 los más carbonatados. La CIC es más elevada en los subgrupos 4.2 y 4.3, al igual que el  $\text{K}^+$  de cambio. Sin embargo, el  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio es más elevado en el subgrupo 4.3, que es el que tiene el menor contenido en carbonatos, lo que a su vez hace que, por el efecto de dilución de los carbonatos, sea el más rico en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Zr y  $\text{Al}_d$ .

## 6.2. Horizontes B

Una vez analizado el grado de homogeneidad/heterogeneidad del material original (horizontes C) de todos los suelos descritos en esta memoria, hemos evaluado, siguiendo la misma metodología, los horizontes B más evolucionados de cada perfil. El objetivo es establecer si materiales de origen y naturaleza semejantes han seguido un desarrollo edafogénico parecido o, por el contrario, han experimentado una evolución distinta.

El dendograma obtenido (Fig. 6.2) distribuye los horizontes B más evolucionados de los suelos en cuatro grupos (conglomerados) estadísticamente homogéneos: el *grupo 1* está formado por los suelos NIG-3, DUR-1, CD-1, SN-1, OT-1, OT-5, LLP-1 y LLP-2; el *grupo 2* está constituido solamente por el suelo COL-10; el *grupo 3* lo forman los suelos de Haza Grande (HG-1 y HG-2), los suelos ALM-1 y ALM-2, el resto de los suelos de Nigüelas (NIG-1, NIG-2 y NIG-4) y de Otura (OT-2, OT-3 y OT-4); por último, el *grupo 4* está formado por el suelo ALM-3 y los suelos enterrados de Colomera (de COL-1 a COL-9). Los valores medios de las distintas propiedades de los horizontes B de cada uno de los grupos se recogen en la Tabla 6.2.

Al igual que en los horizontes C, se ha aplicado el Modelo Lineal General Univariante (SPSS v. 10.0) y las pruebas "post hoc", con objeto de evaluar las diferencias entre las medias específicas de cualquier variable que haya mostrado diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Estas pruebas no han podido realizarse con el grupo 2 porque sólo está formado por una muestra (COL-10), pero los valores de las propiedades de su horizonte B también se han comparado con los del resto de los otros

grupos de suelos. De acuerdo con los resultados, existen diferencias significativas entre los distintos grupos de suelos en cuanto a la textura, el pH, el contenido en  $\text{CaCO}_3$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio, la capacidad de intercambio catiónico, algunos elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ ), el contenido en zirconio y los valores del total de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_d$ ) y aluminio amorfo ( $\text{Al}_0$ ).

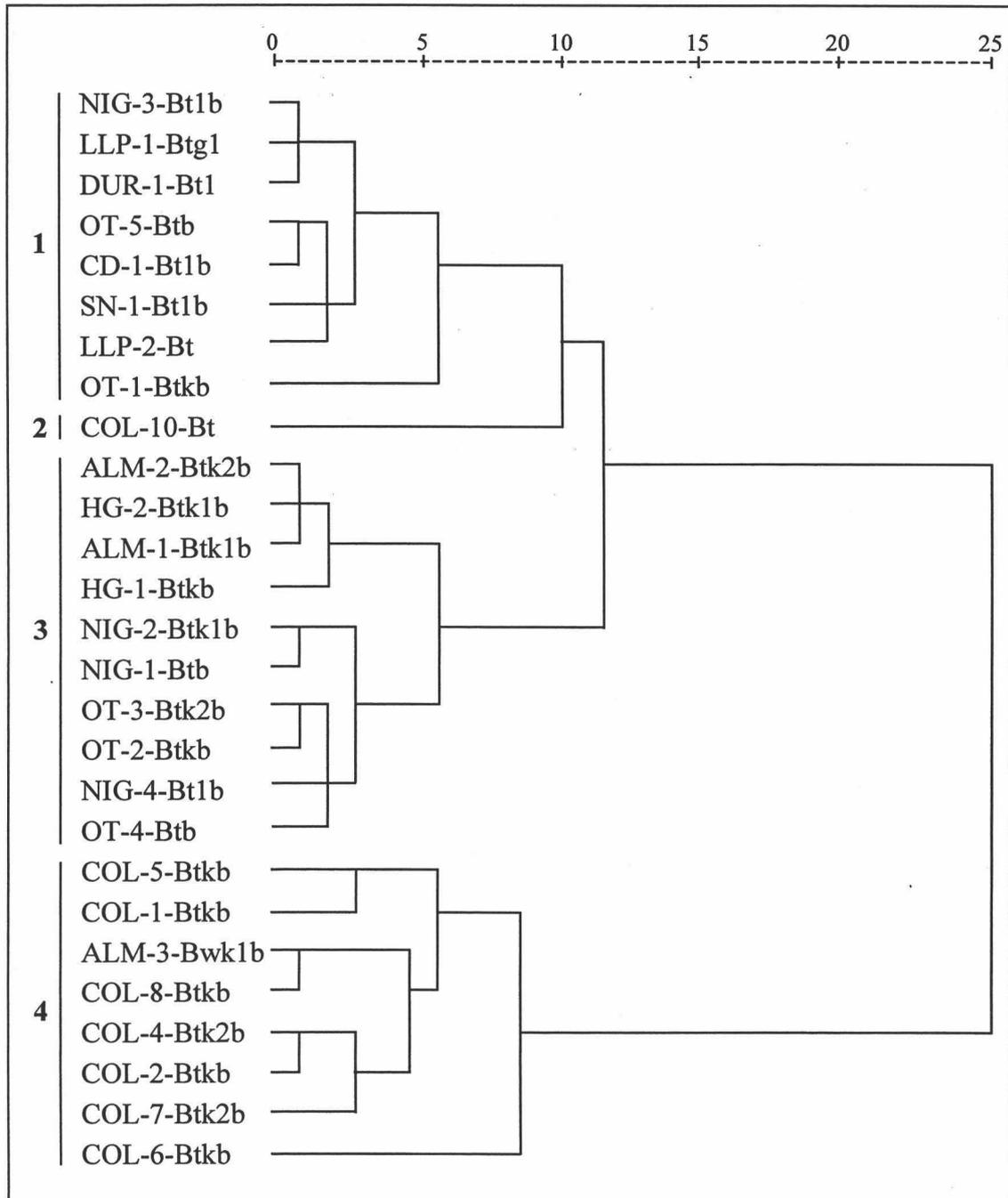


Figura 6.2. Dendrograma obtenido a partir del Análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes B más evolucionados de todos los suelos estudiados.

Tabla 6.2. Valores medios de las propiedades de los horizontes B más evolucionados en los cuatro grupos de suelos establecidos en el Análisis de conglomerados jerárquicos. (CO= Carbono orgánico; CE= Conductividad eléctrica; CIC= Capacidad de intercambio catiónico). El símbolo geométrico hace referencia a la significación de la variación de la propiedad entre los distintos grupos de suelos: diferente= significativa, igual= no significativa.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Grava (%)*	31,9	0,2	15,5	8,4
Arena (%)*	32,9	5,0	28,3	11,8
Limo (%)*	15,8	3,4	27,9	50,3
Arcilla (%)*	51,3	91,6	43,7	37,8
pH*	7,6	7,7	8,4	8,6
CO (%)	0,35	0,05	0,26	0,15
CaCO <sub>3</sub> (%)*	2,1	0,8	4,0	34,2
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,10	0,14	0,12	0,06
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,32	0,87	0,40	0,42
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	11,54	33,20	12,52	30,50
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	4,72	1,67	9,13	2,70
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )*	15,82	38,65	14,98	18,98
SiO <sub>2</sub> (%)*	55,25	51,52	59,58	36,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	20,88	23,92	17,34	9,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)*	8,98	9,65	7,12	4,17
MnO (%)	0,09	0,15	0,08	0,09
MgO (%)	1,24	1,22	1,82	1,56
CaO (%)*	1,97	1,33	2,78	23,50
Na <sub>2</sub> O (%)*	0,80	0,70	0,73	0,32
K <sub>2</sub> O (%)*	2,18	2,44	2,63	1,55
TiO <sub>2</sub> (%)*	0,74	0,71	0,88	0,45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,11	0,11	0,08	0,06
Zr (ppm)*	173,0	146,4	234,6	121,3
Fe <sub>d</sub> (%)*	3,02	4,56	1,35	0,31
Fe <sub>o</sub> (%)	0,26	0,14	0,06	0,02
Al <sub>d</sub> (%)	0,27	0,24	0,16	0,10
Al <sub>o</sub> (%)*	0,14	0,12	0,07	0,05

\* diferencias significativas en el conjunto de los grupos (p < 0,05)

### *Textura*

En relación a las características texturales, estos cuatro grupos de suelos muestran diferencias significativas en el contenido en grava, siendo este más elevado en los grupos 1 y 3, y mínimo en el grupo 2. Los grupos 1 y 3 son también los más arenosos, sin existir diferencias significativas entre ellos, mientras que el grupo 2 es también el más pobre en arena. El contenido en limo presenta también diferencias significativas en todos los grupos, siendo el grupo 4 el que presenta el mayor contenido y el 2 el menor. Por último, la arcilla es más elevada en el grupo 2, alcanzando casi un 95% del total de las fracciones finas; le siguen los grupos 1, 2 y 3, aunque las diferencias entre ellos no son significativas.

### *CaCO<sub>3</sub> y pH*

Los horizontes B del grupo 4 son los que presentan un mayor contenido en carbonato cálcico equivalente, el cual es significativamente diferente del que presentan los otros grupos que, por otra parte, es relativamente pequeño. Con respecto al pH, en los grupos 1 y 2 alcanza un valor de alrededor de 7,7 y no existen diferencias significativas entre ellos; sí son diferentes con respecto a los grupos 3 y 4, en los que el pH se sitúa en torno a 8,5.

### *Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> intercambiable*

El grupo 2, debido a su elevado contenido en arcilla, es el que presenta el mayor valor de CIC, el cual es significativamente diferente del de los otros grupos que, a su vez, no presentan diferencias significativas entre ellos. Como ocurría para el material original, las diferencias en el contenido en carbonato cálcico entre los horizontes B es la responsable del contenido en Ca<sup>2+</sup> intercambiable. No obstante, el horizonte B del grupo 2, que es el que tiene menos carbonato cálcico, presenta un contenido relativamente alto en Ca<sup>2+</sup> de cambio, similar al del grupo 4 (el más carbonatado); esto habría que atribuirlo a su elevada CIC. Con respecto al Mg<sup>2+</sup> de cambio, es más elevado en los grupos 1 y 3, formados sobre materiales de las Zonas Internas, con valores significativamente diferentes de los de los grupos 2 y 4, formados sobre materiales de las Zonas Externas.

### *Elementos totales*

Los contenidos en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub> de los horizontes B, al igual que en los horizontes C, están inversamente relacionadas con el contenido en CaCO<sub>3</sub>, por lo que este constituyente ejerce un papel de dilución respecto a los demás. De hecho, como ocurría en los horizontes C, los contenidos medios en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en

el material no carbonatado en todos los grupos de suelos se sitúan en torno al 55% y 18% respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Por el contrario, como es lógico, el contenido en CaO se incrementa al aumentar el contenido en CaCO<sub>3</sub>. Por su parte, el contenido en Zr es significativamente diferente en todos los grupos de suelos y tiende a ser más elevado en los grupos 3 y 1, formados sobre materiales de las Zonas Internas.

#### *Oxidos totales de hierro y aluminio*

Los contenidos en óxidos totales de hierro y aluminio de los grupos 1 y 2 son más elevados y significativamente diferentes de los de los grupos 3 y 4. Esto, a priori, podría interpretarse en el sentido de que los primeros han sufrido un proceso de meteorización más intenso.

### **6.3. Análisis comparativo de los horizontes C y B**

El análisis comparativo de los distintos grupos de horizontes C y B (Fig. 6.3), pone de relieve que en un mismo grupo de horizontes B (p. ej., grupo 1) se incluyen suelos cuyos horizontes C son significativamente diferentes (p. ej., grupos 1, 2, 4 y 5). Esto implica que materiales originales distintos han tenido una evolución convergente en el tiempo, hasta formar horizontes B con características similares. Esto habría que atribuirlo a que los demás factores formadores, especialmente el clima, han sido equivalentes. Por el contrario, materiales originales muy similares (p. ej., grupo 5) han dado lugar a suelos con horizontes B significativamente diferentes (p. ej., grupos 3 y 4), lo que implica evoluciones divergentes que serían atribuibles, igualmente, a diferencias en los factores formadores. No obstante, lo más frecuente es que el material original condicione la tendencia de evolución de los suelos. Así, son numerosos los grupos de suelos con horizontes C homogéneos que evolucionan hacia similares horizontes B: del grupo 1, NIG-3, CD-1 y SN-1 por un lado, y NIG-1, NIG-2 y NIG-4 por otro; el grupo 2; del grupo 4, OT-4, HG-1 y HG-2; finalmente, en el grupo 5 existen dos tendencias: la del subgrupo formado por OT-2, OT-3, ALM-1 y ALM-2, y la del subgrupo constituido por ALM-3, COL-1, COL-2, COL-4, COL-5, COL-6, COL-7 y COL-8.

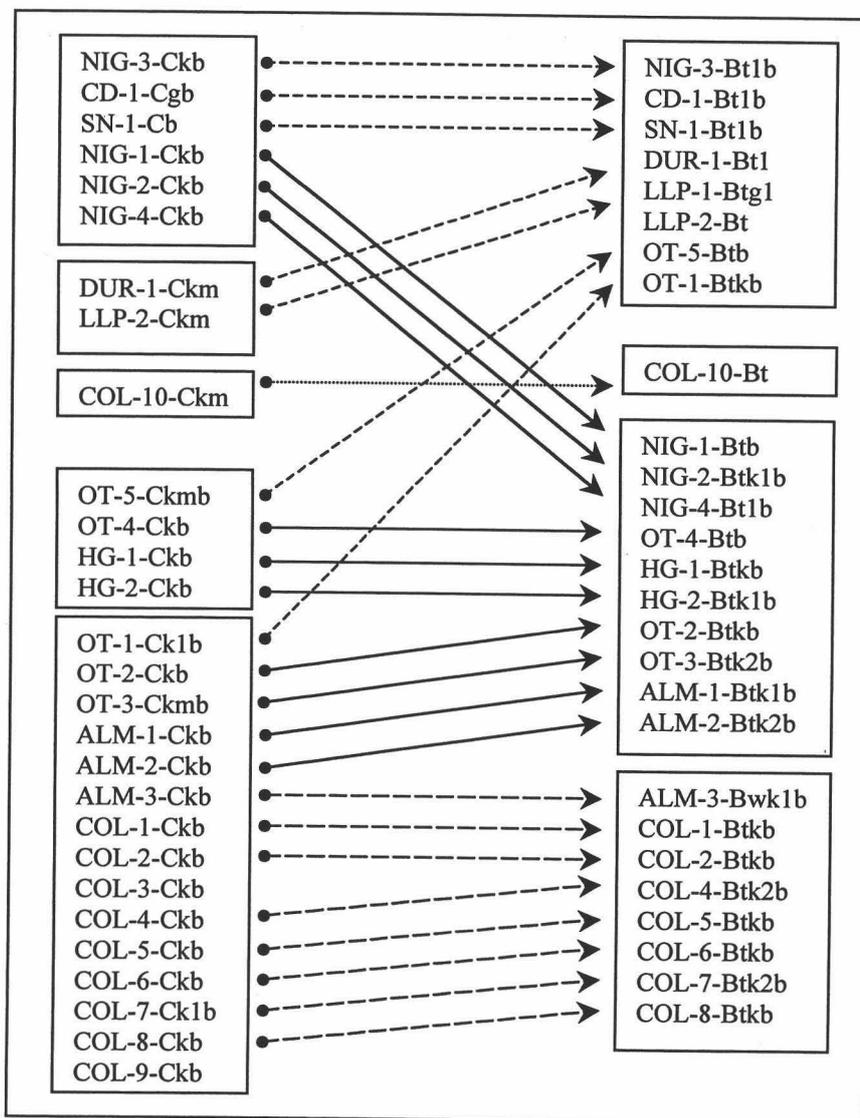
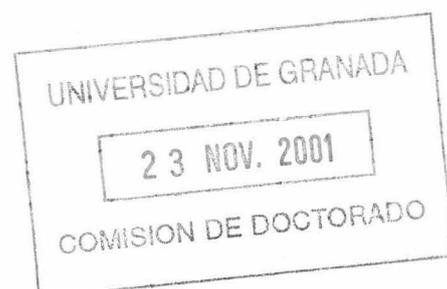


Figura 6.3. Comparación entre los horizontes C y B de los distintos grupos de suelos establecidos mediante el Análisis de conglomerados jerárquicos.

## 7. Análisis del grado de evolución de los suelos

El análisis estadístico del capítulo anterior ha permitido diferenciar grupos de suelos cuyos horizontes B presentaban características similares. No obstante, para establecer una mayor homogeneidad dentro de los horizontes B, hemos evaluado el grado de evolución de cada uno de ellos basándonos en la diferencia en el contenido en arcilla y total de óxidos de hierro ( $Fe_d$ ) entre los horizontes B y C (Levine y Ciolkosz, 1983; Arduino *et al.*, 1986). Cuanto mayores son estas diferencias mayor es el grado de evolución alcanzado por el suelo. De acuerdo con los resultados (Fig. 7), se pueden establecer siete grupos dentro de los cuales los grados de evolución de los suelos son parecidos entre sí, aunque cada suelo pueden seguir manteniendo características peculiares que intentaremos ir descifrando a lo largo de la memoria. En la denominación de cada grupo, el número romano hace referencia a la diferencia en el contenido en arcilla (I = más del 45%, II = entre 25 y 45%, III = entre 10 y 25% y IV = menos del 10%) y la letra a la diferencia en el contenido en  $Fe_d$  ( $a$  = más del 2%,  $b$  = entre 1 y 2%, y  $c$  = menos del 1%).

Dentro de cada grupo, el grado de evolución es similar y, por tanto, cabría esperar que dichos suelos se formasen bajo una combinación equivalente de factores formadores, especialmente en lo referente a las condiciones climáticas.



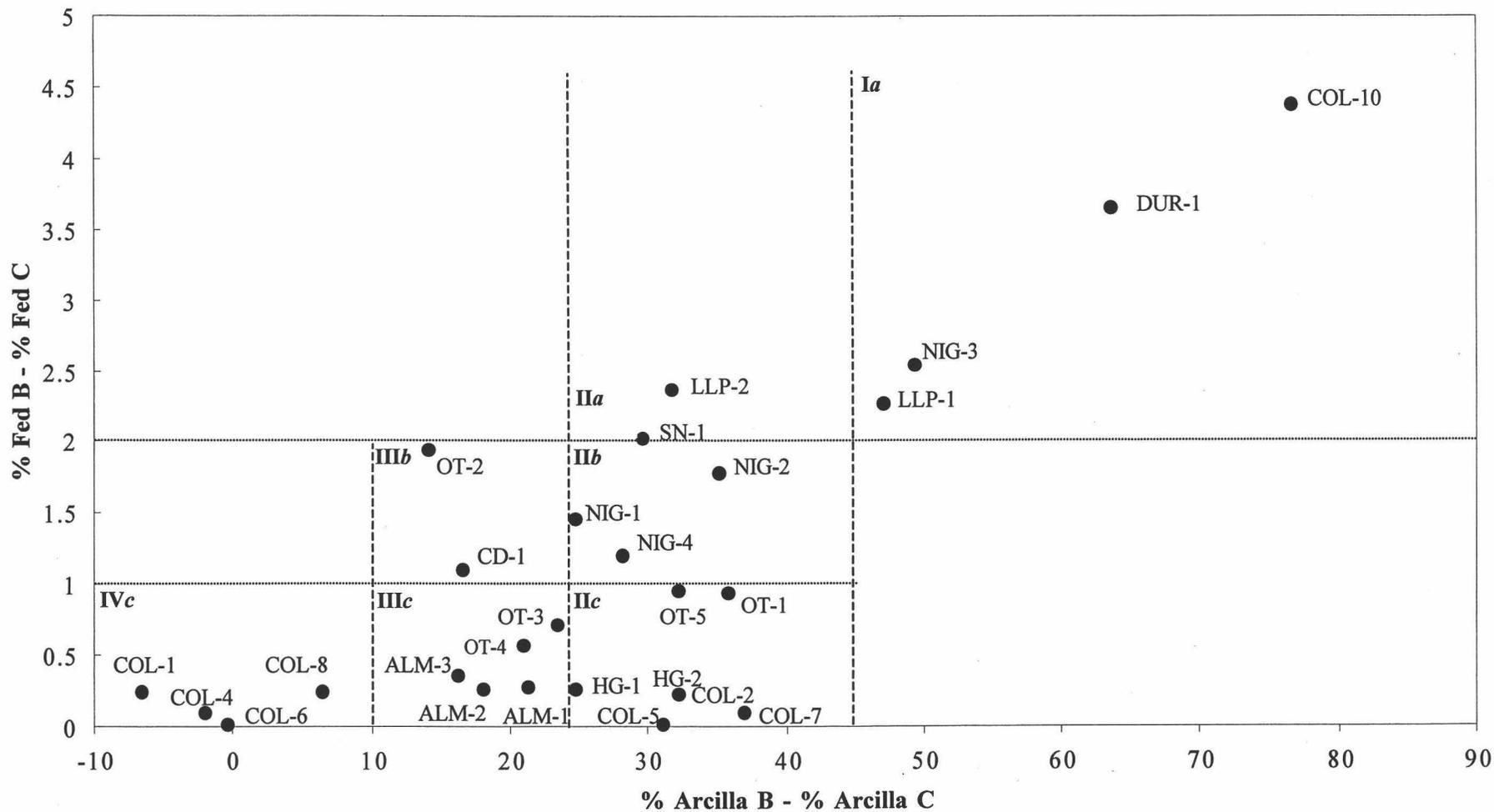


Figura 7. Diferencias en los contenidos de arcilla y total de óxidos de hierro ( $Fe_d$ ) entre los horizontes B y C de todos los suelos estudiados.

## 7.1. Grupo *Ia*

### 7.1.1. Características macromorfológicas

Desde el punto de vista macromorfológico, los suelos de superficie COL-10, DUR-1 y LLP-1 están caracterizados por poseer un perfil de tipo A-Bt-Ckm. Los suelos COL-10 (bajo cultivo de olivar) y DUR-1 (bajo cultivo de almendros) han sido erosionados, puesto que han perdido sus horizontes A y E originales, y sus horizontes Ap actuales están formados por el material del horizonte Bt modificado por el laboreo. Sin embargo, el suelo LLP-1 no parece haber sufrido un proceso intenso de erosión, ya que conserva un pequeño horizonte E. Por su parte, el suelo NIG-3, que forma parte de la serie de suelos enterrados estudiados en las cercanías de la localidad de Nigüelas, presenta un perfil de tipo Bt-Ck, lo que indica que durante su enterramiento debió de truncarse y perder, al menos, los primitivos horizontes A y E.

Todos los suelos presentan un horizonte Bt bien desarrollado, caracterizado por un color rojo (de 10R a 2,5YR), textura arcillosa y una estructura de fuerte a moderada que oscila entre bloques angulares-subangulares y prismática. El horizonte Bt del suelo LLP-1 presenta un color abigarrado en profundidad indicativo de una alternancia de condiciones de oxidación-reducción. Los índices de enrojecimiento de los horizontes Bt más evolucionados de cada suelo alcanzan en todos los casos un valor de 15. El color de los horizontes C de estos suelos varía entre rosa y pardo pálido, conservando la estructura del material parental, aunque en los suelos de superficie las partículas minerales han sido cementadas por carbonato cálcico. El suelo COL-10 presenta horizontes de transición BC consistentes en antiguos Ck que, probablemente después del truncamiento del suelo, se vieron invadidos por arcilla iluviada del horizonte Bt superior.

### 7.1.2. Resultados analíticos

Todos los horizontes Bt están descarbonatados y, por su ubicación en el grupo, superan en más de un 45% el contenido en arcilla del horizonte C y en más del 2% el contenido en  $Fe_d$ . El pH es mayor de 7,0, excepto en el suelo LLP-1 donde los horizontes Bt presentan valores ligeramente ácidos. El contenido en carbono orgánico (CO) es muy pequeño (entre 0,6-0,05%), lo que indica que durante el desarrollo de estos suelos debió de predominar la mineralización de la materia orgánica.

Los horizontes C de los suelos de superficie (COL-10, DUR-1 y LLP-1) presentan una fuerte acumulación de carbonato cálcico, con contenidos de hasta el 80% en COL-10, unido a una cementación de los granos minerales. Esta acumulación, aunque también es evidente en el horizonte C del suelo enterrado NIG-3, es mucho

menor y no da lugar a cementación. Dado que todos los suelos se forman sobre un material original equivalente (micaesquistos del Complejo Nevado-Filábride con algo de materiales calizos del Complejo Alpujárride), la fuerte acumulación de  $\text{CaCO}_3$  en los horizontes C de los suelos de superficie sugiere que, además del que procede del lavado de los horizontes Bt, debió existir un aporte exterior que, probablemente, esté relacionado con las aguas de escorrentía procedentes de los relieves calizos circundantes.

La capacidad de intercambio catiónica (CIC) está relacionada con los contenidos en arcilla y carbono orgánico por la ecuación de regresión múltiple:

$$\text{CIC (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = 4,913 \times \text{CO (\%)} + 0,339 \times \text{Arcilla (\%)} \quad (r = 0,963)$$

que indica que la influencia del carbono orgánico en los valores de capacidad de intercambio catiónico es casi 15 veces mayor que la de la arcilla.

Las bases de cambio están fundamentalmente dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con cantidades inferiores de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Sólo los horizontes Ap de los suelos COL-10 y DUR-1 muestran contenidos relativamente altos de  $\text{K}^+$  que deben ser consecuencia del abonado. Todos los suelos son eútricos. La elevada saturación en bases, igual o cercana al 100%, se puede atribuir también a un proceso de basificación, probablemente contemporáneo a la recarbonatación y ligado a las mismas aguas de escorrentía ricas en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  procedentes de los relieves calizos y dolomíticos circundantes. Sólo el suelo LLP-1 presenta una saturación en bases en sus horizontes superiores menor del 80%, lo que sugiere que este suelo debió de verse menos afectado por las aguas de escorrentía; probablemente debido a que la superficie sobre la que se desarrolla quedó aislada de los terrenos circundantes por la incisión de los ríos durante el Pleistoceno Medio?-Superior (Sanz de Galdeano y López Garrido, 1999). Estos procesos de recarbonatación y rebasificación debieron de ser posteriores a la formación de los suelos y, por tanto, los valores originales de pH en los horizontes Bt debieron ser más ácidos que los actuales.

Los contenidos en hierro total ( $\text{Fe}_t$ ), total de óxidos ( $\text{Fe}_d$ ) y formas amorfas ( $\text{Fe}_o$ ) de los horizontes Bt son mayores que los de sus horizontes C. Los valores de la razón  $\text{Fe}_o/\text{Fe}_d$  en los horizontes Bt son muy pequeños ( $<0,05$ ), lo que indica que los óxidos de hierro formados a partir de la meteorización de los silicatos están prácticamente cristalizados en su totalidad (Arduino *et al.*, 1986).

En todos los suelos, las razones  $\text{Fe}_t/\text{Si}_t$  y  $\text{Al}_t/\text{Si}_t$  son mayores en los horizontes Bt que en los C, de lo que se deduce que el Si era más móvil que el Fe y el Al y, por tanto, el pH original de estos suelos no debió ser inferior a 5,0 (Loughnan, 1969). En esas condiciones, las diferencias en la razón  $\text{Fe}_t+\text{Al}_t/\text{Si}_t$  entre los horizontes Bt y C deberían

ser tanto mayores cuanto mayor fuese la meteorización química y el lavado. Como se puede apreciar en la Figura 7.1.1, la diferencia en esta razón entre los horizontes Bt y C es similar en todos los suelos; aunque algo mayor en el suelo COL-10, intermedia en los suelos NIG-3 y DUR-1, y algo más baja en el suelo LLP-1.

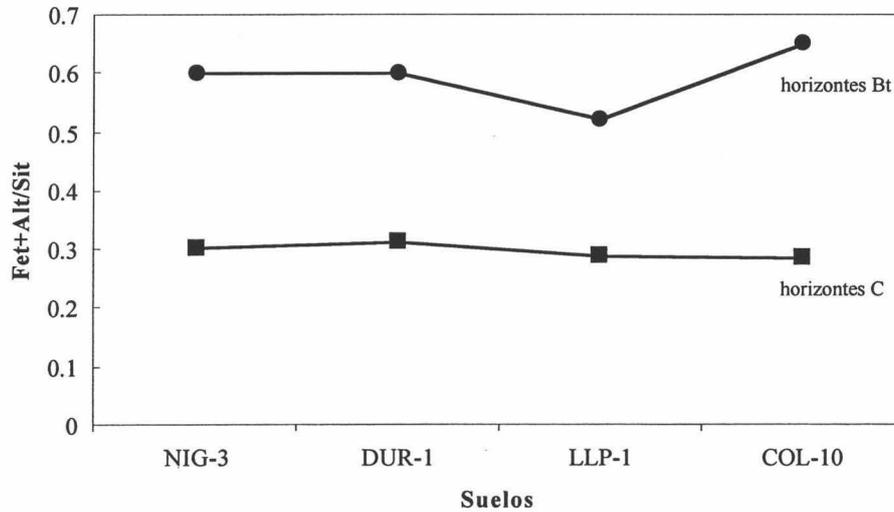


Figura 7.1.1. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt y C de los suelos del grupo Ia.

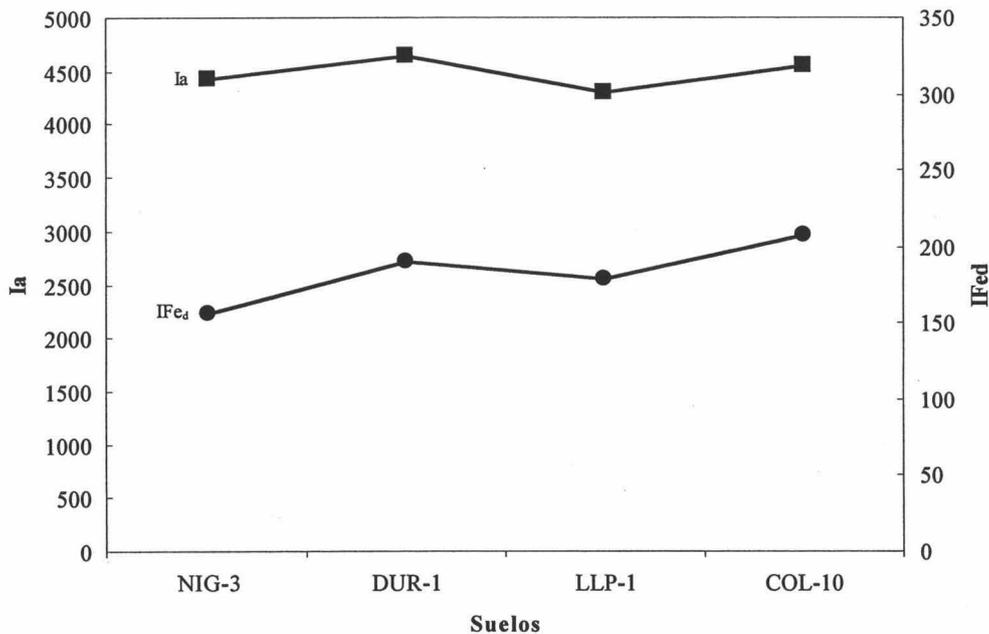


Figura 7.1.2. Índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos del grupo Ia.

Si estimamos la evolución de los suelos a partir de los índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>) (ver capítulo de Materiales y Métodos para su cálculo), todos los suelos del grupo Ia presentan valores similares (Fig. 7.1.2); esto confirma que tienen un grado de evolución equivalente.

El análisis semicuantitativo de los minerales de la arcilla (Tabla 7.1.1) muestra que en todos los horizontes Bt hay un fuerte incremento en caolinita con respecto a los horizontes C, mientras que la esmectita disminuye o desaparece. Esta intensa alteración de la esmectita y neoformación de caolinita debió de producirse con anterioridad al proceso de basificación, cuando los suelos eran más ácidos.

Tabla 7.1.1. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo Ia: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P = Paragonita; nd = no detectado; (+) = trazas; += 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)			
		K	I	S	P
NIG-3	Bt1b	+++	+++	nd	+
	Bt2b	+++	+++	nd	+
	Ckb	+	+++	++	+
DUR-1	Ap	++	+++	nd	++
	Bt1	+++	+++	nd	++
	Bt2	+++	+++	nd	++
	Ckm	+	+++	+	+
LLP-1	A	+++	+++	nd	nd
	E	+++	+++	nd	nd
	Bt1g	+++	+++	nd	nd
	Bt2g	+++	+++	(+)	nd
	Bt3g	+++	+++	+	nd
	Bt4g	++	+++	+	nd
	Ckm	+	+++	++	nd
COL-10	Ap1	+++	+++	nd	nd
	Ap2	+++	+++	(+)	nd
	Bt	+++	+++	(+)	nd
	BCtk	+	+++	++	nd
	BCkt	+	+++	+++	nd
	Ckm	+	+	+++	nd

### 7.1.3. Micromorfología

Desde el punto de vista micromorfológico, los suelos de este grupo se pueden subdividir en dos subgrupos con características diferentes: COL-10 y DUR-1 por un lado, y NIG-3 y LLP-1 por otro. El primer subgrupo representa a los suelos más evolucionados y, dentro de ellos, COL-10 es el más evolucionado de todos los suelos analizados. Los horizontes Bt de estos suelos están constituidos por una micromasa muy arcillosa y muy abundante, dando una contextura relacionada g/f de tipo porfídica abierta, mientras que en los horizontes Bt de NIG-3 y LLP-1 la micromasa se encuentra en mucha menor proporción, dando una contextura relacionada g/f también porfídica pero ahora de espacio simple. En ambos subgrupos la micromasa es de color rojo vivo, con una contextura birrefringente con fuertes orientaciones, pero en COL-10 y DUR-1 el material fino es mucho más homogéneo y transparente, mostrando unas características muy similares a las de la arcilla iluvial. Ambos subgrupos presentan fuertes orientaciones en la micromasa. La contextura birrefringente de tipo granoestriada está representada en los dos subgrupos, pero en COL-10 las recubiertas de los granos minerales son muy espesas y junto a esta contextura también es muy abundante la paraleloestriada y la reticulada (modelos típicos de suelos muy evolucionados). Las contexturas birrefringentes secundarias en DUR-1 son la moteada en mosaico y la prooestriada, la uniestriada en LLP-1 y en mosaico en NIG-3. La microestructura es en bloques angulares de fuerte grado de agregación en todos los casos. Los huecos están constituidos por fisuras y cavidades.

Los revestimientos y rellenos de arcilla iluvial de colores rojizos, ricos en Fe, son muy abundantes en todos estos suelos. Estos revestimientos llegan a ser muy espesos (de hasta 1 mm, con un espesor frecuente de 0,1 mm) en los horizontes Bt de los suelos NIG-3 y LLP-1, pero no ocurre así en COL-10 y DUR-1, en los que hay que buscarlos en los horizontes de transición BCt (COL-10) y en el horizonte Bt2 (DUR-1). Ello es debido a la elevada cantidad de arcilla presente en estos dos suelos, que hace que el horizonte Bt sea muy dinámico, sometido a amplios cambios de volumen en función de los cambios de humedad, y que impide que permanezcan los revestimientos de arcilla iluvial que deben de haberse formado ampliamente en los macroporos. Por el contrario, la gran cantidad de gravas de los suelos NIG-3 y LLP-1 confiere una gran estabilidad a sus horizontes Bt frente a los cambios de humedad, lo que permite que se conserven bien los revestimientos de arcilla iluvial. En COL-10 y DUR-1 son muy frecuentes los revestimientos de arcilla iluvial deformados y fragmentados (pápulas).

Los revestimientos de arcilla iluvial y la micromasa del suelo LLP-1 muestran decoloraciones amarillentas, que indican una cierta extracción del hierro asociado a procesos de hidromorfia posteriores al proceso iluvial. En ocasiones, se observan revestimientos de capas alternantes de arcilla roja, arcilla decolorada y arcilla naranja, lo

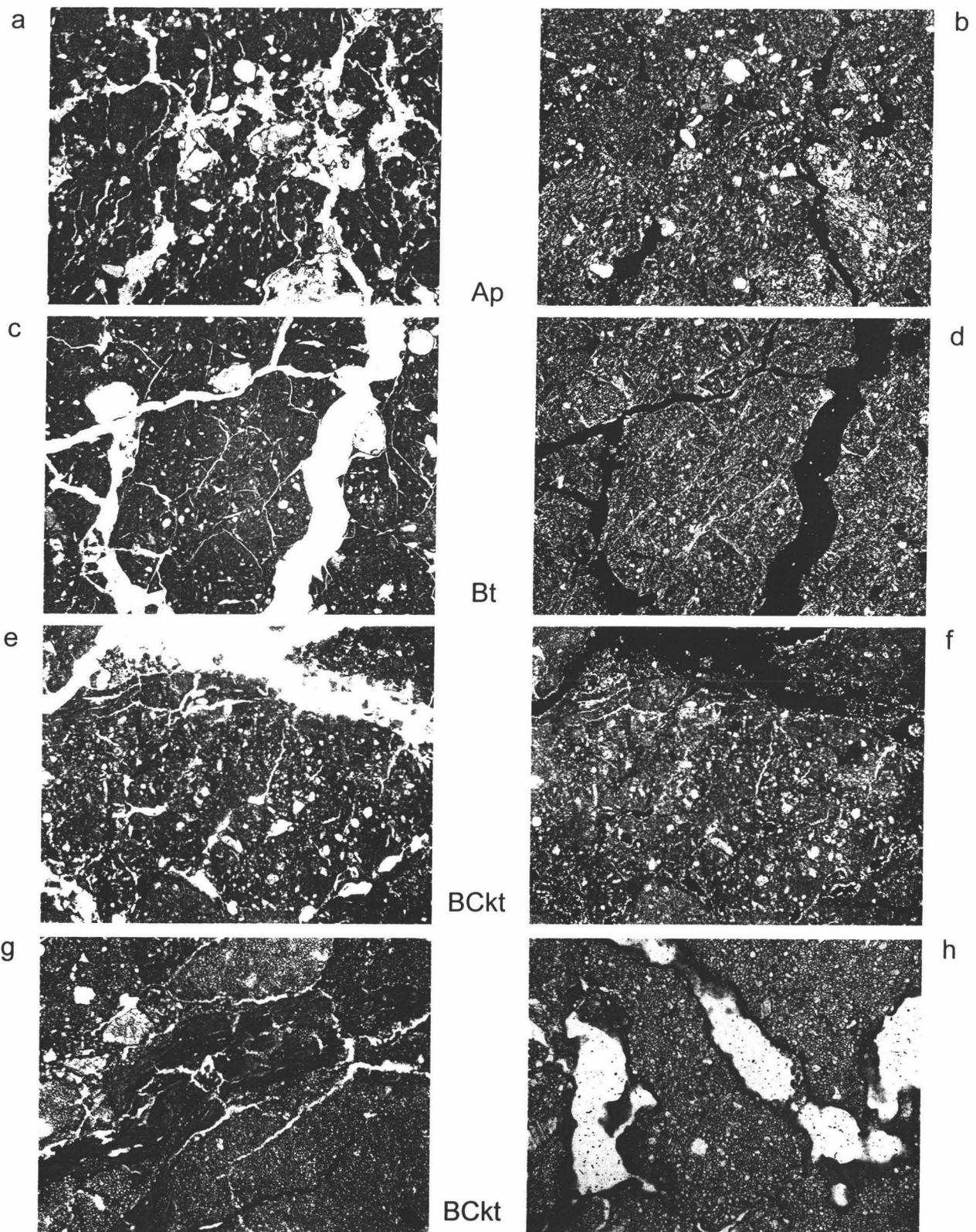
que indica que este suelo ha soportado al menos dos fases distintas de iluviación de arcilla (con distintas disponibilidades de Fe) separadas por una fase de hidromorfía. Esta situación pone de manifiesto que el proceso hidromórfico no es una simple consecuencia de una posible disminución de la porosidad al colmatarse los poros por las películas de arcilla iluvial, sino que ha de ser atribuido a un cambio climático hacia condiciones más húmedas. La última fase iluvial (arcilla naranja) representa un nuevo cambio climático hacia condiciones de menor humedad y con estaciones más contrastadas. La permanencia de estos revestimientos, que han permitido reconstruir parte de la paleoevolución de este suelo, ha sido posible por la abundancia de materiales gruesos (gravas y arenas) que han formado una especie de almacén que protegió a las películas de arcilla iluvial de las presiones ejercidas por los cambios volumétricos (probablemente debidos a las oscilaciones estacionales), los cuales pueden dar lugar a su deformación e integración en la micromasa como ocurre en los suelos arcillosos.

Los nódulos de hierro, tipo hematites, redondeados, de bordes netos y de tamaño arena fina, están presentes en todos los suelos (<1%).

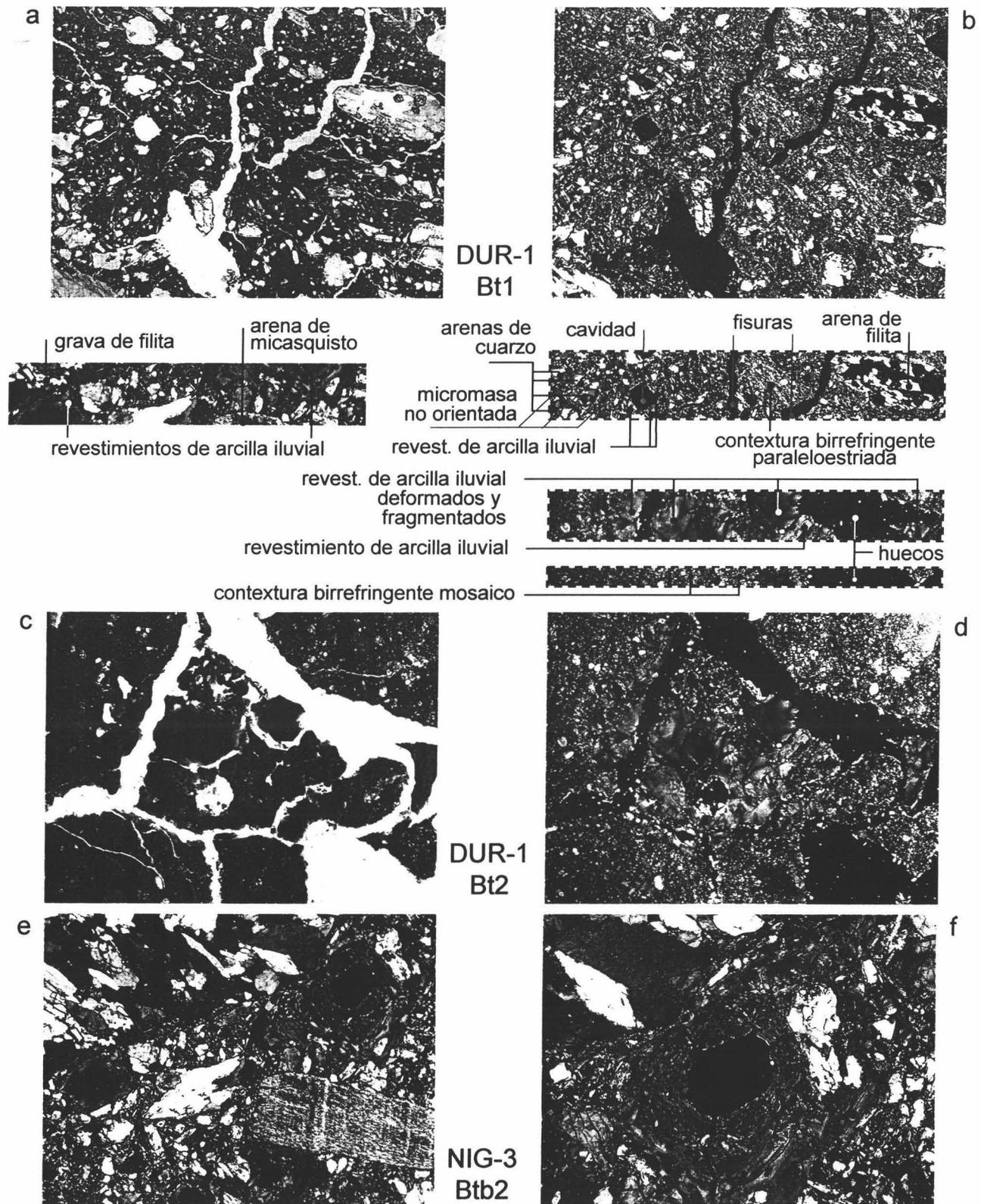
En la mayoría de los horizontes Bt (suelos COL-10, DUR-1 y NIG-3) se observa la presencia de revestimientos de carbonatos sobre las paredes de los macroporos (en escasas cantidades), hecho indicativo de un proceso de recarbonatación secundaria, posterior al proceso de iluviación de arcilla.

Los horizontes Ap de COL-10 y DUR-1 muestran unas características micromorfológicas que difieren absolutamente de las que corresponden a un horizonte Ap (micromasa muy arcillosa, de color rojo vivo, muy transparente, con fuertes orientaciones sépicas y con revestimientos de arcilla iluvial recubriendo las paredes de los macroporos). Se tratan sin duda de unos primitivos horizontes Bt que, al decapitarse intensamente el suelo, han quedado en la superficie. Los horizontes Ap del suelo COL-10 contienen nódulos de carbonato micríticos, de formas redondeadas, con bordes netos y de tamaño arena muy fina. Estos carbonatos, situados encima de un horizonte Bt descarbonatado en su masa basal, sólo pueden ser atribuidos a un proceso de recarbonatación secundaria. Por su presentación localizada en forma de nódulos, unido a sus características morfológicas, debemos pensar en un aporte eólico.

Los horizontes BCtk del suelo COL-10 presentan una micromasa constituida por carbonatos micríticos, con una distribución relacionada g/f de tipo porfídica abierta con muy escasos granos minerales y una contextura birrefringente cristalítica. En algunas zonas existen amplias masas arcillosas de características idénticas a las del horizonte Bt situado encima; también aparecen abundantes y espesos revestimientos de arcilla iluvial de color rojo, recubriendo las fisuras, y espesos rellenos de este mismo material. Estos rasgos ponen de manifiesto la penetración del horizonte árgico en el cálcico. En

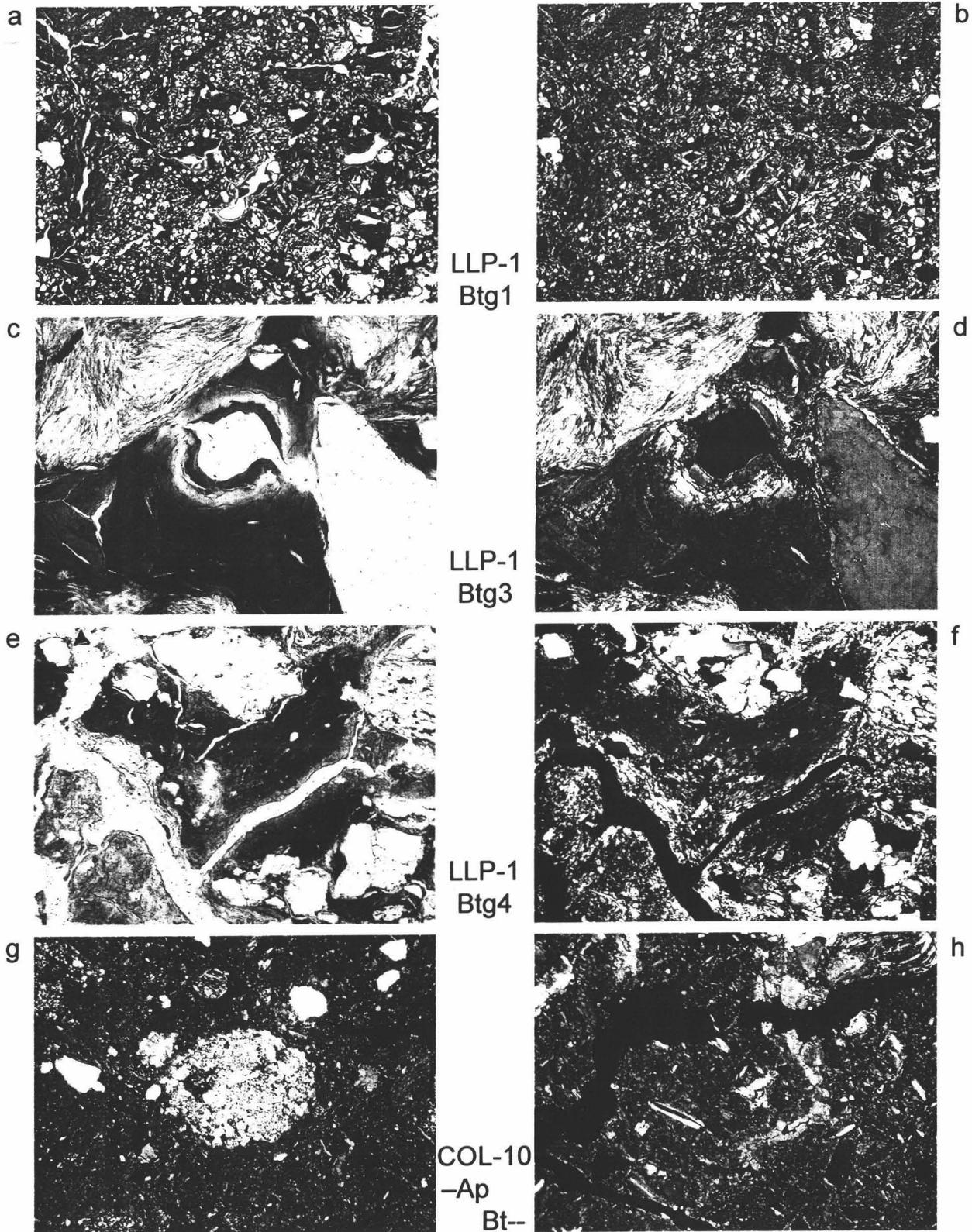


**Lamina 1. Perfil COL-10.** a y b, hor. Ap con características micromorfológicas propias de un B: micromasa de color rojo (a) y orientaciones birrefringentes y revestimientos de arcilla (b). c, color, transparencia y abundancia de la micromasa, distribución relacionada porfídica abierta. d, contexturas granoestriada y reticulada. e y f, revestimientos de arcilla iluvial de color naranja rojizos en micromasa carbonatada micrítica, como resultado de la invasión del hor. árgico al cálcico. g, detalle de un relleno de arcilla iluvial ( $\text{Ø}=500\mu$ ) en micromasa micrítica. h, revestimientos de arcilla iluvial en los macrohuecos. a, c, e, g y h con sólo polarizador. b, d y f con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las fotografías son: 3,5 mm en a, b, c, d, e y f ; 2 mm en g; 1mm en h.



**Lamina 2. a y b, Perfil DUR-1, hor. Bt1, evolucionado pero menos que COL-10 (Lámina 1) micromasa de color rojo (a), orientación birrefringente paraleloestriada, distribución relacionada porfidica abierta y revestimientos de arcilla (b). c y d, revestimientos de arcilla iluvial de color rojo deformados y fragmentados, contextura birrefringente mosaico. e, revestimientos de arcilla iluvial en los macrohuecos, bien conservados al encontrarse en una zona local de alta concentración de gravas y arenas. f, detalle de la foto anterior.**

a y c con sólo polarizador. b, d, e y f con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad con: 3,5 mm en a y b; 2 mm para c, d y e; 1 mm en f.



**Lamina 3.** a y b, Perfil LLP-1, hor. Btg1, distribución relacionada porfídica de simple espacio; abundantes revestimientos de arcilla iluvial en cavidades (prácticamente toda la micromasa es arcilla iluvial). c y d, revestimientos compuestos de tres capas: arcilla iluvial roja, esta arcilla decolorada y arcilla naranja, la más externa. e y f, la hidromorfía de este horizonte se destaca por decoloraciones (amarillentas y grisáceas) en la micromasa como consecuencia del lavado de Fe. g, Perfil COL-10, hor. Ap, nódulos de carbonatos (recarbonatación). h, Perfil COL-10, hor. Bt, relleno de una fisura por carbonatos en una micromasa decarbonatada (recarbonatación).

a, c y e y g con sólo polarizador. b, d, f, g y h con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad con: 3,5 mm en a y b; 1 mm para c, d y h; 2 mm en e y f; 1,5 mm para g.

ocasiones, las masas arcillosas y los revestimientos de arcilla iluvial se encuentran intensamente reemplazadas por los carbonatos, quedando sólo unos restos diseminados en la matriz calcárea. Por otra parte, los cristales individuales de carbonatos de tamaño arena incluidos en la micromasa muestran signos de proceder también del reemplazamiento de minerales silicatados (fundamentalmente cuarzo).

Los distintos orígenes del material de partida de estos suelos se ponen de manifiesto en la naturaleza de las gravas: micaesquistos, esquistos, filitas, pizarras y cuacitas (metamórficas) para los suelos DUR-1, NIG-3 y LLP-1, y calcedonia (sedimentaria) en COL-10. Las arenas y limos son mayoritariamente de cuarzo en todos los suelos. La fuerte meteorización química que afecta a estos suelos se muestra por la poca presencia de micas, tan abundantes en los materiales originales. En este sentido, los granates están presentes dentro de las gravas de estos suelos, pero individualizados en la masa basal de los horizontes Bt sólo se han encontrado, y en escasa cantidad, en el suelo LLP-1.

#### 7.1.4. Clasificación

El perfil LLP-1 presenta un horizonte superficial ócrico, un horizonte E que no cumple los requisitos de color para ser considerado álbico, un horizonte árgico saturado al 77%, con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y con propiedades gleicas a partir de los 50 cm de profundidad; y un horizonte petrocálcico a más de 175 cm de la superficie. Dado que el horizonte árgico no cumple los requisitos para ser denominado rhódico según la FAO, se clasifica como Luvisol gleico crómico cutánico (FAO, 1998), y como Rhodoxeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

El perfil DUR-1 presenta un horizonte superficial ócrico, un horizonte árgico con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un horizonte cálcico cementado dentro de los 100 primeros centímetros (si bien tiene menos del 50% de carbonato cálcico, creemos que se debe a que gran parte del mismo está adherido a la superficie de la grava y no se determina), por lo que lo clasificamos como petrocálcico y lo encuadramos como Luvisol cálcico rhódico (FAO, 1998) y como Rhodoxeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

El perfil COL-10 tiene un horizonte superficial ócrico, un horizonte árgico prácticamente saturado al 100%, con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla, dos horizontes de transición cálcicos, con más del 50% de carbonato cálcico, y un horizonte petrocálcico cuyo límite superior se sitúa a los 120 cm de profundidad. Dado que el horizonte árgico cumple los requisitos para ser denominado rhódico, este suelo se ha clasificado como Luvisol hipercálcico rhódico (FAO, 1998) y Rhodoxeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

El perfil NIG-3 presenta un horizonte árgico saturado con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un horizonte C que, aunque no posee la suficiente cantidad de carbonato cálcico para ser considerado cálcico, sí presenta recarbonataciones secundarias dentro de los 100 cm desde el límite superior del horizonte árgico. Como el color del horizonte árgico sólo cumple los requisitos para ser considerado crómico, se ha clasificado como Luvisol hipocálcico crómico cutánico (FAO, 1998) y como Rhodoxeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

#### 7.1.5. Procesos de edafogénesis

Los principales procesos edáficos que dieron lugar a estos suelos fueron: fuerte *meteorización*, *mineralización de la materia orgánica*, *lavado de carbonatos*, *intensa iluviación de arcilla* y *rubificación*; los cuales condicionaron la formación de horizontes Bt muy desarrollados, de color rojo, textura arcillosa y con abundantes cútanos de arcilla. Estas propiedades debieron de desarrollarse bajo un clima más húmedo que el actual, por lo que se deben considerar como paleosuelos.

Otros procesos que han afectado a algunos de estos suelos son la *hidromorfía* y el *reemplazamiento de los carbonatos* a los materiales silicatados. El proceso hidromórfico está ampliamente desarrollado en el suelo LLP-1. Como se ha puesto de manifiesto en la descripción micromorfológica, la decoloración por empobrecimiento en Fe ha afectado a los revestimientos de arcilla iluvial de color rojo pero no afecta a unos revestimientos de arcilla iluvial de color naranja que se depositan sobre las capas decoloradas. Estos hechos evidencian que este suelo ha soportado, al menos, dos cambios climáticos: el más antiguo derivaría hacia condiciones más húmedas (representado por el proceso hidromórfico atestiguado por las zonas decoloradas) y, posteriormente, se daría un clima menos húmedo con estaciones contrastadas (representado por la formación de los revestimientos naranjas).

En COL-10 (y, muy posiblemente, en DUR-1), la presión de los carbonatos en los horizontes BCtk, BCKt y Ckm ha producido la destrucción de los materiales silicatados incluidos en la masa calcárea. Así, masas y revestimientos arcillosos, de claro origen iluvial, se encuentran reemplazadas por los carbonatos con diferentes intensidades. Igualmente, los granos de cuarzo se encuentran parcial o totalmente sustituidos por carbonatos, preferentemente espáticos.

Como se ha puesto de manifiesto en los apartados anteriores, estos suelos han sufrido un intenso proceso erosivo que, en la mayor parte de los casos, los ha decapitado (posiblemente debido a un fuerte cambio climático, pero quizás también debido a un movimiento tectónico de la zona). El suelo NIG-3 quedó posteriormente recubierto por un paquete de materiales, hecho que no ocurrió en COL-10 y DUR-1, que quedaron con

su horizonte Bt aflorando en superficie. La edafización posterior hizo que los horizontes de lavado y de acumulación de carbonatos, así como los de eluviación e iluviación de arcilla sufrieran los correspondientes reajustes de sus respectivas profundidades. La parte superior del Bt pasó a ser un horizonte A, mientras que la inferior pasó de ser una zona de iluviación de arcilla a una zona de eluviación. Inmediatamente debajo de este, la parte superior del primitivo horizonte Ck se transformó en un nivel de eluviación de carbonatos y de iluviación de arcilla, apareciendo el actual BCtk, con claros signos macro y micromorfológicos de invasión del horizonte cálcico por el árgico.

Los datos analíticos del suelo COL-10 muestran un 2% de  $\text{CaCO}_3$  en el horizonte Ap y casi un 1% en el Bt. El estudio microfomorfológico nos pone de manifiesto las distintas morfologías de los carbonatos en estos horizontes; así, en el Ap se encuentran localizados formando nódulos, redondeados, de bordes nítidos y de tamaño arena fina, mientras que los del horizonte Bt se presentan como recubrimientos de los macroporos. La masa basal de ambos horizontes se encuentra totalmente decarbonatada. Como consecuencia de todo lo anterior, debemos pensar que este suelo ha sufrido una recarbonatación y que los carbonatos se están actualmente movilizando al horizonte Bt (recordemos que el horizonte Bt de este suelo es un horizonte muy dinámico, por su alto contenido en arcilla, y los revestimientos no son estables). De acuerdo con la morfología de los carbonatos en el horizonte superficial, debemos suponer que se trata de un aporte eólico, procedente de los macizos calcáreos próximos.

#### **7.1.6. Edad de los suelos**

Tal y como ya se ha indicado, los suelos COL-10, DUR-1 y LLP-1 son suelos de superficie desarrollados sobre abanicos aluviales datados de principios del Pleistoceno (entre hace 788.000 y 1.650.000 años BP; Birkeland, 1999) y formados como consecuencia de episodios resistásicos (probablemente fríos y muy húmedos); mientras que los suelos debieron desarrollarse durante los periodos cálidos posteriores a la formación del depósito.

El suelo NIG-3 pertenece a una serie de cuatro suelos enterrados por sucesivos depósitos gravosos de naturaleza similar (Fig. 7.1.3) y cuya edad no está perfectamente definida, aunque se interpretan como materiales depositados durante los periodos fríos acaecidos a lo largo del Pleistoceno Medio-Superior (entre 130.000 y 788.000 años BP; Birkeland, 1999). Los episodios de desarrollo edáfico (horizontes Bt) estarían relacionados con los periodos cálidos que alternaron con los mencionados periodos fríos.

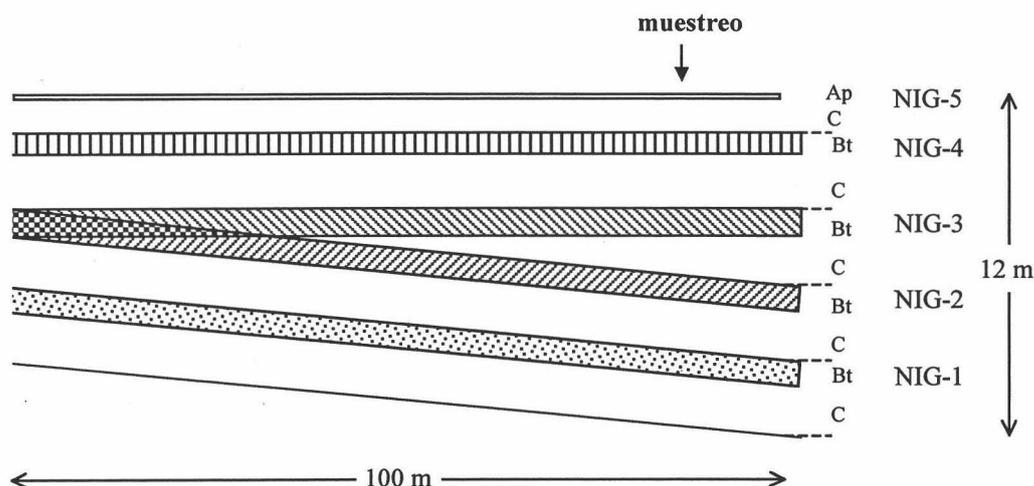


Figura 7.1.3. Esquema de los depósitos y suelos de Nigüelas.

De acuerdo con las edades de los estadios isotópicos establecidos para latitudes bajas en el registro de  $\delta^{18}\text{O}$  (Bassinot *et al.*, 1994) (Fig. 7.1.4 y Tabla 7.1.2), el depósito sobre el que se desarrolló el suelo erosionado NIG-5 (el suelo de superficie que entierra a todos los demás) debió formarse durante los últimos episodios fríos acaecidos entre 11.000 y 71.000 años BP (estadios 2-4); mientras que el material original del suelo NIG-4 debió de depositarse en el anterior episodio frío, entre 127.000 y 186.000 años BP (estadio 6), y el suelo NIG-4 debió de formarse durante el episodio cálido acaecido entre 71.000 y 127.000 años BP (estadio 5).

Siguiendo esta secuencia, el depósito sobre el que se desarrolló el suelo NIG-3 debió de formarse durante el período frío ocurrido entre 242.000 y 301.000 años BP (estadio 8), y el suelo NIG-3 durante el periodo cálido entre hace 186.000 y 242.000 años BP (estadio 7). De hecho, la edad del suelo NIG-3, establecida a partir del índice de acumulación de arcilla (Levine and Ciolkosz, 1983), es de unos 250.000 años BP, que viene a coincidir con la edad establecida por el estadio isotópico. Si completamos la secuencia, el suelo NIG-2 se debió de formar en el episodio cálido entre 301.000 y 334.000 BP (estadio 9) y el material original dataría del periodo frío entre 334.000 y 364.000 BP (estadio 10); mientras que el suelo NIG-1 debió de formarse durante el periodo cálido entre 364.000 y 427.000 BP (estadio 11) y el depósito sobre el que se desarrolló durante el episodio frío entre 427.000 y 474.000 años BP (estadio 12). En consecuencia, el basculamiento que se aprecia en la Figura 7.1.3 y que afectó a los suelos NIG-1 y NIG-2, debió de estar relacionado con un levantamiento de Sierra Nevada que ocurrió hace aproximadamente 300.000 años (Pleistoceno Medio).

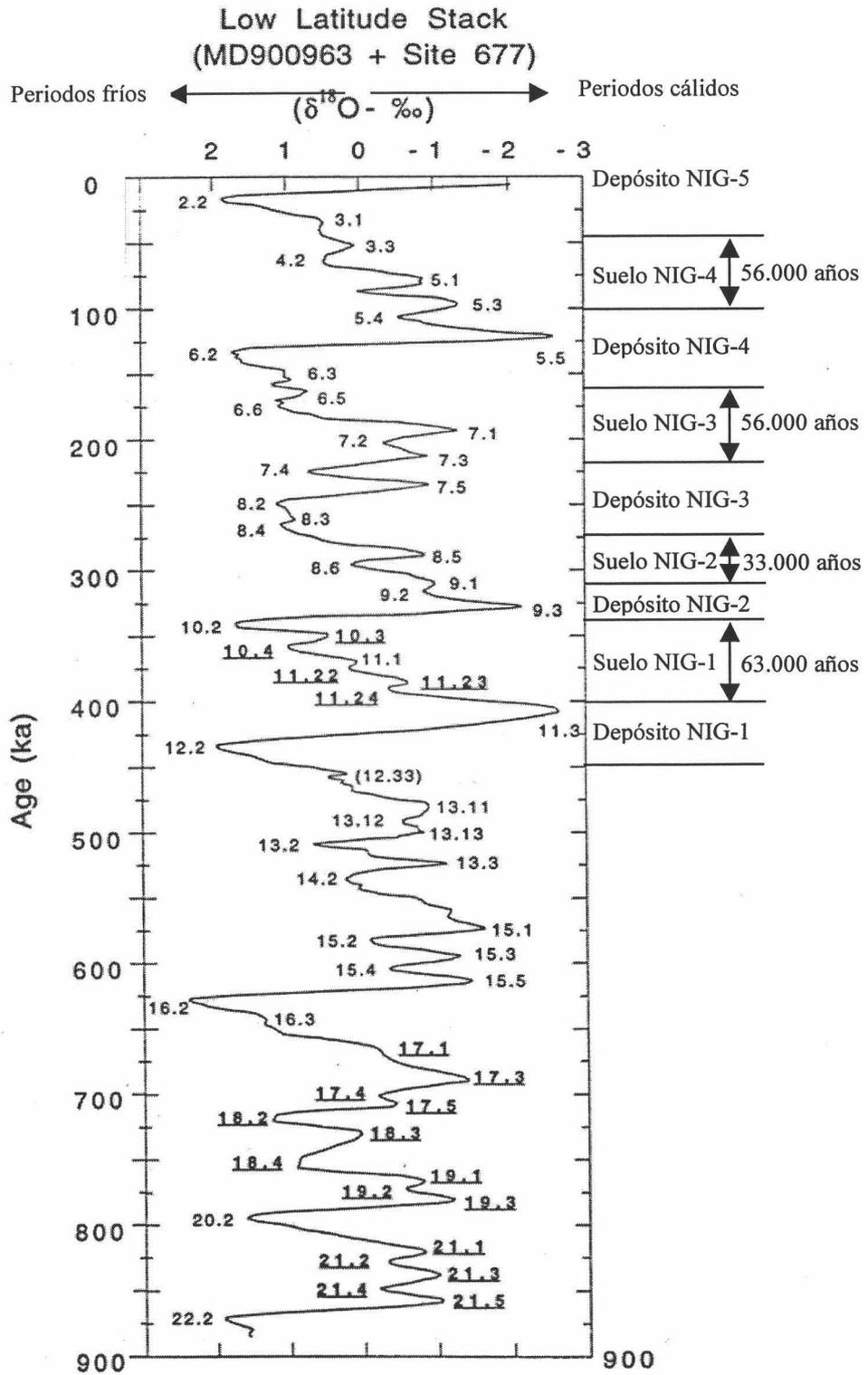


Figura 7.1.4. Periodos fríos y cálidos de los últimos 900.000 años establecidos en el registro de  $\delta^{18}\text{O}$  para latitudes bajas (Bassinot *et al.*, 1994).

Tabla 7.1.2. Edades de los estadios isotópicos en el registro de  $\delta^{18}\text{O}$  para latitudes bajas (Bassinot *et al.*, 1994). (en cursiva los estadios cálidos).

Estadio Isotópico	Edad (10 <sup>3</sup> años)	Estadio Isotópico	Edad (10 <sup>3</sup> años)	Estadio Isotópico	Edad (10 <sup>3</sup> años)
2.0	11	8.6	295	15.3	594
2.2	17	9.0	301	15.4	604
3.0	24	9.1	309	15.5	615
3.1	30	9.2	315	16.0	621
3.3	52	9.3	328	16.2	628
4.0	57	10.0	334	16.3	642
4.2	62	10.2	340	17.0	659
5.0	71	10.3	349	17.1	666
5.1	79	10.4	357	17.2	**
5.2	86	11.0	364	17.3	688
5.3	97	11.1	369	17.4	699
5.4	106	11.22	375	17.5	708
5.5	122	11.23	384	18.0	712
6.0	127	11.24	390	18.2	718
6.2	133	11.3	406	18.3	729
6.3	**	12.0	427	18.4	754
6.4	**	12.2	434	19.0	760
6.5	**	12.3	458	19.1	765
6.6	**	12.4	468	19.2	772
7.0	186	13.0	474	19.3	782
7.1	194	13.11	481	20.0	787
7.2	202	13.12	491	20.2	793
7.3	213	13.13	500	21.1	820
7.4	225	13.2	510	21.2	828
7.5	236	13.3	524	21.3	838
8.0	242	14.0	528	21.4	847
8.2	248	14.2	536	21.5	858
8.3	258	15.0	568	22.0	865
8.4	266	15.1	573	22.2	871
8.5	287	15.2	582	22.3	879

\*\* no determinado

### 7.1.7. Relación grado de evolución – edad

Los diferentes índices de evolución (índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ), diferencias en la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  entre los horizontes B y C, intensa neoformación de caolinita en los horizontes B, índice de enrojecimiento y características micromorfológicas) son muy similares en todos los suelos del grupo *Ia*, lo que indica que presentan grados de alteración y evolución equivalentes. Las diferencias entre ellos pueden ser atribuidas a diferencias en el material original o a condiciones estacionales de encharcamiento. Los materiales carbonatados sobre los que se desarrolla el suelo COL-10 (calizas) son más fácilmente meteorizables que los materiales metamórficos sobre los que se desarrollan los suelos DUR-1, NIG-3 y LLP-1 (micasquistos y cuarcitas) y podrían justificar su mayor evolución; mientras que los procesos de hidromorfía que afectaron al suelo LLP-1 podrían explicar su desarrollo algo menos intenso. Por otra parte, en los suelos COL-10 y DUR-1, al quedar el horizonte Bt en superficie por los procesos de erosión, su arcilla pudo dispersarse e iluviarse después de la erosión, lo que implica que la acumulación de arcilla en sus horizontes Bt pudo seguir incrementándose a lo largo del tiempo y justificar así las diferencias en sus rasgos micromorfológicos (contextura relacionada g/f de tipo porfídica abierta).

Dado que el grado de evolución de los suelos de superficie es equivalente al del suelo enterrado NIG-3, no se puede descartar que su desarrollo tuviera lugar durante el estadio 7 (Tabla 7.1.2) en el que se debió formar NIG-3; no obstante, este desarrollo también pudo producirse a lo largo de los periodos cálidos anteriores al estadio 7 pero con condiciones climáticas equivalentes a las de este, como por ejemplo los estadios 13 (entre 474.000 y 528.000 años BP) y 15 (entre 568.000 y 621.000 años BP) en los que también se ha descrito la formación de horizontes Bt con iluviación de arcilla y rubefacción (Bronger *et al.*, 1998), o incluso en estadios anteriores. En cualquier caso, descartamos los estadios 9 y 11 ya que los suelos que se formaron en ellos (NIG-2 y NIG-1) presentan una evolución claramente inferior (suelos del grupo *Iib*).

Independientemente del episodio edafogenético en el que se formaron, los suelos de superficie presentan dos diferencias claras con respecto al suelo enterrado NIG-3. En primer lugar, gran parte de los cútanos de arcilla están fragmentados e incorporados a la matriz del suelo (pápulas) y, en segundo lugar, han sufrido una intensa recarbonatación y acumulación de carbonato cálcico en sus horizontes C (Ckm). La fragmentación de los cútanos de arcilla sugiere que los suelos han podido ser disturbados por la acción del hielo (Catt, 1987), lo cual puede ser atribuido a los periodos fríos (Kemp, 1985b; Van Vliet-Lanoë, 1985) posteriores a la formación de sus horizontes Bt. No obstante, en suelos muy arcillosos, los cútanos de arcilla raramente permanecen puesto que se ven afectados por los cambios estacionales en las condiciones de humedad. El origen del

elevado contenido en carbonato cálcico de los horizontes Ckm de los suelos LLP-1 y DUR-1, formados sobre materiales muy semejantes a los del suelo NIG-3 y también con horizontes Bt descalcificados, no se puede justificar exclusivamente por un proceso de lavado de los horizontes superiores; más bien, debe ser consecuencia de la infiltración de aguas de escorrentía ricas en iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . En el suelo COL-10, el contenido en carbonato cálcico del horizonte Ckm es todavía mayor que en los otros suelos de superficie, lo que se explica por haberse formado sobre materiales carbonatados y estar rodeado además por los relieves calizos de las Zonas Externas. La presencia de cútanos de carbonato cálcico en los horizontes Bt de los suelos de superficie confirma el proceso de recarbonatación posterior a la formación de sus horizontes Bt. Esto implica que la acumulación de carbonato cálcico y la cementación de los horizontes Ckm debieron de ir incrementándose a lo largo del tiempo, tal y como está descrito en suelos desarrollados sobre terrazas fluviales (Dorrnsoro y Alonso, 1994). Por otra parte, el suelo COL-10 presenta cútanos de arcilla que se introducen en el horizonte cálcico, lo que podría ser atribuido a procesos de iluviación posteriores a la erosión y truncamiento del suelo. Todo ello indica que, después de su formación, los suelos de superficie debieron de ser parcialmente truncados, erosionados y recalcificados, por lo que pueden considerarse poligenéticos (Tarnocai y Valentine, 1989). Al mismo tiempo nos inclina a pensar que su formación debió de ser anterior al estadio 7 en el que se formó el suelo enterrado NIG-3.

## **7.2. Grupo *Ila***

### **7.2.1. Características macromorfológicas**

Los suelos de superficie LLP-2 y SN-1 están caracterizados por poseer un perfil de tipo A-Bt-C. Ambos han sido erosionados, puesto que han perdido sus primitivos horizontes E. El actual horizonte A del suelo SN-1 presenta, además, la formación de polígonos ordenados en su superficie indicativos de una actividad periglacial que ha podido modificar las características del horizonte Bt.

Los horizontes Bt de ambos suelos están bien desarrollados, con un color que varía de rojo oscuro en LLP-2 a rojo amarillento en SN-1 y un índice de enrojecimiento de 11,2 y 6,0 respectivamente. La textura varía de arcillosa a franco arcillosa y la estructura de bloques angulares a subangulares. El color de los horizontes C varía entre rosa y pardo intenso y conserva la estructura del material original, aunque en el suelo LLP-2 las partículas minerales han sido cementadas por carbonato cálcico (Ckm).

### 7.2.2. Resultados analíticos

Los horizontes Bt están descarbonatados y, por pertenecer a este grupo, tienen entre un 45 y un 25% más de arcilla y más de un 2% de  $Fe_d$  que el horizonte C. El pH del LLP-2 es superior a 7,0, mientras que en SN-1 está en torno a 5,5. El contenido en carbono orgánico (CO) es muy pequeño (entre 0,6-0,04%), indicando que durante el desarrollo de ambos suelos debió de predominar la mineralización de la materia orgánica.

El horizonte C del suelo LLP-2 presenta una acumulación de carbonato cálcico que ha cementado las partículas minerales. Dado que este suelo es muy similar al suelo LLP-1, aunque se encuentra más erosionado, esta acumulación, tal y como se explicó en el apartado 7.1, debe proceder tanto del lavado del horizonte Bt como de los aportes de las aguas de escorrentía de los relieves circundantes. Por su parte, el suelo SN-1 no contiene carbonatos, lógico ya que se desarrolla exclusivamente sobre los micaesquistos del Complejo Nevado-Filábride y en una superficie que no recibe la influencia de ningún relieve carbonatado.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está relacionada con los contenidos en arcilla y carbono orgánico por la ecuación de regresión múltiple:

$$CIC \text{ (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = 5,988 \times CO \text{ (\%)} + 0,263 \times \text{Arcilla (\%)} \quad (r = 0,979)$$

que indica que la influencia del carbono orgánico en los valores de la capacidad de intercambio catiónico es casi 23 veces mayor que la de la arcilla.

Las bases de cambio están dominadas por  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , especialmente en el suelo LLP-2, con cantidades minoritarias de  $Na^+$  y  $K^+$ . El suelo LLP-2 es eútrico, con una saturación en bases en su horizonte Bt cercana al 100%; mientras que SN-1 tiene un grado de saturación algo menor del 50% y se cataloga como dístrico. La elevada saturación de LLP-2 habría que atribuirle al proceso de basificación-carbonatación ligado a las aguas de escorrentía; mientras que la desaturación del complejo de cambio de SN-1 sería debida a la mayor humedad de los relieves altos de Sierra Nevada unido a que no se ven influenciados por relieves calizos. En este caso, los procesos de recarbonatación y rebasificación que han afectado al suelo LLP-2 debieron ser posteriores a la formación del suelo, tal y como se ha puesto de manifiesto en los suelos del grupo *Ia*.

Los contenidos en hierro total ( $Fe_t$ ), total de óxidos ( $Fe_d$ ) y formas amorfas ( $Fe_o$ ) de los horizontes Bt de estos suelos son mayores que los de sus horizontes C. No obstante, el contenido en  $Fe_d$  del horizonte C del suelo SN-1 es relativamente elevado,

al igual que la razón  $Fe_d/Fe_t$ ; lo que indica que se trata de un material con un cierto grado de alteración. Esto sugiere la posibilidad de que no se trate del material original sino de un horizonte de transición y que, dadas las dificultades para el muestreo de este suelo, no hayamos alcanzado el verdadero horizonte C.

En estos suelos, las razones  $Fe_t/Si_t$  y  $Al_t/Si_t$  son mayores en los horizontes Bt que en los C; por lo que, como ya se expuso en el apartado 7.1, el pH original no debió ser inferior a 5,0 (Loughnan, 1969). Con objeto de evaluar el grado de alteración química y lavado, en la Figura 7.2.1 se compara la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  de los horizontes Bt y C de los suelos LLP-2 y SN-1 con las de otros suelos más evolucionados (DUR-1 y LLP-1) incluidos en el grupo Ia.

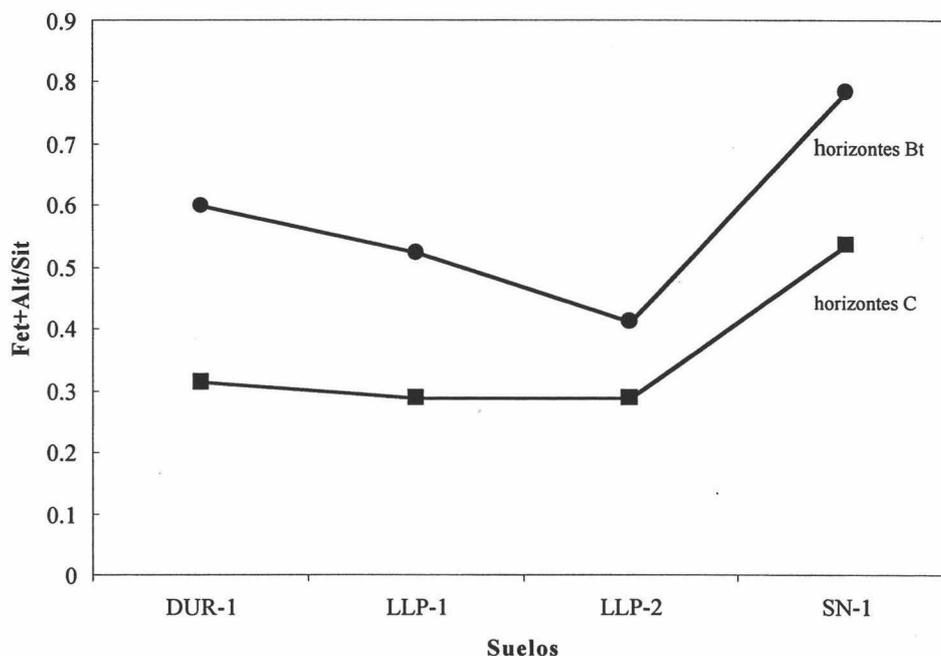


Figura 7.2.1. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt y C de los suelos DUR-1, LLP-1, LLP-2 y SN-1.

Como se puede observar, la diferencia de dicha razón entre los horizontes Bt y C es menor en el suelo LLP-2. Esto puede ser atribuido a que en el suelo LLP-2, al estar erosionado, su horizonte Bt no estaría tan evolucionado como los primitivos horizontes que debió de tener por encima; de hecho, la diferencia de esta razón entre los horizontes Btg4 y C del suelo LLP-1 es muy similar a la del horizonte Bt del suelo LLP-2. Con respecto a SN-1, la diferencia es mayor que en LLP-2, pero algo inferior a la de DUR-1; no obstante, hay que tener presente que este suelo se desarrolla a 2700 m de altitud, en condiciones climáticas presumiblemente más frías que las de DUR-1; por otra parte, los procesos periglaciares que lo afectaron pudieron modificar esta diferencia. Por último, el que los valores absolutos de la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt y C de SN-1 sean

mayores que en los otros suelos podría ser debido a variaciones en la composición de los micaesquistos, a procesos de lavado de sílice más intensos o a que, como se ha expuesto anteriormente, no se haya alcanzado el verdadero horizonte C.

Si estimamos el grado de evolución de los suelos a partir de los índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $I_{Fe_d}$ ), los suelos del grupo *Ila* presentan valores inferiores a los de los suelos del grupo *Ia* (Fig. 7.2.2); lo que confirma un menor grado de evolución. Esta menor evolución se podría justificar por la erosión en el caso de LLP-2 y por los procesos periglaciares y un clima más frío en el caso de SN-1.

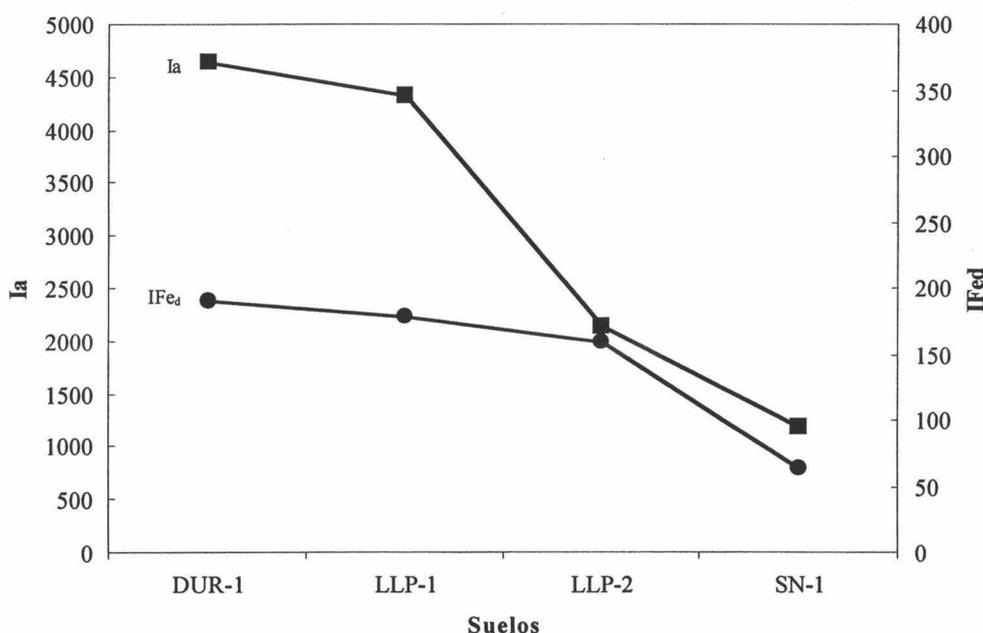


Figura 7.2.2. Índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $I_{Fe_d}$ ) de los suelos DUR-1, LLP-1, LLP-2 y SN-1.

El análisis semicuantitativo de los minerales de la arcilla (Tabla 7.2) muestra la neoformación de caolinita en los horizontes Bt, al tiempo que disminuye la illita. Lógicamente, la neoformación de caolinita, en el caso del LLP-2 debió de producirse antes del proceso de basificación, cuando los valores de pH eran más ácidos.

Tabla 7.2. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo *Ila*: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P = Paragonita; nd = no detectado; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

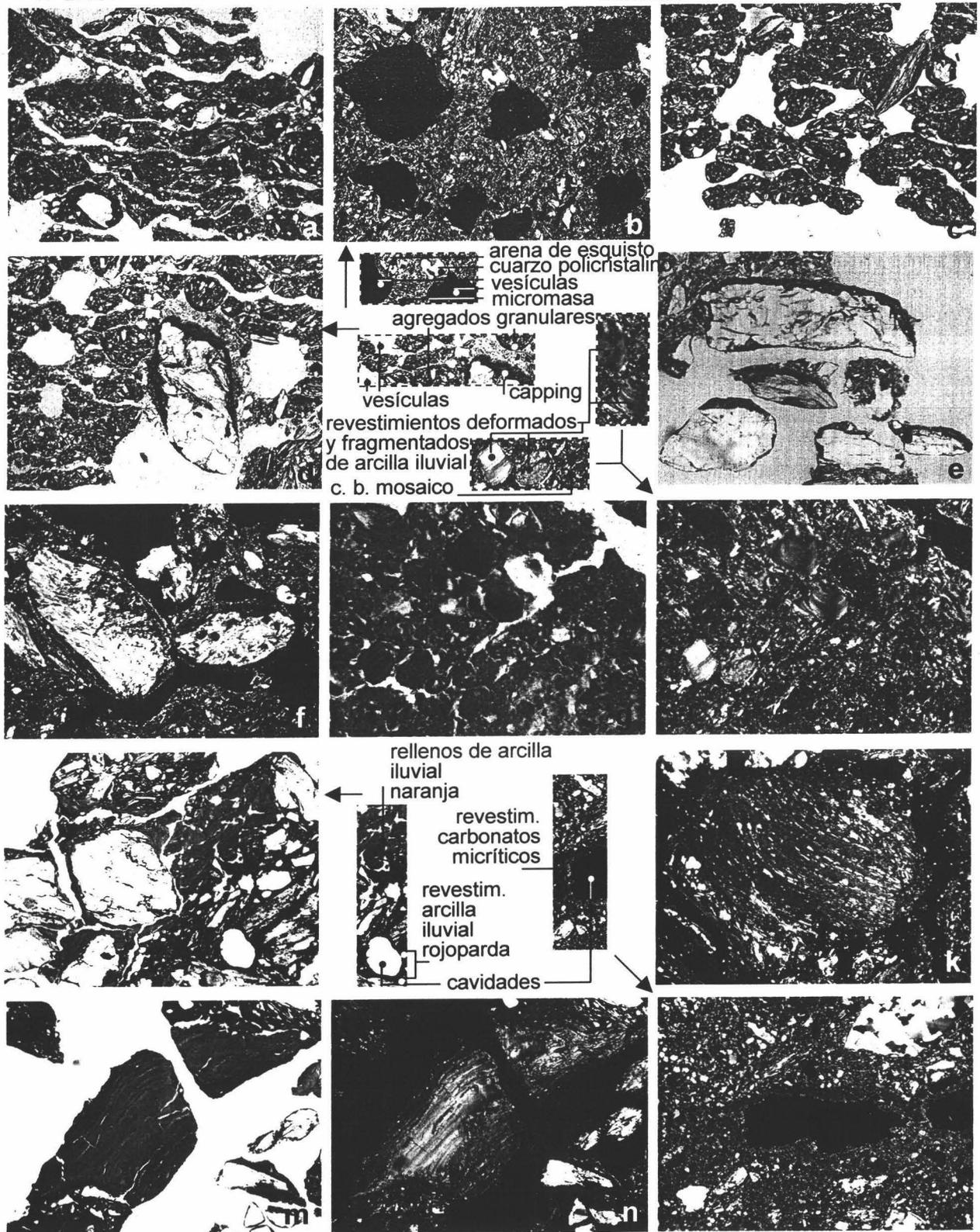
Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)			
		K	I	S	P
LLP-2	A	+++	+++	nd	nd
	Bt	+++	+++	nd	nd
	BCK	++	+++	+	nd
	Ckm	+	+++	++	nd
SN-1	A	++	+++	nd	(+)
	Btb1	+++	++	nd	+
	Btb2	+++	++	nd	+
	BCb	+++	+++	nd	+
	Cb	++	+++	nd	+

### 7.2.3. Micromorfología

Desde el punto de vista micromorfológico, el suelo SN-1 presenta una estructura grumosa, de fuerte grado de desarrollo, con un tamaño de agregados alrededor del milímetro. Se observan muy abundantes huecos de empaquetamiento compuesto.

La masa basal presenta una distribución relacionada g/f tipo porfídica de espacio simple y, localmente, quitónica. La micromasa es arcillosa, de color naranja, menos abundante y menos roja que la de los suelos del grupo *Ia*, y su contextura birrefringente es en mosaico de fuerte grado de orientación. La naturaleza de las gravas es similar en ambos suelos (micaesquistos, esquistos, filitas y cuarcitas) y pone de manifiesto el origen metamórfico de los materiales originales de estos suelos. Las arenas son, fundamentalmente, de cuarzo, con pajitas de micas mucho más abundantes que en los suelos del grupo *Ia*. De las micas, predomina la moscovita sobre la biotita. Los granates, como corresponde a la parcial inestabilidad de estos minerales, son abundantes en el interior de las gravas, pero son escasos en las arenas de los horizontes superficiales, en los que se presentan bastante transformados a óxidos de Fe, tipo hematites; su presencia aumenta en el horizonte BC.

Como rasgos edáficos destacan los revestimientos de arcilla iluvial, de color naranja, que en los horizontes Bt se encuentran muy deformados y fragmentados, a veces muy espesos (de hasta 1mm) en el horizonte BC. En ocasiones llegan a constituir rellenos. Presentan microlaminaciones de capas alternantes con distintas coloraciones



**Lamina 4. Perfil SN-1.** a, hor. A, grietas horizontales paralelas. b, hor. A, poros vesiculares. c, hor. A, agregados de formas muy redondeadas (globosos). d, hor. A, grano de arena con casquete (capping), poros vesiculares y fisuras, agregados esféricos (granulares). e, hor. A, varios granos de arena con casquetes. f, hor. A, por efecto del hielo/deshielo los granos se giran y los distintos casquetes llegan a formar recubiertas. g y f, hor. Bt, abundantes restos de revestimientos de arcilla iluvial deformados y fragmentados en una micromasa roja, transparente (g) y de fuerte orientación, con contextura birrefringente mosaico (f). j, hor. Bt, dos fases de iluviación de arcilla, una de revestimientos y rellenos naranjas y otra de color rojo-pardo. k, hor. Bt, agregado granular con sus partículas orientadas. m y n, hor. Bt, espesos (1 mm) revestimientos de arcilla iluvial deformados y fragmentados con microlaminaciones. o, hor. Ck, revestimientos de carbonatos micríticos. a, c, e, d, e, g, j y m con sólo polarizador. b, f, h, k, m y o con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las fotografías representa: 1 mm en g y h ; 3,5 mm para el resto.

rojizas y a veces se encuentran parcialmente decolorados por acción de una hidromorfia incipiente presente en este suelo.

Existen también nódulos de hierro, tipo hematites, redondeados, de bordes netos y de tamaño arena fina (<1%).

El suelo parece encontrarse muy afectado por los fenómenos de periglaciario. La matriz se presenta muy fragmentada, con granos que presentan casquetes de textura limosa (capping) que en ocasiones recubren casi enteramente al grano, y dando unas morfologías muy redondeadas, como si los granos hubiesen sido desplazados y girados por la acción del hielo. En ocasiones los granos se encuentran fuertemente orientados como consecuencia de las presiones del hielo que actuaron durante los episodios fríos que siguieron a la formación del suelo (Kemp, 1985; Van Vliet-Lanoë, 1985; Catt, 1987); asimismo, también se presentan abundantes vesículas, grietas paralelas a la superficie y agregados granulares muy redondeados típicos de los procesos alternantes de hielo-deshielo.

#### 7.2.4. Clasificación

El perfil LLP-2 presenta un horizonte superficial ócrico, un horizonte árgico saturado con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla, un horizonte BC cálcico dentro de los primeros 100 cm y un horizonte C cálcico cementado que tiene un contenido en carbonato cálcico equivalente inferior al 50% y, en principio, no podría ser clasificado como petrocálcico según el sistema de clasificación FAO (1998); no obstante, dado que gran parte del  $\text{CaCO}_3$  se encuentra adherido a las paredes de la grava y no se puede determinar, creemos que sí supera dicho 50% y se podría considerar petrocálcico. El value en húmedo del horizonte árgico es de 4, por lo que no se puede catalogar como rhódico. Con estas características, se ha clasificado como Luvisol cálcico crómico cutánico (FAO, 1998). De acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), dado que el régimen de humedad es xérico, sería un Palexeralf petrocálcico.

El perfil SN-1 se caracteriza por presentar un horizonte superficial ócrico y un horizonte árgico con un grado de saturación inferior al 50%, en el que en parte la capacidad de cambio catiónico es inferior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla. Con estas características, según la FAO (1998), se trata de un Acrisol. Como tiene un cambio textural abrupto entre el horizonte ócrico y el árgico (se dobla el tanto por ciento de arcilla) y este último tiene un hue de 5YR y un value en húmedo de 4, se ha clasificado como Acrisol abrupático crómico. En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), dado que posee un horizonte árgico y un régimen de humedad údico, se encuadra dentro de los Hapludalfs údicos.

### 7.2.5. Procesos de edafogénesis

Los principales procesos edáficos que dieron lugar a estos suelos fueron los mismos que condicionaron la formación de los suelos del grupo *Ia*: fuerte meteorización, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos (en el caso del suelo LLP-2), intensa iluviación de arcilla y rubificación. Estos procesos dieron como resultado la formación de horizontes Bt bien desarrollados, de color rojo, textura de arcillosa a franco arcillosa y con abundantes cútanos de arcilla. Estas propiedades debieron de desarrollarse bajo un clima más húmedo que el actual, por lo que se deben considerar como paleosuelos.

### 7.2.6. Edad de los suelos

El suelo LLP-2, al igual que el suelo LLP-1, es un suelo de superficie formado sobre un abanico aluvial datado de principios del Pleistoceno (entre hace 788.000 y 1.650.000 años BP; Birkeland, 1999) y formado como consecuencia de episodios resistáxicos en los que las condiciones climáticas probablemente eran más frías y húmedas. Por ello, este suelo debió desarrollarse durante los periodos cálidos posteriores a la formación del depósito, tal y como se ha concluido para los suelos de superficie del grupo *Ia*.

El suelo SN-1 está desarrollado sobre una superficie geomorfológicamente estable de la parte más elevada de Sierra Nevada (2700 m), que no se vio afectada por los episodios glaciares acaecidos posteriormente a su formación. La edad estimada para este suelo, a partir de su índice de acumulación de arcilla (Levine and Ciolkosz, 1983), sería de unos 80.000 años; sin embargo, se trata indiscutiblemente de una edad falseada, puesto que los procesos erosivos y periglaciares que afectaron a este suelo después de su formación, tal y como se ya se ha puesto de manifiesto, debieron modificar sus propiedades, en especial las relacionadas con el contenido en arcilla por efecto de remoción de sus horizontes. Por tanto, podemos concluir que su edad debe ser superior a 80.000 años.

### 7.2.7. Relación grado de evolución – edad

Los grados de evolución estimados a partir de los índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $I_{Fe_d}$ ), las diferencias en la razón  $Fe_t + Al_t / Si_t$  entre los horizontes B y C, la neoformación de caolinita, el índice de enrojecimiento y las características micromorfológicas de estos suelos, muestran que sus grados de desarrollo son menores que los de los suelos del grupo *Ia*. En cualquier caso, siempre habría que tener presente que el grado de evolución se ha visto afectado por posteriores procesos de rejuvenecimiento.

En el suelo LLP-2, la menor evolución se puede explicar por haber sufrido un intenso proceso de erosión que no sólo eliminó los primitivos horizontes A y E sino también gran parte del horizonte Bt. Este truncamiento y erosión, unido al proceso de rebasificación posterior a su formación, indica que, al igual que el suelo LLP-1, se trata de un suelo poligenético. Como se puede apreciar en la Figura 7.1, estos dos suelos difieren principalmente en la diferencia en el contenido en arcilla entre sus horizontes Bt y C, mientras que la diferencia en el contenido en  $Fe_d$  es muy parecida. Esto sugiere que, probablemente, sufrieron una alteración semejante y que sus grados de evolución serían también equivalentes si el suelo LLP-2 no hubiera estado expuesto a ese intenso proceso de erosión. Por tanto, dado que se han formado sobre la misma superficie geomorfológica, es de suponer que se desarrollaron al mismo tiempo, bien durante el estadio 7 (Tabla 7.1.2) o, con más probabilidad, durante estadios cálidos anteriores.

El suelo SN-1 también ha sufrido una intensa erosión, con el añadido de que ha estado sujeto a procesos periglaciares posteriores a la formación de su horizonte Bt que lo han podido disturbar intensamente. Esta acción de los ciclos hielo-deshielo debió de producir una mezcla de los materiales de los primitivos horizontes, con la consiguiente modificación de las propiedades químicas y físicas de su horizonte Bt, como la disminución del contenido de arcilla, la fragmentación de los cútanos y un menor grado de enrojecimiento. De esta forma, los procesos periglaciares debieron borrar los rasgos edáficos anteriores indicativos de un mayor grado de evolución, por lo que este suelo se puede considerar asimismo poligenético.

### **7.3. Grupo *Iib***

#### **7.3.1. Características macromorfológicas**

Los suelos NIG-4, NIG-2 y NIG-1 forman parte, junto al suelo NIG-3 ya descrito, de la serie de suelos enterrados estudiados en el sector de Nigüelas. Presentan un perfil de tipo Bt-Ck, de lo que se deduce que durante su enterramiento debieron truncarse y perder los primitivos horizontes A y E, tal y como le ocurre al suelo NIG-3.

Todos estos suelos presentan un horizonte Bt bien desarrollado, caracterizado por un color de rojo amarillento a rojo oscuro, textura arcillosa a franco arcillosa y una estructura moderada en bloques angulares. Los índices de enrojecimiento de los horizontes Bt más evolucionados de cada suelo varían entre 7,5 (NIG-4) y 11,2 (NIG-2 y NIG-1). El color de los horizontes C de estos suelos varía entre gris pardo (2,5Y) y pardo pálido (10YR) y presentan una estructura masiva. Todos ellos muestran una cierta acumulación de carbonato cálcico en profundidad, especialmente el horizonte C del suelo NIG-4, que no ha dado lugar a la cementación de las partículas minerales (Ck).

### 7.3.2. Resultados analíticos

Todos los horizontes Bt de este grupo de suelos enterrados tienen un contenido en arcilla que supera entre un 25 y un 45% el contenido de su horizonte C, al tiempo que presentan entre un 1% y un 2% más de  $Fe_d$ . El pH es mayor de 7,0, y en muchos casos supera el valor de 8,0. El contenido en carbono orgánico (CO) es muy pequeño, en torno a un 0,2%, lo que sugiere que la mineralización de la materia orgánica debió de predominar también durante la formación de estos suelos.

Los horizontes Bt están descarbonatado, excepto en el suelo NIG-2, que parece haber sufrido un proceso de recarbonatación a partir del lavado del carbonato cálcico del suelo NIG-3 situado inmediatamente por encima.

La capacidad de intercambio catiónica (CIC) está relacionada con los contenidos en arcilla y carbono orgánico por la ecuación de regresión múltiple:

$$CIC \text{ (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = 16,422 \times CO \text{ (\%)} + 0,223 \times \text{Arcilla (\%)} \quad (r = 0,989)$$

que indica que la influencia del carbono orgánico en los valores de capacidad de intercambio catiónico es 73 veces mayor que la de la arcilla. Esto vuelve a poner de manifiesto el alto grado de transformación y evolución de la materia orgánica de estos suelos.

Las bases de cambio están fundamentalmente dominadas por  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ; el primero es más abundante en el suelo NIG-4, mientras que el segundo predomina en los suelos NIG-2 y NIG-1. Las cantidades de  $Na^+$  y  $K^+$  son minoritarias. Todos los suelos son eútricos. La elevada saturación en bases, igual o cercana al 100%, se puede atribuir a procesos de basificación-carbonatación que, en este caso, estarían ligados a las aguas que se infiltran desde los horizontes C calcáreos que están por encima. En cualquier caso, este proceso tuvo que ser posterior a la formación de los horizontes Bt y, por tanto, los pH originales debieron de ser más ácidos que los actuales.

Los contenidos en hierro total ( $Fe_t$ ), total de óxidos ( $Fe_d$ ) y formas amorfas ( $Fe_o$ ) de los horizontes Bt son mayores que los de sus horizontes C. Lo mismo se puede decir de las formas de aluminio ( $Al_t$ ,  $Al_d$  y  $Al_o$ ). Los valores de la razón  $Fe_o/Fe_d$  en los horizontes Bt son muy pequeños ( $<0,05$ ), de lo que se deduce que los óxidos de hierro formados a partir de la meteorización de los silicatos están prácticamente cristalizados en su totalidad (Arduino *et al.*, 1986). El contenido en  $Fe_d$  de estos suelos está relacionado con la arcilla a través de la ecuación:

$$Fe_d \text{ (\%)} = 0,06 \times \text{Arcilla (\%)} \quad r = 0,939$$

que indica que cada 100 g de arcilla vendrían a retener en su superficie unos 6 g de hierro.

En los horizontes Bt hay una disminución del contenido en  $Si_t$  en relación a los horizontes C, con un aumento de los contenidos en  $Fe_t$  y  $Al_t$ . Esto sugiere que el silicio era más móvil que el hierro y el aluminio, con lo que el pH original de estos suelos tampoco debió bajar de 5,0 (Loughnan, 1969).

En la Figura 7.3.1 se han comparado las diferencias en la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  entre los horizontes Bt y C de los suelos NIG-4, NIG-2 y NIG-1 con las del otro suelo enterrado NIG-3, perteneciente al grupo de suelos más evolucionado *Ia*. Como cabría esperar, estas diferencias son mucho mayores en el suelo NIG-3 que en el resto de los suelos enterrados del sector de Nigüelas. Los suelos NIG-2 y NIG-1 presentan diferencias intermedias y muy semejantes entre sí, mientras que el suelo NIG-4 es el que muestra una diferencia más pequeña. Esto indica que el grado de alteración y lavado fue mayor en el suelo NIG-3, intermedio en los suelos NIG-2 y NIG-1 y menor en el suelo NIG-4.

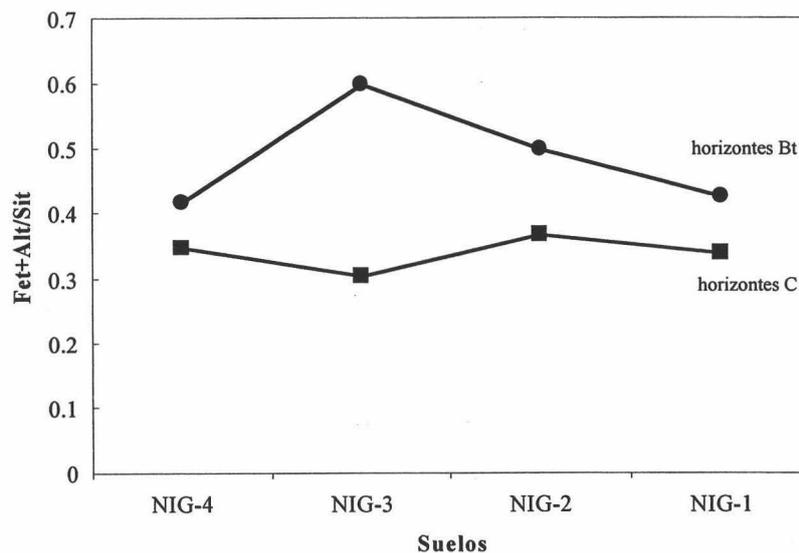


Figura 7.3.1. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt y C de los suelos enterrados del sector de Nigüelas.

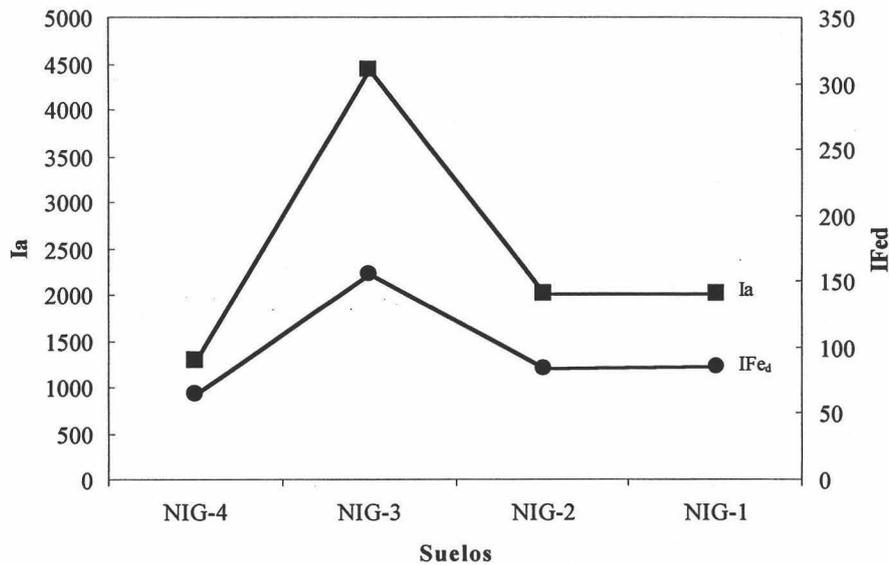


Figura 7.3.2. Índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos enterrados del sector de Nigüelas.

Si estimamos el grado de evolución y alteración de estos suelos a partir de sus índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) (Fig. 7.3.2), se puede observar que el suelo NIG-3 es el más evolucionado, seguido de los suelos NIG-2 y NIG-1 y, por último, NIG-4, el que muestra un menor grado de desarrollo de todos los suelos enterrados.

El índice de enrojecimiento ( $I_r$ ) de los horizontes Bt más evolucionados en los suelos enterrados de Nigüelas muestra el mismo patrón de comportamiento que los índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) (Fig. 7.3.3).

El análisis semicuantitativo de los minerales de la arcilla (Tabla 7.3) muestra que en todos los horizontes Bt hay un incremento en caolinita con respecto a los horizontes C, mientras que la esmectita disminuye (suelo NIG-4) o desaparece (suelos NIG-2 y NIG-1). Esta alteración de la esmectita y neoformación de caolinita es menos intensa que la que se produce en el suelo NIG-3 y, en cualquier caso, también debió de producirse con anterioridad al proceso de basificación, cuando los suelos eran más ácidos.

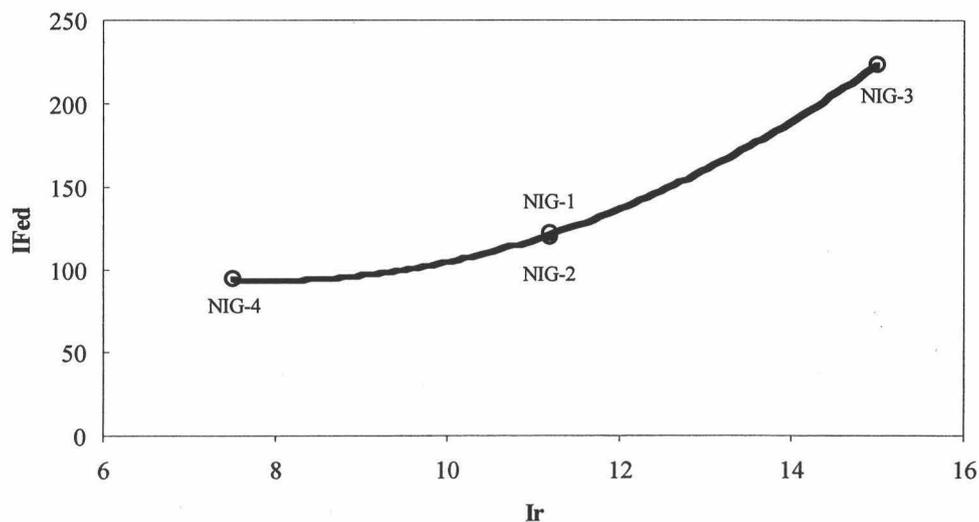


Figura 7.3.3. Relación entre el índice de acumulación de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) y el índice de enrojecimiento ( $Ir$ ) en los horizontes Bt más evolucionados de los suelos enterrados de Nigüelas.

Tabla 7.3. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo *Iib*: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P = Paragonita; nd = no detectado; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)			
		K	I	S	P
NIG-4	Bt1	++	+++	(+)	+
	Bt2	++	+++	+	+
	BC	+	+++	++	+
	CB	+	+++	++	+
	Ck	+	+++	++	+
NIG-2	Bt1	++	+++	nd	+
	Bt2	++	+++	nd	+
	Ck	+	+++	++	+
NIG-1	Bt	++	+++	nd	+
	BC	++	+++	nd	+
	Ck	+	+++	+	+

### 7.3.3. Micromorfología

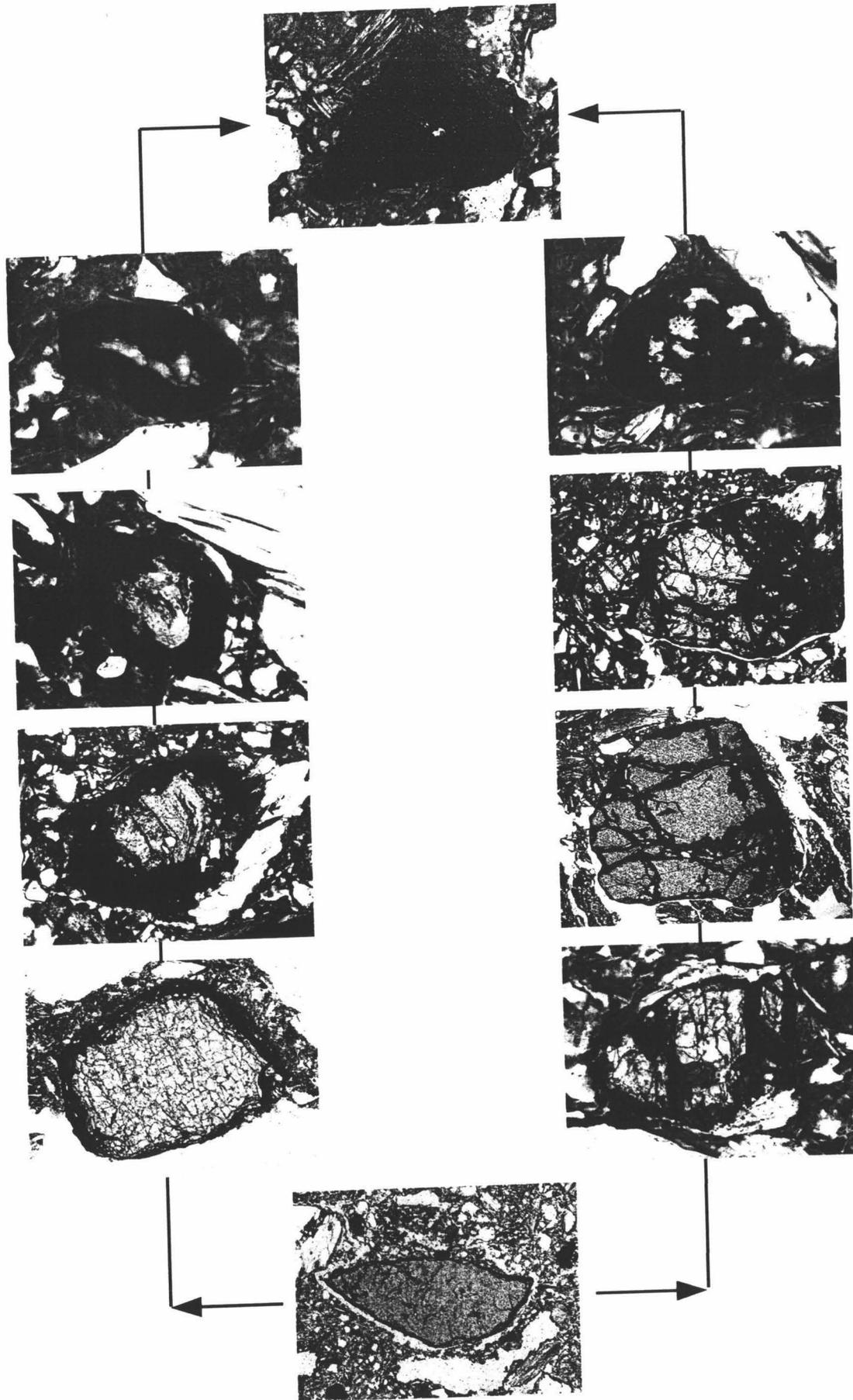
Desde el punto de vista micromorfológico, los horizontes Bt de los suelos del grupo *Iib* muestran una microestructura en bloques angulares de moderado grado de agregación. La porosidad está constituida por fisuras y cavidades. La masa basal presenta una distribución relacionada g/f tipo porfídica de espacio simple, con una micromasa arcillosa, de color naranja, de transparencia media, punteada y de aspecto fluidal como rasgo indicativo de su origen iluvial. La contextura birrefringente es moteada, con motas sueltas en NIG-4 y en mosaico en NIG-1 y NIG-2. Su grado de orientación es mucho menor que el del otro suelo de este sector (NIG-3).

El material grueso está constituido por gravas metamórficas (micaesquistos, esquistos, filitas y cuarcitas) y arenas de cuarzo policristalino fundamentalmente, con abundantes pajitas de micas, más abundantes en NIG-4 que en NIG-2 y NIG-1 y, sobre todo, que en NIG-3 (predomina la moscovita sobre la biotita). Los granates son escasos en las arenas de los horizontes superficiales, en los que se presentan bastante transformados a óxidos de Fe, tipo hematites; su presencia aumenta en el horizonte BC y son abundantes en el interior de las gravas. Se trata, pues, de suelos formados a partir de depósitos procedentes de la erosión de rocas metamórficas, de idénticas características a los materiales de los suelos del grupo anterior *Ia*, con la excepción del suelo COL-10, cuyos materiales eran de procedencia sedimentaria.

Los revestimientos de arcilla iluvial sobre los macroporos se presentan en moderadas cantidades en NIG-4 y son delgados ( $20\mu$ ), mientras que en NIG-2 y NIG-1 son más abundantes y más espesos ( $50-100\mu$ ); en cualquier caso, son mucho menos abundantes y menos espesos que en NIG-3. También están presentes los revestimientos de arcilla iluvial amarillorrojizos deformados y fragmentados. Los revestimientos de arcilla muestran microlaminaciones con diferentes coloraciones correspondientes a distintas disponibilidades de Fe en las etapas de formación de estas láminas.

Existen también nódulos de hierro, tipo hematites, redondeados, de bordes netos y de tamaño arena fina (<1%).

En el horizonte Bt de NIG-2 existe una recarbonatación secundaria en forma de nódulos, revestimientos y rellenos de carbonatos espáticos y micríticos. En las zonas más carbonatadas se ha desarrollado un proceso de reemplazamiento de los constituyentes del primitivo horizonte Bt por los carbonatos. Así, se observan claros ejemplos de reemplazamiento de los granos detríticos (cuarzo y micas) e igualmente se puede seguir los diferentes pasos de transformación de la arcilla de la masa basal y de los revestimientos por los carbonatos; en cualquier caso, estos reemplazamientos son escasos en el conjunto del suelo.



**Lamina 5. Perfiles NIG-1, NIG-3 y NIG-4.** Distintas fases de la transformación de granates (incoloros) a compuestos de Fe, tipo hematites (rojos oscuros). A la izquierda alteración pelicular; a la derecha alteración irregular. Estos granates tienen tamaño de arena; todas las microfotografías son con sólo polarizador.

moscovita

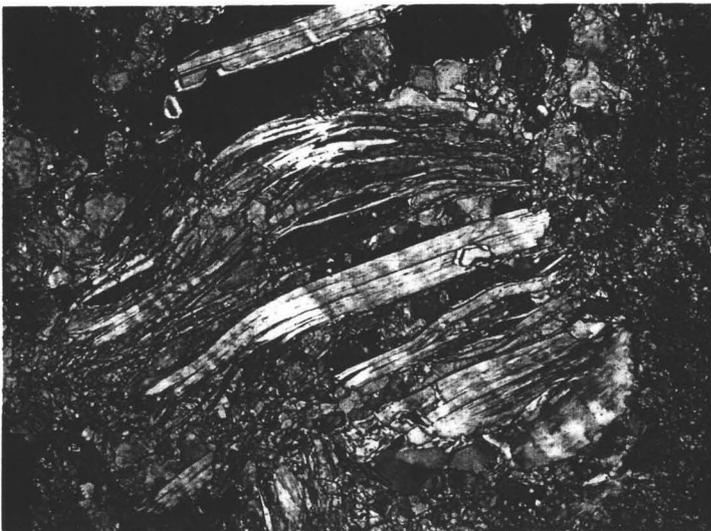
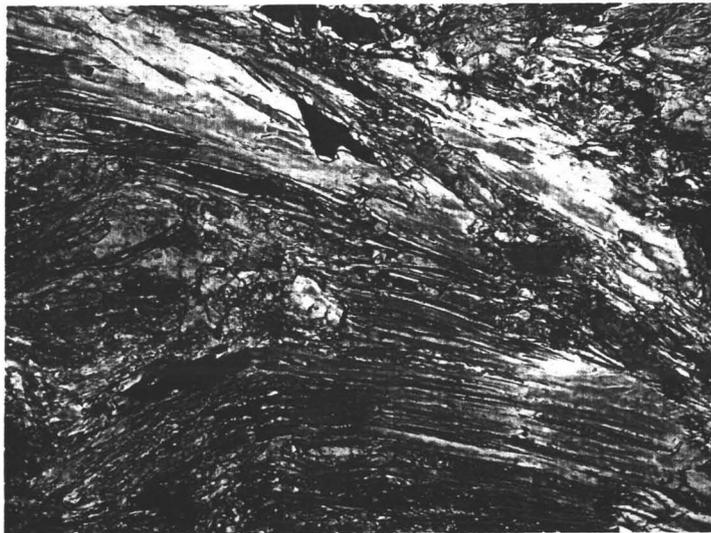
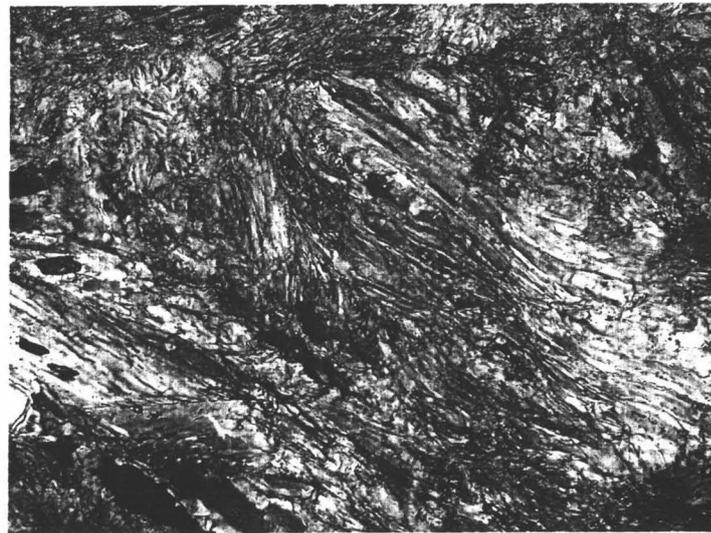
carbonatos reemplazantes conservando el hábito fibroso de la moscovita reemplazada

moscovita

moscovita fracturada en dos por los carbonatos

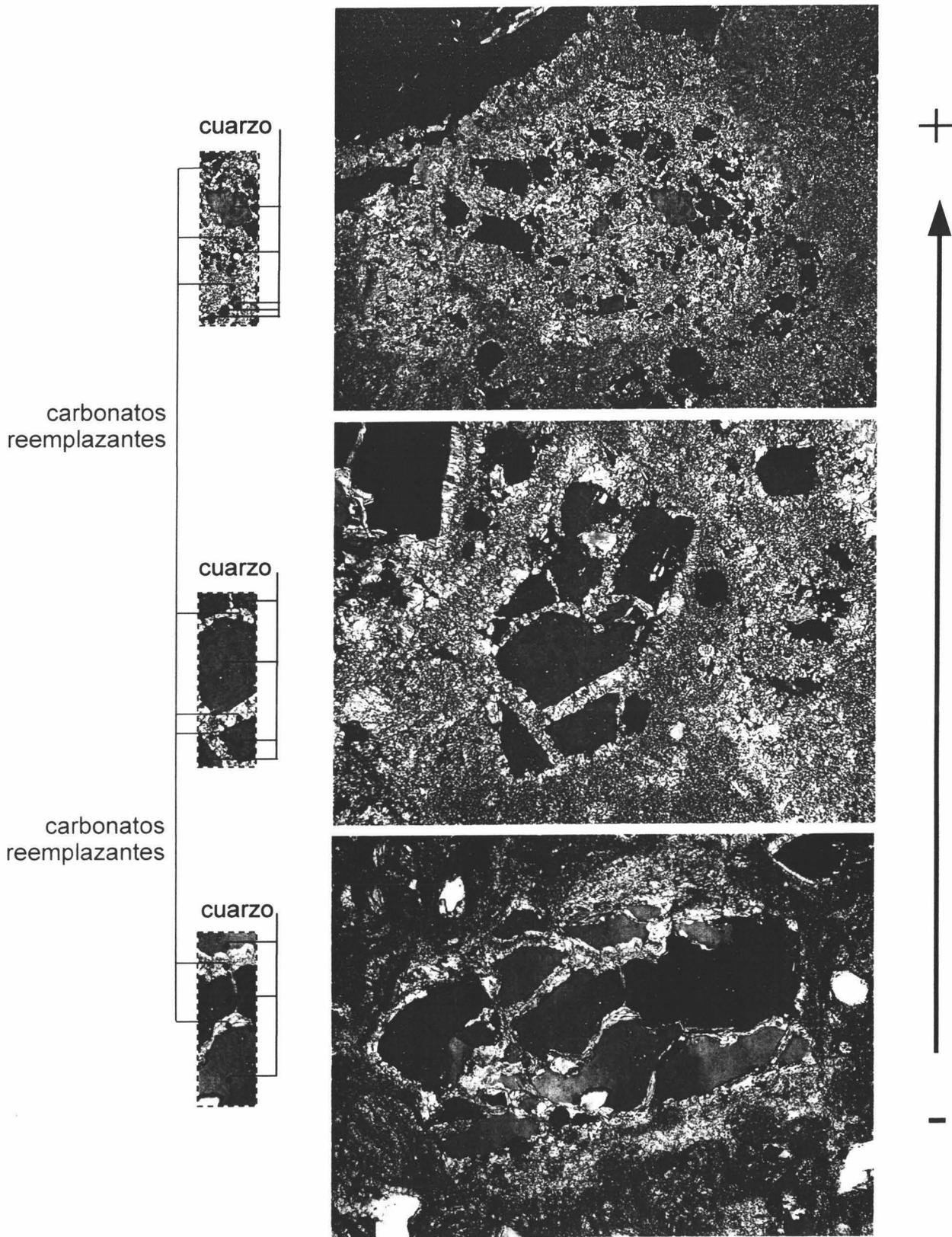
moscovita

carbonatos reemplazantes



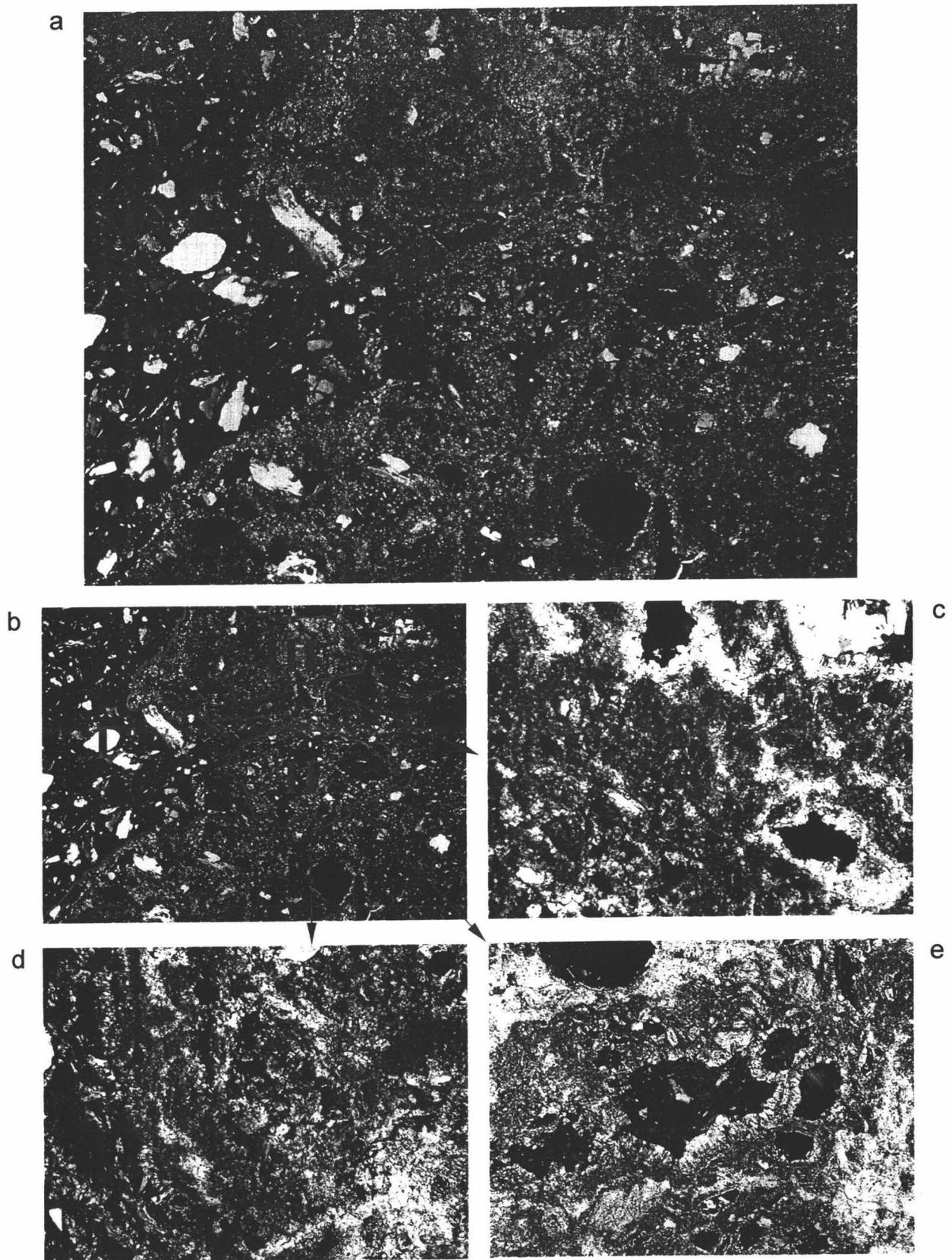
**Lamina 6. Perfil NIG-2, Hor. Btb2.** Distintas etapas en el reemplazamiento de la moscovita (de colores de interferencia verdes, azules, rojos y amarillos brillantes) por los carbonatos (colores blancos, grises amarillentos).

Microfotografías con polarizador y analizador cruzados. Escala, el lado más largo de las fotos corresponde en la realidad con 1 mm.



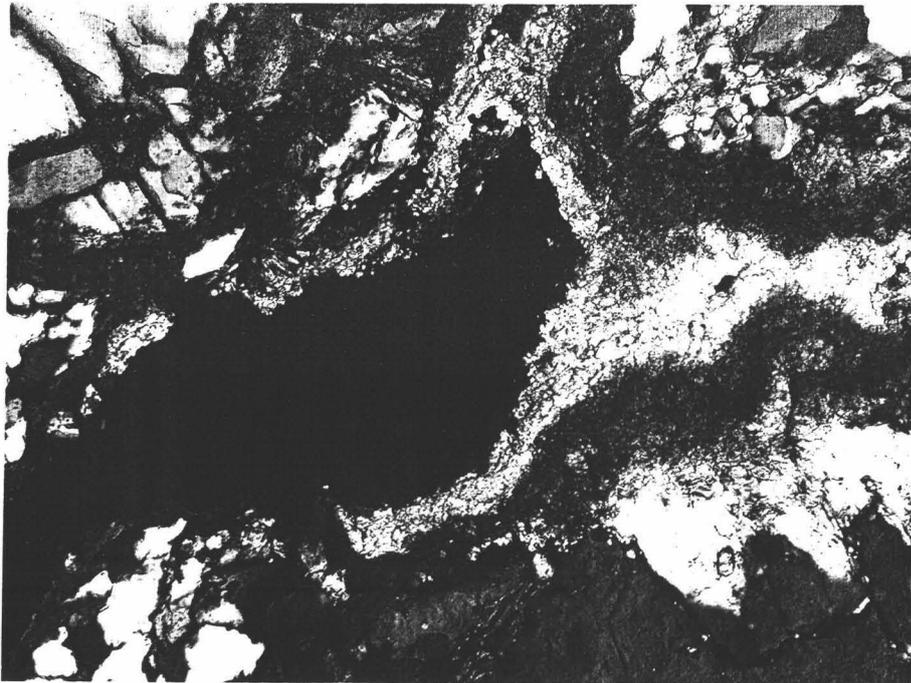
**Lamina 7. Perfil NIG-2, Hor. Btb2.** Distintas etapas en el reemplazamiento de cristales de cuarzo (de colores de interferencia grises) por los carbonatos (colores blancos y grises amarillentos).

Microfotografías con polarizador y analizador cruzados. Escala, el lado más largo de las fotos corresponde en la realidad a 1 mm.



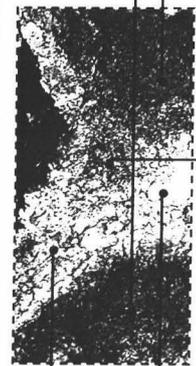
**Lamina 8. Perfil NIG-2, Hor. Btb2.** a, distintas etapas en el reemplazamiento del hor. Bt (de colores rojos; zona I) por los carbonatos secundarios (colores naranjas y amarillentos). c, d y e, detalles de las zonas con diferente grado de sustitución II y III del la foto b.

Microfotografías con polarizador y analizador cruzados. Escala, el lado más largo de las fotos corresponde en la realidad a 3,5 mm en a; 1 mm en c y d; 0,5 en e.



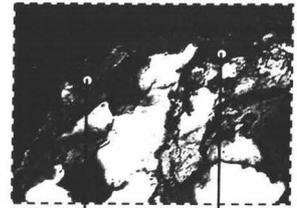
RAI = Revestimiento de Arcilla Iluvial

RAI a medio  
reemplazar  
por los carbonatos



RAI casi totalmente  
reemplazado  
por los carbonatos

carbonatos

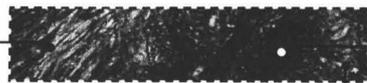


RAI bien conservado  
sobre cuarcita



reconstrucción del  
posible RAI inicial

moscovita parcialmente  
reemplazada por los carbonatos



RAI poco afectado  
por los carbonatos

carbonatos

moscovita  
carbonatos reemplazando  
a la moscovita



RAI casi totalmente  
reemplazado por los carbonatos

RAI a medio reemplazar por los carbonatos

**Lamina 9. Perfil NIG-2, Hor. Btb2.** Distintas etapas en el reemplazamiento de revestimientos de arcilla iluvial (de colores rojos) por los carbonatos (colores blancos y grises amarillentos).

Microfotografías con polarizador y analizador cruzados. Escala, el lado más largo de las fotos corresponde en la realidad a 2 mm en la foto superior y 1 mm en la inferior.

Por las características micromorfológicas (cantidad de micromasa y grado de orientación, pajitas de mica, granates, espesor y abundancia de los revestimientos de arcilla iluvial) se puede definir una secuencia de evolución creciente para los suelos enterrados de Nigüelas que, de menor a mayor evolución, sería:

NIG-4<<NIG-2<NIG-1<<<<NIG-3

#### 7.3.4. Clasificación

El suelo NIG-4 presenta un horizonte árgico saturado con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un horizonte cálcico a una profundidad de 105 cm desde el límite superior del horizonte árgico. El color del horizonte árgico sólo cumple los requisitos para ser considerado crómico y puesto que el horizonte cálcico se encuentra a más de 100 cm desde la superficie del perfil, ha sido clasificado como Luvisol crómico cutánico según FAO (1998). En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se ha clasificado como Palexeralf cálcico.

El perfil NIG-2 presenta un horizonte árgico saturado, ligeramente calcáreo, con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un color que sólo reúne los requisitos para ser llamado crómico. Su horizonte C no cumple las características de un horizonte cálcico pero, puesto que tiene recarbonataciones secundarias dentro de los 100 primeros cm desde el límite superior del horizonte árgico, se ha clasificado según la FAO (1998) como Luvisol hipocálcico crómico cutánico. Según la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se clasifica como Palexeralf típico.

El perfil NIG-1 presenta un horizonte árgico saturado con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla. Su horizonte C tiene recarbonataciones secundarias pero su límite superior se encuentra a más de 100 cm desde la superficie del perfil. Con estas características y dado que el horizonte árgico sólo cumple los requisitos de color para ser denominado crómico, este perfil ha sido clasificado como Luvisol crómico cutánico según la FAO (1998) y como Palexeralf típico de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

#### 7.3.5. Procesos de edafogénesis

Los principales procesos de edafogénesis que dieron lugar a estos suelos fueron: *meteorización, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos, intensa iluviación de arcilla y rubificación*; como resultado, se formaron horizontes Bt bien desarrollados, de color rojo, textura arcillosa a franco arcillosa y con abundantes *cútanos*

UNIVERSIDAD DE GRANADA

23 NOV. 2001

101  
COMISION DE DOCTORADO

de arcilla. Estas propiedades debieron de desarrollarse bajo un clima más húmedo que el actual, por lo que se deben considerar como paleosuelos.

Otro proceso generalizado en estos suelos es la recarbonatación. Los depósitos que han ido enterrando los suelos eran calcáreos y posteriormente los carbonatos se han lavado a los suelos subyacentes. Localmente, en las áreas de máxima concentración de carbonatos de los horizontes carbonatados, se ha producido un intenso proceso de reemplazamiento por parte de estos materiales a los minerales silicatados (cuarzo y moscovita, principalmente), a la micromasa arcillosa y a los revestimientos de arcilla iluvial, como ha sido ya señalado en el estudio micromorfológico.

### **7.3.6. Edad de los suelos**

La edad aproximada de estos suelos y de los materiales sobre los que se desarrollan ya se ha establecido en el apartado 7.1. De acuerdo con lo expuesto, el depósito en el que se han estudiado estos suelos enterrados representa gran parte de la historia de los periodos de erosión-deposición (fríos y húmedos) y de edafización (más cálidos) acaecidos en la Depresión de Granada a lo largo del Pleistoceno Medio-Superior (entre 10.000 BP y 788.000 BP; Birkeland, 1999).

### **7.3.7. Relación grado de evolución – edad**

De acuerdo con los índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $I_{Fe_d}$ ), las diferencias en la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  entre los horizontes B y C, el grado de neoformación de caolinita en los horizontes B, el índice de enrojecimiento y las características micromorfológicas, los suelos NIG-2 y NIG-1 muestran un grado de evolución muy parecido, que es superior al del suelo NIG-4 e inferior al del suelo NIG-3. De aquí se deduce que los dos primeros periodos de edafización debieron tener una intensidad equivalente y formaron suelos de evolución semejante (NIG-2 y NIG-1). El tercer periodo de edafización fue el más intenso y dio lugar al suelo más evolucionado (NIG-3); mientras que el último periodo de edafización fue el más débil de los cuatro y, aunque los procesos de formación del suelo fueron los mismos, su intensidad fue mucho menor (NIG-4).

Además, la duración de los periodos cálidos a lo largo de los cuales se formaron probablemente estos suelos fue de alrededor de 63.000 años (NIG-1), 33.000 años (NIG-2) y 56.000 años (NIG-3 y NIG-4). Por tanto, el factor tiempo parece no ser el responsable de los diferentes grados de evolución de los suelos enterrados, en especial de los suelos NIG-1, NIG-3 y NIG-4. Más bien debieron de estar relacionados con cambios en las condiciones climáticas, ya que los demás factores formadores fueron equivalentes, especialmente el material original y el relieve. Por ello, el mayor grado de desarrollo del suelo NIG-3 debe ser atribuido a un clima diferente, probablemente más

húmedo. Estas condiciones de mayor humedad también justificarían el lavado de carbonatos del horizonte Bt a través de su horizonte C y la formación de revestimientos de carbonato cálcico en los horizontes Bt del suelo NIG-2. En consecuencia, en nuestra zona de estudio, los diferentes grados de desarrollo edáfico durante los últimos 474.000 años indican que el clima más húmedo de todos los periodos cálidos debió de tener lugar entre 186.000 y 242.000 años BP (estadío 7), y el más seco entre 71.000 y 127.000 años BP (estadío 5) (Tabla 7.1.1). Los periodos cálidos anteriores a 242.000 años (estadíos 9 y 11) debieron tener climas con humedades intermedias.

## 7.4. Grupo *IIIb*

### 7.4.1. Características macromorfológicas

Este grupo incluye los suelos OT-2 y CD-1. Ambos suelos están enterrados y presentan un perfil de tipo Bt-C, lo que indica que debieron truncarse durante su enterramiento y perder los primitivos horizontes A y E. En la actualidad, el suelo OT-2 se encuentra enterrado por un depósito conglomerático muy carbonatado, y en el caso del suelo CD-1, por materiales de naturaleza muy semejante a aquellos sobre los que se desarrolla (depósitos de procedencia metamórfica, carentes de carbonatos).

Ambos presentan un horizonte Bt bien desarrollado, caracterizado por un color de rojo a rojo amarillento, textura de franco arcillo arenosa a franco arcillosa y una estructura en bloques angulares de fuerte a moderada. El índice de enrojamiento varía entre 7,5 (CD-1) y 11,2 (OT-2). El color de los horizontes C de estos suelos varía entre pardo intenso y amarillo rojizo y no muestran un desarrollo de estructura.

### 7.4.2. Resultados analíticos

Los horizontes Bt, por la ubicación de los suelos en el grupo *IIIb*, contienen entre un 10 y un 25% más de arcilla y entre un 1 y un 2% más de  $Fe_a$  que el horizonte C correspondiente. El pH del suelo OT-2 es claramente superior a 8,0, mientras que en el suelo CD-1 roza la neutralidad, con valores ligeramente ácidos en el horizonte Bt y algo más bajo en el horizonte C. El contenido en carbono orgánico (CO) es muy pequeño (menor de 0,4%) en ambos suelos, lo que indica que durante su desarrollo debió de predominar también la mineralización de la materia orgánica.

El horizonte C del suelo OT-2 tiene una fuerte acumulación de carbonato cálcico (54%) que no ha producido cementación. Su horizonte Bt también está carbonatado, lo que indica que ha debido sufrir un proceso de recarbonatación después de su formación,

probablemente a partir del lavado de los materiales fuertemente carbonatados que lo entierran. Por el contrario, el suelo CD-1 no presenta carbonatos en todo el perfil.

Las bases de cambio están dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con cantidades minoritarias de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Los suelos son eútricos, con una saturación en bases del 100% en OT-2 que debe ser atribuida al proceso de basificación-recarbonatación, y en torno al 80% en los horizontes Bt de CD-1 que no ha estado afectado por relieves calizos ni ha sido enterrado por materiales carbonatados. Como ya hemos mencionado anteriormente, los procesos de recarbonatación-rebasificación debieron de ser posteriores a la formación del suelo y, por ello, el pH original de los horizontes Bt, especialmente el de OT-2, debió de ser más ácido que el actual.

Los contenidos en hierro total ( $\text{Fe}_t$ ), total de óxidos ( $\text{Fe}_d$ ) y óxidos amorfos ( $\text{Fe}_o$ ) de los horizontes Bt son mayores que los de sus horizontes C. No obstante, el horizonte C de CD-1, con claros síntomas de haber estado afectado por una antigua hidromorfía, presenta elevados contenidos en  $\text{Fe}_t$  y  $\text{Al}_t$ , especialmente en este último que supera el contenido de los horizontes Bt. Estos resultados parecen indicar que en el horizonte Cg de CD-1 se acumuló Al y Fe, probablemente aportados por aguas freáticas ácidas y reductoras. Por otra parte, el suelo CD-1 presenta un contenido relativamente elevado en óxidos amorfos de hierro ( $\text{Fe}_o$ ) que llegan a superar el 25% del total de óxidos de hierro, en contraste con los suelos estudiados hasta el momento que no superan en ningún caso el 10%.

Por los motivos expuestos anteriormente, la razón  $\text{Al}_t/\text{Si}_t$ , del horizonte Cg de CD-1 es particularmente elevada e incluso superior a la de los horizontes Bt; no obstante, en el horizonte BC (no afectado por hidromorfía) no parece haberse acumulado el Al, de forma que dicha razón, al igual que la razón  $\text{Fe}_t/\text{Si}_t$ , se incrementa en los horizontes Bt en relación al BC. Por el contrario, en OT-2 las razones  $\text{Fe}_t/\text{Si}_t$  y  $\text{Al}_t/\text{Si}_t$  no tienden a incrementarse en el horizonte Bt en relación al C, siendo muy similares e incluso decreciendo en el Bt; esto contrasta con los resultados de los suelos estudiados anteriormente. En la Figura 7.4.1 comparamos la razón  $\text{Fe}_t+\text{Al}_t/\text{Si}_t$  de los horizontes Bt y C de suelos de los grupos *Ia* (DUR-1) y *Iib* (NIG-2) con la de los suelos de este grupo, pudiéndose apreciar que, en estos últimos, las diferencias son casi nulas; aunque, probablemente, por motivos diferentes.

Si estimamos el grado de evolución de los suelos a partir de los índices de acumulación de arcilla (*Ia*) y de óxidos de hierro ( $\text{IFe}_d$ ), los suelos del grupo *IIIb* presentan valores inferiores a los de los suelos de los grupos *Ia* y *Iib* (Fig. 7.4.2).

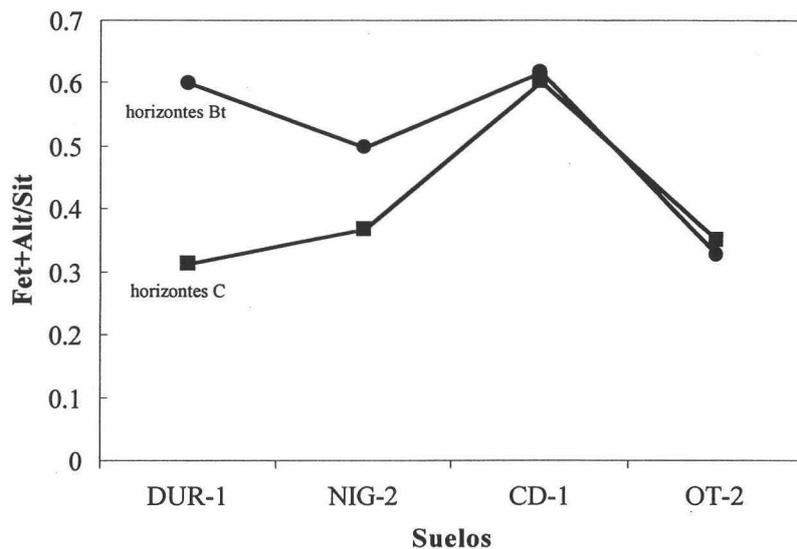


Figura 7.4.1. Razones  $Fe_t + Al_t / Si_t$  en los horizontes Bt y C de los suelos DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2.

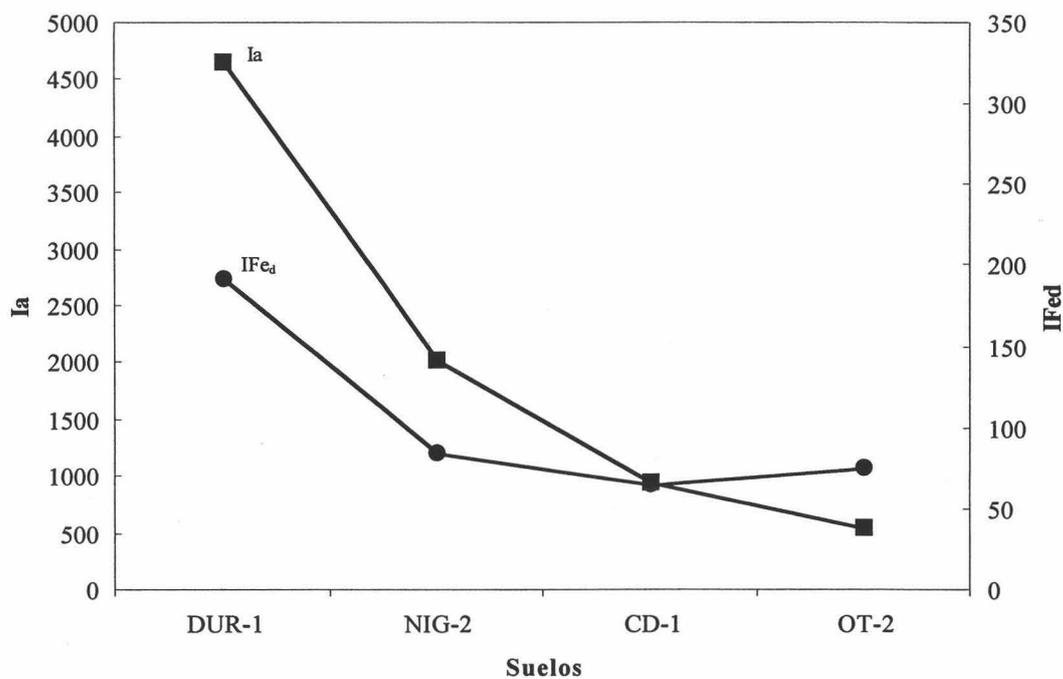


Figura 7.4.2. Índices de acumulación de arcilla ( $I_a$ ) y de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) de los suelos DUR-1, NIG-2, CD-1 y OT-2.

El análisis semicuantitativo de los minerales de la arcilla (Tabla 7.4) muestra la neoformación de caolinita en los horizontes Bt, al tiempo que disminuye la esmectita.

Lógicamente, la neoformación de caolinita, especialmente en OT-2, debió de producirse antes del proceso de basificación, cuando los valores de pH eran más ácidos. En cualquier caso, la neoformación de caolinita no alcanza los niveles de los suelos del grupo *Ia*.

Tabla 7.4. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo *IIIb*: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P = Paragonita; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

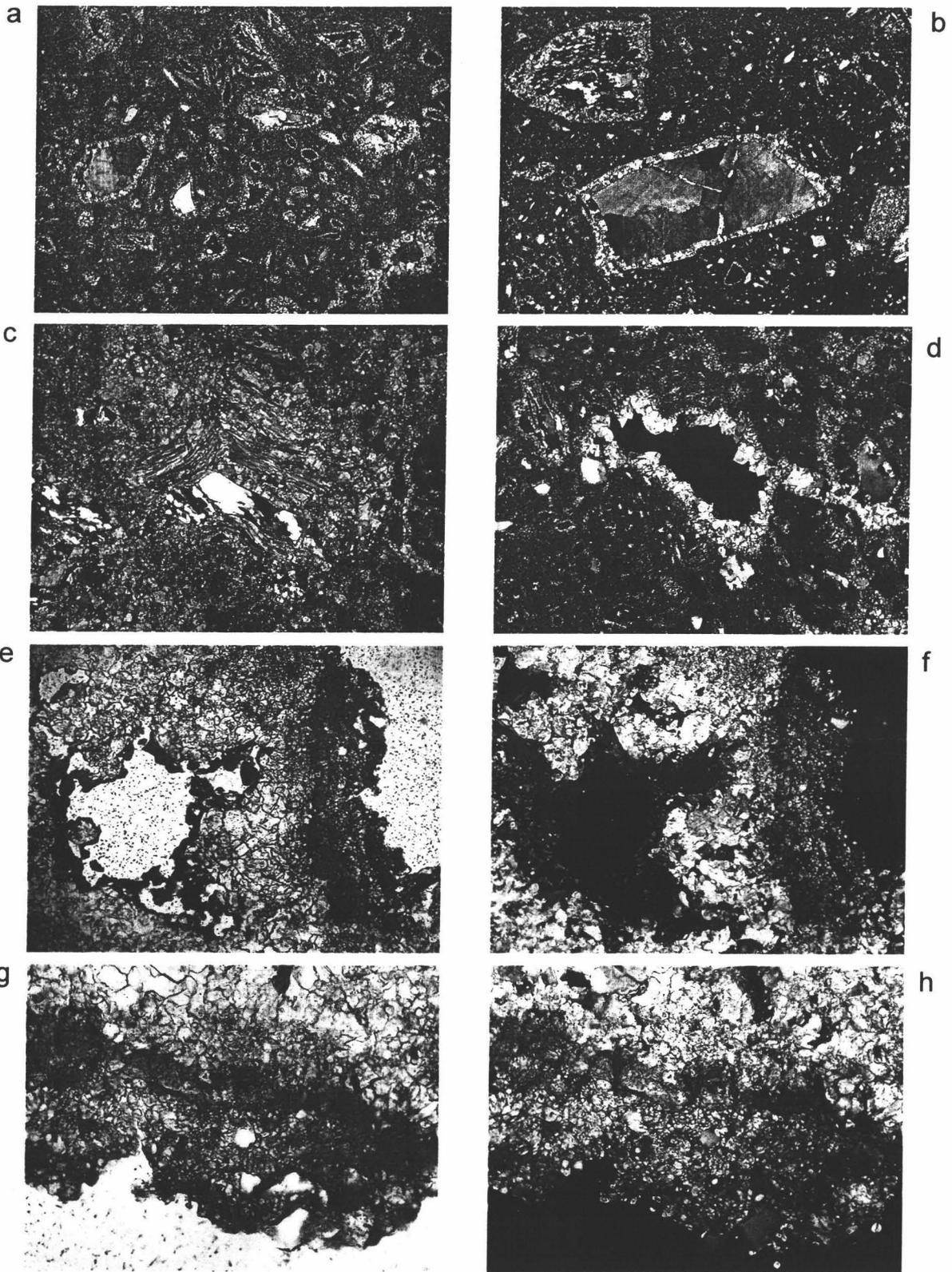
Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)			
		K	I	S	P
OT-2	Btkb	++	+++	(+)	+
	Ckb	+	+++	++	+
CD-1	A	+	+++	+	+
	C	+	+++	+	+
	Btb1	++	++	++	+
	Btb2	++	++	++	+
	BCb	+	++	+++	+
	Cgb	+	++	+++	+

### 7.4.3. Micromorfología

El análisis micromorfológico pone de manifiesto que se trata de suelos evolucionados. El suelo OT-2 es el de menor evolución de los dos suelos de este grupo *IIIb* y presenta un grado de evolución muy semejante al suelo NIG-1 del grupo *IIB*; por otra parte, el suelo CD-1 es también similar a NIG-1 por el grado de orientación de la micromasa, pero la abundancia y espesor de los revestimientos de arcilla iluvial lo hacen más parecido al suelo NIG-4.

El horizonte Bt de ambos suelos presenta una microestructura en bloques angulares de bajo a moderado grado de agregación. La porosidad esta formada fundamentalmente por fisuras de paredes encajantes y algunas cavidades.

La masa basal presenta una distribución relacionada g/f de tipo porfídica de espacio simple. La contextura birrefringente de la micromasa es de motas en mosaico. El material grueso esta conformado por gravas de origen metamórfico (esquistos, micaesquistos, filitas y cuarcitas) y arenas de cuarzo policristalino y monocristalino, junto a abundantes pajitas de moscovita. Los granates se encuentran en escasa cantidad



**Lamina 10. Perfil OT-2, hor. Ck.** a y b, el reemplazamiento de los cristales de cuarzo por los carbonatos empieza por una aureola espática (color blanco) y luego va avanzando hacia el interior del cristal. c, reemplazamiento de una moscovita (pajitas verdes, rojas y amarillas) en estado muy avanzado. d, revestimiento de carbonatos espáticos en un hueco rodeado de una micromasa micrítica (color gris amarillento). e y f, dos revestimientos de arcilla iluvial (de color rojo) con diferente grado de reemplazamiento por los carbonatos (a la izquierda, bien conservado; a la derecha, moderadamente sustituido). g y h, detalle del revestimiento moderadamente reemplazado (la máxima transformación en la zona central de las fotos).

e y g con sólo polarizador. a, b, c, d, f y h con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad con: 3,5 mm en a; 6,5 mm para b; 2 mm en c y d; 1 mm en e y f; 0,5 mm para g y h.

(<1%) y aparecen generalmente parcialmente transformados a óxidos de hierro de tipo hematites. El material fino (micromasa) es arcilloso, de color rojo anaranjado y naranja rojizo, de transparencia media.

Al igual que en el caso de los suelos de los grupos anteriores (a excepción de COL-10), el material original de estos suelos fueron depósitos procedentes de la erosión de rocas metamórficas. También como ocurría en esos suelos, la ausencia de gravas y arenas de carbonatos permite suponer que los depósitos en un principio no contenían materiales detríticos carbonatados, estos debieron de ser aportados posteriormente, en determinados episodios, por aguas de escorrentía (no todos los suelos están enterrados por depósitos carbonatados).

Como rasgos edáficos más ampliamente representados, tal y como ocurre en todos los suelos anteriormente descritos, aparecen revestimientos de arcilla iluvial. En ocasiones se presentan bien conservados recubriendo los macroporos y, frecuentemente, se encuentran fragmentados y deformados (pápulas) en diverso grado, llegando a desaparecer e integrándose en la micromasa. El espesor de los revestimientos oscila entre las 50 $\mu$  en OT-2 y las 150 $\mu$  en CD-1.

Otros rasgos edáficos son los nódulos de hierro, tipo hematites, redondeados, de bordes netos y de tamaño arena fina, que están presentes en escasas cantidades (<1%):

En el horizonte Bt del suelo OT-2 se observa la presencia de revestimientos de carbonatos sobre las paredes de los macroporos y de nódulos (en escasas cantidades), hecho indicativo de un proceso de recarbonatación secundaria, posterior al proceso de iluviación de arcilla.

El horizonte Ck de OT-2 presenta frecuentes e intensos reemplazamientos por los carbonatos de los granos de cuarzo y de los revestimientos y masas arcillosas de origen iluvial. El horizonte C del suelo CD-1 presenta decoloraciones en la micromasa y en los revestimientos de arcilla iluvial debidas a un proceso de hidromorfía.

#### **7.4.4. Clasificación**

El perfil CD-1 tiene un horizonte árgico saturado en más de un 50%, con una capacidad de cambio catiónico superior a 24 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de arcilla y un hue de 7,5YR. El horizonte C tiene características gleicas, pero como se encuentra a más de 100 cm de profundidad no se tienen en cuenta a efectos de la clasificación del suelo. Con estas características, este suelo ha sido clasificado como Luvisol crómico cutánico según la FAO (1998). En cuanto a la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff,

1999), se corresponde con un Palexeralf típico por tener un horizonte árgico con más de un 35% de arcilla, un régimen de humedad xérico y ningún otro rasgo diferenciador.

El perfil OT-2 presenta un horizonte cálcico con más del 50% de carbonato cálcico y un horizonte árgico calcáreo, por lo que se ha clasificado como Calcisol lúvico hipercálcico según la FAO (1998). En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) se corresponde con un Haploxeralf cálcico por tener un horizonte árgico de textura franca, un régimen de humedad actual xérico y un horizonte cálcico dentro de los 100 cm de profundidad del perfil.

#### 7.4.5. Procesos de edafogénesis

Los principales procesos de edafogénesis que dieron lugar a estos suelos, al igual que los de los otros grupos ya estudiados, fueron: *meteorización, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos, iluviación de arcilla y rubificación*. Además, en el caso del suelo OT-2 se aprecian procesos de *recarbonatación- y reemplazamientos carbonatados*, y en CD-1, un proceso de *hidromorfía*. Como resultado, se formaron horizontes Bt bien desarrollados, de color rojo, textura de arcillo arenosa a franco arcillosa y con frecuentes cútanos de arcilla; estas propiedades debieron de desarrollarse bajo un clima más húmedo que el actual, por lo que se deben considerar como paleosuelos.

#### 7.4.6. Edad de los suelos

El suelo CD-1 está desarrollado sobre materiales metamórficos pertenecientes a la Block Formation (Von Drasche, 1879) que datan del Mioceno Superior (Dabrio *et al.*, 1978; Lhenaff, 1979; Alcalá *et al.*, 1988). El suelo OT-2 se desarrolla sobre un abanico aluvial formado por materiales procedentes de Sierra Nevada con gran influencia del complejo Alpujárride y cuya edad no ha sido establecida, aunque se le supone que, al igual que OT-1 y OT-3, se ha formado a lo largo del Cuaternario (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999).

#### 7.4.7. Relación grado de evolución – edad

De acuerdo con los índices de evolución utilizados (índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>), diferencias en la razón Fe<sub>t</sub>+Al<sub>t</sub>/Si<sub>t</sub> entre los horizontes B y C, grado de neoformación de caolinita en los horizontes B y características micromorfológicas) se podría decir que los suelos de este grupo *IIIb* tienen un menor grado de evolución que los grupos anteriores. No obstante, habría que matizar esta afirmación.

Así, en el suelo CD-1, el índice de acumulación de óxidos de hierro y la diferencia en la razón  $Fe_t + Al_t / Si_t$  entre los horizontes B y C, se han visto afectados por el proceso de hidromorfía del horizonte C (aporte de Al y, probablemente, Fe), por lo que sus valores deben ser superiores a los estimados. No obstante, el índice de acumulación de arcilla y la naturaleza de ésta (moderada neoformación de caolinita y presencia de esmectitas en los horizontes B), unido a las características micromorfológicas (distribución relacionada g/f tipo porfídica de espacio simple, grado de orientación birrefringente de la micromasa en mosaico, y abundancia y espesor de los revestimientos de arcilla iluvial), indican un grado de evolución claramente inferior a los suelos del grupo *Ia*, aunque similar a los suelos del grupo *Iib*. De acuerdo con la edad de la superficie, este suelo debió de formarse en el Mioceno Superior y, por la hidromorfía que afecta al horizonte C, en una superficie relativamente llana. El clima en este periodo debió de ser muy húmedo, ya que el espesor conjunto de los horizontes Bt y BC (en este último se observan claros revestimientos de arcilla) es de más de 230 cm. Después de su formación, el suelo debió de ser parcialmente erosionado y enterrado por depósitos similares a su material original (actuales horizontes A y C). El suelo y el depósito que lo enterraba debieron entonces verse afectados por el levantamiento de Sierra Nevada ocurrido a finales del Plioceno (Estévez y Sanz de Galdeano, 1983), lo que justificaría que la pendiente actual sobre la que se encuentra sea del 35%. Después del levantamiento y como consecuencia de la elevada pendiente, el depósito que enterraba al suelo debió de erosionarse progresivamente hasta alcanzar el espesor actual de unos 17 cm. La progresiva erosión del depósito justificaría el que no se haya desarrollado sobre él un nuevo suelo con una cierta evolución. En la actualidad, la erosión está formando grandes cárcavas en la superficie de este suelo que llegan incluso a alcanzar el horizonte C. Por último, si bien la humedad debía de ser relativamente elevada dado el gran espesor de los horizontes Bt y BC, algún factor debió de limitar su grado de evolución, que es inferior al de los suelos que se formaron posteriormente en el Pleistoceno (grupo *Ia*); en nuestra opinión, ese factor limitante pudo ser unas condiciones de temperatura más frías.

En el suelo OT-2, los procesos de erosión y recarbonatación posteriores a su formación indican que se trata de un suelo poligenético. Como se puede apreciar en la Figura 7, los suelos OT-2 y NIG-2 difieren principalmente en el incremento en arcilla en el horizonte Bt en relación al C, mientras que el incremento en  $Fe_d$  es muy parecido. Un hecho que creemos importante en este suelo es la variación de las razones  $Fe_t / Si_t$  y  $Al_t / Si_t$  en profundidad. Estas razones tienden a mantenerse constantes en los horizontes B y C, mientras que en los suelos de los grupos anteriores se incrementaban claramente en los horizontes B en relación a los C. Estos resultados, a priori, parecen indicar que la meteorización química de los materiales silicatados ha sido relativamente baja y que las diferencias en el contenido en arcilla,  $Fe_t$ ,  $Al_t$  y  $Si_t$ , entre los distintos horizontes pueden deberse fundamentalmente al proceso de lavado de carbonatos en el horizonte B y su

acumulación en el C. De hecho, si estimamos el contenido en estos elementos prescindiendo del carbonato cálcico de cada horizonte, sus concentraciones son muy similares en los horizontes B y C ( $Si_t = 65,0\%$ ,  $Fe_t = 7,4\%$  y  $Al_t = 15,0\%$ ). No obstante, si nos basamos en el contenido en óxidos totales ( $Fe_d$  y  $Al_d$ ), sí que se aprecia un claro incremento de los mismos en el horizonte B en relación al C, aunque el cálculo se haga prescindiendo de los carbonatos. Por tanto, existen datos que, hasta cierto punto, podríamos considerar contradictorios (baja y alta intensidad en el proceso de meteorización) y que son de difícil explicación en la evolución normal de un suelo. En este caso, tendríamos que pensar en suelos poligenéticos complejos en los que incluso el material del horizonte Bt se ha podido desplazar en el espacio y no ocupa su posición primitiva.

No obstante, la explicación podría ser más sencilla y relacionada con los intensos desplazamientos de sílice por carbonatos en el horizonte C (ver características micromorfológicas). Estos desplazamientos debieron de provocar una intensa pérdida de Si en el horizonte C, con el consiguiente incremento de la razón  $Fe_t + Al_t / Si_t$  que, de esta forma, iguala su valor al de los horizontes B. Por otra parte, el horizonte C de OT-2 presenta restos de antiguos cútanos de arcilla que debieron alcanzar el horizonte C al decapitarse el suelo, cuando el horizonte Bt quedó en superficie y se redispersó su arcilla. Al depositarse sobre este suelo un nuevo depósito carbonatado, su lavado recarbonató el suelo OT-2 y los nuevos carbonatos están sustituyendo y destruyendo los antiguos cútanos del horizonte C. La presencia de esta iluviación en el seno del horizonte C, hoy en día desdibujada por la recarbonatación posterior, sería la responsable de que este horizonte tenga más arcilla de la que le correspondería y, por tanto, de que la relación % arcilla B - % arcilla C sea menor. En cualquier caso, si nos basamos solo en el grado de alteración del horizonte B, su evolución sería similar al horizonte B del suelo NIG-2 y no podemos descartar que sean contemporáneos.

## 7.5. Grupos c

Los suelos incluidos en los grupos c de la Figura 7.1 están caracterizados por presentar una menor evolución que el resto de suelos estudiados anteriormente, en especial en lo referente al contenido en  $Fe_d$  de los horizontes B en relación a los C. Todos ellos pertenecen a los grupos de suelos 2 y 4 discriminados en el Análisis de conglomerados jerárquicos realizado a partir de las propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de los horizontes C (Fig. 6.1). Con objeto de analizarlos en mayor profundidad y de establecer una mayor diferenciación entre sus materiales parentales, se ha vuelto a realizar el mismo estudio estadístico, incluyendo los contenidos en una serie de elementos traza (As, Ba, Br, Co, Cr, Mo, Ni, Rb, Y, Sr, V, Cu, Pb, Zn y Th). El resultado de este análisis se muestra en la Figura 7.5.

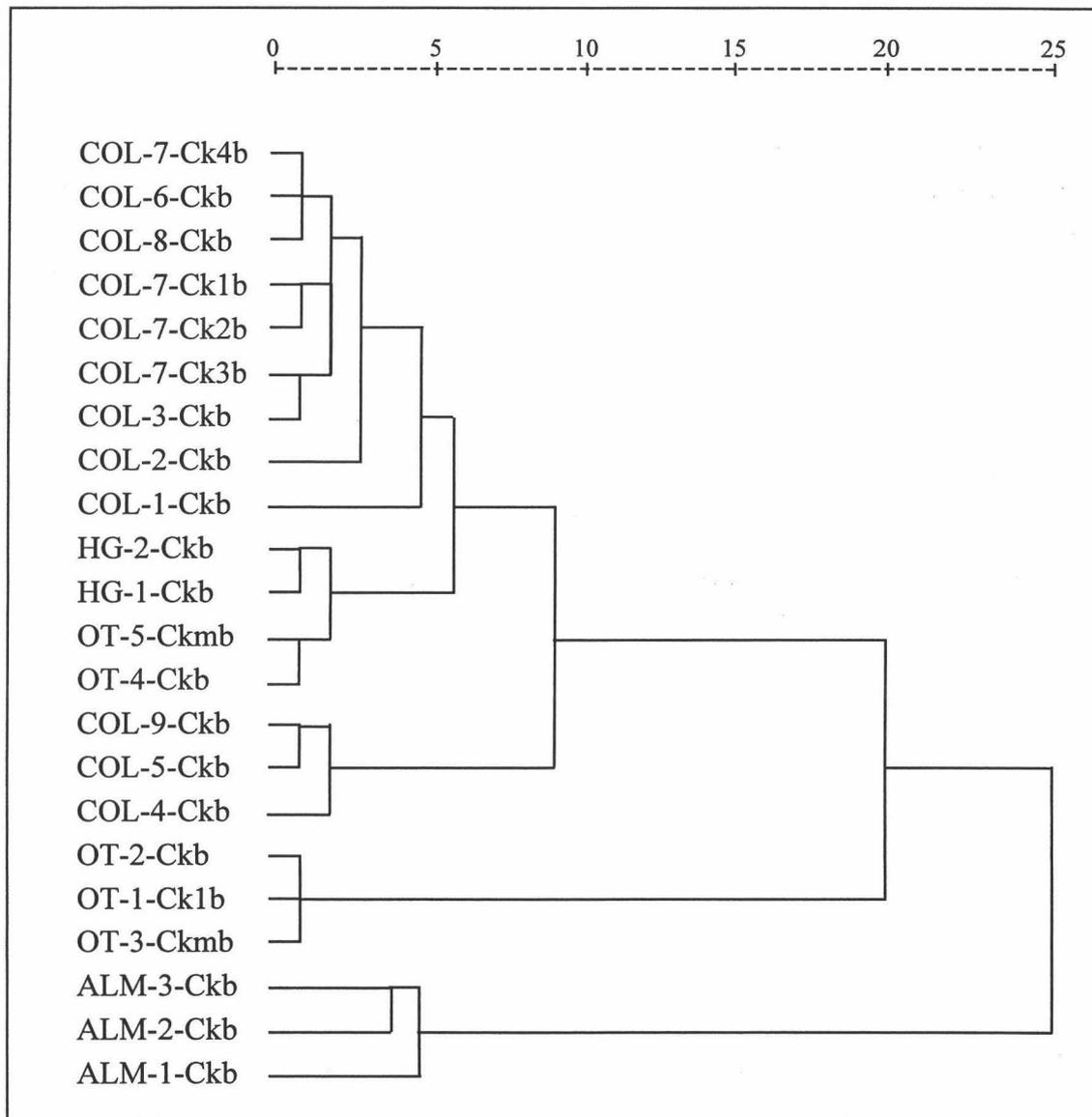


Figura 7.5. Dendrograma obtenido a partir del análisis de conglomerados jerárquicos de las propiedades físicas, químicas, fisico-químicas y contenido en elementos traza de los horizontes C de los suelos de los sectores de Otura, Almanjáyar, Haza Grande y Colomera.

Como se puede observar en la Figura 7.5, el material parental de los suelos del sector de Haza Grande (HG-2 y HG-1) y de los suelos OT-5 y OT-4 es muy similar, con lo que se les presupone un mismo origen. Estos son parecidos a la mayoría de los materiales sobre los que se formaron los suelos enterrados del sector de Colomera, con la excepción de COL-9, COL-5 y COL-4. Por otro lado, se diferencia el material original de los suelos OT-1, OT-2 y OT-3 y, por último, los materiales sobre los que se desarrollan los suelos del sector de Almanjáyar (ALM-3, ALM-2 y ALM-1).

### **7.5.1. Características macromorfológicas**

Todos los suelos incluidos en los grupos *c* de la Figura 7.1 son suelos enterrados, con un perfil tipo Bt-C. Esto implica que durante su enterramiento debieron de truncarse y perder, al menos, los primitivos horizontes A y E. Sólo el suelo OT-3 presenta un horizonte A debido a que fue muestreado en una zona en la que se había perdido el conglomerado fuertemente carbonatado que lo entierra.

Los suelos enterrados del sector de Colomera presentan un horizonte Bt caracterizado por un color de rojo amarillento a pardo, con una textura que varía de arcillo limosa a franco limosa e incluso arcillosa, y una estructura en bloques angulares o subangulares moderada. Los índices de enrojecimiento de los horizontes Bt más evolucionados de cada suelo no superan en ningún caso el valor de 6. Todos los horizontes Bt de estos suelos están carbonatados (Btk). El color de los horizontes C de estos suelos varía entre rosa y amarillo rojizo, tienen una estructura masiva y están fuertemente carbonatados, aunque sin signos de cementación (Ck).

Los suelos enterrados de los sectores de Almanjáyay y Haza Grande (ALM y HG) presentan horizontes Bt, excepto el suelo ALM-3 que tiene un horizontes Bw. Estos horizontes B están caracterizados por un color de pardo a rojo amarillento, textura de arcillosa a arcillo limosa y una estructura en bloques angulares-subangulares, con tendencia prismática en los suelos de Almanjáyay. Todos están carbonatados, excepto los primeros horizontes Bt de los suelos de Haza Grande. Los índices de enrojecimiento de los horizontes Bt mejor desarrollados no superan tampoco el valor de 6, siendo de 2 en Haza Grande. El color de los horizontes C varía entre pardo y rosa, son masivos y están fuertemente carbonatados pero sin cementación (Ck).

Los suelos localizados en el sector de Otura presentan horizontes Bt caracterizados por un color entre pardo rojizo y rojo amarillento, textura predominantemente arcillosa y una estructura de bloques angulares-subangulares a prismática. Los horizontes Bt de los suelos OT-3 y OT-1 están carbonatados (Btk) y tienen un índice de enrojecimiento de 11,2 y 10,0, respectivamente. Los horizontes Bt de los suelos OT-5 y OT-4 están descarbonatados y muestran un índice de enrojecimiento de 10 y 7,5, respectivamente. El color de los horizontes C en todos los casos es predominantemente rosa, tienen una estructura masiva y están fuertemente carbonatados (Ck); presentan cementación (Ckm) en OT-3 y OT-5, los suelos más superficiales de ambas series.

### 7.5.2. Resultados analíticos

Todos los horizontes Bt de estos suelos, dada su ubicación en los grupos *c* (Fig. 7), no superan en más de un 1% el contenido en  $Fe_d$  de los horizontes C. Sin embargo, las diferencias en el contenido en arcilla con respecto a los horizontes C varían ampliamente, desde un 45% hasta diferencias incluso negativas en algunos suelos enterrados de Colomera (COL-1, COL-4 y COL-6). De hecho, los diferentes horizontes B de un mismo suelo presentan cambios bruscos en el contenido en arcilla (p. ej. COL-7, COL-8) que apuntan a que, efectivamente, la mayoría de los suelos de este grupo *c* pudieron desarrollarse en antiguas llanuras de inundación. Dada la sucesión de diferentes suelos enterrados, estas superficies debieron pasar por periodos alternantes de resistaxia (en el que se forma el depósito) y de biostaxia (en el que tiene lugar la edafización del depósito). Los horizontes B formados en cada episodio de biostaxia, antes de su enterramiento en el siguiente episodio de resistaxia, pudieron verse afectados por la circulación de las aguas superficiales que dieron lugar a procesos de erosión y deposición y, en definitiva, a la redistribución del material de los horizontes B; esto justificaría el que dichos horizontes presenten una coloración más o menos homogénea (los materiales redistribuidos proceden fundamentalmente de horizontes B) y, al mismo tiempo, muestren cambios bruscos de textura (consecuencia de la diferente energía del agua en el momento de la deposición). En algunos de estos episodios de redistribución, la erosión predominó sobre la deposición hasta el punto de desaparecer el horizonte B (COL-3, COL-9). Estos procesos implicarían que las diferencias en el contenido en arcilla de los horizontes B y C no puedan ser utilizadas como un índice de evolución del suelo.

El pH en todos los suelos es mayor de 8,0, con valores que llegan incluso a 9,0. El contenido en carbono orgánico (CO) es muy pequeño (<0,3%), lo que indica que durante el desarrollo de estos suelos debió de predominar también la mineralización de la materia orgánica.

Todos los horizontes B están carbonatados, excepto los de los suelos OT-5 y OT-4 y el más superficial de HG-1. Esto indica que los suelos debieron sufrir un proceso de recarbonatación posterior a su formación; proceso que es especialmente destacable en los suelos enterrados de Colomera y en ALM-3. Todos los horizontes C presentan una intensa acumulación de  $CaCO_3$ , que en los suelos de Colomera forma nódulos endurecidos y en OT-3 y OT-5 cementa las partículas minerales (horizonte petrocálcico). El carbonato acumulado en los horizontes C puede proceder fundamentalmente del lavado de los horizontes B y de las aguas de escorrentía de los relieves circundantes; por su parte, la recarbonatación de los horizontes B debe ser consecuencia del lavado del suelo que se sitúa por encima, sin descartar que parte del carbonato de los horizontes C tengan también este mismo origen.

Las bases de cambio están fundamentalmente dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con cantidades inferiores de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . El contenido en  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio es especialmente elevado en los suelos de los sectores de Almanjáyar y Haza Grande y en los suelos OT-5 y OT-4, por lo que probablemente se han visto más influenciados por materiales de naturaleza dolomítica. Todos los suelos son eútricos, con un grado de saturación del 100% en todos los casos. Esta completa saturación en bases se puede atribuir a los procesos de recarbonatación-rebasificación que actuaron después de la formación de estos suelos, con lo que se presupone que los valores de pH originales pudieron ser inferiores a los actuales.

Los contenidos en hierro total ( $\text{Fe}_t$ ), total de óxidos ( $\text{Fe}_d$ ) y formas amorfas ( $\text{Fe}_o$ ) de los horizontes B de estos suelos son mayores que los de sus horizontes C; esto, a priori, apunta a que dichos horizontes B se han formado como consecuencia de un proceso de meteorización química del material de partida. No obstante, el lavado del  $\text{CaCO}_3$  de los horizontes B podría dar lugar, por sí solo, a los mismos resultados.

Por el contrario, la variación de la razón  $\text{Fe}_t+\text{Al}_t/\text{Si}_t$  entre los horizontes B de los suelos ya no podría ser atribuida al proceso de descarbonatación, sino a procesos de meteorización y lavado de los productos resultantes. En la Figura 7.5.1 se compara el valor de dicha razón en los horizontes B y C de suelos del grupo *IIC*. Como se puede comprobar, es más elevada en los horizontes B de los suelos OT-1, OT-5, HG-2 y HG-1 que en sus correspondientes horizontes C; mientras que en los suelos de Colomera encuadrados en este grupo, dicha razón permanece prácticamente constante en ambos horizontes.

Si hacemos esta misma comparación entre los horizontes B y C de los suelos del grupo *IIIc* (Fig. 7.5.2), también es mayor en los horizontes B de los suelos ALM-3 y OT-4, prácticamente igual en ambos horizontes del suelo OT-3 y ligeramente superior en los horizontes C de los suelos ALM-2 y ALM-1. En los suelos del grupo *IVc*, dicha razón no varía entre los horizontes B y C (Fig. 7.5.3).

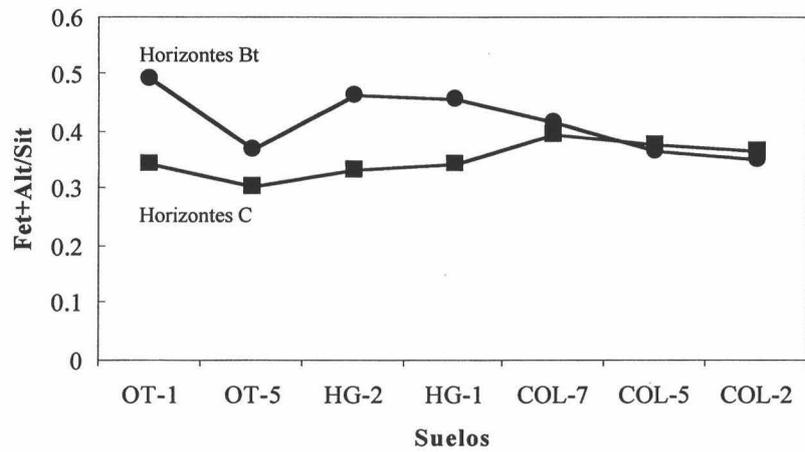


Figura 7.5.1. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes B y C de los suelos del grupo IIc.

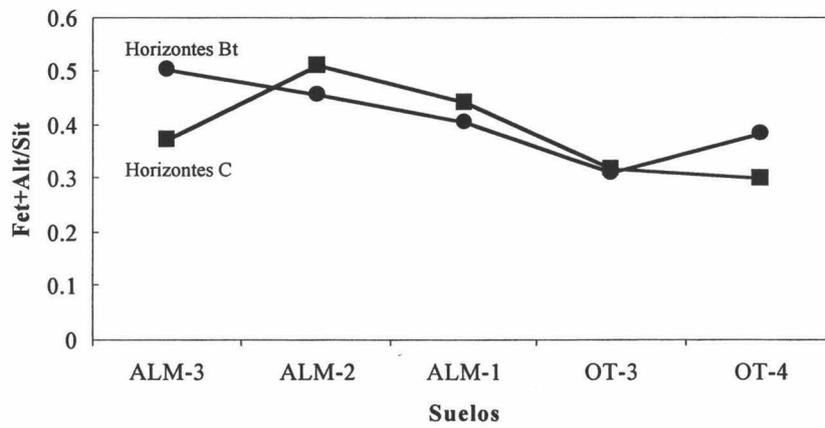


Figura 7.5.2. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt (Bw para ALM-3) y C de los suelos del grupo IIIc.

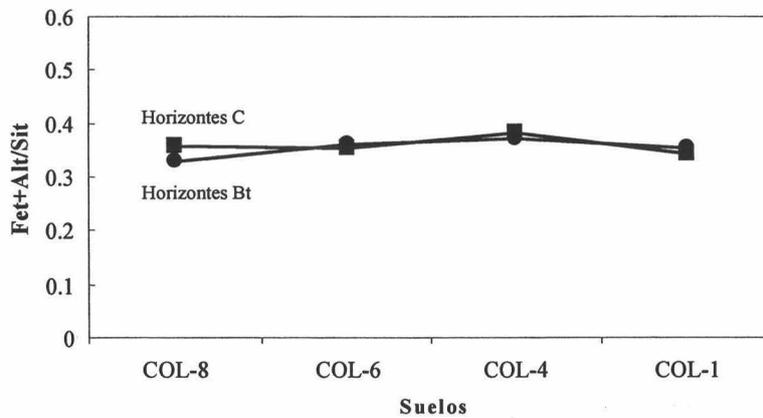


Figura 7.5.3. Razones  $Fe_t+Al_t/Si_t$  en los horizontes Bt y C de los suelos del grupo IVc.

El análisis semicuantitativo de los minerales de la arcilla (Tablas 7.5.1 y 7.5.2) muestra la neoformación de caolinita en los horizontes Bt de los suelos de los sectores de Otura, Almanjáyar y Haza Grande, al tiempo que disminuye la esmectita. Lógicamente, la neoformación de caolinita debió de producirse antes de los procesos de rebasificación-recarbonatación, cuando los valores de pH eran más ácidos.

En los suelos enterrados de Colomera (Tablas 7.5.1 y 7.5.3), por el contrario, la mineralogía de la fracción arcilla es muy parecida en todos los perfiles. No se observa una clara neoformación de caolinita en los horizontes Bt, sino más bien un incremento de interestratificados de illita-esmectita que indica un proceso de transformación de la illita en esmectitas degradadas y mal cristalizadas. Esto sugiere que el proceso de meteorización química en estos suelos no fue muy intenso. En los suelos COL-1 y COL-2, la mineralogía de arcillas es muy semejante en los horizontes C y BC, con illita y esmectita como minerales predominantes y sin caolinita; sin embargo, en los horizontes Bt, aunque sí se presenta la caolinita, el contenido en esmectita es incluso mayor que en el horizonte BC. Lo mismo ocurre en el suelo COL-7, donde los horizontes Bt muestran variaciones mineralógicas heterogéneas y poco lógicas en una evolución edáfica normal. Únicamente en los suelos COL-6 y COL-8 parece existir una cierta neoformación de caolinita en sus horizontes Bt. En general, estos cambios mineralógicos dentro de los mismos horizontes Bt nos hace pensar en la existencia de discontinuidades o, con más probabilidad, enterramientos dentro de estos perfiles; los cuales serían razonables dados los procesos erosivos a los que anteriormente se ha hecho referencia en estos suelos formados sobre antiguas llanuras de inundación.

Tabla 7.5.1. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo *Iic*: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P = Paragonita, I-S = Inter. Illita-Es; nd = no detectado; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)				
		K	I	S	P	I-S
OT-5	Btb	++	+++	(+)	(+)	nd
	BCKb	+	+++	++	(+)	nd
	Ckmb	+	+++	+	(+)	nd
OT-1	Btkb	++	+++	++	(+)	nd
	Ck1b	+	+++	+++	+	nd
	Ck2b	+	+++	+++	+	nd
HG-2	Btk1b	+	+++	+	+	nd
	Btk2b	+	+++	+	+	nd
	BCKb	+	+++	++	+	nd
	Ckb	+	+++	+++	+	nd
HG-1	Btb	++	+++	++	+	nd
	Btkb	+	+++	++	++	nd
	BCKb	+	+++	++	+	nd
	Ckb	+	+++	+++	+	nd
COL-7	Btk1b	+	++	+++	nd	++
	Btk2b	+	++	++	nd	+++
	Btk3b	+	++	++	nd	+++
	BCKb	+	++	+++	nd	++
	CBkb	+	++	++	nd	+++
	Ck1b	(+)	++	+++	nd	++
	Ck2b	(+)	+	+++	nd	++
	Ck3b	(+)	+	+++	nd	++
	Ck4b	(+)	+	+++	nd	++
COL-5	Btkb	+	+	+++	nd	++
	BCKb	(+)	+	+++	nd	+++
	Ckb	(+)	++	+++	nd	+
COL-2	Btkb	++	++	+++	nd	++
	BCKb	nd	+	++	nd	+++
	Ckb	nd	+	+++	nd	+++

Tabla 7.5.2. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo *IIIc*: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P= Paragonita; nd= no detectado; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)			
		K	I	S	P
OT-4	Btb	++	+++	nd	++
	BCKb	+	+++	++	+
	Ckb	+	+++	++	+
OT-3	A	+	+++	++	+
	Btk1b	+	+++	+	+
	Btk2b	+	+++	++	+
	BCtkb	+	+++	+++	(+)
	Ckmb	+	+++	+++	+
ALM-3	Bwk1b	++	+++	++	+
	Bwk2b	+	+++	++	+
	BCKb	+	+++	++	+
	Ckb	+	+++	+++	+
ALM-2	Btk1b	+	+++	+	+
	Btk2b	++	+++	+	(+)
	Btk3b	++	+++	+	+
	BCKb	+	+++	++	+
	Ckb	+	+++	+++	+
ALM-1	Btk1b	++	+++	+	+
	Btk2b	++	+++	++	+
	BCKb	+	+++	++	+
	Ckb	+	+++	+++	+

Tabla 7.5.3. Minerales de la arcilla de los suelos del grupo IVc: K = Caolinita, I = Illita, S = Esmectita, P= Paragonita, I-S = Interestratificados Illita-Esmectita; nd = no detectado; (+) = trazas; + = 5-15%; ++ = 15-40%; +++ = > 40%.

Suelo	Horizonte	Minerales de la arcilla (%)				
		K	I	S	P	I-S
COL-8	Btkb	+	++	+	nd	+++
	BCkb	(+)	+	+++	nd	+++
	Ckb	(+)	+	+++	nd	++
COL-6	Btkb	+	+	++	nd	+++
	Ckb	(+)	+	+++	nd	+
COL-4	Btk1b	+	++	++	nd	+++
	Btk2b	+	++	++	nd	+++
	Ckb	+	++	+++	nd	++
COL-1	Btkb	+	++	+++	nd	++
	BCkb	nd	++	++	nd	+++
	Ckb	nd	++	+++	nd	+++

Para analizar el grado de uniformidad del material, hemos establecido la razón Ti/Zr (Chapman y Horn, 1968; Rostad *et al.*, 1976; Chittleborough y Oades, 1980; Alonso Rojo, 1989) en los horizontes de los suelos enterrados de Colomera. Como se puede observar en la Tabla 7.5.4, esta razón presenta variaciones dentro de los suelos, lo que nos lleva a pensar nuevamente en la existencia de una heterogeneidad dentro del material, especialmente en COL-7 (Btk1b) y COL-4 (Btk1b).

Como consecuencia de las variaciones heterogéneas con la profundidad que muestran los suelos enterrados de Colomera en cuanto a textura y propiedades químicas, con la posible existencia de enterramientos dentro de ellos, las diferencias en el contenido en arcilla y hierro entre los horizontes B y C no pueden ser utilizadas como un índice de evolución del suelo; este únicamente lo podremos estimar a partir del estudio micromorfológico.

Tabla 7.5.4. Relaciones Ti/Zr para los suelos enterrados del sector de Colomera.

Perfil	Horizonte	Ti/Zr	Perfil	Horizonte	Ti/Zr
COL-8	Btkb	23,2	COL5	Btkb	23,0
	BCKb	22,4		BCKb	29,3
	Ckb	26,9		Ckb	23,7
COL-7	Btk1b	24,1	COL-4	Btk1b	14,2
	Btk2b	10,5		Btk2b	24,5
	Btk3b	24,8		Ckb	23,4
	BCKb	22,7			
	CBkb	26,5	COL-2	Btkb	25,3
	Ck1b	20,7		BCKb	20,5
	Ck2b	22,5		Ckb	29,1
	Ck3b	24,1			
	Ck4b	26,2	COL-1	Btkb	24,8
		BCKb		28,0	
COL-6	Btkb	20,5		Ckb	19,6
	Ckb	22,4			

Si comparamos los índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>) de los suelos de los sectores de Otura (OT-5 y OT-4), Haza Grande y Almanjáyár (Fig. 7.5.4), se puede observar que los suelos OT-5 y OT-4 presentan un grado de evolución parecido entre ellos, algo menor en el suelo OT-4, y mayor que los de los suelos del sector de Haza Grande. No obstante, aunque el material parental en ambos sectores es semejante y contiene cantidades parecidas de arcilla, el suelo HG-2 muestra un índice de acumulación de arcilla mucho más elevado mientras que en el suelo HG-1 es claramente inferior. Esto último podría ser debido al pequeño espesor que presenta el horizonte Bt del suelo HG-1, que debió sufrir una erosión más intensa antes de su enterramiento. Los suelos desarrollados en el sector de Almanjáyár presentan unos índices de acumulación de arcilla y óxidos de hierro superiores a los de los suelos del sector de Haza Grande. Con respecto a los suelos OT-5 y OT-4, muestran un mayor índice de acumulación de arcilla pero sus índices de acumulación de óxidos de hierro son algo menores. De los tres, el suelo ALM-3 es el que presenta un menor grado de evolución.

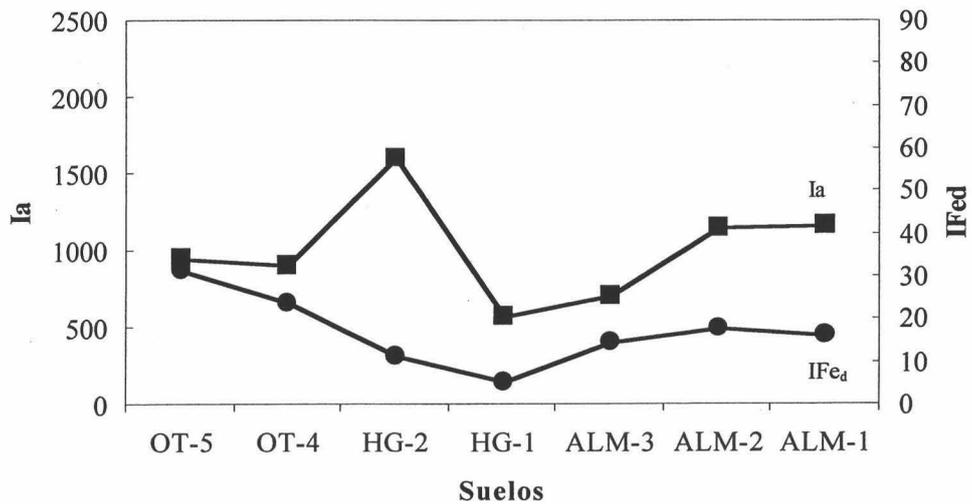


Figura 7.5.4. Índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>) de los suelos de los sectores de Otura (OT-5 y OT-4), Haza Grande y Almanjáyár.

La Figura 7.5.5 muestra los índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>) de los suelos OT-3, OT-2 y OT-1 comparados con algunos de los suelos enterrados de Nigüelas.

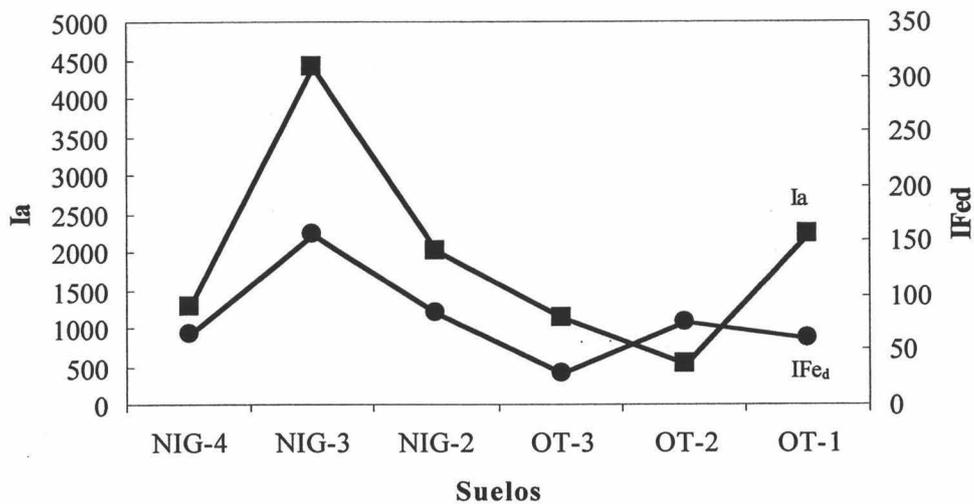


Figura 7.5.5. Índices de acumulación de arcilla (Ia) y de óxidos de hierro (IFe<sub>d</sub>) de los suelos OT-3 y OT-1 y los suelos OT-2, NIG-4, NIG-3 y NIG-2.

Tal y como se puede apreciar, el suelo OT-1 es el más evolucionado de los tres y su grado de evolución es comparable al del suelo NIG-2. El suelo OT-3, el más superficial de su serie, es el menos evolucionado y su grado de evolución es comparable con NIG-4.

### 7.5.3. Micromorfología

#### *Series de Otura*

Son suelos formados a partir de depósitos de procedencia mixta, metamórfica y sedimentaria. Desde el punto de vista micromorfológico, se trata de suelos evolucionados en los que se puede establecer la siguiente secuencia de evolución:

$$OT-4 < OT-5 < OT-3 < OT-2 \ll OT-1$$

La microestructura de los horizontes Bt es en bloques subangulares y angulares, de moderado grado de agregación. La porosidad está formada por fisuras y algunas cavidades. La distribución relacionada g/f es en todos los casos porfídica pero de tipo variable: abierta en OT-1, de doble espacio en OT-4 y OT-5, y de espacio simple en OT-3. La contextura birrefringente es de motas en mosaico de moderada a fuerte orientación en OT-3, OT-4 y OT-5, mientras que la granoporoesfriada es la predominante en OT-1.

Las gravas presentes son de origen metamórfico: micaesquistos, filitas y cuarcitas. El cuarzo, policristalino y monocristalino, es el mineral predominante de las arenas. La moscovita es un componente minoritario de las arenas finas. La micromasa es arcillosa, de color naranja más o menos rojizo y de transparencia media.

Los rasgos edáficos más abundantes en todos los horizontes Bt y BC de estos suelos son los revestimientos de arcilla iluvial. A veces se encuentran tapizando las paredes de los macrohuecos, pero muy frecuentemente se encuentran deformados, fragmentados e integrados en la micromasa. Su color es amarillo-rojizo y sus espesores oscilan desde las 50 $\mu$  en OT-4 hasta las 150 $\mu$  en OT-1.

Existen también nódulos de hierro, tipo hematites, redondeados, de bordes netos y de tamaño arena fina, cuyo contenido es bajo (<1%).

En la mayoría de los horizontes Bt (a excepción de OT-5) se observa la presencia de frecuentes nódulos de carbonatos, micríticos y a veces espáticos, y en algunos suelos (OT-1 y OT-3) existen también revestimientos sobre las paredes de los macroporos que, ocasionalmente, colmatan completamente el poro. Estos rasgos indican que estos suelos también han sufrido un proceso de recarbonatación secundaria, posterior al proceso de iluviación de arcilla.

En los horizontes Ck se presentan revestimientos de arcilla iluvial y revestimientos de carbonatos espáticos en una masa basal micrítica con abundantes

granos de tamaño arena de cuarzo y algunas gravas de esquistos y cuarcita. No se han encontrado signos de reemplazamientos de sílice por carbonatos, tan extendidos en el suelo OT-2.

*Serie de Almanjáyar*

Son suelos formados a partir de materiales carbonatados, claramente de menor evolución que los de la serie de Otura y Nigüelas. ALM-3 es un suelo de muy baja evolución, con la formación de un horizonte Bw muy poco desarrollado, mientras que los otros dos suelos, ALM-1 y ALM-2, presentan una buena evolución (similar pero algo mayor en el primero que en el segundo), con formación de horizontes Bt de características desarrolladas.

El horizonte Bw de ALM-3 presenta una microestructura en bloques angulares de moderado grado de agregación. Sus huecos son de tipo fisuras fundamentalmente, con algunas cavidades. La distribución relacionada g/f es porfídica abierta. La micromasa se encuentra fuertemente impregnada de carbonatos, por lo que la contextura birrefringente es cristalítica. En el material grueso encontramos cuarzo, granos de carbonatos espáticos y, en menor cantidad, moscovita. El material fino es calcáreo-arcilloso, de color amarillento y de transparencia baja. Como rasgos edáficos se presentan finos cuasirrevestimientos de color negro de compuestos de Fe/Mn, junto a nódulos de Fe (ambos se podrían interpretar como signos evidentes de una antigua hidromorfia) y nódulos de carbonatos micríticos.

Los horizontes Bt de ALM-1 y ALM-2 presentan una microestructura en bloques angulares de moderado a fuerte grado de agregación. Su porosidad está constituida por fisuras y algunas cavidades. La distribución relacionada g/f es porfídica, abierta en ALM-2 y de doble espacio en ALM-1. La contextura birrefringente dominante es de tipo motas en mosaico, de fuerte grado de orientación; la secundaria es en motas aisladas en ALM-2 y poroestriada en ALM-1. El material grueso está constituido por arenas de cuarzo, con escasa presencia de pajitas de moscovita. El material fino es arcilloso, de color amarillos rojizo y de transparencia media.

Los rasgos edáficos más distintivos de estos horizontes Bt son los hipo y cuasirrevestimientos de compuestos de Fe/Mn de color negro y delgados (10 $\mu$ ). A veces, estos óxidos de Fe/Mn se presentan formando nódulos, frecuentemente en forma de racimos. Existen también nódulos y revestimientos de carbonatos micríticos. Finalmente, es de destacar la baja presencia de revestimientos de arcilla iluvial.

Los horizontes Ck están constituidos por una masa basal de carbonatos micríticos con escasos granos de cuarzo y mica (más escasa la biotita que la moscovita).

Existen cuasirrevestimientos de compuestos de Fe/Mn y algunos revestimientos de carbonatos espáticos. También se ha encontrado algunos restos fósiles de tipo globigerina.

#### *Serie de Haza Grande*

Son suelos formados a partir de materiales carbonatados, con rasgos micromorfológicos muy similares a los de los suelos del sector de Almanjáyar. Son suelos de baja evolución, de menor evolución que ALM-1 y ALM-2 pero más evolucionados que el suelo ALM-3.

Los horizontes Bt de estos suelos presentan una microestructura en bloques angulares de moderado grado de agregación. Su porosidad está constituida por fisuras con muy escasas cavidades. La distribución relacionada g/f es porfídica abierta y la contextura birrefringente de la micromasa es de tipo mosaico. El material grueso está formado por cuarzo, poli y monocristalino, esquistos, carbonatos espáticos y moscovita. Por su parte, el material fino es arcilloso, de color amarillo-parduzco, sucio y de baja transparencia.

Los rasgos edáficos son poco abundantes: revestimientos finos, más o menos intensamente fragmentados, de arcilla amarilla de origen iluvial; revestimientos espesos de arcilla gruesa, microlaminados y de color pardo; nódulos en racimos de compuestos de Fe/Mn (evidencia de una antigua hidromorfia); y nódulos de carbonato micríticos.

Los horizontes Ck están constituidos por una masa basal micrítica, con abundantes granos de arena fina de cuarzo, carbonatos espáticos y escasa moscovita. Presentan algunos revestimientos finos (20 $\mu$ ) de arcilla iluvial de color amarillo y otros espesos (200 $\mu$ ) de arcilla gruesa de color pardo. También aparecen revestimientos de carbonatos, hiporrevestimientos y nódulos de compuestos de Fe/Mn y algunos restos de fósiles mineralizados en carbonato, semejantes a las globigerinas.

#### *Serie de Colomera*

Son suelos formados a partir de materiales carbonatados, pero la presencia de abundantes gravas y arenas de naturaleza calcedónica nos indican que proceden de otra área fuente distinta a la de los materiales de los sectores de Almanjáyar y Haza Grande. Se trata de depósitos procedentes de la erosión de materiales calizos de las sierras próximas pertenecientes a las Zonas Externas.

Son suelos de mediana a alta evolución que, desde el punto de vista micromorfológico, presentan un grado de evolución similar, aunque se puede definir la siguiente serie de evolución creciente:

$$\text{COL-4} < \text{COL-6} < < \text{COL-8} < \text{COL-7} < \text{COL-5} < < \text{COL-2}$$

La evolución del suelo COL-8 es comparable a la del suelo más evolucionado de la serie de Almanjáyar (ALM-2).

Todos estos suelos presentan una particularidad muy característica y es la fuerte recarbonatación que han sufrido después de su formación. Este proceso ha llevado a la práctica total destrucción del material original de los horizontes Bt, que ha sido casi totalmente asimilado por los carbonatos. Los horizontes Btk han quedado con aspecto de una masa micrítica, en la que es posible distinguir débiles residuos de la arcilla rojiza del primitivo Bt. Localmente, quedan pequeños reductos en los que se conserva perfectamente el primitivo horizonte Bt, mostrando una contextura birrefringente y revestimientos, muy deformados, de arcilla roja de claro origen iluvial.

Otra rasgo muy peculiar de estos suelos es la frecuente presencia de revestimientos y rellenos de carbonatos, frecuentemente espáticos, que se encuentran en poros cuyas paredes presentan una matriz arcillosa que está decarbonatada en un cierto espesor dentro de una masa basal calcárea. Su formación parece difícil de explicar. En principio, se podría pensar que los carbonatos espáticos que están cristalizando atrajeran hacia ellos los carbonatos de la periferia de los peds y los incorporasen a sus cristales. No obstante, la explicación podría ser mucho mas compleja, implicando cambios de humedad y temperatura. En cualquier caso, es un rasgo que merece estudiarse más en profundidad.

Los horizontes Bt de estos suelos presentan microestructuras en bloques angulares de moderado a fuerte grado de agregación. Predominan las fisuras, aunque también están presente las cavidades y, en algunas ocasiones, son frecuentes los huecos de empaquetamiento compuesto (COL-8, COL-7 y COL-5) y los canales (COL-2).

La masa basal presenta una distribución relacionada g/f de tipo porfídica abierta. La contextura birrefringente de la micromasa es variable, en motas aisladas en COL-4 y COL-6, en mosaico en COL-7, granoestriada en COL-7 y COL-5, y poro-paraleloestriada e, incluso, uniestriada en COL-2.

En el material grueso aparecen gravas y arenas de calcedonia junto a granos de cuarzo monocristalino y, en muy escasa cantidad, moscovita. El material fino

predominante es arcillo-calcáreo, en algunas zonas totalmente descarbonatado, de color amarillo y naranja-rojizo y de baja transparencia.

Como rasgos edáficos predominan claramente los carbonatados, con morfologías muy variadas: revestimientos, rellenos, nódulos y cristales, a veces micríticos y otras espáticos. Existen también frecuentes nódulos de compuestos de Fe, generalmente agrupados, que podrían indicar antiguos procesos de hidromorfía, y pequeños restos de revestimientos de arcilla iluvial.

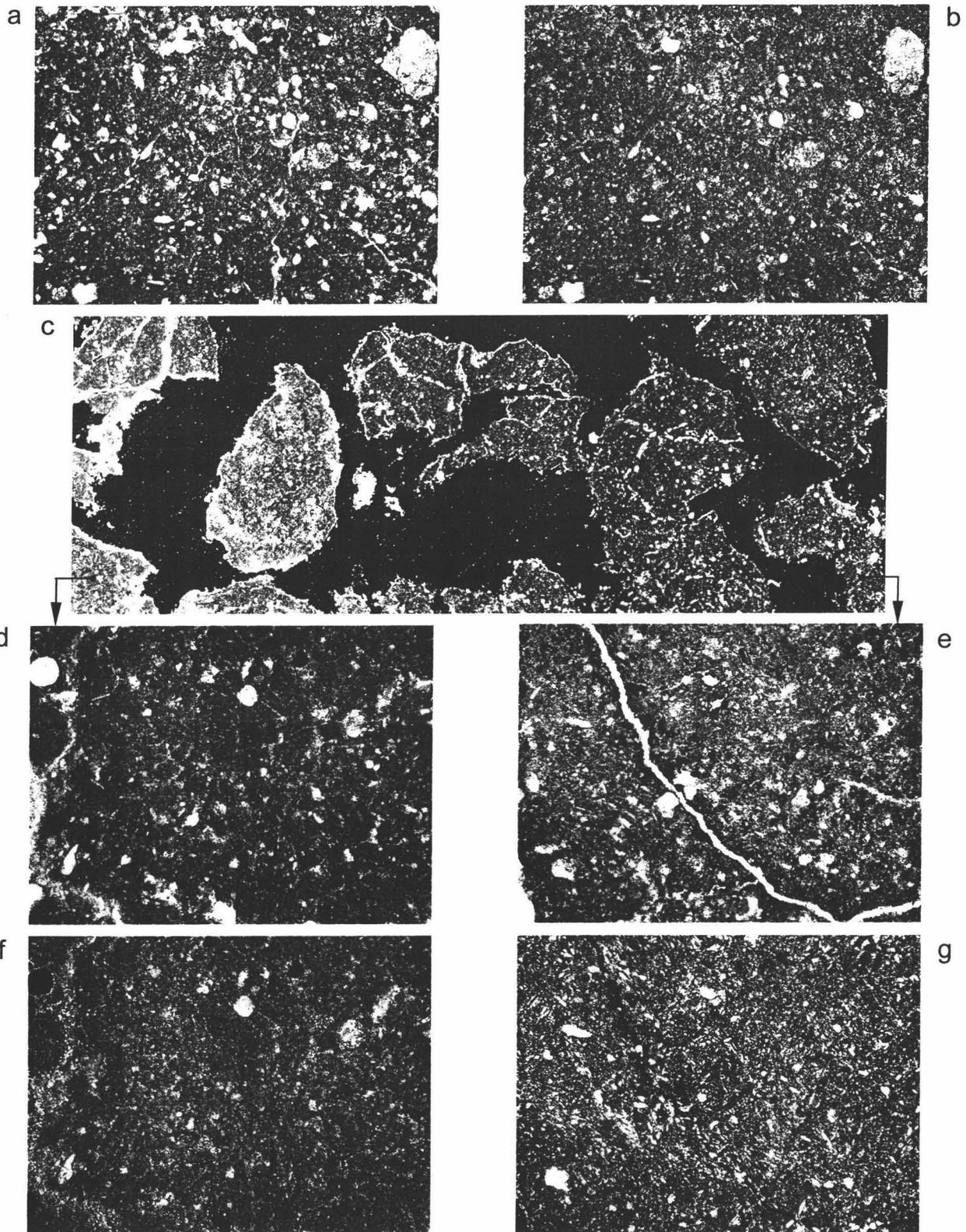
Los horizontes Ck son muy calcáreos, constituidos por una masa micrítica con escasos granos de arena de cuarzo y calcedonia y con nódulos, hiporrevestimientos y revestimientos de compuestos de Fe. Los revestimientos de carbonatos, frecuentemente espáticos, son abundantes. Existen también restos de horizontes Bt intensamente transformados por los carbonatos.

#### **7.5.4. Clasificación**

Los perfiles ALM-1 y ALM-2 presentan un horizonte cálcico dentro de los 100 primeros centímetros, con más de un 50% de carbonato cálcico en ALM-1, y un horizonte árgico calcáreo, por lo que se han clasificado como Calcisol lúvico hipercálcico y Calcisol lúvico, respectivamente, según la FAO (1998). En la clasificación del Soil Survey Staff (1999), al tratarse de suelos con un horizonte árgico con más del 35% de arcilla, un régimen de humedad actual xérico y un horizonte cálcico dentro de los 150 primeros centímetros, se corresponden con los Palexeralfs cálcicos. El perfil ALM-3 presenta un horizonte cálcico dentro de los 100 primeros centímetros y un horizonte cámbico, con lo que se ha clasificado como Calcisol háplico según la FAO (1998) y como Calcixerept típico según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

Los perfiles HG-2 y HG-1 presentan un horizonte cálcico dentro de los 100 primeros centímetros y un horizonte árgico calcáreo, por lo que se han clasificado como Calcisoles lúvicos según la FAO (1998). En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), al tratarse de suelos con un horizonte árgico con más del 35% de arcilla, un régimen de humedad actual xérico y un horizonte cálcico dentro de los 150 primeros centímetros, se corresponden con los Palexeralfs cálcicos.

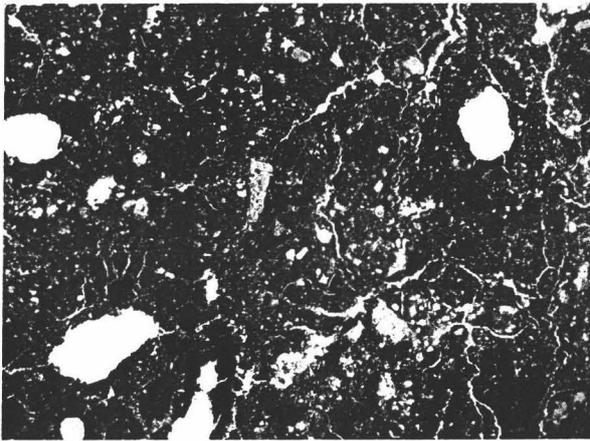
El perfil OT-3 se ha clasificado según la FAO (1999) como Calcisol endopétrico lúvico, ya que presenta un horizonte petrocálcico fuertemente cementado a más de 50 cm de profundidad y un horizonte árgico calcáreo. En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se corresponde con un Palexeralf petrocálcico por tener un horizonte árgico, un régimen de humedad xérico y un horizonte petrocálcico cuyo límite superior se encuentra dentro de los 150 primeros centímetros.



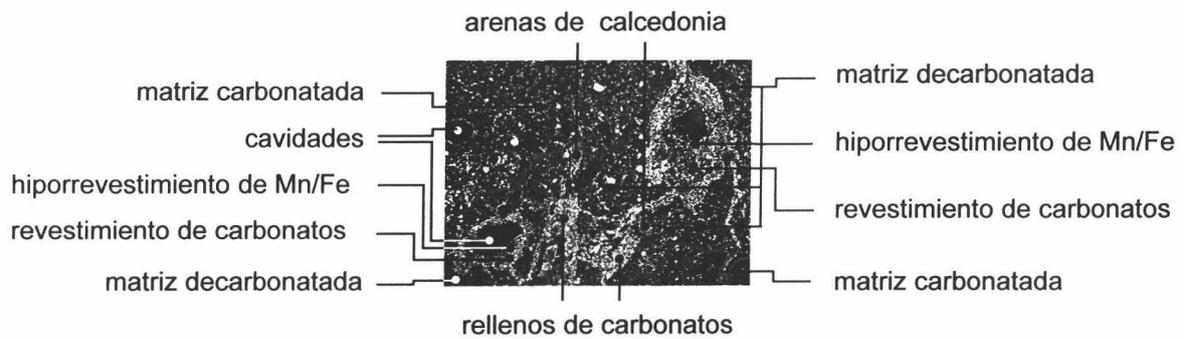
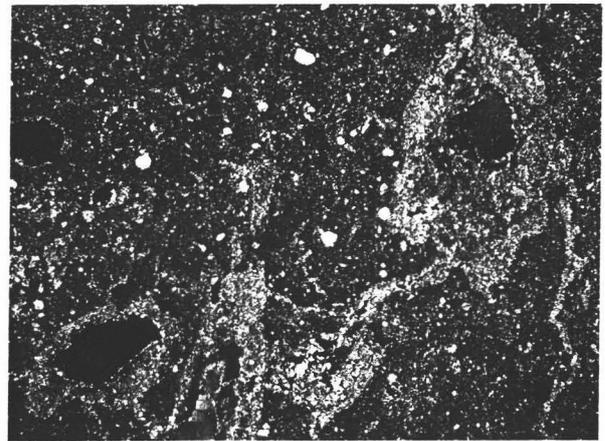
**Lamina 11. Perfil COL-5, hor. Btb. a y b.** Matriz con apariencia de una marga; se trata sin embargo de un hor. Bt masivamente recarbonatado. **c**, lámina delgada tratada localmente con HCl 1:1; muestra sin atacar a la izquierda, muestra tratada a la derecha (al eliminarse los carbonatos aparece la matriz arcillosa). **d** y **f**, ampliación de la zona no atacada con HCl. **e** y **g**, ampliación de la zona atacada por el ácido.

**a**, **d** y **f**, con sólo polarizador. **b**, **c**, **e** y **g** con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad con: 3,5 mm en **a**, **b**, **d**, **e**, **f**, y **g**; 9,5 mm para **c**.

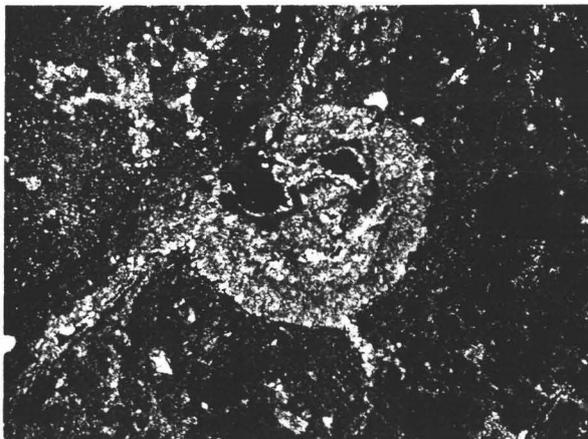
a



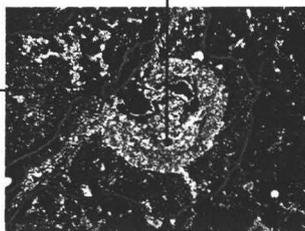
b



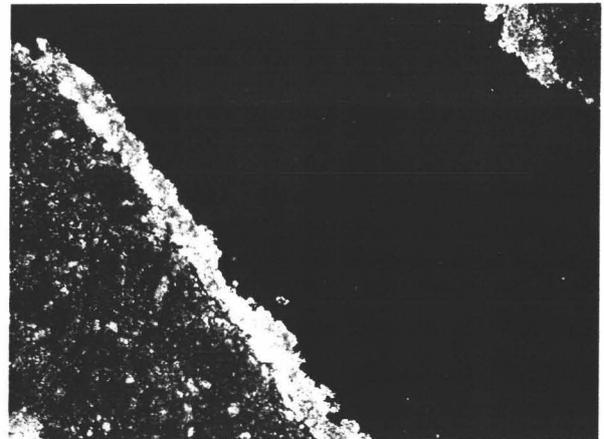
c



relleno de carbonatos

matriz  
decarbonatada

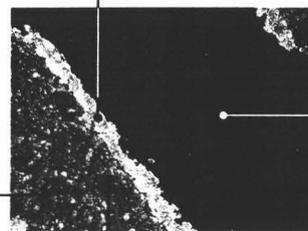
matriz carbonatada



d

revestimiento de carbonatos

matriz carbonatada

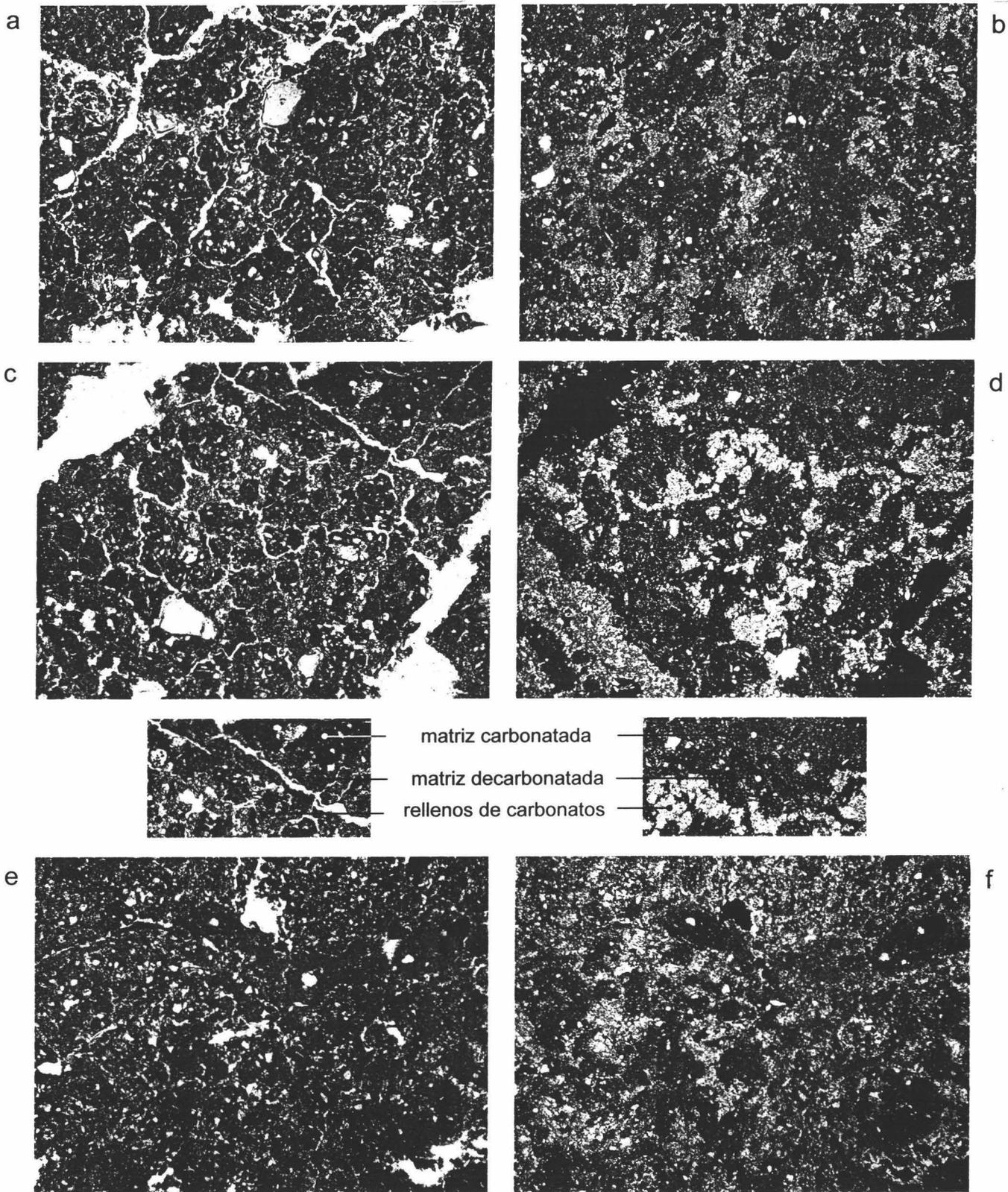


matriz decarbonatada

fisura

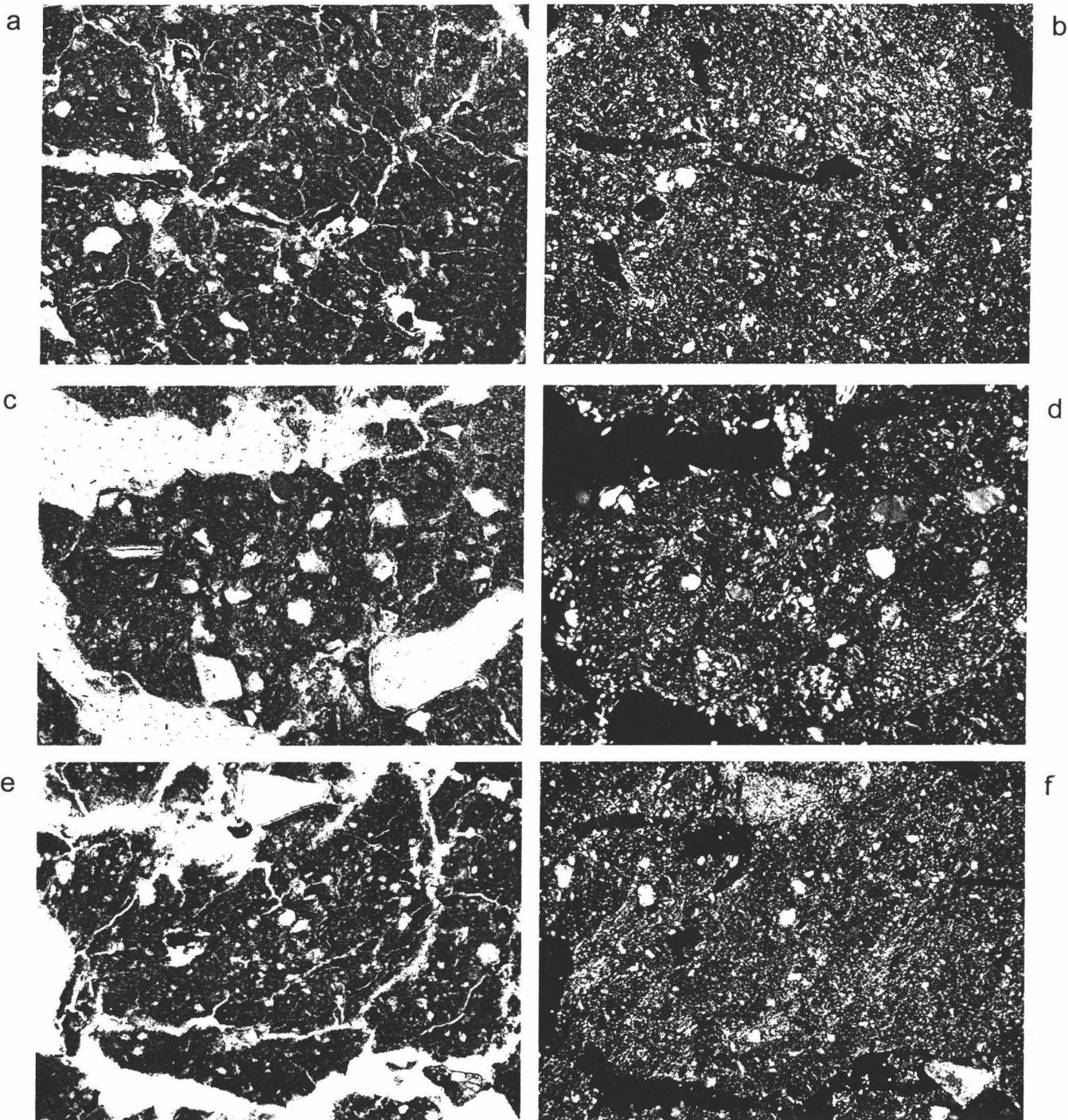
**Lamina 12. Perfil COL-5, hor. Btb.** Carbonatos formando revestimientos y rellenos rodeados de una zona con la matriz del suelo decarbonatada. El espesor de la zona decarbonatada parece tener relación con la concentración de carbonatos, pero no con el tamaño de los poros (foto d).

a, con sólo polarizador. b, c y d con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad con: 3,5 mm en a y b, d; 2 mm para c; 1 mm para d.



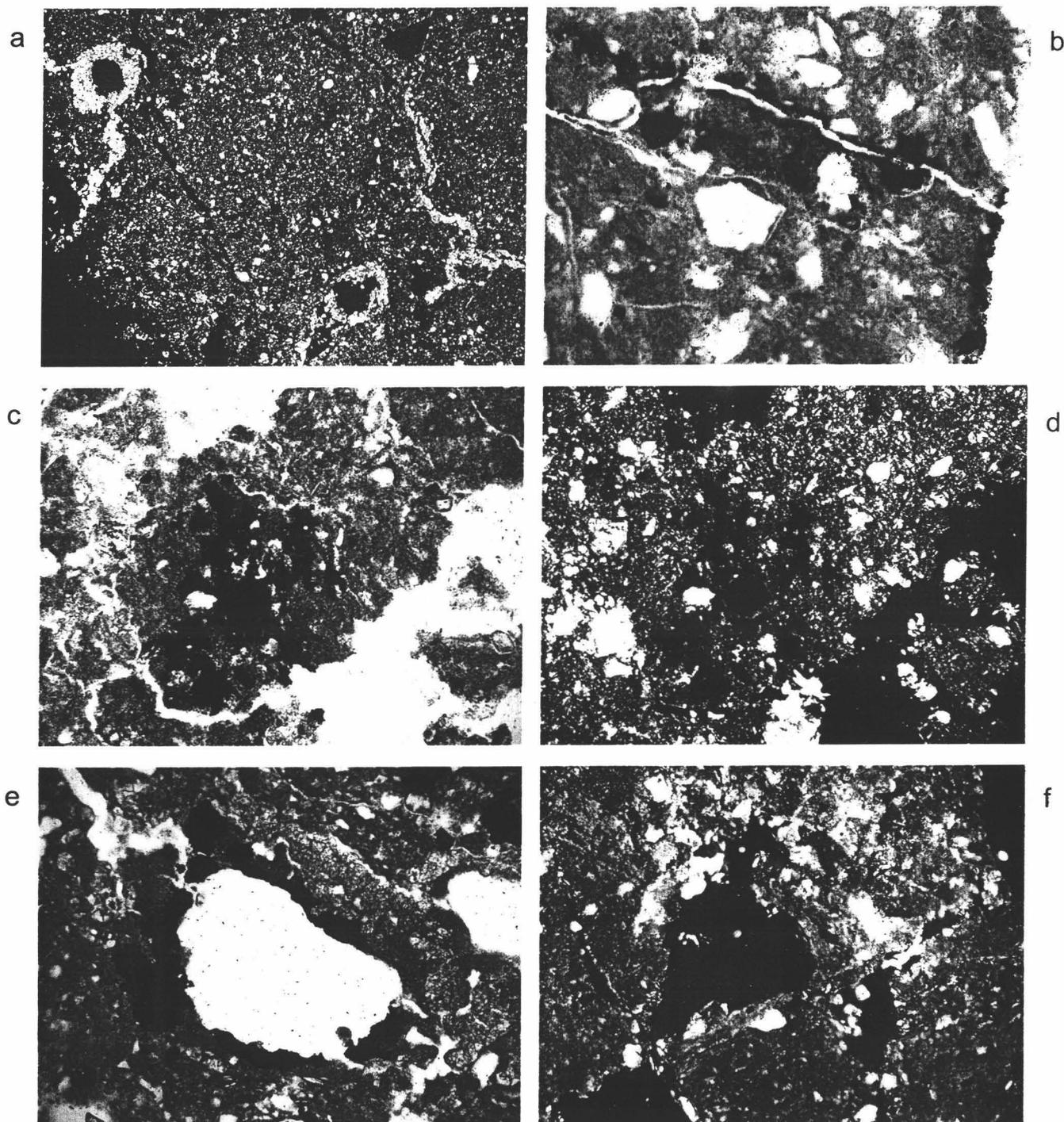
**Lamina 13.** Revestimientos y rellenos de carbonatos rodeados de una matriz arcillosa decarbonatada. **a y b**, perfil COL-2, hor. Btb. **c y d**, perfil COL-5, hor. Btb. **e y f**, perfil COL-7, hor. Btb.

**a, c y e**, con sólo polarizador. **b, d y f** con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad a 3,5 mm.



**Lamina 14. Serie de Colomera, contexturas birrefringentes. a y b, tipo mosaico en COL-7, hor. Btb. c y d, granoestriada en COL-5, hor. Btb. e y f, paraleloestriada en COL-2, hor. Btb.**

a, c y e, con sólo polarizador. b, d y f con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad a 3,5 mm.



**Lamina 15. Serie de Colomera, rasgos edáficos en los horizontes Btb.** a, revestimientos y rellenos de carbonatos en COL-5. b, hiporrevestimientos y nódulos de compuestos de Fe en COL-2. c y d, nódulos arracimados de compuestos de Fe en COL-2. e, hiporrevestimientos de compuestos de Mn en COL-5. f, revestimientos de arcilla iluvial en COL-1.

b, c y e, con sólo polarizador. a, d y f con polarizador y analizador cruzados. Escalas, la dimensión más larga de las microfotografías corresponden en la realidad a: 3,5 mm en a. 0,5 mm en b; 1 mm en c, d y e; 2 mm en f.

El perfil OT-1 se ha clasificado según la FAO (1998) como Calcisol lúvico hipercálcico por presentar un horizonte cálcico con más del 50% de carbonato cálcico y un horizonte árgico calcáreo. En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se corresponde con un Palexeralf cálcico, ya que posee un horizonte árgico de textura arcillosa (más del 35% de arcilla), un régimen de humedad actual xérico y un horizonte cálcico dentro de los 100 cm de profundidad del perfil.

El perfil OT-5 presenta un horizonte árgico saturado, con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un horizonte petrocálcico dentro de los 100 primeros centímetros. Con esto, y teniendo en cuenta que el horizonte árgico tiene un hue de 2,5YR y un value de 3 en húmedo y en seco, se ha clasificado como Luvisol hipercálcico rhódico según la FAO (1998). En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se corresponde con un Rhodoxeralf petrocálcico.

El perfil OT-4 posee igualmente un horizonte árgico saturado, con una capacidad de cambio catiónico superior a  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de arcilla y un horizonte cálcico con menos de un 50% de carbonato cálcico dentro de los 100 primeros centímetros. Como el value en húmedo del horizonte árgico es de 4 y no cumple los requisitos de color para denominarse rhódico, este suelo se ha clasificado como Luvisol orthicálcico crómico según la FAO (1998). En la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se corresponde con un Palexeralf cálcico, ya que posee un horizonte árgico de textura arcillosa (más del 35% de arcilla), un régimen de humedad actual xérico y un horizonte cálcico dentro de los 100 cm de profundidad del perfil.

Los suelos enterrados de Colomera, dadas las variaciones texturales que presentan, son difíciles de clasificar pero, en general, ya que poseen horizontes cálcicos dentro de los 100 primeros centímetros y horizontes árgicos calcáreos, se encuadrarían dentro de los Calcisoles lúvicos según la FAO (1998); también hipercálcicos en aquellos casos en los que el horizonte cálcico contenga más del 50% de carbonato cálcico (COL-8, COL-7, COL-6 y COL-1). De acuerdo con la clasificación de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se corresponden con los Palexeralf cálcicos (COL-8, COL-7, COL-5, COL-4, COL-2) y con los Haploxeralf cálcicos, cuando el horizonte árgico no contenga más de un 35% de arcilla (COL-6 y COL-1).

#### 7.5.5. Procesos de edafogénesis

Los principales procesos de edafogénesis que dieron lugar a estos suelos fueron; *intenso lavado de carbonatos, meteorización, mineralización de la materia orgánica, iluviación de arcilla, rubificación* y más o menos intensa *recarbonatación-rebasificación*. Como resultado, se formaron horizontes Bt bien desarrollados, de color rojo amarillento a pardo, textura de arcillo a arcillo limosa y con frecuentes

revestimientos de arcilla; estas propiedades debieron de desarrollarse bajo un clima más húmedo que el actual, por lo que se deben considerar paleosuelos.

#### **7.5.6. Edad de los suelos**

Los suelos del sector de Haza Grande están formados sobre un material detrítico fino y carbonatado. Su edad no está bien definida, pero probablemente se traten de materiales margosos del Tortoniense-Messiniense (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999) ya que están enterrados por la Formación Alhambra, de edad Plio-Pleistocena.

Los suelos enterrados de Colomera (COL-1 a COL-9) se debieron de formar durante el Plioceno (Fernández y Soria, 1986-1987), en antiguas llanuras de inundación constituidas por sedimentos carbonatados de grano fino procedentes de las Zonas Externas. El suelo COL-10, que entierra a todos los demás, se formó sobre un depósito gravoso cuya edad data presumiblemente de la transición Plio-Pleistoceno.

Los suelos enterrados del sector de Almanjáyar, situados unos 200 m por debajo de los de Haza Grande, se desarrollan sobre materiales formados por sedimentos aluviales limo-arcillosos, carbonatados y con gran desarrollo de llanura de inundación. Lhenaff (1979) denomina a la superficie en la que se encuentran estos suelos “Vega Alta”, ya que se sitúa ligeramente por encima de la Vega de Granada, y atribuye su formación al Pleistoceno Superior. No obstante, tanto el material de partida como los horizontes B tienen características muy parecidas a los suelos de Haza Grande y, probablemente, formaran parte de una misma superficie que, con posterioridad a la formación de los suelos, fue fallada, levantándose la superficie de Haza Grande unos 200 m con respecto a la de Almanjáyar. Durante el Plio-Pleistoceno, la superficie de Haza Grande fue enterrada por la Formación Alhambra, sobre la que se desarrolla un suelo similar al LLP-2. En este caso, la edad de los suelos del sector de Almanjáyar sería anterior al Pleistoceno.

Los suelos OT-5 y OT-4 están desarrollados sobre materiales de naturaleza margosa, parecidos a los estudiados en el sector de Haza Grande y cuya edad podría coincidir con la de éstos. Los suelos OT-1 y OT-3, al igual que el suelo OT-2, se desarrollan sobre un abanico aluvial formado por materiales procedentes de Sierra Nevada con gran influencia del complejo Alpujárride. La edad de estos materiales no ha sido establecida, aunque se supone que se han formado a lo largo del Cuaternario (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999).

#### 7.4.7. Relación grado de evolución – edad

En los suelos enterrados de Colomera, los procesos de erosión y recarbonatación posteriores a su formación indican que se trata de suelos poligenéticos. Todos presentan variaciones texturales anómalas dentro de ellos, en especial las relacionadas con las diferencias en el contenido en arcilla entre los horizontes B y C. Como se ha apuntado anteriormente, estos suelos se formaron en antiguas llanuras de inundación que debieron experimentar periodos alternantes de resistaxia y biostaxia. Una vez formados los suelos, y como consecuencia de la circulación de las aguas superficiales, los procesos de erosión, truncamiento y deposición de materiales debieron ser muy activos, dando lugar a redistribuciones de los materiales de los horizontes B y a las variaciones texturales que muestran. En algunos casos, la erosión debió ser muy intensa, con la pérdida de todo el horizonte B (suelos COL-9 y COL-3). El hecho de que la relación  $Fe_t+Al_t/Si_t$  se mantenga prácticamente constante entre los horizontes B y C y que no se aprecie una clara neoformación de caolinita indica que probablemente no han sufrido una fuerte alteración química.

De acuerdo con sus características macro y micromorfológicas, estos suelos han sido fuertemente modificados por un intenso proceso de recarbonatación posterior a su formación, alterando los primitivos horizontes Bt hasta tal grado que ha terminado por enmascarar en todos ellos los rasgos de una mayor evolución. Esta intensa recarbonatación implica que estos suelos se debieron formar bajo unas condiciones de humedad relativamente altas que permitieran un intenso lavado y unas temperaturas probablemente frías. Las bajas temperaturas justificarían que la solución del suelo tuviera un elevado contenido en  $CO_2$  que tendería a disolver el carbonato cálcico, tan abundante en el material original de estos suelos. En un medio poco permeable, los iones  $HCO_3^-$  irían precipitando lentamente y cristalizando en forma de esparita, tal y como muestra el estudio micromorfológico. Este proceso de disolución de los carbonatos debió incrementar el pH allí donde se acumularan, lo que no descartaría el proceso de sustitución de Si por carbonatos aunque no se aprecie, ya que puede estar enmascarado por la intensa recarbonatación posterior. Esto podría explicar la alta razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  que presentan los horizontes C y el que esta sea similar a la de los horizontes Bt. En cualquier caso, los rasgos de los primitivos horizontes Bt que aún se conservan evidencian que el grado de evolución de estos suelos pudo ser similar al de los otros suelos desarrollados en llanuras de inundación .

Los suelos HG-1, HG-2, OT-4 y OT-5 parecen haberse formado sobre el mismo tipo de material original. La diferencia en la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  entre los horizontes B y C, el grado de neoformación de caolinita y sus características micromorfológicas indican que tienen un grado de evolución y alteración parecido. No obstante, los suelos del sector de Haza Grande presentan un menor contenido en  $Fe_d$  y una razón  $Fe_d/Fe_t$

inferior a la de los suelos OT-4 y OT-5. Esto también condiciona que muestren unos índices de acumulación de óxidos de hierro ( $IFe_d$ ) algo menores. Además, los suelos del sector de Haza Grande parecen haber sufrido con mayor intensidad el proceso de recarbonatación posterior a su formación. En la actualidad, los suelos HG-2 y HG-1 están enterrados por un potente paquete de materiales de la Formación Alhambra, que podría explicar su mayor contenido en carbonatos por el lavado de los materiales suprayacentes. Es muy probable que, después de la formación de estos suelos, la superficie sobre la que se encontraban se fallara y se levantara, con lo que originalmente debían ocupar una posición más baja y, probablemente, con desarrollo de llanura de inundación (es posible que formasen parte de la misma superficie que los suelos de ALM). Este hecho justificaría unas condiciones de menor evolución que la de los suelos OT-4 y OT-5, situados en una zona más distal con respecto al centro de la cuenca y, en consecuencia, más aireada (los suelos OT-4 y OT-5 no presentan las evidencias de hidromorfía que muestran los suelos ALM y HG); al mismo tiempo, condicionaría unos procesos de erosión más intensos como consecuencia de las avenidas periódicas.

Los suelos ALM-1 y ALM-2, aunque se desarrollan sobre un material original con ciertas diferencias respecto a los de los suelos del sector de Haza Grande, presentan unas características micromorfológicas muy parecidas a estos. El suelo ALM-3, el más superficial de esta serie, es el que muestra un menor grado de evolución. Todos son suelos poligenéticos, puesto que han sido erosionados y recarbonatados con posterioridad a su formación.

Los suelos OT-1 y OT-3, de acuerdo con sus índices de acumulación de arcilla y de óxidos de hierro y sus características micromorfológicas, presentan un mayor grado de evolución que los suelos OT-4 y OT-5. Como ocurría en el suelo OT-2, han sido erosionados y recarbonatados por lo que se pueden considerar suelos poligenéticos. En el suelo OT-3, el más superficial de su serie, la razón  $Fe_t+Al_t/Si_t$  es muy similar entre sus horizontes B y C y no se aprecia una clara neoformación de caolinita en sus horizontes más desarrollados con respecto al material original. Dado que el estudio micromorfológico ha puesto de manifiesto que no se observan reemplazamientos de sílice por los carbonatos, parece que este suelo ha sufrido un menor grado de alteración química con respecto a los suelos que tiene por debajo (OT-2 y OT-1). No obstante, estas diferencias también podrían ser debidas a que su horizonte Bt no esté genéticamente relacionado con el material original. El grado de evolución del suelo OT-1 es parecido al del suelo NIG-2, tal y como ocurre con el suelo OT-2 (grupo *IIIb*), por lo que no se descarta que puedan ser contemporáneos.

## 8. Consideraciones generales

La Depresión de Granada, cuyo relleno comenzó en el Serravalliense-Tortonense, experimentó importantes cambios en las condiciones climáticas que se vieron reflejadas en el grado de evolución de los suelos. A continuación, se exponen los rasgos más significativos de estos cambios climáticos deducidos a partir del estudio de los suelos analizados en esta Memoria.

### *Mioceno Superior-Plioceno*

Durante el Tortonense Superior, tuvo lugar un importante levantamiento de Sierra Nevada y fue entonces cuando el núcleo Nevado-Filábride se erosionó fuertemente, dando lugar al depósito de la Block Formation (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999). Durante el depósito de esta formación, en la Depresión de Granada y zonas adyacentes se produjo una regresión que marcó el paso desde la sedimentación marina a la sedimentación continental (Dabrio y Ruiz-Bustos, 1979). Esta continentalización de la cuenca se originó a partir de una bajada eustática que condicionó una reestructuración tectónica asociada a sistemas principales de fallas, caracterizada por la expansión de la cuenca y la migración de los depocentros (Fernández *et al*, 1996). A lo largo del Plioceno, se fueron interrelacionando distintos sistemas deposicionales (Viseras, 1991), con desarrollo de abanicos aluviales en las zonas marginales procedentes de las zonas Externas e Internas y amplias llanuras de inundación hacia el centro, donde también se formaron zonas de sedimentación palustre.

En esta Memoria se estudian suelos desarrollados presumiblemente sobre las margas del Tortonense-Messiniense (HG-1 y HG-2, OT-4 y OT-5), un suelo formado sobre los materiales de la Block Formation (CD-1) y una serie de suelos desarrollados sobre materiales pliocénicos asociados a llanuras de inundación (suelos enterrados de Colomera). Asimismo, se han estudiado suelos formados sobre sedimentos aluviales limo-arcillosos, carbonatados y con gran desarrollo de llanura de inundación (ALM-1, ALM-2, ALM-3). A excepción del suelo CD-1, formado por materiales metamórficos del Complejo Nevado-Filábride, estos suelos se desarrollaron sobre depósitos muy carbonatados. En todos los casos se encuentran enterrados y presentan un perfil de tipo Bt-C, lo que indica que debieron truncarse durante su enterramiento y perder los primitivos horizontes superficiales (horizontes A y E).

De acuerdo con nuestros resultados, estos suelos se debieron formar en periodos alternantes de resistaxia-biostaxia (hasta nueve periodos en el caso de Colomera) acaecidos durante el Mioceno Superior-Plioceno. En los periodos de resistaxia se

depositaron los sedimentos y en los de biostaxia se desarrollaron los suelos. Si nos centramos en los suelos de Colomera, sus características indican que, en los periodos de biostaxia, los sedimentos evolucionaron por lavado del carbonato cálcico, meteorización química e iluviación de arcilla, formando horizontes Bt relativamente bien desarrollados. Una vez formado cada suelo, una mayor circulación de las aguas superficiales, probablemente por aumento de la humedad (no hay que olvidar que se desarrollan en llanuras de inundación), debió de erosionar parcialmente el suelo y redistribuir el material de los horizontes Bt (erosionando en un sitio y depositando en otro), lo que justificaría que en el seno de dichos horizontes se presenten cambios texturales bruscos (lo que se depositaba en cada momento estaría relacionado con la energía del agua circulante); en algunos casos la erosión fue más severa y llegó a eliminar todo el solum (sólo se conserva el sedimento del suelo original). El siguiente episodio de resistaxia enterró el suelo, ya modificado por la circulación de las aguas superficiales, con nuevos sedimentos carbonatados. El lavado del nuevo sedimento impregnó de carbonatos el anterior horizonte Bt, modificando considerablemente o incluso borrando sus características, al tiempo que formaba nódulos de  $\text{CaCO}_3$  tanto en los horizontes B como en los C. Sobre este sedimento se volvió a desarrollar un nuevo horizonte Bt en el que, de nuevo, volvieron a darse los procesos anteriormente descritos. Estos ciclos se volvieron a repetir en el tiempo hasta configurar el conjunto de suelos enterrados de Colomera. Por otra parte, los suelos presentan síntomas de haber estado afectados por un proceso de hidromorfía más o menos temporal (presencia de pequeños nódulos y revestimientos de manganeso) que estaría en concordancia con su desarrollo en llanuras de inundación.

En general, el conjunto de características de estos suelos pone de relieve dos hechos fundamentales: a) evolución moderada de los horizontes Bt y b) intensos procesos de lavado de carbonatos que llegan a recarbonatar fuertemente los suelos enterrados.

Los suelos de Haza Grande (HG-1 y HG-2), Otura (OT-4 y OT-5) y Almanjáyár (ALM-1, ALM-2 y ALM-3) presentan características muy similares a los de Colomera. Los sedimentos de los suelos del sector de Almanjáyár se encuadran, al igual que los de Colomera, en el grupo 4 de los horizontes C (Fig. 6.1) y parece muy probable que su formación tuviera lugar también en zonas de antiguas llanuras de inundación. Por el contrario, los horizontes Bt de los suelos ALM-1 y ALM-2 se encuadran en el grupo 3 de los horizontes B (Fig. 6.2), junto con los de HG-1, HG-2, OT-4 y OT-5. Las diferencias fundamentales de estos horizontes B con respecto al grupo 4, en el que se encuadran los suelos enterrados de Colomera, estriban fundamentalmente en que están mucho menos recarbonatados, lo cual podría ser debido a que, dentro de la llanura de inundación, ocupaban una posición más distal y próxima a los relieves circundantes. Esto implicaría una menor infiltración de la humedad, menor lavado de los depósitos

que los entierran y, por tanto, menor recarbonatación de los horizontes Bt. Por su parte, los suelos HG-1, HG-2, OT-4 y OT-5 se localizan muy próximos a los relieves que circundan la cuenca de Granada y se desarrollan sobre un material original muy similar, probablemente margas del Tortoniense-Messiniense. En cualquier caso, estos materiales se han visto afectados por los mismos procesos que los suelos de Colomera y Almanjáyar y han dado lugar a suelos muy parecidos a ellos, pudiendo justificarse las diferencias por su mayor o menor distancia al centro de la cuenca. De hecho, los suelos de Haza Grande podrían formar parte de la misma superficie que los de Almanjáyar, la cual, posteriormente a la formación de los suelos fue fallada, elevando los suelos de Haza Grande unos 200 m por encima de los de Almanjáyar.

Contemporáneamente a la formación de estos suelos, en los abanicos aluviales constituidos a partir de los materiales procedentes del Complejo Nevado-Filábride se desarrolló el suelo CD-1. En general, los procesos que dieron lugar a este suelo son los mismos que dieron lugar a los suelos anteriores, si exceptuamos todos los relacionados con los carbonatos, ya que ni el material contiene carbonatos ni el suelo se vio afectado por relieves calizos. No obstante, el suelo sí estuvo afectado por procesos de hidromorfía, al menos su horizonte C. El mayor grado de evolución del suelo CD-1 con respecto a los anteriores podría ser debido al diferente material de partida, depósitos gravosos de materiales metamórficos más filtrantes que los materiales de textura limo-arcillosa de las margas tortonienses y de los depósitos de llanuras de inundación. En cualquier caso, su evolución es menor que la de los suelos datados de principios del Pleistoceno (LLP-1, LLP-2, DUR-1 y COL-10). Esta menor evolución difícilmente puede justificarse únicamente por unas condiciones más secas, ya que el suelo CD-1 es muy potente (el solum presenta más de 2 m) y los suelos contemporáneos de las llanuras de inundación presentan intensos proceso de lavado de carbonatos. Si descartamos la humedad como el principal factor limitante en el desarrollo de estos suelos, tendríamos que recurrir a unas temperaturas más frías, las cuales podrían incluso justificar el intenso lavado de carbonatos dado que la concentración de CO<sub>2</sub> en el agua, elemento indispensable en la disolución de los carbonatos, se incrementa al disminuir la temperatura.

Suc (1984), en su estudio de la vegetación en el Mediterráneo Occidental desde comienzos del Plioceno, apunta que durante el Plioceno Inferior esta zona se caracterizaba por una densa vegetación arbórea, indicativo de elevadas precipitaciones. Hace aproximadamente 3,2 Ma, se produjo un cambio climático caracterizado por una disminución de la precipitación y un enfriamiento, mientras que la transición Plio-Pleistoceno (1,6 Ma BP) se caracterizó por condiciones de precipitación y temperaturas más elevadas. En definitiva, durante el Mioceno Superior se debieron dar condiciones de elevada precipitación que disminuyeron a lo largo del Plioceno, con episodios alternantes en el tiempo de menor humedad. Asimismo, durante este periodo esta zona

debió de experimentar temperaturas más frías que las que se instauraron a comienzos del Pleistoceno. Estas condiciones climáticas justificarían que el grado de evolución de los suelos formados durante este periodo sea claramente inferior al de los suelos desarrollados a partir de la transición Plio-Pleistoceno.

### *Pleistoceno Inferior*

Durante el final del Plioceno, tuvo lugar una nueva etapa de levantamiento (Estévez y Sanz de Galdeano, 1983) que dio lugar, a comienzos del Pleistoceno, a nuevos abanicos aluviales constituidos por materiales gravosos procedentes del Complejo Nevado-Filábride (metamórficos) mezclados con materiales del Complejo Alpujárride (metamórficos y carbonatados). Estos materiales están representados por la Formación Alhambra (LLP-1 y LLP-2) en la Depresión de Granada y por los depósitos del suroeste de Sierra Nevada, en las cercanías de Dúrcal (DUR-1). En los bordes noroeste, norte y noreste de la Depresión también se generaron sistemas de abanicos aluviales de dimensiones, en general, más reducidas que los desarrollados en el borde de Sierra Nevada (COL-10) (Fernández y Soria, 1986-1987). Estos abanicos aluviales se debieron formar en superficies geomorfológicamente estables, ya que los suelos que se desarrollan sobre ellos (LLP-1, LLP-2, DUR-1 y COL-10) no han sido enterrados por depósitos posteriores y en la actualidad se encuentran en superficie. No obstante, han sido erosionados y truncados puesto que han perdido sus primitivos horizontes superficiales.

Los principales procesos edáficos que dieron lugar a estos suelos fueron fuerte meteorización, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos, intensa iluviación de arcilla y rubificación. Como resultado, se formaron horizontes Bt muy desarrollados, de color rojo, textura arcillosa, con abundantes revestimientos de arcilla y con una clara neoformación de caolinita. En definitiva, los mismos procesos que actuaron en el desarrollo de los suelos del Plioceno, aunque con intensidades diferentes. Los índices de evolución analizados indican que estos suelos presentan grados de alteración y evolución parecidos y claramente superiores a los de los suelos desarrollados durante el Plioceno. No obstante, dentro de ellos se observan pequeñas variaciones que pueden ser atribuidas a diferencias en el material original, a condiciones estacionales de encharcamiento o a procesos erosivos. La mayor evolución que muestra el suelo COL-10 se puede justificar porque los materiales carbonatados (calizas de las Zonas Externas) sobre los que se desarrolla son más fácilmente meteorizables que los materiales metamórficos sobre los que se desarrollan los suelos LLP-2, LLP-1 y DUR-1 (micasquistos y cuarcitas de las Zonas Internas). Los procesos de hidromorfía que afectaron al suelo LLP-1 pueden explicar su desarrollo algo menos intenso, mientras que la fuerte erosión que afectó al suelo LLP-2 (con la probable pérdida de una parte

importante del primitivo espesor del horizonte Bt) justificaría que sus índices de evolución sean menores que en los otros suelos.

En general, estos suelos presentan un horizonte Ckm, cuyos elevados contenidos en carbonato cálcico no se pueden explicar únicamente por el lavado de los horizontes superiores, sino que hay que recurrir al aporte de las aguas carbonatadas procedentes de los relieves circundantes, en especial en el suelo COL-10. Esto, unido a la presencia de revestimientos de carbonato sobre los macroporos (COL-10 y DUR-1), reafirma el proceso de recarbonatación y, por tanto también de basificación, posterior al proceso de iluviación de arcilla. En los suelos COL-10 y DUR-1 se observa la presencia de revestimientos de arcilla que invaden el horizonte cálcico y que pueden ser atribuidos a procesos de iluviación de arcilla posteriores a la erosión y truncamiento del suelo, lo que implicaría un incremento adicional de la arcilla de sus horizontes Bt.

Dado que estos paleosuelos se desarrollan sobre materiales datados de principios del Pleistoceno (1.650.000 años BP, Birkeland, 1999) y que debieron de depositarse durante periodos de rexistasia (probablemente fríos y húmedos), la formación de los suelos debió de tener lugar durante los episodios cálidos posteriores a estos depósitos.

#### *Pleistoceno Medio-Superior*

Durante el Pleistoceno Medio-Superior tuvieron lugar nuevos eventos de creación y reorganización del relieve que dieron lugar a la formación de nuevos abanicos aluviales. En el sector de Nigüelas se conserva una serie de cuatro suelos enterrados (suelos NIG-1 a NIG-4) cuyos materiales originales se corresponden con cuatro de estos abanicos aluviales. Los depósitos debieron formarse durante episodios fríos y resistáxicos, mientras que los suelos se desarrollaron en periodos biostáxicos más cálidos que debieron de alternar con los anteriores. Lo mismo se podría decir para los suelos OT-1, OT-2 y OT-3, también desarrollados presumiblemente a lo largo del Cuaternario sobre abanicos aluviales formados por materiales procedentes del Complejo Nevado-Filábride pero, en este caso, con gran cantidad de materiales carbonatados del complejo Alpujárride. El lavado de estos materiales ricos en carbonato cálcico dio lugar a una fuerte recarbonatación en los suelos enterrados, modificando en gran medida sus índices de evolución.

De acuerdo con las edades de los estadios isotópicos establecidos para latitudes bajas en el registro de  $\delta^{18}\text{O}$  (Bassinot *et al.*, 1994), el suelo NIG-4 debió de formarse durante el episodio cálido acaecido entre 71.000 y 127.000 años BP (estadio 5) y el suelo NIG-3 durante el periodo cálido entre hace 186.000 y 242.000 años BP (estadio 7). Siguiendo este esquema, el suelo NIG-2 se debió de formar en el episodio cálido

entre 301.000 y 334.000 BP (estadío 9), mientras que el suelo NIG-1 probablemente se desarrolló durante el periodo cálido entre 364.000 y 427.000 BP (estadío 11)

Los procesos de edafogénesis que dieron lugar a estos suelos fueron los mismos que dieron lugar a los suelos anteriores, pero sus intensidades también variaron en el tiempo. De acuerdo con los índices de evolución, los suelos más antiguos, NIG-1 y NIG-2, muestran grados de evolución muy parecidos entre ellos e intermedios entre NIG-3, el más evolucionado, y NIG-4, el más joven y de menor evolución. Por tanto, y teniendo en cuenta que la duración de los periodos de edafización fueron similares, se puede deducir que las condiciones climáticas de los estadíos 9 y 11 debieron de ser muy parecidas entre sí y dieron lugar a suelos de evolución similar. El estadío 7 debió de ser el más húmedo y dio lugar al suelo más evolucionado de la serie (NIG-3), al tiempo que su grado de evolución se aproxima mucho al de los suelos de superficie desarrollados sobre materiales de principios del Pleistoceno (DUR-1, LLP-1, LLP-2 y COL-10). Por último, el estadío 5 formó el suelo menos evolucionado (NIG-4), por lo que sus condiciones climáticas debieron de ser más secas y/o más frías.

En los suelos OT-1, OT-2 y OT-3, aunque sus horizontes Bt se han visto modificados fundamentalmente por intensos procesos de recarbonatación, sus características parecen poner de relieve que se formaron también durante el Pleistoceno Medio-Superior. Así, los suelos OT-1 y OT-2 presentan un grado de evolución comparable al de los suelos NIG-1 ó NIG-2, mientras que el suelo OT-3 muestra un grado de evolución similar al de NIG-4.

Además de los suelos descritos anteriormente en la Depresión de Granada, también hemos estudiado el suelo SN-1, desarrollado sobre los micaesquistos del Complejo Nevado-Filábride, en una superficie geomorfológicamente estable localizada en un sector relativamente elevado de Sierra Nevada (2.700 m). Se trata de un suelo con un perfil de tipo A-Bt-C que ha sido erosionado y afectado por intensos procesos periglaciares posteriores a su formación, tal y como revelan los estudios macro y micromorfológicos. Lógicamente, la edad estimada para este suelo a partir de su índice de acumulación de arcilla (80.000 años) está falseada, puesto que los procesos erosivos y periglaciares han debido de alterar el primitivo contenido en arcilla por efecto de remoción de sus horizontes. Este hecho, unido a su relativamente elevado índice de acumulación de óxidos de hierro (superior al del suelo NIG-4), nos lleva a considerar que su edad debe ser superior a 80.000 años y que, probablemente, se formara en el estadío 7 (entre 186.000 y 242.000 años BP).

Por tanto, de acuerdo con nuestros resultados, durante el estadío 7 (entre 186.000 y 242.000 años BP) tuvieron lugar intensos procesos de edafización que desarrollaron suelos cuyos índices de evolución son similares a los de otros suelos superficiales

formados en superficies más antiguas (Pleistoceno Inferior). Por tanto, no se puede descartar que estos últimos adquiriesen sus propiedades durante el estadio 7; no obstante, la formación de horizontes petrocálcicos, el índice de acumulación de hierro libre más elevado en los suelos del Pleistoceno Inferior y el gran desarrollo de cútanos y pápulas, nos inclinan a pensar que pudieron adquirir sus propiedades en estadios cálidos anteriores, como los estadios 13 (entre 474.000 y 528.000 años BP) ó 15 (entre 568.00 y 621.000 años BP) en los que también se ha descrito la formación de horizontes Bt con iluviación de arcilla y rubefacción (Bronger *et al.*, 1998a), o incluso en estadios anteriores.

### *Relación suelos-tiempo*

Para abordar este apartado nos vamos a centrar fundamentalmente en los suelos desarrollados sobre materiales similares o equivalentes, concretamente materiales gravosos metamórficos procedentes del Complejo Nevado-Filábride que pueden contener una pequeña cantidad de materiales carbonatados del Complejo Alpujárride. En la Fig. 8.1 se esquematiza esta evolución y nos servirá de base para la posterior discusión.

En general, desde el Plioceno hasta el Pleistoceno Superior los procesos que dan lugar a los suelos son muy similares: meteorización química relativamente intensa, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos, iluviación de arcilla, neoformación de caolinita y rubificación; a los que, en algunos casos y posteriormente a su formación, se unieron los procesos de recarbonatación y rebasificación, aunque sus intensidades variaron en los distintos episodios de edafización.

Durante el Plioceno, los suelos desarrollados sobre estos materiales (CD-1) muestran un grado de evolución moderado que, de acuerdo con nuestros datos, podría estar condicionado por unas condiciones climáticas húmedas y relativamente frías. Durante el Pleistoceno Inferior (LLP-1, LLP-2, DUR-1, COL-10), las condiciones climáticas debieron ser más favorables para el desarrollo del suelo (probablemente más húmedas y/o más cálidas), alcanzando los suelos un mayor grado de evolución (grado de evolución A en Fig. 8.1). Lógicamente, los suelos pliocénicos que permanecieran en superficie durante el Pleistoceno Inferior seguirían evolucionando hasta alcanzar el grado de evolución A. Únicamente si se enterraron pudieron mantener las propiedades desarrolladas durante el Plioceno.

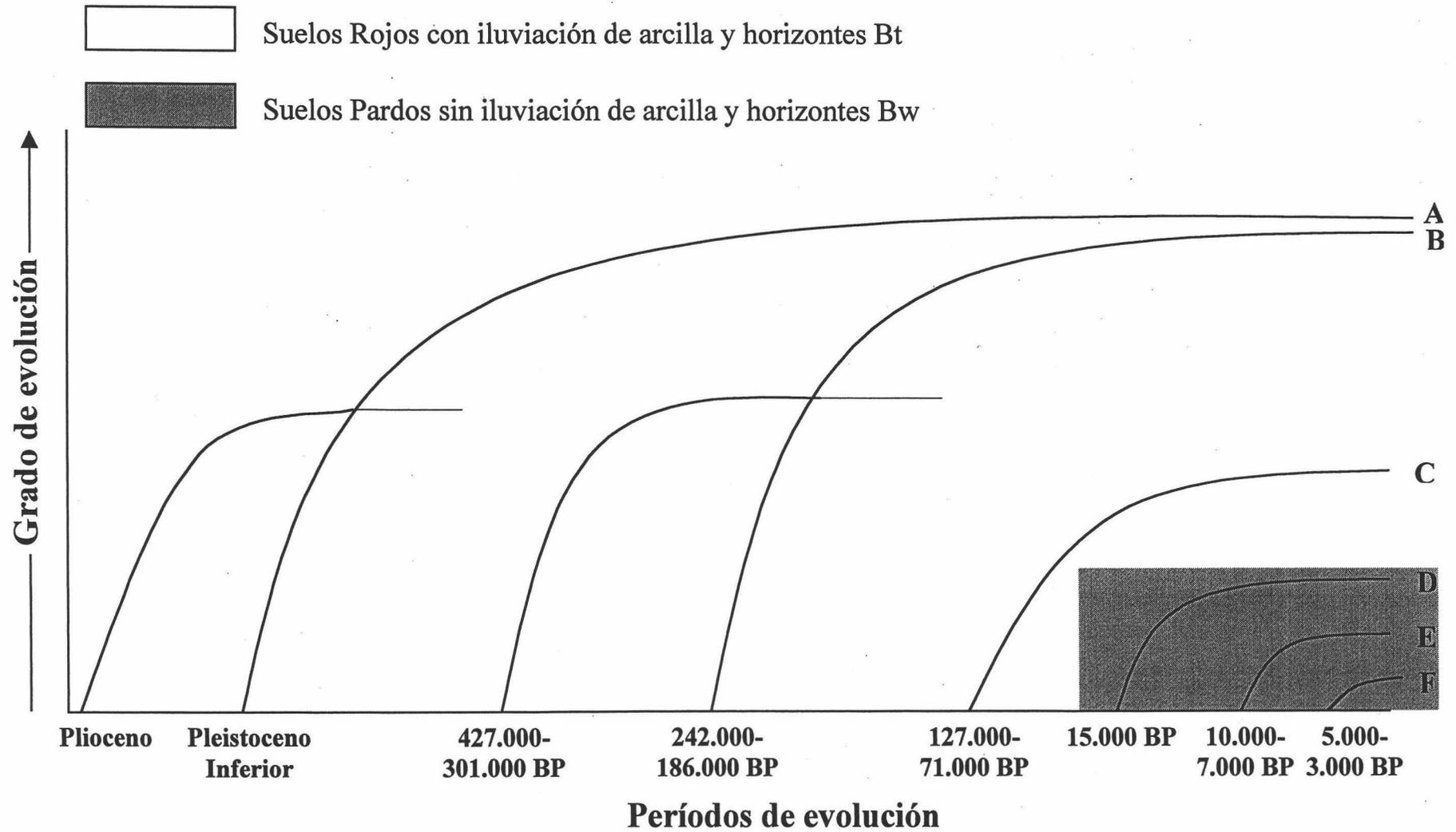


Figura 8.1. Esquema del grado de evolución de los suelos a lo largo de los periodos de edafización.

Durante el Pleistoceno Medio (entre 427.000 y 301.000 años BP) los suelos experimentaron una disminución en su grado de evolución (NIG-1 y NIG-2), probablemente motivada por un nuevo cambio en las condiciones climáticas de los períodos edafizantes (más secas y/o más frías que en el Pleistoceno Inferior). A finales del Pleistoceno Medio, el clima debió de experimentar un nuevo cambio hacia condiciones más edafizantes (mayor humedad y/o mayor temperatura) que dieron lugar a suelos cuyo grado de evolución se aproxima al de los suelos del Pleistoceno Inferior (grado de evolución B en Fig. 8.1). De nuevo, los suelos de comienzos o mediados del Pleistoceno Medio que permaneciesen en superficie seguirían evolucionando durante este período hasta alcanzar el grado de evolución B y sólo mantendrían sus rasgos evolutivos si estuviesen enterrados durante este período. Por el contrario, los suelos del Pleistoceno Inferior podrían mantener sus rasgos evolutivos, aunque éstos serían similares a los de los suelos de finales del Pleistoceno Medio.

A comienzos del Pleistoceno Superior el clima debió de experimentar un nuevo cambio hacia condiciones menos edafizantes (más secas y/o más frías), formándose los suelos rojos menos evolucionados de todos los estudiados (grado de evolución C en Fig. 8.1). En este caso, los suelos desarrollados durante el Pleistoceno Inferior y finales del Pleistoceno Medio seguirían manteniendo sus rasgos evolutivos, ya que difícilmente se podrían perder en condiciones menos edafizantes que las que los formaron.

Si continuamos la evolución de los suelos en el tiempo basándonos en los resultados obtenidos por Simón *et al.* (2000), el mayor cambio climático parece ser que tuvo lugar a finales del Pleistoceno Superior (si aceptamos que el Pleistoceno terminó hace 10.000 años BP). Las nuevas condiciones climáticas dieron lugar a un cambio completo en los procesos de edafización, de forma que ya no se forman suelos rojos con iluviación de arcilla (horizontes Bt) y neoformación de caolinita sino suelos pardos no iluviados (horizontes Bw) y sin caolinita neoformada. Este tipo de suelo se sigue formando también durante el Holoceno, aunque el grado de evolución decrece progresivamente hasta nuestros días (grados de evolución D, E y F en Fig. 8.1).

De acuerdo con lo expuesto, los grados de evolución A y B están muy próximos entre sí, de forma que los índices de evolución que hemos manejado en esta memoria difícilmente se pueden utilizar para establecer la edad de suelos más antiguos de 242.000 años BP. Por el contrario, a partir de 242.000 años BP los suelos disminuyen progresivamente su evolución al disminuir la edad de la superficie sobre la que se forman, por lo que el grado de evolución podría ser utilizado para estimar la edad de los suelos.

Por otra parte, si representásemos el grado de evolución de los suelos en función de su edad (Fig. 8.2) obtendríamos que éste se incrementa continuamente en el tiempo.

Resultados similares fueron obtenidos por Bockheim (1980) y Birkeland (1990), lo que les llevó a poner en duda que los suelos alcanzasen el estado estable. No obstante, la Fig. 8.1 sugiere que, en cada episodio edafogénico, los suelos podrían haber alcanzado un estado estable. En este sentido, el concepto de estado estable dependería de la resolución temporal escogida, de forma que a gran escala habría un continuo cambio de las propiedades con el tiempo, mientras que a pequeña escala podrían haberse alcanzado una serie de estados estables (Simón *et al.*, 2000).

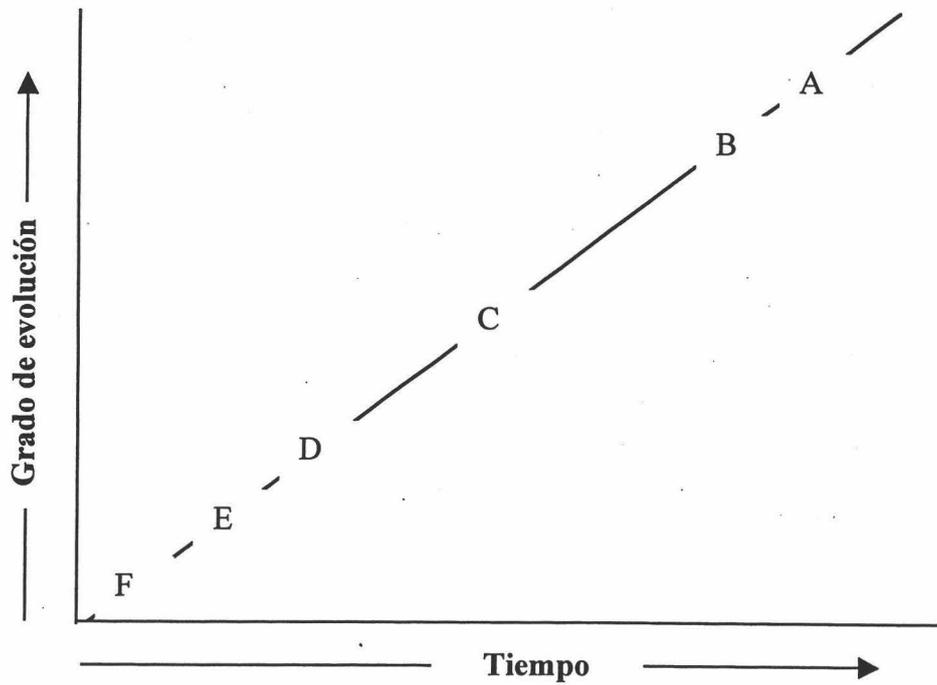
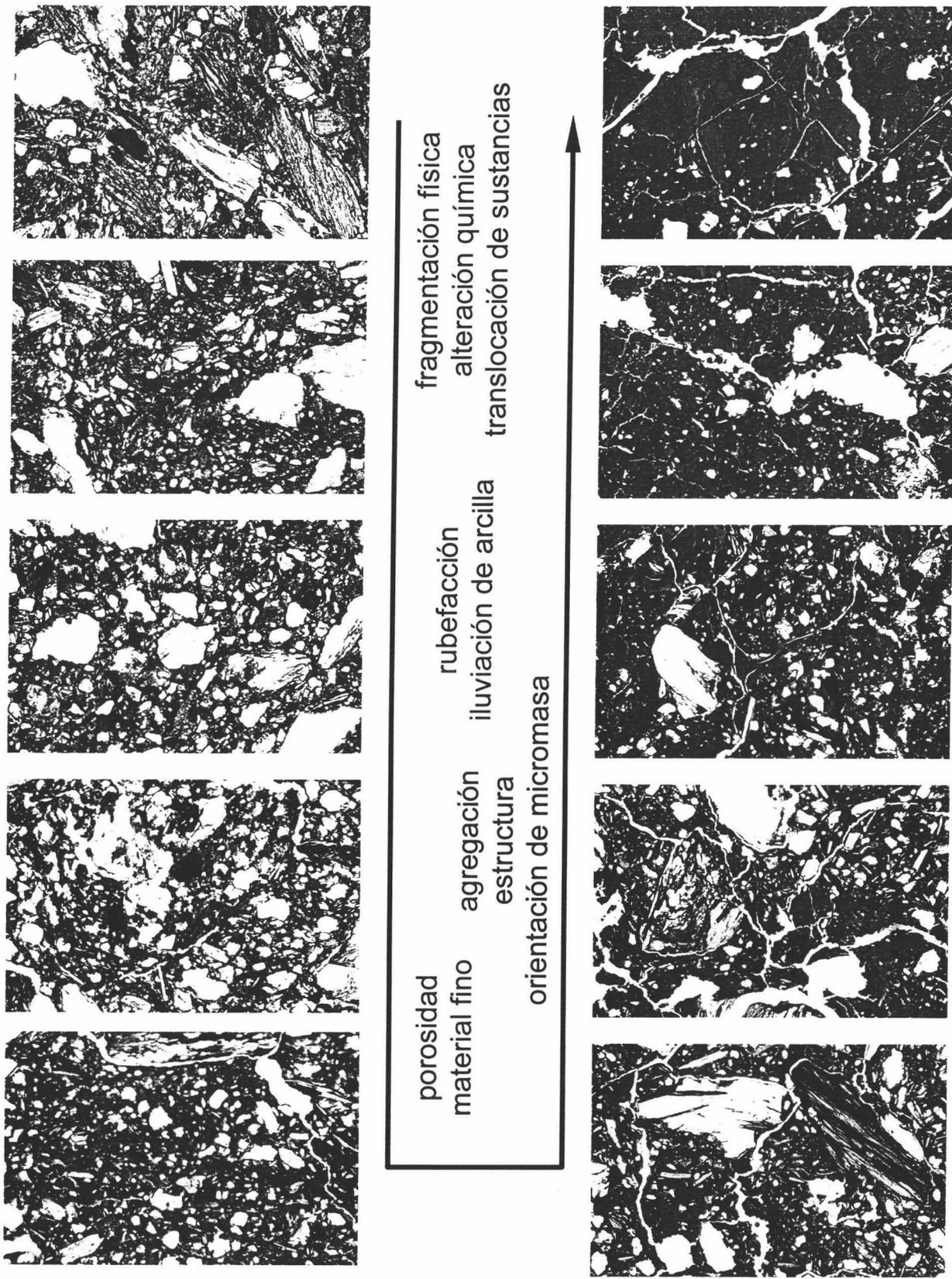
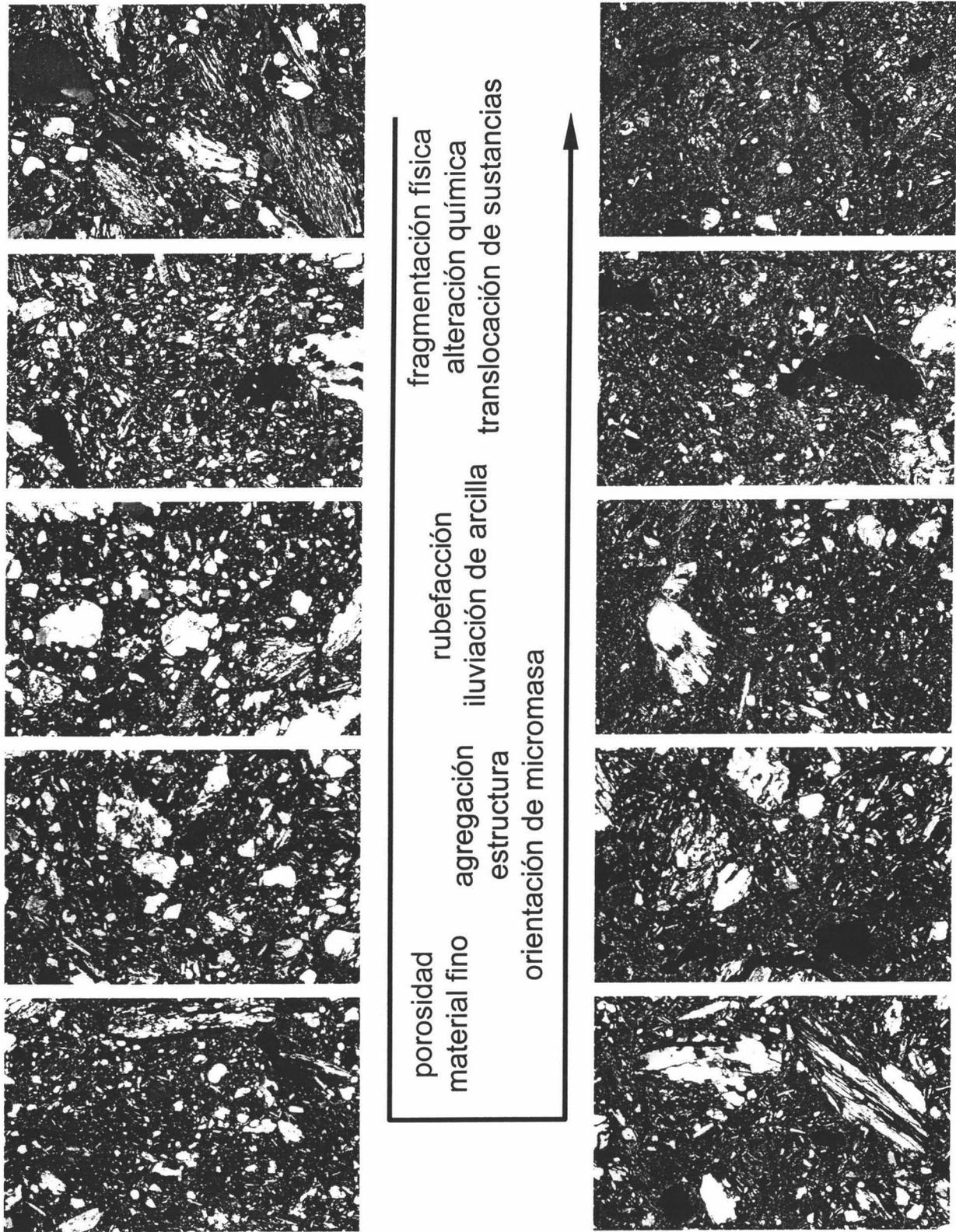


Figura 8.2. Variación del grado de evolución de los suelos con el tiempo.



Lamina 16. Evolución del horizonte Bt de los suelos de las series de Durcal, Niguelas, Llano de la Perdiz y Sierra Nevada a partir de depósitos procedentes de rocas metamórficas (Complejo Nevado-Filábride).

Todas las microfotografías son con sólo polarizador. El lado más largo de las fotografías representa a escala 2 mm.



**Lamina 17. Evolución del horizonte Bt de los suelos de las series de Durcal, Niguelas, Llano de la Perdiz y Sierra Nevada a partir de depósitos procedentes de rocas metamórficas (Complejo Nevado-Filábride).**

Todas las microfotografías son con polarizador y analizador cruzados. El lado más largo de las fotografías representa a escala 2 mm.

## 9. Conclusiones

1. Desde el Plioceno al Pleistoceno Superior, los principales procesos de edafogénesis han sido meteorización química relativamente intensa, mineralización de la materia orgánica, lavado de carbonatos, iluviación de arcilla, neoformación de caolinita y rubificación, acompañados en algunos casos y con posterioridad a la formación de los suelos, de los procesos de erosión, recarbonatación y rebasificación. No obstante, la intensidad de estos procesos ha experimentado variaciones que han debido de estar relacionadas con cambios en las condiciones climáticas.

2. Los suelos desarrollados a lo largo del Plioceno muestran un grado de evolución moderado que podría estar condicionado por unas condiciones climáticas húmedas y relativamente frías. Durante el Pleistoceno Inferior se incrementa el grado de evolución con respecto al de los suelos formados durante el Plioceno, lo que habría que atribuir a condiciones climáticas más favorables para el desarrollo edáfico, probablemente más húmedas y/o más cálidas. En el Pleistoceno Medio vuelve a disminuir el grado de evolución de los suelos, lo que indica un cambio hacia un clima más seco y/o más frío. A finales del Pleistoceno Medio, el clima debió experimentar un nuevo cambio hacia condiciones más edafizantes que dieron lugar a suelos cuyo grado de evolución se aproxima al de los suelos desarrollados en el Pleistoceno Inferior, y de nuevo, a comienzos del Pleistoceno Superior, se volvió a hacer más seco y/o más frío, dando lugar la formación de los suelos rojos menos evolucionados de todos los estudiados.

3. Dado que los suelos de principios del Pleistoceno presentan un grado de evolución parecido al de los suelos formados a finales del Pleistoceno Medio, los índices de evolución utilizados en este trabajo no se pueden utilizar para establecer la edad de suelos más antiguos de 242.000 BP. Por el contrario, a partir de este límite la evolución de los suelos parece disminuir con la edad de la superficie sobre la que se desarrollan, con lo que su grado de evolución sí podría ser empleado para estimar la edad de los suelos.

4. En cada episodio de edafogénesis, los suelos podrían haber alcanzado un estado de equilibrio con los factores formadores, en especial aquellas propiedades que están relacionadas con la meteorización. No obstante, si se considera una escala temporal mucho más amplia, el grado de evolución de los suelos se incrementaría progresivamente en el tiempo. Por tanto, ambos hechos no son excluyentes.

## 10. Bibliografía

- Aguilar, J., P. Bullock, M. Ortega y M. Simón.** 1981. Paleosuelos mixtos (rojos y pardos) en la Depresión de Granada. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 40: 849-864.
- Aguilar, J., T. Rodríguez y M. Simón.** 1986. Mecanismos de iluviación de arcilla en materiales calcáreos. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 45: 565-576.
- Aguilar, J., J. Fernández, A. Martínez and E. Fernández.** 1993. Evaluation of red soils in the cultivation of almonds in Dúrcal (Granada). Second International Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 125-127.
- Aguilar, J., J. Fernández, C. Dorronsoro and G. Stoops.** 1995. Micromorphological aspects of the elluviation/illuviation processes in red mediterranean soils. Third International Meeting on Red Mediterranean Soils. Chalkidiki, Grecia. pp. 125-127.
- Aguirre, E.** 1957. Una prueba paleomastológica de la edad Cuaternaria del Conglomerado de la Alhambra. *Estudios Geológicos*, 13: 135-140.
- Alcalá, B., J.C. Braga y J.M. Martín.** 1988. Arrecifes ligados a abanicos deltaicos de la Depresión de Granada. II Congr. Geol. de España, 1: 7-10.
- Alcalá del Olmo, L. y F. Monturiol Rodríguez.** 1988. Variabilidad de los diferentes tipos de suelos rojos en España. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 47: 371-394.
- Alías, L. J. y A. Pérez.** 1969a. Suelos rojos mediterráneos de la Provincia de Granada. I. Macromorfología, características analíticas generales y estudio químico. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 28: 367-387.
- Alías, L. J. y A. Pérez.** 1969b. Suelos rojos mediterráneos de la Provincia de Granada. III. Minerales pesados de la fracción arena fina. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 28: 811-821.
- Alías, L. J., A. Pérez y J.A. Sánchez.** 1969. Suelos rojos mediterráneos de la Provincia de Granada. II. Mineralogía de arcillas. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 28: 761-779.

- Alías, L.J. y J. Albaladejo.** 1978a. Mineralogía y génesis de suelos con horizonte B textural sobre rocas volcánicas en el sureste de España. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 37: 165-185.
- Alías, L.J. y J. Albaladejo.** 1978b. Mineralogía y génesis de suelos con horizonte B textural sobre rocas calizas en el sureste de España. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 37: 647-663.
- Alonso Rojo, M. P.** 1989. Cronosecuencias de suelos en la Cuenca del Río Tormes. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. 1013 pp.
- Arduino, E., E. Barberis, F. Ajmone Marsan, E. Zanni and M. Franchini.** 1986. Iron oxides and clay minerals within profiles as indicators of soil age in northern Italy. *Geoderma*, 37: 45-55.
- Arnold, R.W.** 1979. *Concept of the argillic horizon and problems in its identification.* In: F.H. Beinroth and S. Panichapong (Eds.), Proceedings of the Second International Soil Classification Workshop. Part II. Soil Survey Division, Land Development Department, Bangkok, Thailand. pp. 21-33.
- Arkley, R.J.** 1963. Calculation of carbonate and water movement in soil from climatic data. *Soil Science*, 96 (4): 239-248.
- Arribas, M.E., J. Fernández y J.M. García-Aguilar.** 1988. Análisis sedimentológico de los materiales lacustres (Formación de Gorafe-Huélogo) del sector central de la Depresión de Guadix. *Estud. Geol.*, 44: 61-73.
- Avery, B.W.** 1985. *Argillic horizons and their significance in England and Wales.* In: J. Boardman (Ed.), Soil and Quaternary Landscape Evolution. John Wiley, Chichester. pp. 69-86.
- Barahona, E.** 1974. Arcillas de ladrería de la provincia de Granada: evaluación de algunos ensayos de materias primas. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- Barahona, E.** 1984. Determinación de carbonatos totales y caliza activa (grupo de trabajo de normalización de métodos analíticos). I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Madrid, Vol. 1: 53-67.
- Bassinot, F.V., L.D. Labeyrie, E. Vincent, X. Quidelleur, N.J. Shackleton and Y. Lancelot.** 1994. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 126: 91-108.

- Bech, J. y V.R. Vallejo.** 1984. Estudio de los suelos fersialíticos de la Depresión Central Catalana. I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Madrid. pp. 811-826.
- Bech, J., J. Rustullet, F.J. Tobías, R. Martínez and D. Quílez.** 1993. Mediterranean red soils of the NE edge of the Garraf Massif, Catalonia (Spain). Second International Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 128-130.
- Bech, J., F.J. Tobías, N. Roca and J. Rustullet.** 1995. Trace elements distribution in some Mediterranean red soils from the NE of Spain. Third International Meeting on Red Mediterranean Soils. Chalkidiki, Grecia. pp. 128-131.
- Benayas, J., L. Alcalá del Olmo, F. Monturiol y A. Guerra.** 1991. Paleoprocesos edáficos en superficies plio-cuaternarias del centro de España. *Suelo y Planta*, 1: 287-301.
- Bertrand, G.** 1968. Paysage et Géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. T. 39. Fasc. 3: 249-272.
- Birkeland, P.W.** 1990. Soil-geomorphic research: a selective overview. In: P.L.K. Kneupfer and L.D. McFadden (Eds.), Soils and landscape evolution. *Geomorphology*, 3: 207-224.
- Birkeland, P.W.** 1999. Soils and Geomorphology. Third Edition. Oxford University Press, New York. 430 pp.
- Blecker, S.W., C.M. Yonker, C.G. Olson and E.F. Kelly.** 1997. Paleopedologic and geomorphic evidence for Holocene climate variation, Shortgrass Steppe, Colorado, USA. *Geoderma*, 76: 113-130.
- Blodgett, R.H., J.P. Crabaugh and E.F. McBride.** 1993. *The color of Red Beds - a geologic perspective*. In: Soil Color, SSSA Spec. Publ. 31, Madison, WI. pp. 127-159.
- Bockheim, J.G.** 1980. Solution and use of chronofunctions in studying soil development. *Geoderma*, 24: 71-85.
- Boero, V. and U. Schwertmann.** 1987. Occurrence and transformations of iron and manganese in a colluvial Terra Rossa toposequence of Northern Italy. *Catena*, 14: 519-531.
- Boero, V. and U. Schwertmann.** 1989. Iron oxide mineralogy of Terra Rossa and its

- genetic implications. *Geoderma*, 44: 319-327.
- Bornand, M.** 1978. Altération des matériaux fluvioglaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhone. Thèse. Univ. Sciences et Tech. du Languedoc, I.N.R.A., Montpellier, France.
- Brewer, R.** 1964. Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, New York. 470 pp.
- Brewer, R.** 1968. Clay illuviation as a factor in particle size differentiation in soil profiles. Transcriptions of the 9<sup>th</sup>. International Congress of Soil Science. Adelaide, 4: 489-499.
- Brewer, R. and J.R. Sleeman.** 1970. Some trends in pedology. *Earth Sci. Rev.*, 6: 297-335.
- Bronger, A. and J.A. Catt.** 1989. Paleosols: problems of definition, recognition and interpretation. In: A. Bronger and J.A. Catt (Eds.), *Paleopedology: Nature and Applications of Paleosols. Catena Supplement*, 16: 1-7.
- Bronger, A. and T. Heinkele.** 1989. Paleosol sequences as witnesses of Pleistocene climatic history. In: A. Bronger and J.A. Catt (Eds), *Paleopedology: Nature and Applications of Paleosols. Catena Supplement* 16, 163-186.
- Bronger, A., R. Winter and T. Heinkele.** 1998. Pleistocene climatic history of East and Central Asia based on paleopedological indicators in loess-paleosol sequences. *Catena*, 34: 1-17.
- Bronger, A. and J.A. Catt.** 1998. The position of paleopedology in geosciences and agricultural sciences. *Quaternary International*, Vols. 51/52: 87-93.
- Bullock, P., H. Fedoroff, A. Jongerius, G. Stoops and T. Tursina.** 1985. Handbook for soil thin sections description. Waine Research Publications, Wolverhampton.
- Bullock, P. and M.L. Thompson.** 1985. *Micromorphology of Alfisols*. In: *Soil Micromorphology and Soil Classification*. Soil Science Society of America. Madison. pp. 87-117.
- Buol, S.W.** 1980. *Morphological characteristics of Alfisols and Ultisols*. In: B.K.G. Theng (Ed.), *Soils with Variable Charge*. New Zealand Society of Soil Science, Lower Hutt. pp. 3-16.

- Catt, J.A.** 1979. Soils and Quaternary geology in Britain. *Journal of Soil Science*, 30: 607-642.
- Catt, J.A.** 1987. *Effects of the Devensian cold stage on soil characteristics and distribution in eastern England*. In: J. Boardman (Ed.), *Periglacial Processes and Landforms in Britain and Ireland*. Cambridge University Press, pp. 145-152.
- Catt, J.A.** 1989. Relict properties in soils of the Central and North-West European temperate region. In: A. Bronger and J.A. Catt (Eds.), *Paleopedology: Nature and Applications of Paleosols*. *Catena Supplement*, 16: 41-58.
- Chapman, S.L. and M.E. Horn.** 1968. Parent material uniformity and origin of silty soils in northwest Arkansas based on zirconium-titanium contents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32: 265-271.
- Chittleborough, D.J. and J.M. Oades.** 1980. The development of a Red-Brown Earth. II. Uniformity of the parent material. *Aus. J. Soil Res.*, 18: 375-382.
- Comisión Organizadora del V<sup>th</sup> International Working Meeting on Soil Micromorphology.** 1977. The soils of the Alhambra Formation. International Report of Meeting. Granada, Spain. 38 pp.
- Cremaschi, M.** 1987. Paleosols and Vetusols in the central Po plain (northern Italy). A study in Quaternary Geology and soil development. *Studi e Ricerche sul Territorio*, Edizioni Unicopli, Milano, Italia.
- Dabrio, C., J. Fernández, J. A. Peña, A. Ruiz-Bustos y C. Sanz de Galdeano.** 1978. Rasgos sedimentológicos de los conglomerados miocénicos del borde noreste de la depresión de Granada. *Est. Geol. Univ. de Granada*, 34: 89-97.
- Dabrio, C. and A. Ruiz-Bustos.** 1979. Les conglomérats de la "Blockformation" et leur signification dans l'évolution néogène du bassin de Grenade (Cordillères Bétiques, Espagne). *C.R. Seanc. Soc. Géol. France, Paris*, 2: 53-55.
- Dabrio, C., J.M. Martín and A. Megias.** 1982. Signification sedimentaire des evaporites de la Depression de Grenade (Espagne). *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 24: 705-710.
- Delgado, R., G. Delgado, J. Párraga, E. Gámiz, M. Sánchez y M.A. Tenorio.** 1988. Proyecto LUCDEME. Mapa de suelos (Escala 1:100.00). Güejar-Sierra, 1027. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, ICONA y Universidad de Granada (Eds.). Madrid. 110 pp.

- Delgado, R., J. Párraga, G. Delgado, F. Huertas et J. Linares.** 1990. Genèse d'un sol fersiallitique de la formation Alhambra (Granada-Espagne). *Science du Sol*, 28: 53-70.
- Delgado, R., J. Aguilar and G. Delgado.** 1994. Use of numerical estimators and multivariate analysis to characterize the genesis and pedogenic evolution of xerals from southern Spain. *Catena*, 23: 309-325.
- Díaz de Federico, A. y E. Puga.** 1980. Memoria del Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.027, Güejar-Sierra. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- Dorronsoro, C. y J. Aguilar.** 1988. El proceso de iluviación de arcilla. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 47 :311-350.
- Dorronsoro, C. and P. Alonso.** 1993. Soil development in the chronosequence of red mediterranean soils in Salamanca, Spain. Second Intenational Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 104-108.
- Dorronsoro, C. and P. Alonso.** 1994. Chronosequence in Almar River fluvial-terrace soil. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 910-925.
- Duchaufour, P.** 1977. *Pédologie. 1. Pédogenèse et classification.* Ed. Masson. Paris.
- Duchaufour, P.** 1982. *Pedology, pedogenesis and classification* (trans. T.R. Paton). Allen and Unwin, London.
- Erhart, H.** 1955. Biostasie et Rhesistasie. Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 241: 1218-1220.
- Espejo, R.** 1985. The ages and soils of two levels of "Raña" surfaces in central Spain. *Geoderma*, 35: 223-239.
- Espejo, R.** 1986. Procesos edafogenéticos y edad de las formaciones tipo "Raña" relacionadas con las estribaciones meridionales de los Montes de Toledo. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 45 (5-6): 655-680.
- Espejo, R., E. Molina y M.A. Vicente.** 1991. Estudio de perfiles de alteración en abanicos aluviales neógenos sobre el zócalo hercínico ibérico. *Suelo y Planta*, 1: 721-733.

- Estévez, A. and C. Sanz de Galdeano.** 1983. Néotectonique du secteur central des Chaines Bétiques (Basins du Guadix-Baza et de Grenade). *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, Paris, 21: 23-34.
- Eswaran, H.** 1979. *Micromorphology of Alfisols and Ultisols with low activity clays.* In: F.H. Beinroth and S. Panichapong (Eds.), Proceedings of the Second International Soil Classification Workshop. Part. II. Soil Survey Division, Land Development Department, Bangkok, pp. 53-76.
- Eswaran, H., P. Reich, E. Van der Berg and P. Zdruli.** 1995. Global distribution of soils with xeric soil moisture regime. 3<sup>rd</sup> International Meeting on Red Mediterranean Soils. Chalkidiki, Grecia. pp. 85.
- FAO.** 1977. Guía para la descripción de perfiles de suelo (Segunda Edición). FAO. Roma. 70 pp.
- FAO.** 1998. World Reference Base for Soil Resources. FAO-ISRIC-ISSS. Rome. 88 pp.
- Faz, A.** 1997. Génesis y evolución paleoambiental de los suelos de la Sierra de Carrascoy (Murcia). Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Fedoroff, N.** 1973. *The clay illuviation.* In: St. Kowalinski and J. Drozd (Eds.), Soil micromorphology Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Working Meeting on Soil Micromorphology, Wrocław, Poland. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe. pp. 195-207.
- Fedoroff, N., M.A. Courty and M.L. Thompson.** 1990. *Micromorphological evidence of paleoenvironment change in Pleistocene and Holocene paleosols.* In: L.A. Douglas (Ed.), Soil Micromorphology: a Basic and Applied Science. Elsevier, Amsterdam. pp. 653-665.
- Fedoroff, N.** 1997. Clay illuviation in Red Mediterranean soils. *Catena*, 28: 171-189.
- Fernández, J. y C. Dabrio.** 1983. Los conglomerados de la Moraleda. Un modelo de sistema fluvial de tipo braided (Depresión de Granada, España). *Estud. Geol.*, 39: 53-69.
- Fernández, J. y J. Soria.** 1986-1987. Evolución sedimentaria en el borde norte de la Depresión de Granada a partir del Turolense terminal. *Acta Geológica Hispánica*, t. 21-22: 73-81.

- Fernández, J., C. Viseras and B.J. Bluck.** 1989. Changes in evolution of the Guadix Basin as documented by alluvial architecture (Betic Ranges, Spain). *Publ. Ser. Geol. Catalunya*, 6. 80 pp.
- Fernández, J., B.J. Bluck and C. Viseras.** 1991. A lacustrine fan-delta system in the Pliocene deposits of the Guadix Basin (Betic Cordilleras, South Spain). *Cuad. Geol. Ibérica*, 15: 299-317.
- Fernández, M.T., M.J. Delgado, A. Faz y R. Ortiz.** 1994. Mineralogía de algunos suelos fersialíticos del Sureste de España. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 17: 209-216.
- Fernández, J., J. Soria and C. Viseras.** 1996. *Stratigraphic architecture of the Neogene basins in the central sector of the Betic Cordillera (Spain): tectonic control and base-level changes*. In: P.F. Friend and C.J. Dabrio (Eds.), *Tertiary Basins of Spain: The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 353-365.
- Fontboté, J.M.** 1970. Sobre la historia preorogénica de las Cordilleras Béticas. *Cuad. Geol.*, Universidad de Granada, 1, pp. 71-78.
- Fontboté, J.M., J.A. Gallegos, J.M. González Donoso y C. Sanz de Galdeano.** 1980. Memoria del Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.026, Padul. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- García, R. y J. Forteza.** 1964. Estudio agrobiológico de la provincia de Zamora. Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca.
- García González, M.T. y F.J. Aragoneses.** 1991. Transformaciones mineralógicas en suelos sobre formaciones tipo "Raña". *Suelo y Planta*, 1: 735-747.
- García, J.M. and F. Santos-Francés.** 1993. Relationships between the characteristics of mediterranean red soils and the age of the geomorphological surfaces in central-western Spain. 2nd International Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 114-118.
- García Giménez, R., J.A. González Martín y R. Jiménez Ballesta.** 1995. Permanencia de ambientes edafogenéticos de rango Mediterráneo en la evolución pleistocena del Páramo de Madrid. *Edafología*, 1: 67-73.
- García, A., J. Fernández y J. Aguilar.** 2000. Pedogénesis de Rhodoxeralf últicos

- sobre granito (Extremadura). *Edafología*, 7: 31-50.
- Gerrard, A.J.** 1981. Soils and Landforms: An integration of Geomorphology and Pedology. George Allen and Unwin (Publishers), London. 219 pp.
- Gil de Carrasco, C.** 1988. Los suelos en el paisaje del sector oriental de Sierra Nevada: sus relaciones con la vegetación. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 607 pp.
- Gómez, A., S. Sánchez, M. Simón, F. Salvador y A. Esteban.** 1992. *Síntesis de la morfología glacial y periglacial de Sierra Nevada (España)*. En: F. López Bermúdez, C. Conesa García y M.A. Romero Díaz (Eds.), Estudios de la Geomorfología de España. Sociedad Española de Geomorfología, Murcia. pp. 379-392.
- González, F.** 1962. Estudio agrobiológico de la provincia de Sevilla. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto. Sevilla.
- González, F.** 1963. Estudio agrobiológico de la provincia de Cádiz. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto. Sevilla.
- González, F.** 1971. Estudio agrobiológico de la provincia de Córdoba. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto. Sevilla.
- González Donoso, J.M.** 1967. Estudio geológico de la Depresión de Granada. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.
- González Donoso, J.M.** 1968. Conclusiones estratigráficas y paleogeográficas sobre los terrenos miocénicos de la Depresión de Granada. *Acta Geológica Hispánica*, t. III, nº 3: 57-63.
- Guerra, A. y F. Monturiol.** 1954. Memoria del Mapa de Suelos del término municipal de Ecija (Sevilla). Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal. C.S.I.C. Madrid.
- Guerra, A.** 1972. Los suelos rojos en España. Contribución a su estudio y clasificación. Instituto de Edafología y Biología Vegetal, C.S.I.C. Madrid, 253 pp.
- Günster, N. y A. Skowronek.** 1998. *La posición geomorfológica y clima-genética de los paleosuelos fósiles de la Depresión de Granada*. En: A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch (Eds.), Investigaciones recientes de la Geomorfología española. pp. 367-374.
- Günster, N. and A. Skowronek.** 2001. Sediment-soil sequences in the Granada Basin as evidence for long- and short-term climatic changes during the Pliocene and

- Quaternary in the Western Mediterranean. *Quaternary International*, 78: 17-32.
- Günster, N., P. Eck, A. Skowronek and L. Zöller.** 2001. Late Pleistocene loess and their paleosols in the Granada Basin, Southern Spain. *Quaternary International*, 76/77: 241-245.
- Harden, J.W.** 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in Central California. *Geoderma*, 28: 1-28.
- Harrison, J.B.J., L.D. McFadden and R.J. Weldon.** 1990. Spatial soil variability in the Cajon Pass chronosequence: implications for the use of soils as a geochronological tool. In: P.L.K. Kneupfer and L.D. McFadden (Eds.), Soils and landscape evolution. *Geomorphology*, 3: 399-416.
- Heilman, P.G.F.** 1972. On the formation of red soils in the Lower Crati Basin (S Italy). Ph. D. Thesis. International Institute for Aerial Survey and Earth Science (ITC). Delft, The Netherlands. 189 pp.
- Hempel, L.** 1960. Límites geomorfológicos altitudinales de Sierra Nevada. *Estud. Geogr.*, 78: 81-93.
- Holmgren, G.** 1967. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31: 210-211.
- Hurst, V.J.** 1977. Visual estimation of iron in saprolite. *Geol. Soc. Am. Bul.*, 88: 174-176.
- Ibáñez, J.J., J. Gallardo y R. Jiménez.** 1987. Suelos con horizontes argílicos en el Macizo de Ayllón y Sierra del Alto Rey (Sistema Central): Pautas de distribución en el paisaje. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 46: 1103-1116.
- Ibáñez, J.J., A. López, A. García y R. García.** 1988a. Mosaicos heterocrónicos, heterogénicos y heterolíticos en el Macizo de Ayllón (Sistema Central): Repercusiones sobre la tipología de suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 47: 1353-1362.
- Ibáñez, J.J., J. Gallardo, R. Virgil y R. Jiménez.** 1988b. Suelos con horizontes argílicos en el Macizo de Ayllón y Sierra del Alto Rey (Sistema Central). II. Clasificación. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 47: 1571-1583.
- Ibáñez, J.J., F. Fernández y A. García.** 1989. Consideraciones acerca de las interrelaciones entre suelos, vegetación y paleoprocesos morfogenéticos en el Macizo

- de Ayllón y la Sierra del Alto Rey (Sistema Central). *Anales de Edafología y Agrobiología*, 48: 637-647.
- Ibañez, J.J., S. De Alba and J. Boixadera.** 1995. *The pedodiversity concept and its measurement: application to soil formation systems*. In: D. King, R.J.A. Jone and A.J. Thomasson (Eds.), *European Land Information Systems for Agro-Environmental Monitoring*. Joint Research Centre, European Commission, Brussels. pp. 181-195.
- I.G.M.E.** 1980. Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.027, Güejar-Sierra. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- I.G.M.E.** 1980. Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.026, Padul. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- I.G.M.E.** 1981. Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.041, Dúrcal. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- I.G.M.E.** 1988. Mapa Geológico de España (E. 1:50.000). Hoja 1.009, Granada. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- I.N.M.** 1991. Síntesis de los datos climáticos de Andalucía. Madrid.
- Isbell, R.F.** 1980. *Genesis and classification of low activity clay Alfisols and Ultisols*. In: B.K.G. Theng (Ed.), *Soils with Variable Charge*. New Zealand Soc. Soil Sci. pp. 397-410.
- Jamagne, M. et C. Jeanson.** 1978. *Illuviation primaire et secondaire dans les sols lessives sur matériaux limoneux*. In: M. Delgado (Ed.), *Micromorfología de suelos*. Universidad de Granada. Vol. 2, pp. 935-965.
- Jenny, H.** 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, New York.
- Kemp, R.A.** 1985a. Soil micromorphology and the Quaternary. *Quaternary Research Association Technical Guide*, Vol. 2. 80 pp.
- Kemp, R.A.** 1985b. *The Valley Farm soil in Southern East Anglia*. In: J. Boardman (Ed.), *Soils and Quaternary Landscape Evolution*. Wiley, Chichester, pp. 179-196.
- Kemp, R.A., H. Jerz, W. Grottenthaler and R.C. Preece.** 1994. *Pedosedimentary fabrics of soils within loess and colluvium in southern England and Germany*. In: A. Ringrose-Voase and G. Humphries (Eds.), *Soil Micromorphology*. Elsevier,

Amsterdam. pp. 207-219.

**Kemp, R.A.** 1998. Role of micromorphology in paleopedological research. *Quaternary International*, Vols. 51/52: 133-141.

**Kraus, M.J.** 1997. Lower Eocene alluvial paleosols: Pedogenic development, stratigraphic relationships, and paleosol/landscape associations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129: 387-406.

**Lamouroux, M.** 1971. Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogénèse fersiallitique au Liban. Thèse, Univ. Estrasbourg, France. 314 pp.

**Levine, E.R. and E.J. Ciolkosz.** 1983. Soil development in till of various ages in Northeastern Pennsylvania. *Quaternary Research*, 19: 85-99.

**Lhenaff, R.** 1965. Néotectonique quaternaire sur le bord occidental de la Sierra Nevada (province de Grenade, Espagne). *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 7(3): 205-207.

**Lhenaff, R.** 1979. Le bassin de Grenade (Andalousie, Espagne): Morphogénèse d'une cuvette intra-montagneuse. *Méditerranée*, 3: 37-44.

**Losa Quintana, J.M., J. Molero Mesa y M. Casares Porcel.** 1986. El paisaje vegetal de Sierra Nevada. La cuenca alta del río Genil. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada. Granada. 285 pp.

**Loughnan, F.C.** 1969. Chemical weathering of the silicate minerals. American Elsevier, New York. 154 pp.

**Loveland, P.J. and W.R. Whalley.** 1991. *Particle size analysis*. In: K.A. Smith and C.E. Mullis (Eds.), *Soil Analysis: Physical Methods*. Marcel Dekker, New York. pp. 271-328.

**Lupiani, E. y J. Soria.** 1985. MAGNA, 1009. Instituto Geológico y Minero de España.

**Mancini, F.** 1966. *On the elimination of the term Mediterranean in soil science*. In: *Trans. Conf. Medit. Soils*, Madrid. CSIC. pp 413-416.

**Martín-García, J.M.** 1994. La Génesis de Suelos Rojos en el Macizo de Sierra Nevada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 684 pp.

**Martín-García, J.M., G. Delgado, M. Sánchez-Marañón, J.F. Párraga and R.**

- Delgado.** 1997. Nature of dioctahedral micas in Spanish red soils. *Clay Minerals*, 32: 107-121.
- Martín-García, J.M., G. Delgado, J.F. Párraga, J. Bech and R. Delgado.** 1998. Mineral formation in micaceous Mediterranean Red Soils of Sierra Nevada, Granada, Spain. *European Journal of Soil Science*, 49: 253-268.
- Martín-García, J.M., G. Delgado, J.F. Párraga, E. Gámiz and R. Delgado.** 1999. Chemical, mineralogical and (micro)morphological study of coarse fragments in Mediterranean Red Soils. *Geoderma*, 90: 23-47.
- Martín Peinado, F.** 1994. Suelos rojos del ámbito mediterráneo. Tesina de Licenciatura. Universidad de Granada. 75 pp.
- McFadden, L.D. and P.L.K. Kneupfer.** 1990. Soil Geomorphology: the linkage of pedology and superficial processes. In: P.L.K. Kneupfer and L.D. McFadden (Eds.), Soils and landscape evolution. *Geomorphology*, 3: 197-205.
- McKeague, J.A. and R.J. Arnaud.** 1969. Pedotranslocation: eluviation-iluviation in soils during the Quaternary. *Soil Science*, 107: 428-434.
- McKeague, J.A.** 1983. *Clay skins and the argillic horizon*. In: P. Bullock and C.P. Murphy (Eds.), Soil Micromorphology. Vol. 2. Soil genesis. Proceedings of the 6th International Working Meeting on Soil Micromorphology. London. AB Academic Publ., Berkhamsted. pp. 367-388.
- Messerli, B.** 1965. Beiträge zur geomorphologie der Sierra Nevada (Andalusien). Thése. Juris Verlag. Zurich. 178 pp.
- Munsell.** 1954. Munsell Soil Color Charts. Munsell Color Company, Inc. Baltimore, Maryland, USA.
- Mücher, H.J. and T.D. Morozova.** 1983. *The application of soil micromorphology in Quaternary Geology and Geomorphology*. In: P. Bullock and C.P. Murphy (Eds.), Soil Micromorphology. AB Academic Publishers, Berkhamsted. pp. 151-194.
- Nettleton, W.D., C.G. Olson and D.A. Wysocki.** 2000. Paleosol classification: problems and solutions. *Catena*, 41: 61-92.
- Ortega-Huertas, M., M. Rodríguez-Gallego y F. López-Aguayo.** 1979. Mineralogía de la fracción fina de la "Block Formation". Depresión de Granada. *Estudios*

*Geológicos*, 35: 541-548.

**Ortega, M. and J. Aguilar.** 1980. Sulla presenza di paleosuoli rossi nella Depressione spagnola di Granada. *Rendiconto dell'Accademia di Scienze Fisiche e Matematiche della Società Nazionale di Scienze, Lettere e Arti in Napoli*. Serie IV, vol. XLVII: 61-82.

**Ortiz, R., A. Faz, M.T. Fernández and M.J. Delgado.** 1993. Typological characterization and genesis of red soils with an argillic horizon in semiarid Mediterranean area (Spain). 2nd International Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 97-99.

**Papadakis, J.** 1980. *El Clima*. Editorial Albatros. Buenos Aires, Argentina. 377 pp.

**Pascual, A.** 1975. Estudio hidrogeológico de las cuencas medias de los ríos Monachil y Dílar (Granada). Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.

**Polynov, B.** 1927. Contributions of Russian scientists to paleopedology. Russian Academy of Sciences, Leningrad.

**Remmelzwaal, A.** 1978. Soil genesis and Quaternary landscape development in the Tyrrhenian coastal area of south central Italy. *Publ. Fys. Geog. Bodemk. Lab. Univ. Amsterdam*. 28 pp.

**Remmelzwaal, A.** 1979. Translocation and transformation of clay in Alfisols in Early, Middle and Late Pleistocene coastal sands of southern Italy. *Catena*, 6: 379-398.

**Retallack, G.J.** 1988. Field recognition of paleosols. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 216: 1-20.

**Retallack, G.J.** 1990. *Soils of the past: An introduction to paleopedology*. Unwin Hyman, Boston. 520 pp.

**Retallack, G.J. and V.P. Wright.** 1990. *Micromorphology of lithified paleosols*. In: L.A. Douglas (Ed.), *Soil Micromorphology: a Basic and Applied Science*. Elsevier, Amsterdam. pp. 641-652.

**Retallack, G.J.** 2001. *Soils of the past: An introduction to paleopedology*. Second Edition. Blackwell Science Ltd. 404 pp.

**Reuter, G.** 2000. A logical system of paleopedological terms. *Catena*, 41: 93-109.

- Richards, L.A.** 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. United States Salinity Laboratory. Staff Agriculture Handbook, nº 60. U.S.D.A. pp. 105-106.
- Rivas Martínez, S.** 1964. Esquema de la vegetación potencial y su correspondencia con los suelos de la España peninsular. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 22: 341-405.
- Rivas Martínez, S.** 1982. Etages bioclimáticas, secteurs chorologiques et series de vegetation de L'Espagne mediterraneenne. *Ecología mediterránea*, 8: 275-288.
- Rivas Martínez, S.** 1987. Memoria del Mapa de series de vegetación de España. ICONA. Madrid.
- Rodríguez-Fernández, J.** 1982. El Mioceno del sector central de las Cordilleras Béticas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 224 pp.
- Rodríguez-Fernández, J., C. Sanz de Galdeano and J. Fernández.** 1989. *Genesis and Evolution of the Granada Basin (Betic Cordillera, Spain)*. In: T.P. Thauasuthipitak and P. Ounchanum (Eds.), *Intermontane Basins: Geology and Resources*. Chiang-Mai, Thailand. pp. 294-305.
- Roquero, E., J.L. Goy and C. Zazo.** 1993. Rhodoxeralfs and related soils on middle Tajo River Pleistocene terraces (Central Spain). Second Intenational Meeting on Red Mediterranean Soils. Adana, Turquía. pp. 100-102.
- Roquero, E., J. Pérez Arias and A. Martín Serrano.** 1999. Influence of morphological slope evolution in red soil genesis. Madrid Basin, Central Spain. Abstracts of the 6th International Meeting on Soils with Mediterranean type of Climate. Barcelona, Spain. pp. 483-485.
- Rostad, H.P.W., N.E. Smeck and L.P. Wilding.** 1976. Genesis of argillic horizons in soils derived from coarse-textured calcareous gravels. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 40: 739-744.
- Ruhe, R.V.** 1956. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Science*, 82: 441-455.
- Ruhe, R.V.** 1965. *Quaternary pedology*. In: H.E. Wright and D.G. Frey (Eds.), *The Quaternary of the United States*. Princeton University Press, Princeton, NJ. pp. 755-764.
- Ruhe, R.V.** 1975. *Geomorphology, Geomorphic Processes and Surficial Geology*.

Houghton Mifflin, Boston, MA.

**Ruiz-Bustos, A., J. Fernández, J. Morales, J. Rodríguez-Fernández y J.A. Vera.** 1990. Los materiales Plio-Pleistocenos del borde norte de la depresión de Granada. *Estud. Geol.*, 46: 270-290.

**Ruiz Bustos, A., M. Martín Martín y A. Martín Algarra.** 1992. Nuevos datos sobre el neógeno continental en el sector noreste de la cuenca de Granada, Cordillera Bética. *Geogaceta*, 12: 52-56.

**Ruiz de la Torre, J.** 1990. Mapa forestal de España. Granada-Málaga. Hoja 5-11. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA. Madrid.

**Sánchez, J.A. y F. Artés.** 1966. Apportation au étude de la formation des sols rouges autochtones sur des calcaires. Comunicaciones de la Conferencia de Suelos Mediterráneos, Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, Madrid. pp 375-382.

**Sánchez, S., M. Simón, I. García y A. Gómez.** 1988. Morfogénesis de un sistema nival de Sierra Nevada: Laguna Seca (Provincia de Granada). *Cuaternario y Geomorfología*, Vol. 2 (1-4): 99-105.

**Sánchez Gómez, S. T.** 1990. Aplicación del estudio de suelos a la dinámica de la cuenca del río Lanjarón. Relación: Suelos-Geomorfología. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

**Santos-Francés, F. and J.M. García.** 1995. Application of Landsat-5 (TM) images in characterizing the degree of erosion of Red Mediterranean Soils in the Duero Basin. 3<sup>rd</sup> International Meeting of Red Mediterranean Soils. Chalkidiki, Greece. pp 107-110.

**Sanz de Galdeano, C.** 1976. *Datos sobre las deformaciones neógenas y cuaternarias del sector del Padul (Granada)*. En: Reunión sobre la Geodinámica de la Cordillera Bética y mar de Alborán. Publ. Univ. Granada. pp. 197-218.

**Sanz de Galdeano, C.** 1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*, 39: 157-165.

**Sanz de Galdeano, C. and J. A. Vera.** 1992. Stratigraphic record and palaeogeographical context of the Neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4: 21-36.

**Sanz de Galdeano, C. and A.C. López-Garrido.** 1999. Nature and impact of the

- Neotectonic deformation in the western Sierra Nevada (Spain). *Geomorphology*, 30: 259-272.
- Schulte, L. and R. Julià.** 1999. Quaternary soil development on river terraces in the Vera Basin (SE-Spain). Abstracts of the 6th International Meeting on Soils with Mediterranean type of Climate. Barcelona, Spain. pp. 583-585.
- Schultz, L.G.** 1964. Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierce Shale. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 391-C.
- Schwertmann, U. and R.M. Taylor.** 1977. *Iron oxides*. In: J.B. Dixon and S.B. Webb (Eds.), Minerals in soil environments. Soil Sci. Soc. Am., Madison. pp. 148-180.
- Schwertmann, U. and R.M. Taylor.** 1989. *Iron oxides*. In: Minerals in Soil Environments, (2<sup>nd</sup> Edition). Soil Science Society of America. pp. 379-438.
- Semmel, A.** 1989. Paleopedology and Geomorphology: examples from the Western Part of Central Europe. In: A. Bronger and J.A. Catt (Eds), Paleopedology: Nature and application of paleosols. *Catena Supplement*, 16: 143-162.
- Simón, M., I. García y S. Sánchez.** 1989. Evolución de los suelos durante el Cuaternario en el Piso Oromediterráneo Nevadense. Abs. 2a Reun. Nac. Cuat. Ibe. Madrid.
- Simón, M., S. Sánchez, I. García y O. Cabezas.** 1992. Los suelos en relación con el relieve de la alta montaña mediterránea (Sierra Nevada-Granada). III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, pp. 451-456.
- Simón, M., P. Alfaro, M. González, J.A. López y J. González.** 1993a. Suelos rojos como representantes de la edafogénesis de finales del Mioceno al Pleistoceno. *El Cuaternario en España y Portugal*, 2: 623-632.
- Simón, M., I. García, O. Cabezas y S. Sánchez.** 1993b. Cronosecuencias de suelos en alta montaña mediterránea (Sierra Nevada, Granada). XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Salamanca. pp. 1170-1177.
- Simón, M., I. García y S. Sánchez.** 1996. Paleoambientes cuaternarios en Sierra Nevada a través de la interrelación Geomorfología-Suelos. 1<sup>a</sup> Conferencia Internacional Sierra Nevada. Granada, Spain. pp. 87-95.
- Simón, M., S. Sánchez and I. García.** 2000. Soil-landscape evolution on a

Mediterranean high mountain. *Catena*, 39: 211-231.

**Soil Conservation Service.** 1972. Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples. U.S. Department of Agriculture, Washington.

**Soil Survey Staff.** 1975. Soil Taxonomy. Agriculture Handbook 436. USDA, Washington, DC.

**Soil Survey Staff.** 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second Edition. U.S. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Handbook n° 436. Washington, DC.

**Soutade, G. and A. Baudiere.** 1970. Vegetation et modeles des hauts versants septentrionaux de la Sierra Nevada. *Annales de Geographie*, n° 436, 1: 709-736.

**Stoops, G. and H. Eswaran.** 1986. Soil Micromorphology. Van Nostrand Reinhold, New York.

**Suc, J.P.** 1984. Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, 307: 429-432.

**Tarnocai, C. and K.W.G. Valentine.** 1989. Relict soil properties of the Artic and Subartic regions of Canada. In: A. Bronger and J.A. Catt (Eds), *Paleopedology: Nature and application of paleosols. Catena Supplement*, 16: 9-39.

**Temsamani-Mirabet, R., M. Soriano, V. Aranda, M. Sánchez-Marañón and R. Delgado.** 1999. The influence of pedoenviromental variables on Betico-Mogrebide red soils (Spain/Morocco). Abstracts of the 6th International Meeting on Soils with Mediterranean type of Climate. Barcelona, Spain. pp. 491-493.

**Terrerros, J.F.** 1985. Temas de Edafología. Zaragoza.

**Thornthwaite, C.W.** 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geog. Rev.*, 38: 56-94.

**Thornthwaite, C.W.** 1955. The water balance. *Publications in Climatology*, 8 (1). Laboratory of climatology. Centerton, NJ. p. 104.

**Torrent, J.** 1976. Soil development in a sequence of river terraces in northern Spain. *Catena*, 3: 137-151.

- Torrent, J., U. Schwertmann, H. Fechter and F. Alférez.** 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, 136: 354-358.
- Torrent, J. and U. Schwertmann.** 1987. Influence of hematite on the color of red beds. *J. Sediment. Petrol.*, 57: 682-686.
- Tyurin, I.V.** 1951. Analytical procedure for a comparative study of soil humus. *Trudy Prochr. Inst. Dokuchaeva*, 38: 5-9.
- Valle, F.** 1985. Mapa de series de vegetación de Sierra Nevada (España). *Ecología mediterránea*, 11 (2/3): 183-199.
- Van Vliet-Lanoë, B.** 1985. *Frost effects in soil*. In: J. Boardman (Ed.), *Soils and Quaternary Landscape Evolution*. Wiley, Chichester, pp. 117-159.
- Viseras, C.** 1991. Estratigrafía y sedimentología del relleno aluvial de la Cuenca de Guadix (Cordilleras Béticas). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 327 pp.
- Viseras, C. and J. Fernández.** 1992. Sedimentary basin destruction inferred from the evolution of drainage systems in the Betic Cordillera, southern Spain. *J. Geol. Soc. London*, 149: 1021-1029.
- Von Drasche, R.** 1879. Bosquejo geológico de la zona superior de Sierra Nevada. Bol. Com. Mapa Geol. de España. 353 pp.
- Yaalon, D.H.** 1971. *Soil-forming processes in time and space*. In: D. H. Yaalon (Ed.), *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. International Society of Soil Science and Israel Universities Press, Jerusalem. pp. 29-39.
- Yaalon, D.H.** 1997. Soils in the Mediterranean region: what makes them different?. *Catena*, 28: 157-168.
- Yassoglou, N., C. Kosmas and N. Moustakas.** 1997. The red soils, their origin, properties, use and management in Greece. *Catena*, 28: 261-278.

## 11. APENDICE

### • Sector de Colomera (COL)

#### 1. Macromorfología

En este apartado se recoge la descripción macromorfológica de cada uno de suelos del sector de Colomera, así como las características generales del área donde se encuentran situados. Estas últimas son comunes a todos los perfiles por tratarse de una serie de suelos enterrados por depósitos de similar litología, aunque reflejan principalmente las características del suelo COL-10, el que se encuentra en superficie.

**Localidad:** Término municipal de Colomera (Granada).

**Situación:** Finca La Granja, a 5 km al NW del Pantano de Cubillas.

**Coordenadas U.T.M.:** 438400/4131475/Huso 30

**Altitud:** 682 m.

**Pendiente:** Suavemente inclinado.

**Posición Fisiográfica:** Ladera.

**Vegetación:** Olivos.

**Material Original:** Sedimentos carbonatados.

**Condiciones de drenaje:** Imperfectamente drenado.

**Pedregosidad:** Moderadamente pedregoso.

**Afloramientos rocosos:** Ninguna o muy pocas rocas.

**Salinidad:** Libre de sales.

**Erosión:** Hídrica laminar y en surcos.

**Influencia humana:** Cultivo.

---

#### Perfil COL-10

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Ap1	0-6	Color rojo oscuro (2,5YR 3/6) en seco y rojo muy oscuro (2,5YR 2,5/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares muy gruesos (hasta 3 cm) a granular fina, de grado moderado. Abundantes cútanos de arcilla y slickensides. Con suela de arado. Calcáreo. Sin raíces. Pocas gravas. Límite brusco.
Ap2	6-20	Color rojo oscuro (2,5YR 3/6) en seco y rojo débil (2,5YR 5/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura prismática, con grandes prismas (10 x 3 cm; 10 x 6 cm), de grado fuerte. Abundantes

---

---

		cútanos de arcilla y slickensides. Con suela de arado. Calcáreo. Muy escasas raíces. Menos gravas que en el horizonte superior. Límite difuso.
Bt	20-50	Color rojo (10R 4/6) en seco y rojo oscuro (10R 3/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura prismática, con prismas algo más pequeños que en el horizonte superior (10 x 3 cm), de tamaño mediano y grado fuerte. Muy abundantes cútanos de arcilla y slickensides en todas las caras de los agregados. Frecuentes raíces finas y muy finas. No calcáreo. Sin gravas. Límite brusco.
BCtk	50-90	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo, abigarrado, con material más rojizo procedente del horizonte superior rellenando las grietas. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares pequeños, de grado moderado y masiva en las zonas enriquecidas en carbonato. Fuertemente calcáreo. Muy abundantes nódulos de carbonato, endurecidos e irregulares, de crecimiento concéntrico, con superficies lisas que indican redisolución. Carbonatos en pequeñas grietas que indican la movilización y redisolución del carbonato. Signos de recarbonatación. Muy escasas raíces finas y muy finas. Pocas gravas. Límite difuso.
BCKt	90-120	Color rojo pálido (2,5YR 7/4) en seco y rojo (2,5YR 6/8) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares pequeños, de grado débil y masiva en las frecuentes zonas enriquecidas con carbonato. Fuertemente calcáreo. Muy escasos nódulos de carbonato, muy blandos. Pulvirulento. Muy escasas raíces. Frecuentes gravas. Límite brusco.
Ckm	>120	Color pardo muy pálido (10YR 8/2) en seco y gris brillante (10YR 7/2) en húmedo. Al desecarse adquiere un color blanco. Textura franca. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo y cementado. Frecuentes gravas de hasta 15 cm.

---

**Clasificación:** Luvisol hipercálcico rhódico (FAO, 1998); Rhodoxeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

## Serie de suelos enterrados de Colomera

## Perfil COL-9

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Ckb	0-84	Color pardo claro (7,5YR 6/4) en seco y pardo intenso (7,5YR 5/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.

## Perfil COL-8

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
C/Bb	84-93	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con escasos nódulos de carbonato cálcico irregulares y muy escasos micelios. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.
Btkb	93-108	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Calcáreo, con abundantes nódulos irregulares de carbonato cálcico y muy escasos micelios. Poca grava. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.
BCkb	108-124	Color amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño grande. Fuertemente calcáreo, con menos nódulos y micelios de carbonato que el horizonte superior. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite gradual.
Ckb	124-145	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con escasos a frecuentes micelios de carbonato cálcico y sin nódulos. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

Perfil COL-7

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
B/Cb	145-161	Color pardo claro (7,5YR 6/4) en seco y pardo intenso (7,5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano. Fuertemente calcáreo, con frecuentes nódulos y micelios de carbonato cálcico. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.
Btk1b	161-179	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Calcáreo, con muy abundantes nódulos y micelios de carbonato cálcico. Frecuentes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite difuso.
Btk2b	179-194	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Calcáreo, con muy abundantes nódulos y micelios de carbonato cálcico. Frecuentes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite difuso.
Btk3b	194-210	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Calcáreo, con muy abundantes nódulos y micelios de carbonato cálcico. Frecuentes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Pocas gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite neto.
BCkb	210-226	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares de tamaño grande. Calcáreo, con abundantes nódulos y micelios de carbonato cálcico. Frecuentes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Frecuentes gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite gradual.
CBkb	226-245	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y amarillo rojizo (5YR 7/8) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con muy escasos nódulos y micelios de carbonato cálcico.

		Muy escasas manchas pirolusíticas. Frecuentes gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite gradual.
Ck1b	245-271	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con escasos nódulos de carbonato cálcico y sin micelios. Escasas manchas pirolusíticas. Frecuentes gravas. Abundantes restos de antiguas raíces. Límite gradual.
Ck2b	271-293	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, sin micelios de carbonato pero con abundantes nódulos endurecidos. Muy escasas manchas pirolusíticas. Pocas gravas. Frecuentes restos de raíces. Límite gradual.
Ck3b	293-323	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, sin micelios de carbonatos pero con muy abundantes nódulos endurecidos. Sin manchas pirolusíticas. Pocas gravas. Frecuentes restos de raíces. Límite gradual.
Ck4b	323-370	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, sin micelios de carbonatos pero con muy abundantes nódulos endurecidos. Sin manchas pirolusíticas. Pocas gravas. Frecuentes restos de raíces. Límite neto.

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

#### Perfil COL-6

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	370-390	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Fuertemente calcáreo, con muy abundantes nódulos de carbonato cálcico endurecidos. Frecuentes manchas pirolusíticas. Pocas gravas. Frecuentes restos de raíces. Límite neto.
Ckb	390-403	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en

UNIVERSIDAD DE GRANADA

2001

COMISION DE

---

húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con escasos nódulos de carbonato cálcico, pequeños y endurecidos. Muy escasas manchas pirolusíticas. Pocas gravas. Escasos restos de raíces. Límite neto.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Haploxeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

#### Perfil COL-5

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	403-433	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño mediano y fino. Calcáreo, con muy abundantes nódulos de carbonato, irregulares, muchos de ellos tubulares. Abundantes micelios de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas. Frecuentes restos de raíces, con posiblemente concentración de pirolusita. Pocas gravas. Límite gradual.
BCKb	433-447	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares de tamaño grande y mediano. Fuertemente calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato endurecidos. Frecuentes micelios de carbonato. Algunas manchas pirolusíticas. Algunas raíces. Pocas gravas. Límite neto.
Ckb	447-477	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y amarillo rojizo (5YR 6/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares de gran tamaño. Calcáreo, con algunos nódulos de carbonato. Algunas manchas pirolusíticas. Frecuentes restos de raíces. Pocas gravas. Límite neto.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

#### Perfil COL-4

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btk1b	477-504	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares medianos y finos. Calcáreo, con algunos nódulos de carbonato. Muy abundantes manchas pirolusíticas. Muy frecuentes

---

---

		restos de raíces. Pocas gravas. Límite difuso.
Btk2b	504-529	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares medianos y finos. Calcáreo, con algunos nódulos de carbonato. Muy abundantes manchas pirolusíticas. Muy frecuentes restos de raíces. Pocas gravas. Límite difuso.
Ckb	529-579	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares medianos y grandes. Calcáreo, con escasos nódulos de carbonato. Muy abundantes manchas pirolusíticas. Abundantes restos de antiguas raíces. Pocas gravas. Límite neto y brusco.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil COL-3

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
	579-681	Conglomerado calcáreo.
Ckb	681-716	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con escasos nódulos de carbonato, blandos y de límites netos. Sin manchas pirolusíticas. Sin raíces. Frecuentes gravas. Límite neto.

---

### Perfil COL-2

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	716-744	Color rojo amarillento (5YR 4/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares medianos y finos. Calcáreo, con muy abundantes nódulos de carbonato cálcico medianos, blandos y de límites netos, endurecidos los de tamaño pequeño. Escasas manchas pirolusíticas. Sin raíces. Pocas gravas. Límite gradual.
BCKb	744-776	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura en bloques angulares medianos. Fuertemente calcáreo, con frecuentes

---

---

nódulos de carbonato cálcico, la mayoría blandos e irregulares, aunque también algunos más endurecidos. Frecuentes manchas pirolusíticas. Sin raíces. Frecuentes gravas. Límite gradual.

Ckb 776-824 Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares muy grandes, con tendencia masiva. Fuertemente calcáreo, con frecuentes nódulos de carbonato cálcico, blandos en general y de forma irregular, aunque algunos también algo más duros. Abundantes manchas pirolusíticas. Sin raíces. Frecuentes gravas. Límite gradual.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil COL-1

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	824-862	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques subangulares medianos y finos. Calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato cálcico, blandos y duros. Frecuentes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Sin raíces. Frecuentes gravas. Límite gradual.
BCKb	862-889	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y amarillo rojizo (5YR 6/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura en bloques angulares a subangulares de tamaño grande. Fuertemente calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato cálcico endurecidos, irregulares y con tendencia al redondeamiento. Escasas manchas pirolusíticas. Sin raíces. Frecuentes gravas. Límite gradual.
Ckb	889-949	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 7/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato cálcico, más abundantes que en el horizonte superior, muy duros e irregulares. Recristalizaciones secundarias de carbonato cálcico en los agregados. Escasas manchas dendríticas de pirolusita. Sin raíces. Frecuentes gravas.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Haploxeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

2. Datos analíticos

Tabla A.1. Análisis granulométrico del suelo COL-10 (1= 2-1 mm; 2= 1-0,5 mm; 3= 0,5-0,25 mm; 4= 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Hor.	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
COL-10	Ap1	12,9	21,3	5,2	15,8	21,0	57,6	3,3	5,9	4,2	5,8	1,5	0,6
	Ap2	6,3	22,4	5,6	13,3	18,9	58,7	4,3	5,5	3,9	4,8	2,9	1,0
	Bt	0,2	5,0	0,6	2,8	3,4	91,6	0,7	1,0	0,7	1,2	0,9	0,5
	BCtk	15,1	12,7	6,2	36,4	42,6	44,7	2,3	2,4	2,4	3,1	1,7	0,8
	BCKt	29,0	15,4	8,3	54,6	62,9	21,7	1,0	2,5	3,2	4,9	2,3	1,5
	Ckm	44,3	46,3	5,4	33,4	38,8	14,9	15,2	16,1	7,7	4,3	1,5	1,5

Tabla A.2. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) del suelo COL-10.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
COL-10	Ap1	8,0	0,10	1,9	nd	0,54	0,11	1,85	29,00	1,25	24,33	100
	Ap2	8,2	0,10	2,0	nd	0,37	0,09	1,66	27,70	1,00	29,34	100
	Bt	7,7	0,05	0,8	nd	0,29	0,14	0,87	33,20	1,67	38,65	93
	BCtk	8,3	0,03	51,1	nd	0,37	0,09	0,49	36,75	0,92	22,90	100
	BCKt	8,5	0,02	71,4	nd	0,26	0,06	0,23	37,25	0,50	11,45	100
	Ckm	8,7	0,02	80,0	nd	0,30	0,05	0,10	39,25	0,50	6,30	100

Tabla A.3. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina del suelo COL-10.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
COL-10	Ap1	60,69	17,81	7,75	0,15	0,81	1,66	0,24	1,99	0,78	0,14	186,8
	Ap2	60,41	17,95	7,63	0,15	0,81	1,66	0,20	1,96	0,85	0,14	191,5
	Bt	51,52	23,92	9,65	0,15	1,22	1,33	0,70	2,44	0,71	0,11	146,4
	BCtk	25,46	12,08	5,20	0,06	0,74	27,97	0,15	1,19	0,34	0,06	72,9
	BCkt	13,85	4,95	2,40	0,03	0,44	42,47	0,09	0,50	0,18	0,03	50,1
	Ckm	12,78	2,14	1,53	0,04	0,86	44,64	0,22	0,15	0,09	0,02	28,4

Tabla A.4. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en el suelo COL-10.

Perfil	Horizonte	Fed	Feo	Fed/	Feo/	Ald	Alo	Ald/	Alo/
		(%)	(%)	Fet	Fed	(%)	(%)	Alt	Ald
COL-10	Ap1	3,42	0,14	0,44	0,04	0,47	0,32	0,03	0,68
	Ap2	3,56	0,14	0,46	0,04	0,42	0,30	0,02	0,71
	Bt	4,56	0,14	0,47	0,03	0,24	0,12	0,01	1,16
	BCtk	2,06	0,03	0,40	0,01	0,19	0,07	0,01	0,37
	BCkt	0,97	0,01	0,40	0,01	0,09	0,04	0,02	0,44
	Ckm	0,17	0,09	0,11	0,53	0,07	0,03	0,03	0,43

Tabla A.5. Análisis granulométrico de los suelos enterrados de Colomera (de COL-9 a COL-4) (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
COL-9	Ckb	4,8	10,9	12,0	41,5	53,5	35,6	0,2	0,3	0,4	3,2	2,9	3,9
COL-8	C/Bb	3,6	9,5	12,2	38,8	51,0	39,5	0,2	0,4	0,6	3,0	3,1	2,2
	Btkb	4,2	8,4	11,2	37,4	48,6	43,0	0,4	0,8	1,0	2,5	1,4	2,4
	BCkb	9,3	13,4	12,1	33,7	45,8	40,8	0,5	1,5	2,1	3,9	2,3	3,2
	Ckb	15,0	15,1	12,8	35,6	48,4	36,5	0,8	1,8	2,1	4,2	2,6	3,5
COL-7	B/Cb	9,7	9,8	10,8	36,4	47,2	43,0	1,0	1,3	1,1	2,4	1,6	2,3
	Btk1b	6,7	18,5	10,2	51,1	61,3	20,2	4,2	6,2	2,4	2,4	1,3	2,0
	Btk2b	7,7	6,7	6,5	33,1	39,6	53,7	1,5	1,1	0,7	1,4	0,8	1,2
	Btk3b	6,2	26,7	11,4	41,2	52,6	20,7	5,5	7,8	3,3	4,0	2,8	3,4
	BCkb	18,1	10,7	8,9	30,9	39,8	49,5	1,2	1,6	1,7	2,8	1,5	2,0
	CBkb	19,0	10,3	9,0	39,0	48,0	41,7	2,0	1,6	1,1	2,5	1,4	1,6
	Ck1b	21,0	13,7	12,6	61,2	73,8	12,5	2,2	2,2	2,1	3,2	1,6	2,5
	Ck2b	9,6	7,9	11,5	66,7	78,2	13,9	0,8	1,3	1,0	1,9	1,2	1,7
	Ck3b	8,6	5,2	9,4	49,6	59,0	35,8	0,6	0,2	0,3	1,3	1,2	1,7
	Ck4b	8,5	11,1	11,5	44,5	56,0	32,9	0,1	0,2	0,8	4,0	2,7	3,3
COL-6	Btkb	8,8	6,3	10,3	49,0	59,3	34,4	0,2	0,1	0,2	1,7	1,8	2,3
	Ckb	12,1	3,8	9,5	52,0	61,5	34,7	0,2	0,3	0,3	0,9	0,9	1,1
COL5	Btkb	11,5	34,9	22,2	32,2	54,4	10,7	1,5	2,3	2,5	12,0	8,0	8,6
	BCkb	15,3	7,3	7,7	41,3	49,0	43,7	0,9	1,5	1,0	1,7	1,0	1,1
	Ckb	17,5	13,3	15,2	58,9	74,1	12,6	1,2	1,6	1,3	3,1	2,5	3,6
COL-4	Btk1b	6,1	4,6	5,2	43,2	48,4	47,0	0,9	0,9	0,5	1,0	0,6	0,7
	Btk2b	7,0	5,1	6,1	38,0	44,1	50,8	1,0	1,0	0,8	1,1	0,7	0,6
	Ckb	9,6	5,8	5,1	36,3	41,4	52,8	1,6	1,2	0,8	1,3	0,8	0,1

Tabla A.6. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos enterrados de Colomera (de COL-9 a COL-4).

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
COL-9	Ckb	8,6	0,13	49,7	nd	0,22	0,05	0,25	37,2	1,33	15,56	100
COL-8	C/Bb	8,6	0,12	40,3	nd	0,20	0,05	0,33	37,5	1,58	16,54	100
	Btkb	8,4	0,16	21,8	nd	0,28	0,04	0,19	26,5	0,58	23,83	100
	BCKb	8,5	0,09	45,7	nd	0,23	0,07	0,35	34,2	1,67	16,54	100
	Ckb	8,6	0,17	55,2	nd	0,31	0,07	0,31	36,0	2,00	14,59	100
COL-7	B/Cb	8,6	0,10	45,1	nd	0,26	0,07	0,37	35,8	2,50	17,02	100
	Btk1b	8,5	0,08	35,6	nd	0,39	0,09	0,46	37,8	3,08	17,02	100
	Btk2b	8,5	0,15	25,9	nd	0,29	0,11	0,48	37,0	3,42	20,91	100
	Btk3b	8,5	0,09	19,5	nd	0,35	0,09	0,44	32,0	2,75	22,86	100
	BCKb	8,4	0,09	37,0	nd	0,40	0,11	0,46	35,0	3,25	19,94	100
	CBkb	8,6	0,10	53,2	nd	0,49	0,09	0,29	32,8	2,50	15,08	100
	Ck1b	8,6	0,11	64,1	nd	0,52	0,07	0,19	30,5	2,08	12,64	100
	Ck2b	8,7	0,09	67,8	nd	0,53	0,07	0,19	30,8	2,08	11,67	100
	Ck3b	8,9	0,10	64,5	nd	0,33	0,07	0,15	29,8	2,33	14,10	100
	Ck4b	8,9	0,08	64,5	nd	0,22	0,05	0,17	30,8	2,17	16,05	100
COL-6	Btkb	8,9	0,11	60,2	nd	0,24	0,04	0,25	28,5	2,17	14,59	100
	Ckb	8,8	0,10	58,8	nd	0,22	0,04	0,25	32,0	2,33	14,10	100
COL5	Btkb	8,6	0,10	30,4	nd	0,23	0,04	0,52	33,2	3,50	19,94	100
	BCKb	8,8	0,21	46,6	nd	0,27	0,04	0,46	32,8	2,92	16,54	100
	Ckb	8,7	0,24	25,1	nd	0,35	0,04	0,39	31,5	2,58	20,91	100
COL-4	Btk1b	8,7	0,08	45,0	nd	0,21	0,04	0,44	25,0	2,67	18,97	100
	Btk2b	8,7	0,17	39,6	nd	0,24	0,05	0,56	33,5	3,25	18,48	100
	Ckb	8,6	0,25	35,6	nd	0,31	0,05	0,56	34,2	3,08	20,43	100

Tabla A.7. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos enterrados de Colomera (de COL-9 a COL-4).

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
COL-9	Ckb	29,49	7,35	3,59	0,08	1,26	29,90	0,24	1,06	0,39	0,06	99,9
COL-8	C/Bb	35,91	8,74	4,14	0,11	1,29	24,20	0,14	1,32	0,47	0,06	118,5
	Btkb	49,88	11,27	5,20	0,16	1,49	13,91	0,15	1,82	0,61	0,06	157,3
	BCkb	32,20	7,76	3,66	0,09	1,19	26,17	0,33	1,20	0,37	0,05	99,0
	Ckb	27,46	6,76	3,16	0,07	1,11	31,54	0,16	0,93	0,38	0,06	84,6
COL-7	B/Cb	17,74	3,84	1,83	0,01	0,80	40,54	0,34	0,55	0,19	0,02	94,4
	Btk1b	39,75	9,86	4,48	0,13	1,53	21,27	0,31	1,50	0,45	0,08	112,1
	Btk2b	19,93	5,88	2,46	0,01	1,53	36,87	0,22	0,68	0,23	0,04	131,7
	Btk3b	50,20	12,72	5,68	0,16	1,58	12,51	0,46	1,98	0,61	0,08	147,4
	BCkb	38,81	10,16	4,49	0,11	1,35	21,94	0,13	1,51	0,45	0,06	118,7
	CBkb	27,73	7,44	3,22	0,07	1,16	31,15	0,11	1,10	0,38	0,06	86,1
	Ck1b	20,83	5,70	2,54	0,05	1,01	37,39	0,53	0,80	0,22	0,05	63,7
	Ck2b	18,92	5,19	2,33	0,04	1,01	38,92	0,11	0,67	0,21	0,05	55,9
	Ck3b	20,60	5,52	2,54	0,05	1,11	37,33	0,13	0,72	0,25	0,05	62,3
	Ck4b	21,31	5,41	2,51	0,05	1,05	36,42	0,11	0,71	0,32	0,06	73,3
COL-6	Btkb	24,20	6,07	2,75	0,06	1,07	34,64	0,78	0,91	0,27	0,03	78,9
	Ckb	25,50	6,32	2,82	0,06	1,13	34,19	0,07	0,87	0,28	0,05	75,1
COL5	Btkb	42,98	10,96	4,83	0,13	1,50	18,55	0,23	1,75	0,50	0,06	130,3
	BCkb	32,36	8,50	3,67	0,08	1,28	27,29	0,26	1,31	0,42	0,08	85,9
	Ckb	28,69	7,50	3,33	0,08	1,18	30,48	0,37	1,16	0,30	0,06	76,0
COL-4	Btk1b	32,50	8,47	3,70	0,09	1,26	27,49	0,06	1,30	0,36	0,08	151,7
	Btk2b	36,91	9,61	4,21	0,10	1,37	23,81	0,14	1,50	0,40	0,10	97,9
	Ckb	38,49	10,25	4,50	0,11	1,41	22,04	0,10	1,54	0,44	0,06	112,7

Tabla A.8. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos enterrados de Colomera (de COL-9 a COL-4).

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
COL-9	Ckb	0,16	0,01	0,04	0,06	0,09	0,04	0,01	0,40
COL-8	C/Bb	0,17	0,01	0,04	0,05	0,12	0,03	0,01	0,24
	Btkb	0,30	0,02	0,06	0,08	0,12	0,06	0,01	0,48
	BCkb	0,16	0,01	0,04	0,06	0,07	0,03	0,01	0,40
	Ckb	0,05	0,01	0,02	0,11	0,07	0,03	0,01	0,40
COL-7	B/Cb	0,38	0,01	0,21	0,03	0,09	0,04	0,02	0,40
	Btk1b	0,38	0,01	0,08	0,03	0,09	0,04	0,01	0,40
	Btk2b	0,45	0,02	0,18	0,04	0,09	0,05	0,02	0,50
	Btk3b	0,64	0,02	0,11	0,03	0,09	0,06	0,01	0,60
	BCkb	0,18	0,02	0,04	0,11	0,09	0,05	0,01	0,50
	CBkb	0,14	0,01	0,04	0,05	0,09	0,03	0,01	0,30
	Ck1b	0,09	0,01	0,03	0,06	0,09	0,02	0,02	0,20
	Ck2b	0,06	0,01	0,02	0,13	0,09	0,01	0,02	0,10
	Ck3b	0,08	0,01	0,03	0,14	0,09	0,01	0,02	0,10
	Ck4b	0,06	0,01	0,02	0,16	0,12	0,02	0,02	0,16
COL-6	Btkb	0,10	0,01	0,04	0,11	0,05	0,02	0,01	0,40
	Ckb	0,08	0,01	0,03	0,16	0,05	0,02	0,01	0,40
COL5	Btkb	0,17	0,02	0,03	0,15	0,07	0,06	0,01	0,80
	BCkb	0,10	0,01	0,03	0,13	0,09	0,04	0,01	0,40
	Ckb	0,08	0,01	0,02	0,11	0,09	0,03	0,01	0,30
COL-4	Btk1b	0,11	0,01	0,03	0,12	0,09	0,03	0,01	0,30
	Btk2b	0,17	0,02	0,04	0,11	0,12	0,04	0,01	0,32
	Ckb	0,08	0,02	0,02	0,24	0,12	0,05	0,01	0,40

Tabla A.9. Análisis granulométrico de los suelos enterrados de Colomera (de COL-3 a COL-1) (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
COL-3	Ckb	23,5	23,3	15,2	38,3	53,5	23,2	0,4	2,1	2,8	8,0	5,1	4,9
COL-2	Btkb	6,5	10,5	8,4	38,0	46,4	43,1	0,9	1,5	1,4	2,8	1,6	2,4
	BCkb	16,0	11,5	9,1	43,9	53,0	35,5	1,6	2,2	1,8	2,6	1,5	1,8
	Ckb	18,9	12,4	18,2	58,6	76,8	10,8	3,4	1,8	1,1	2,3	1,4	2,4
COL-1	Btkb	18,3	15,6	12,4	51,6	64,0	20,4	1,8	2,9	3,3	3,3	1,9	2,5
	BCkb	28,8	13,2	11,3	53,3	64,6	22,2	1,8	2,0	1,4	3,3	1,7	2,9
	Ckb	38,9	16,8	11,5	44,7	56,2	27,0	1,0	1,3	2,3	6,0	2,6	3,6

Tabla A.10. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos enterrados de Colomera (de COL-3 a COL-1).

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
COL-3	Ckb	8,7	0,12	56,0	nd	0,21	0,02	0,23	30,0	0,33	10,21	100
COL-2	Btkb	8,6	0,30	35,3	nd	0,27	0,07	0,56	34,5	0,58	21,89	100
	BCkb	8,8	0,26	45,0	nd	0,19	0,04	0,48	33,5	0,50	14,59	100
	Ckb	8,9	0,12	49,6	nd	0,23	0,04	0,44	32,2	0,50	13,62	100
COL-1	Btkb	8,7	0,12	35,3	nd	0,27	0,02	0,33	25,8	0,42	18,97	100
	BCkb	8,8	0,21	46,3	nd	0,24	0,06	0,46	31,8	1,08	15,39	100
	Ckb	8,8	0,13	59,0	nd	0,20	0,04	0,27	27,0	0,83	11,66	100

Tabla A.11. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos enterrados de Colomera (de COL-3 a COL-1).

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
COL-3	Ckb	20,96	4,60	2,07	0,04	0,82	37,80	0,19	0,78	0,26	0,04	68,5
COL-2	Btkb	37,28	9,10	4,04	0,11	1,25	23,48	0,28	1,53	0,49	0,06	115,9
	BCkb	30,24	7,43	3,41	0,08	1,10	29,71	0,11	1,22	0,33	0,05	96,3
	Ckb	28,46	7,20	3,24	0,06	1,10	30,32	0,10	1,17	0,40	0,05	82,5
COL-1	Btkb	37,00	9,09	4,13	0,10	1,26	23,76	0,22	1,53	0,45	0,05	108,8
	BCkb	29,00	7,27	3,25	0,05	1,14	29,93	0,06	1,20	0,44	0,05	94,2
	Ckb	21,89	5,23	2,37	0,02	0,94	36,73	0,34	0,82	0,27	0,05	82,4

Tabla A.12. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos enterrados de Colomera (de COL-3 a COL-1).

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/Fet	Feo/Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/Alt	Alo/Ald
COL-3	Ckb	0,13	0,02	0,06	0,12	0,09	0,03	0,02	0,30
COL-2	Btkb	0,41	0,02	0,10	0,05	0,12	0,05	0,01	0,40
	BCkb	0,34	0,02	0,10	0,05	0,07	0,04	0,01	0,53
	Ckb	0,19	0,01	0,06	0,07	0,09	0,03	0,01	0,30
COL-1	Btkb	0,37	0,02	0,09	0,04	0,12	0,04	0,01	0,32
	BCkb	0,16	0,01	0,05	0,08	0,12	0,04	0,02	0,32
	Ckb	0,12	0,01	0,05	0,09	0,12	0,02	0,02	0,16

## • Sector de Almanjáyar (ALM)

### 1. Macromorfología

En este apartado se recoge la descripción macromorfológica de cada perfil, así como las características generales del área donde se encuentran situados; estas últimas son comunes a todos los perfiles por tratarse de una serie de suelos enterrados formados sobre depósitos de similar litología.

**Localidad:** Granada.

**Situación:** Polígono del Almanjáyar.

**Coordenadas U.T.M.:** 445625/4117525/Huso 30

**Altitud:** 699 m.

**Pendiente:** Suavemente inclinado.

**Posición Fisiográfica:** Vega alta.

**Vegetación:** Matorral xérico mediterráneo.

**Material Original:** Sedimentos aluviales limo-arcillosos carbonatados.

**Condiciones de drenaje:** Moderadamente bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica laminar.

**Influencia humana:** No.

### Perfil ALM-3

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Bwk1b	0-27	Color pardo brillante (7,5YR 6/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares con tendencia prismática. Algunas manchas pirolusíticas. Calcáreo. Pocos nódulos blanquecinos de carbonato. Con algunas grietas rellenas de material de arriba. Restos de antiguas raíces. Pocas gravas. Límite gradual.
Bwk2b	27-40	Color pardo brillante (7,5YR 6/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares con tendencia prismática. Abundantes manchas pirolusíticas. Calcáreo. Nódulos blanquecinos de carbonato más abundantes que en el horizonte superior. Pocas gravas. Límite neto.

---

BCKb	40-54	Color pardo brillante (7,5YR 6/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura en bloques angulares. Muy pocas manchas pirolusíticas. Calcáreo. Muy pocas raíces. Pocas gravas. Límite neto.
Ckb	>54	Color pardo muy pálido (10YR 7/3) en seco y pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Calcáreo. Pocas gravas.

---

**Clasificación:** Calcisol háplico (FAO, 1998); Calcixerept típico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil ALM-2

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btk1b	0-20	Color pardo brillante (7,5YR 6/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques subangulares finos con tendencia prismática. Abundantes cútanos de arcilla, brillantes en todas las caras de agregados. Calcáreo. Fuerte agrietamiento, con embolsamientos del horizonte C del perfil superior en las grietas. La masa del suelo está descarbonatada pero hay abundantes nódulos de carbonato, siendo las grietas las zonas más carbonatadas. Manchas pirolusíticas en la parte inferior del horizonte. Signos de hidromorfía. Frecuentes restos de raíces muertas. Pocas gravas. Límite gradual.
Btk2b	20-63	Color pardo rojizo (5YR 5/4) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques subangulares. Abundantes superficies de presión en las caras de los agregados, incluso con formación de estrías. Calcáreo. Frecuentes grietas rellenas de material carbonatado de textura limosa procedente del horizonte C del perfil superior. Escasas manchas pirolusíticas. Abundantes manchas negruzcas de raíces muertas. Pocas gravas. Límite gradual.
Btk3b	63-80	Color pardo rojizo (5YR 4/4) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques subangulares. Desaparece el agrietamiento. Calcáreo. Frecuentes manchas pirolusíticas. Escasas manchas de raíces. Pocas gravas. Límite difuso.

---

BCKb	80-95	Color pardo rojizo brillante (5YR 6/4) en seco y pardo rojizo (5YR 5/4) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura en bloques angulares. Calcáreo. Manchas pirolusíticas menos abundantes que en el horizonte superior. Calcáreo. Pocas gravas.
Ckb	>95	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Calcáreo. Pocas gravas.

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil ALM-1

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btk1b	0-27	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares medianos con tendencia a formar prismas medianos. Calcáreo. Con carbonatos en forma de nódulos y en grietas. Abundantes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Sin raíces. Pocas gravas. Límite plano y difuso.
Btk2b	27-50	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares medianos con tendencia a formar prismas medianos. Calcáreo. Con carbonatos en forma de nódulos y en grietas. Abundantes manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Sin raíces. Pocas gravas. Límite plano y neto.
BCKb	50-69	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (7,5YR 6/6). Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares a subangulares. Calcáreo, con algunos nódulos de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas recubriendo las caras de los agregados. Pocas gravas finas subredondeadas. Límite plano y gradual.
Ckb	>69	Color pardo muy pálido (10YR 8/3) en seco y pardo amarillento brillante (10YR 6/4). Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Calcáreo. Pocas gravas.

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

2. Datos analíticos

Tabla A.13. Análisis granulométrico de los suelos del sector de Almanjáyar (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
ALM-3	Bwk1b	3,1	7,3	7,7	38,4	46,1	46,6	1,7	1,2	0,9	1,4	1,0	1,1
	Bwk2b	8,2	9,3	7,3	40,8	48,1	42,6	1,2	1,6	1,5	2,5	1,2	1,3
	BCkb	9,2	9,0	9,7	42,3	52,0	39,0	0,7	0,8	1,1	3,1	1,4	1,9
	Ckb	4,9	17,7	15,0	36,9	51,9	30,4	0,3	0,6	2,4	8,3	3,6	2,5
ALM-2	Btk1b	3,3	14,7	12,4	32,4	44,8	40,5	0,9	1,3	1,8	5,0	2,9	2,8
	Btk2b	2,6	12,3	9,3	24,7	34,0	53,7	1,8	1,9	1,8	3,4	1,6	1,8
	Btk3b	5,7	11,1	8,8	27,7	36,5	52,4	0,9	1,4	1,4	3,4	1,6	2,4
	BCkb	14,5	11,9	9,6	42,8	52,4	35,7	2,2	2,0	1,6	2,7	1,4	2,0
	Ckb	3,6	3,0	7,7	50,0	57,7	39,3	0,3	0,3	0,4	0,8	0,6	0,6
ALM-1	Btk1b	2,2	18,6	10,9	19,9	30,8	50,6	1,6	2,5	3,5	6,5	3,2	1,3
	Btk2b	5,1	17,6	10,0	27,8	37,8	44,6	1,7	2,3	2,6	5,4	2,7	2,9
	BCkb	10,9	12,3	8,6	37,4	46,0	41,7	1,2	1,3	1,5	3,6	2,1	2,6
	Ckb	6,0	8,1	11,3	51,3	62,6	29,3	1,2	0,9	0,5	2,0	1,3	2,2

Tabla A.14. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos del sector de Almanjáyar.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
ALM-3	Bwk1b	8,3	0,15	24,8	1,85	0,28	0,14	0,47	25,00	7,70	13,22	100
	Bwk2b	8,4	0,20	33,5	1,87	0,30	0,16	0,40	33,20	7,05	10,77	100
	BCKb	8,6	0,25	43,0	1,91	0,33	0,52	0,22	32,00	4,65	14,20	100
	Ckb	8,7	0,10	40,7	1,92	0,37	0,12	0,22	33,40	5,05	7,34	100
ALM-2	Btk1b	8,5	0,14	9,0	1,78	0,30	0,10	0,51	18,50	6,73	15,67	100
	Btk2b	8,2	0,23	5,0	1,85	0,82	0,14	0,69	18,50	9,30	17,63	100
	Btk3b	8,3	0,15	2,0	1,88	0,52	0,14	0,69	18,70	9,21	23,01	100
	BCKb	8,6	0,23	36,7	1,90	0,30	0,10	0,45	27,40	6,33	12,73	100
	Ckb	8,6	0,21	41,7	1,75	0,32	0,08	0,38	27,90	6,65	12,73	100
ALM-1	Btk1b	7,9	0,14	4,7	1,83	3,21	0,14	0,71	22,60	5,61	14,69	100
	Btk2b	8,2	0,17	5,3	1,86	1,34	0,18	0,80	18,50	8,81	16,16	100
	BCKb	8,5	0,07	36,0	1,98	0,60	0,12	0,54	31,20	6,73	11,75	100
	Ckb	8,8	0,13	59,7	1,79	0,60	0,10	0,25	28,10	4,65	12,73	100

Tabla A.15. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos del sector de Almanjáyar.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
ALM-3	Bwk1b	42,28	15,58	5,75	0,08	2,98	13,00	0,53	2,69	0,65	0,06	149,3
	Bwk2b	37,64	13,50	4,98	0,06	3,31	17,38	0,42	2,36	0,57	0,06	140,3
	BCKb	32,94	11,41	4,20	0,05	3,76	21,63	0,44	1,96	0,47	0,07	128,2
	Ckb	36,77	10,03	3,79	0,05	4,16	19,00	0,57	1,82	0,50	0,08	149,0
ALM-2	Btk1b	57,00	15,62	5,78	0,12	2,67	5,01	0,67	2,80	0,85	0,10	253,9
	Btk2b	55,91	18,54	6,94	0,11	2,61	2,96	0,51	3,11	0,83	0,06	219,9
	Btk3b	57,00	19,08	7,10	0,10	2,42	1,82	0,53	3,18	0,88	0,06	219,9
	BCKb	36,19	12,76	4,83	0,06	3,65	18,65	0,44	2,15	0,50	0,09	141,0
	Ckb	32,64	12,29	4,42	0,05	5,30	19,12	0,48	2,06	0,49	0,09	113,2
ALM-1	Btk1b	57,98	15,53	6,24	0,10	2,08	3,18	1,09	2,81	0,76	0,08	231,4
	Btk2b	57,78	16,84	6,65	0,08	2,21	3,84	0,49	2,86	0,74	0,07	233,3
	BCKb	37,21	11,82	4,60	0,05	2,44	19,99	0,39	1,93	0,51	0,06	152,7
	Ckb	24,13	7,74	2,96	0,02	3,64	29,99	0,28	1,26	0,32	0,07	96,9

Tabla A.16. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos del sector de Almanjáyar.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
ALM-3	Bwk1b	0,488	0,016	0,085	0,032	0,094	0,057	0,006	0,600
	Bwk2b	0,375	0,010	0,075	0,027	0,071	0,038	0,005	0,533
	BCKb	0,263	0,008	0,063	0,030	0,094	0,038	0,008	0,400
	Ckb	0,132	0,009	0,035	0,065	0,094	0,038	0,009	0,400
ALM-2	Btk1b	0,263	0,032	0,045	0,122	0,094	0,057	0,006	0,600
	Btk2b	0,375	0,051	0,054	0,137	0,094	0,085	0,005	0,900
	Btk3b	0,338	0,043	0,048	0,127	0,094	0,085	0,005	0,900
	BCKb	0,113	0,014	0,023	0,127	0,094	0,047	0,007	0,500
	Ckb	0,166	0,008	0,038	0,047	0,094	0,047	0,008	0,500
ALM-1	Btk1b	0,413	0,050	0,066	0,121	0,118	0,085	0,008	0,720
	Btk2b	0,413	0,045	0,062	0,109	0,071	0,076	0,004	1,067
	BCKb	0,300	0,019	0,065	0,062	0,071	0,047	0,006	0,667
	Ckb	0,141	0,004	0,048	0,030	0,047	0,047	0,006	1,000

## • Sector de Haza Grande (HG)

### 1. Macromorfología

En este apartado se recoge la descripción macromorfológica de los dos perfiles estudiados en este sector, así como las características generales del área donde se encuentran situados, comunes a los dos. Ambos suelos se encuentran enterrados por un depósito de más de 10 m de espesor, por lo que se han obviado algunas características de la zona que no influyen en ellos.

**Localidad:** Haza Grande (Granada).

**Coordenadas U.T.M.:** 448275/4116800/Huso 30.

**Altitud:** 939 m.

**Pendiente:** Llano.

**Posición Fisiográfica:** Bajo el abanico aluvial donde se deposita la Formación Alhambra.

**Material Original:** Sedimentos limosos carbonatados.

**Salinidad:** Sin sales.

**Influencia humana:** No.

---

### Perfil HG-2

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btk1b	0-43	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares. Ligeramente calcáreo, con escasos nódulos de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas. Abundantes superficies de presión con estriamiento. Grietas rellenas de material de arriba. Sin gravas.
Btk2b	43-50	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares. Calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas. Abundantes superficies de presión con estriamiento. Grietas rellenas de material de arriba. Pocas gravas.
BCkb	50-60	Color pardo brillante (7,5YR 6/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato. Frecuentes gravas.

---

Ckb	>60	Color pardo muy pálido (10YR 7/3) en seco pardo (10YR 5/3) en húmedo. Textura franca. Estructura masiva. Calcáreo. Frecuentes gravas.
-----	-----	---

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1999); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil HG-1

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btb	0-15	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillo limosa. Estructura en bloques angulares. Muy ligeramente calcáreo, con muy escasos nódulos de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas. Abundantes superficies de presión con estriamiento. Grietas rellenas de material de arriba. Pocas gravas.
Btkb	15-22	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares. Calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato. Frecuentes manchas pirolusíticas. Abundantes superficies de presión con estriamiento. Grietas rellenas de material de arriba. Pocas gravas.
BCkb	22-30	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura masiva. Calcáreo, con abundantes nódulos de carbonato. Frecuentes gravas.
Ckb	>30	Color pardo muy pálido (10YR 7/3) en seco y pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Calcáreo. Frecuentes gravas.

**Clasificación:** Calcisol lúvico (FAO, 1999); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

## 2. Datos analíticos

Tabla A.17. Análisis granulométrico de los suelos del sector de Haza Grande (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
HG-2	Btk1b	0,3	9,6	8,8	28,2	37,0	53,4	0,9	0,9	1,2	2,9	2,2	1,5
	Btk2b	13,0	14,3	9,2	31,8	41,0	44,7	2,4	2,0	1,5	3,8	2,1	2,5
	BCkb	23,9	21,4	10,7	41,7	52,4	26,2	3,2	2,9	2,5	6,0	3,2	3,6
	Ckb	35,6	30,3	18,7	29,9	48,6	21,1	0,6	0,8	1,3	9,9	9,9	7,8
HG-1	Btb	4,0	15,0	10,4	30,4	40,8	44,2	1,1	1,5	1,6	4,8	2,5	3,5
	Btkb	7,3	11,6	8,2	31,4	39,6	48,8	1,8	1,3	1,1	3,2	1,8	2,4
	BCkb	40,0	11,2	8,3	43,6	51,9	36,9	0,9	1,2	1,3	3,3	1,8	2,7
	Ckb	40,4	26,0	19,6	30,4	50,0	24,0	0,8	1,1	1,7	10,1	6,2	6,1

Tabla A.18. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos del sector de Haza Grande.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )				V (%)	
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>		
HG-2	Btk1b	8,4	0,22	1,3	1,99	1,17	0,22	0,58	11,10	18,7	24,00	100
	Btk2b	8,5	0,15	11,1	1,95	1,26	0,22	0,49	22,10	17,0	17,14	100
	BCkb	8,7	0,10	32,3	1,82	1,14	0,16	0,21	19,50	9,3	11,67	100
	Ckb	8,6	0,10	30,9	1,94	1,40	0,16	0,13	24,00	7,8	14,10	100
HG-1	Btb	8,7	0,27	0,1	1,90	0,57	0,16	0,42	15,50	15,3	15,56	100
	Btkb	8,6	0,29	8,3	1,88	0,92	0,18	0,42	18,20	16,3	17,51	100
	BCkb	8,8	0,19	39,6	1,98	0,57	0,14	0,23	25,50	10,1	10,70	100
	Ckb	8,6	0,25	33,6	1,99	nd	0,16	0,15	24,70	8,2	8,27	100

Tabla A.19. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos del sector de Haza Grande.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
HG-2	Btk1b	57,92	19,23	7,38	0,13	2,63	0,83	0,55	3,29	0,89	0,09	222,4
	Btk2b	56,46	19,07	7,27	0,11	2,94	2,06	0,43	3,19	0,86	0,10	194,8
	BCKb	39,92	12,68	4,85	0,07	2,96	17,47	0,34	2,13	0,56	0,11	156,7
	Ckb	45,12	10,76	4,33	0,06	3,56	15,41	0,38	1,80	0,63	0,10	226,3
HG-1	Btb	55,16	17,40	6,60	0,09	2,84	4,38	0,41	2,94	0,81	0,08	223,3
	Btkb	53,14	17,72	6,68	0,09	2,83	5,23	0,32	2,95	0,78	0,08	199,4
	BCKb	34,18	11,81	4,52	0,05	2,84	21,73	0,29	1,99	0,51	0,09	135,4
	Ckb	42,88	10,55	4,32	0,07	4,15	15,95	0,25	1,75	0,56	0,10	212,6

Tabla A.20. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos del sector de Haza Grande.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
HG-2	Btk1b	0,338	0,045	0,046	0,133	0,071	0,076	0,004	1,067
	Btk2b	0,263	0,039	0,036	0,150	0,071	0,076	0,004	1,067
	BCKb	0,154	0,028	0,032	0,181	0,071	0,057	0,006	0,800
	Ckb	0,111	0,014	0,026	0,123	0,071	0,019	0,007	0,267
HG-1	Btb	0,300	0,034	0,045	0,112	0,094	0,047	0,005	0,500
	Btkb	0,338	0,036	0,051	0,106	0,094	0,047	0,005	0,500
	BCKb	0,134	0,007	0,030	0,053	0,071	0,009	0,006	0,133
	Ckb	0,080	0,014	0,019	0,178	0,094	0,019	0,009	0,200

• **Sector del LLano de la Perdiz (LLP)**

**1. Macromorfología**

**Perfil LLP-1**

**Localidad:** Granada.

**Situación:** Junto al Llano de la Perdiz.

**Coordenadas U.T.M.:** 450500/4114500/H30.

**Altitud:** 1008 m.

**Pendiente:** Llano.

**Posición Fisiográfica:** Abanico aluvial en planicie.

**Vegetación:** Matorral xérico mediterráneo.

**Material Original:** Conglomerado metamórfico (Formación Alhambra).

**Condiciones de drenaje:** Moderadamente bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica laminar ligera.

**Influencia humana:** No.

**Clasificación:** Luvisol gleico crómico cutánico (FAO, 1998); Rhodoxeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

---

<b>Hor.</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Descripción macromorfológica</b>
A	0-2	Color pardo intenso (7,5YR4/6) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura migajosa, fina, de grado débil, con grandes bloques en superficie. Frecuentes gravas. Ligeramente calcáreo. Límite neto.
E	2-18	Color amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en seco y pardo fuerte (7,5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura granular (1 mm-0,5 mm) a bloques subangulares de 2 cm, mediana, de grado moderado. Abundantes raíces de todos los tamaños. Frecuentes gravas. No calcáreo. Límite neto y ligeramente ondulado.
Btg1	18-50	Color rojo (10R 4/6) en seco y rojo (10R 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares, ocasionalmente de gran tamaño (6 x 4 cm), mediana, de grado moderado. Muy abundantes cútanos de arcilla y slickensides recubriendo los agregados.

---

---

		Algunos fragmentos de roca endurecidos y resistentes a la meteorización. Escasa presencia de pirolusita, que pone de manifiesto una incipiente hidromorfía. Frecuentes raíces finas a muy gruesas. Frecuentes gravas. No calcáreo. Límite neto y plano.
Btg2	50-85	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo, abigarrado. Textura arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares (2 x 2 cm - 8 x 5 cm), gruesa, moderada. Muy abundantes cóntanes de arcilla y slickensides recubriendo los agregados. Algunos fragmentos de roca muy alterados. Escasa presencia de pirolusita, que pone de manifiesto una incipiente hidromorfía. Escasas a frecuentes raíces medianas, gruesas y muy gruesas. Frecuentes gravas. No calcáreo. Límite difuso y plano.
Btg3	85-121	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo, muy abigarrado. Textura franco arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares grandes (9 x 7 cm), gruesa, moderada. Frecuentes cóntanes de arcilla. Abundantes manchas pirolusíticas con manchas grises entre agregados. Abundantes fragmentos de roca muy alterados. Frecuentes gravas. No calcáreo. Escasas raíces gruesas y muy gruesas. Límite difuso y plano.
Btg4	121-176	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo. Textura franco arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Escasos cóntanes de arcilla. Manchas pirolusíticas entre las láminas de esquisto, con manchas de color gris. Muy abundantes fragmentos de roca, de esquistos muy alterados que conservan la estructura de roca. Frecuentes gravas. No calcáreo.

---

## Perfil LLP-2

**Localidad:** Granada.

**Situación:** Junto a la Silla del Moro.

**Coordenadas U.T.M.:** 448775/4114700/Huso 30.

**Altitud:** 899 m.

**Pendiente:** Inclinada.

**Posición Fisiográfica:** Ladera.

**Vegetación:** Matorral xérico mediterráneo.

**Material Original:** Conglomerado metamórfico (Formación Alhambra).

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica laminar moderada.

**Influencia humana:** No.

**Clasificación:** Luvisol cálcico crómico cutánico (FAO, 1998); Palexeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
A	0-15	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura migajosa, fina, débil. Calcáreo. Abundantes gravas.
Bt	15-80	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares pequeños. Abundantes cútanos de arcilla. No calcáreo. Muy abundantes gravas. Límite neto.
Bck	80-101	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/8) en húmedo, abigarrado. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo. Muy abundantes gravas cementadas por carbonato. Límite gradual.
Ckm	101-171	Color rosa (7,5YR 8/4) en seco y rojo pálido (10R 7/4) en húmedo, abigarrado. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo y cementado. Abundantes gravas cementadas por carbonato.

---

## 2. Datos analíticos

Tabla A.21. Análisis granulométrico de los suelos del Llano de la Perdiz (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Hor.	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
LLP-1	A	32,7	74,4	7,7	6,7	14,4	11,1	1,3	6,6	12,7	37,4	14,1	2,3
	E	38,0	66,2	10,8	10,5	21,3	12,5	5,8	10,1	10,3	22,8	8,8	8,5
	Bt1g	31,7	32,5	4,9	8,4	13,3	54,2	5,7	6,2	5,5	8,4	3,3	3,4
	Bt2g	35,0	45,3	5,2	10,4	15,6	39,1	13,3	11,4	7,1	9,0	3,5	1,0
	Bt3g	46,4	53,2	6,8	8,7	15,5	31,3	11,2	14,1	9,7	12,2	3,7	2,4
	Bt4g	48,8	59,9	6,8	11,2	18,0	22,1	9,6	15,9	13,3	14,9	4,1	2,1
LLP-2	A	42,3	60,3	10,3	12,5	22,8	16,8	11,5	13,7	10,6	13,4	5,0	6,1
	Bt	39,6	49,8	5,1	6,2	11,3	38,8	20,0	12,8	6,3	6,2	2,3	2,3
	Bck	49,2	74,0	5,5	9,4	14,9	11,1	21,7	17,5	13,9	14,6	4,3	2,0
	Ckm	53,4	74,4	6,6	11,9	18,5	7,1	25,2	19,2	11,3	13,5	4,0	1,3

Tabla A.22. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos del Llano de la Perdiz.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
LLP-1	A	7,4	3,77	1,10	0,93	0,51	0,06	0,26	14,00	2,25	24,12	68,7
	E	7,5	1,18	0,61	1,70	0,41	0,02	0,15	8,00	1,67	12,99	75,7
	Bt1g	6,6	0,65	0,45	1,72	0,19	0,06	0,15	8,70	3,67	16,23	77,8
	Bt2g	6,5	0,35	0,56	1,74	0,30	0,12	0,11	13,00	5,25	14,38	100,0
	Bt3g	6,7	0,26	0,68	1,87	0,94	0,15	0,11	9,70	4,42	12,99	100,0
	Bt4g	6,6	0,28	0,90	1,97	0,34	0,21	0,11	10,70	4,58	12,06	100,0
LLP-2	A	8,2	1,48	2,1	nd	0,52	0,04	0,29	9,00	1,42	11,13	96,6
	Bt	7,8	0,56	0,5	nd	1,02	0,06	0,29	12,50	2,42	16,70	91,5
	Bck	8,1	0,29	28,3	nd	2,34	0,06	0,07	21,00	0,75	6,96	100,0
	Ckm	8,7	0,31	36,0	2,19	0,83	0,21	0,04	27,50	0,78	6,03	100,0

Tabla A.23. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos del Llano de la Perdiz.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
LLP-1	A	78,12	7,41	4,10	0,07	0,57	1,15	0,77	0,69	0,83	0,05	272,5
	E	76,79	9,62	4,86	0,07	0,55	0,97	0,89	1,00	1,00	0,04	326,7
	Bt1g	57,30	20,37	9,65	0,06	0,72	0,57	0,55	1,62	0,72	0,05	166,4
	Bt2g	62,70	17,33	8,61	0,07	0,75	0,71	0,65	1,48	0,73	0,03	169,7
	Bt3g	62,96	17,16	8,49	0,08	0,95	1,04	0,80	1,87	0,74	0,04	169,1
	Bt4g	65,46	16,02	8,11	0,12	0,99	0,85	0,86	1,66	0,81	0,04	209,5
LLP-2	A	78,12	7,41	4,10	0,07	0,57	1,15	0,77	0,69	0,83	0,05	280,7
	Bt	63,07	17,07	9,01	0,11	0,97	0,80	0,60	1,81	0,70	0,10	175,7
	Bck	47,10	9,88	5,84	0,14	1,44	16,78	0,60	1,24	0,46	0,07	128,0
	Ckm	40,52	7,09	4,65	0,11	2,22	21,85	0,51	0,90	0,38	0,07	107,3

Tabla A.24. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos del Llano de la Perdiz.

Perfil	Horizonte	Fed	Feo	Fed/	Feo/	Ald	Alo	Ald/	Alo/
		(%)	(%)	Fet	Fed	(%)	(%)	Alt	Ald
LLP-1	A	1,02	0,06	0,25	0,06	0,20	0,07	0,027	0,35
	E	0,97	0,06	0,20	0,06	0,09	0,07	0,009	0,77
	Bt1g	3,00	0,11	0,31	0,04	0,21	0,15	0,010	0,71
	Bt2g	2,82	0,10	0,33	0,03	0,21	0,13	0,012	0,62
	Bt3g	2,59	0,11	0,30	0,04	0,13	0,07	0,007	0,54
	Bt4g	1,57	0,07	0,19	0,04	0,11	0,07	0,007	0,64
LLP-2	A	1,99	0,08	0,48	0,04	0,13	0,07	0,017	0,54
	Bt	3,11	0,10	0,34	0,03	0,22	0,17	0,013	0,77
	Bck	1,01	0,04	0,17	0,04	0,07	0,07	0,007	1,00
	Ckm	0,74	0,01	0,16	0,01	0,07	0,04	0,010	0,57

## • Sector de Otura (OT)

### 1. Macromorfología

A continuación, se muestran las características generales de la zona donde se encuentran situados los suelos enterrados OT-3, OT-2 y OT-1, así como la descripción macromorfológica de cada perfil. Las características más superficiales hacen referencia al suelo situado a menor profundidad (OT-3).

**Localidad:** Otura (Granada).

**Situación:** Junto a la carretera de entrada a Otura desde Dílar.

**Coordenadas U.T.M.:** 444575/4104625/Huso 30.

**Altitud:** 825 m.

**Pendiente:** Inclinada.

**Posición Fisiográfica:** Abanico aluvial.

**Vegetación:** Matorral xérico mediterráneo.

**Material Original:** Conglomerado carbonatado.

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Moderadamente pedregoso.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica moderada.

**Influencia humana:** No.

### Perfil OT-3

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
A	0-3	Color pardo rojizo (5YR 5/4) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Textura franca. Estructura granular a pequeños bloques subangulares y angulares. Rico en fragmentos de roca de restos del conglomerado. Calcáreo. Abundantes raíces finas y muy finas. Frecuentes gravas. Límite neto y plano.
Btk1b	3-15	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franca. Estructura en bloques angulares más pequeños y menos abundantes que los del horizonte inferior. Calcáreo. Abundantes nódulos pequeños de carbonato. Muchas raíces medianas, finas y muy finas. Pocas gravas. Límite gradual.

---

Btk2b	15-36	Color rojo amarillento (5YR 4/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franca arcillosa. Estructura en bloques angulares. Calcáreo. Con nódulos de carbonato mucho menos abundantes y más pequeños que en el horizonte inferior. Manchas negras de pirolusita. Pocas gravas. Límite gradual.
BCtkb	36-63	Color pardo rojizo (5YR 5/3) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franca arcillosa. Estructura en bloques angulares gruesos. Calcáreo. Con nódulos grandes de carbonato, irregulares, duros y blandos, como masas alargadas (de hasta 10 cm largo x 4 cm ancho) entremezcladas con material arcilloso. Estos nódulos presentan en su centro un proceso de recristalización y endurecimiento. Pocas gravas. Límite
Ckmb	63-78	Color rosa (5YR 8/3) en seco y amarillo rojizo (5YR 7/6) en húmedo. Textura franco limosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo y cementado. Abundantes gravas.

---

**Clasificación:** Calcisol endopétrico lúvico (FAO, 1998); Palexeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

#### Perfil OT-2

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	0-39	Color rojo (2,5YR 4/6) en seco y rojo (2,5YR 4/8) en húmedo. Textura franca arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares. Calcáreo, con pequeñas formaciones de nódulos y micelios de carbonatos. Frecuentes gravas. Límite brusco e inclinado.
Ckb	39-43	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franca. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo y parcialmente cementado. Abundantes gravas.

---

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Haploxeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

## Perfil OT-1

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btkb	0-65	Color rojo débil (10R 4/4) en seco y rojo (10R 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques subangulares pequeños. Calcáreo. Muy rico en nódulos de carbonato de color rosáceo, mayormente cristalizados, probablemente posteriores a la formación del horizonte. Frecuentes gravas.
Ck1b	65-84	Color rosa (5YR 7/4) en seco y amarillo rojizo (5YR 6/6) en húmedo. Textura franca. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo. Con acumulaciones de carbonato procedentes de lavado. Abundantes gravas.
Ck2b	84-100	Color blanco rosáceo (7,5YR 8/2) en seco y rosa (7,5YR 7/4) en húmedo. Textura franca limosa. Estructura masiva. Conglomerado poco alterado, Fuertemente calcáreo y parcialmente cementado en algunas zonas. Abundantes gravas.

**Clasificación:** Calcisol lúvico hipercálcico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

A continuación, se muestran las características generales de la zona donde se encuentran situados los suelos enterrados OT-5, y OT-4, así como la descripción macromorfológica de cada perfil.

**Localidad:** Otura (Granada).

**Situación:** En la carretera a la salida de Otura en dirección a la Malahá.

**Coordenadas U.T.M.:** 443550/4105100/Huso 30.

**Altitud:** 798 m.

**Pendiente:** Inclínada.

**Posición Fisiográfica:** Ladera en zona alomada.

**Vegetación:** Cereales.

**Material Original:** Sedimentos margosos.

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica moderada.

**Influencia humana:** Cultivo.

---

#### Perfil OT-5

---

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btb	31-60	Color pardo rojizo oscuro (2,5YR 3/4) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura prismática, con frecuentes prismas de tamaño 7 cm x 3 cm. No calcáreo. Escasas manchas pirolusíticas. Manchas negras alargadas de antiguas raíces. Frecuentes gravas de pequeño tamaño y naturaleza cuarcítica y esquistosa.
BCKb	60-70	Color amarillo rojizo (5YR 7/6) en seco y rojo amarillento (5YR 5/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura masiva con tendencia a estructura en bloques subangulares. Calcáreo. Con acumulaciones laterales laminares de carbonato. Con manchas pirolusíticas en las caras de los agregados. Frecuentes gravas y fragmentos de roca.
Ckmb	70-92	Color gris brillante (10YR 7/2) en seco y pardo pálido (10YR 6/3) en húmedo. Textura franca. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo, cementado y endurecido, con laminaciones laterales de

---

---

carbonato. Con bolsas pequeñas de material del horizonte superior. Muy abundantes gravas.

---

**Clasificación:** Luvisol hipercálcico rhódico (FAO, 1998); Rhodoxeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

#### Perfil OT-4

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btb	72-108	Color pardo rojizo (2,5YR 4/4) en seco y rojo (2,5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura prismática, con grandes prismas (15-20 cm x 7-8 cm) que se rompen en prismas más pequeños (6 cm x 5-3 cm). Muy pocas gravas. Abundantes manchas pirolusíticas. No calcáreo.
BCKb	108-135	Color amarillo rojizo (5YR 6/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques angulares a subangulares de tamaño variable (4 cm x 2,5 cm-1 cm x 1 cm). Calcáreo. Con nódulos de carbonato irregulares, más o menos redondeados. Con manchas pirolusíticas. Frecuentes gravas.
Ckb	135-168	Color rosa (7,5YR 7/4) en seco y pardo (7,5YR 5/4) en húmedo. Textura franca. Estructura en bloques angulares, con agregados duros. Calcáreo. Con nódulos de carbonato más irregulares que el horizonte superior. Sin manchas pirolusíticas. Restos de antiguas raíces. Frecuentes gravas.

---

**Clasificación:** Luvisol orthicálcico crómico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

2. Datos analíticos

Tabla A.25. Análisis granulométrico de los suelos OT-1, OT-2 y OT-3 (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
OT-3	A	23,5	43,3	10,2	24,7	34,9	21,8	5,6	8,4	7,6	12,8	4,4	4,4
	Btk1b	9,9	45,4	11,1	22,4	33,5	21,1	4,5	7,3	8,3	14,2	5,1	6,0
	Btk2b	6,0	41,0	9,7	13,3	23,0	36,0	2,6	6,1	7,6	14,6	5,3	4,9
	BCtkb	14,3	37,8	11,2	17,8	29,0	33,2	4,0	6,1	6,8	11,8	4,5	4,6
	Ckmb	63,4	32,0	6,4	49,0	55,4	12,6	5,4	8,0	6,3	7,6	2,4	2,4
OT-2	Btkb	17,8	44,8	7,0	15,4	22,4	32,8	4,8	7,7	10,0	16,0	4,4	1,9
	Ckb	58,1	35,7	9,8	35,8	45,6	18,7	5,9	7,3	6,5	10,0	3,0	3,1
OT-1	Btkb	26,8	34,8	4,7	11,6	16,3	48,9	7,1	7,9	6,5	8,4	2,8	2,1
	Ck1b	61,0	37,0	13,7	29,6	43,3	19,7	6,1	8,3	6,6	9,3	3,4	3,3
	Ck2b	57,9	32,6	15,4	38,9	54,3	13,1	2,3	6,1	5,6	10,9	4,8	2,9

Tabla A.26. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos OT-1, OT-2 y OT-3.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
OT-3	A	8,6	1,39	33,5	nd	0,69	0,02	0,29	19,71	1,30	11,60	100
	Btk1b	8,6	0,52	14,6	nd	0,50	0,04	0,04	10,34	0,40	10,28	100
	Btk2b	8,7	0,29	6,6	nd	0,33	0,08	0,20	15,38	2,16	11,26	100
	BCtkb	8,7	0,23	18,6	nd	0,27	0,10	0,16	23,80	2,48	11,75	100
	Ckmb	9,1	0,12	72,4	nd	0,26	0,06	0,04	28,61	1,12	4,90	100
OT-2	Btkb	8,7	0,35	10,3	nd	0,45	0,07	0,20	11,73	5,93	12,46	100
	Ckb	8,9	0,17	54,4	nd	0,62	0,07	0,11	19,71	3,57	7,30	100
OT-1	Btkb	8,7	0,41	13,6	nd	0,29	0,24	0,31	25,00	3,29	16,16	100
	Ck1b	8,9	0,35	53,4	nd	0,47	0,10	0,09	30,77	2,00	5,39	100
	Ck2b	9,1	0,35	67,3	nd	0,63	0,22	0,04	29,81	2,00	4,41	100

Tabla A.27. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos OT-1, OT-2 y OT-3.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
OT-3	A	44,67	8,60	4,04	0,05	1,96	18,57	0,70	1,23	0,59	0,07	195,9
	Btk1b	59,99	11,46	5,25	0,08	1,10	8,88	0,39	1,67	0,84	0,05	274,5
	Btk2b	64,65	14,28	6,02	0,07	0,98	4,76	0,53	1,88	0,81	0,05	258,0
	BCtkb	54,45	12,34	5,47	0,05	1,12	11,34	0,37	1,75	0,70	0,04	212,2
	Ckmb	17,74	3,84	1,83	0,01	0,80	40,74	0,34	0,55	0,19	0,02	79,1
OT-2	Btkb	60,58	13,29	6,60	0,07	1,14	6,49	0,39	1,80	0,85	0,05	242,0
	Ckb	29,15	6,91	3,36	0,03	1,26	30,76	0,21	0,90	0,34	0,05	109,0
OT-1	Btkb	49,93	16,92	7,85	0,10	1,13	9,09	0,97	1,83	0,58	0,09	133,9
	Ck1b	19,94	5,88	2,47	0,01	1,53	36,87	0,22	0,68	0,23	0,04	64,6
	Ck2b	18,73	4,58	1,90	0,01	1,40	38,91	0,15	0,57	0,24	0,02	78,2

Tabla A.28. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos OT-1, OT-2 y OT-3.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet (%)	Feo/ Fed (%)	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt (%)	Alo/ Ald (%)
OT-3	A	0,30	0,03	0,07	0,09	0,024	0,066	0,003	2,80
	Btk1b	0,45	0,05	0,09	0,10	0,047	0,076	0,004	1,60
	Btk2b	0,83	0,06	0,14	0,07	0,071	0,085	0,005	1,20
	BCtkb	0,53	0,04	0,10	0,07	0,024	0,057	0,002	2,40
	Ckmb	0,11	0,01	0,06	0,07	0,024	0,028	0,006	1,20
OT-2	Btkb	2,14	0,05	0,32	0,02	0,118	0,076	0,009	0,64
	Ckb	0,20	0,03	0,06	0,15	0,000	0,038	0,000	0,00
OT-1	Btkb	1,05	0,07	0,13	0,07	0,071	0,123	0,004	1,73
	Ck1b	0,20	0,01	0,08	0,05	0,047	0,038	0,008	0,80
	Ck2b	0,11	0,01	0,06	0,05	0,024	0,028	0,005	1,20

Tabla A.29. Análisis granulométrico de los suelos OT-4 y OT-5 (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
OT-5	Btb	22,6	35,0	6,3	10,3	16,6	48,4	8,4	6,6	5,0	8,8	3,3	2,8
	BCkb	44,7	37,6	7,9	22,6	30,5	31,9	4,0	6,1	7,6	12,3	3,8	3,8
	Ckmb	82,1	41,9	9,7	28,9	38,6	19,5	6,0	7,3	7,0	12,7	4,5	4,5
OT-4	Btb	3,9	24,3	11,1	18,6	29,7	46,0	1,4	2,6	3,4	8,4	4,2	4,4
	BCkb	35,3	31,2	8,4	29,6	38,0	30,8	2,7	4,9	6,1	9,7	3,8	4,0
	Ckb	35,9	34,3	10,9	29,8	40,7	25,0	3,7	4,6	5,3	11,1	4,6	5,0

Tabla A.30. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos OT-4 y OT-5.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
OT-5	Btb	8,8	0,12	0,3	nd	0,26	0,10	0,49	9,13	9,38	15,67	100
	BCkb	9,0	0,12	38,0	nd	nd	0,08	0,31	21,15	7,69	9,79	100
	Ckmb	9,1	0,12	56,5	nd	nd	0,08	0,11	25,96	3,61	1,47	100
OT-4	Btb	8,7	0,12	0,6	nd	0,51	0,12	0,42	7,45	14,10	15,67	100
	BCkb	8,9	0,12	42,0	nd	nd	0,08	0,22	19,47	8,33	3,30	100
	Ckb	9,2	0,06	41,3	nd	0,73	0,10	0,11	17,31	5,93	4,90	100

Tabla A.31. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos OT-4 y OT-5.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
OT-5	Btb	65,19	16,97	7,25	0,08	1,47	0,72	0,68	2,56	0,69	0,08	193,1
	BCkb	38,65	10,20	4,52	0,04	1,89	21,06	0,67	1,51	0,42	0,06	132,1
	Ckmb	28,48	6,00	2,72	0,02	1,66	31,34	0,45	0,95	0,35	0,04	132,0
OT-4	Btb	63,50	17,47	7,10	0,09	1,70	1,11	0,53	2,93	0,87	0,07	255,7
	BCkb	35,30	10,03	4,30	0,04	1,93	23,20	1,00	1,55	0,46	0,08	139,8
	Ckb	39,33	8,31	3,57	0,03	2,36	22,44	0,91	1,34	0,51	0,05	173,8

Tabla A.32. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos OT-4 y OT-5.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
OT-5	Btb	1,09	0,05	0,15	0,05	0,094	0,094	0,006	1,00
	BCkb	0,45	0,01	0,10	0,03	0,071	0,047	0,007	0,67
	Ckmb	0,12	0,003	0,04	0,03	0,071	0,038	0,012	0,53
OT-4	Btb	0,71	0,06	0,10	0,08	0,094	0,085	0,005	0,90
	BCkb	0,30	0,02	0,07	0,05	0,071	0,038	0,007	0,53
	Ckb	0,15	0,01	0,04	0,04	0,047	0,038	0,006	0,80

• **Sector de Dúrcal (DUR)**

1. *Macromorfología*

**Perfil DUR-1**

**Localidad:** Término municipal de Dúrcal

**Situación:** Junto a la carretera Granada-Motril

**Coordenadas U.T.M.:** 448700/4095125/Huso 30.

**Altitud:** 786 m.

**Pendiente:** Llano.

**Posición Fisiográfica:** Abanico aluvial.

**Vegetación:** Almendros.

**Material Original:** Conglomerado metamórfico (micasquistos y cuarcitas).

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica moderada.

**Influencia humana:** Cultivo.

**Clasificación:** Luvisol cálcico rhódico (FAO, 1998); Rhodoxeralf petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

---

<b>Hor.</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Descripción macromorfológica</b>
Ap	0-10	Color pardo intenso (7,5YR 4/6) en seco. Textura arcillosa. Estructura migajosa, fina, débil. Ligeramente calcáreo. Frecuentes gravas.
Bt1	10-55	Color rojo (10R 4/6) en seco y rojo oscuro (10R 3/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura prismática (20 x 5,5-6 cm; 10 x 3,5 cm), gruesa, fuerte. Muy abundantes cútanos de arcilla. Frecuentes gravas. No calcáreo.
Bt2	55-84	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares (3 x 1,5 cm; 2 x 1 cm; 1 x 0,5 cm), mediana, moderada. Muy abundantes cútanos de arcilla. Frecuentes gravas medianas y gruesas (6 x 4,5 cm; 12 x 5 cm). No calcáreo.

---

Ckm	>84	Color pardo pálido (10YR 6/3) en seco y pardo (10YR 4/3) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Fuertemente calcáreo y cementado por el carbonato. Abundantes gravas.
-----	-----	--

2. Datos analíticos

Tabla A.33. Análisis granulométrico del suelo DUR-1 (1= 2-1 mm; 2= 1-0,5 mm; 3= 0,5-0,25 mm; 4= 0,25-0,1 mm; 5= 0,1-0,075; 6= 0,075-0,05).

Perfil	Hor.	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
DUR-1	Ap	33,4	31,2	nd	nd	20,6	48,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Bt1	29,8	17,3	4,5	5,8	10,3	72,4	2,3	3,1	2,8	4,6	2,2	2,4
	Bt2	36,8	26,1	6,4	10,6	17,0	56,9	6,4	5,7	3,8	5,8	2,6	1,8
	Ckm	50,9	65,0	10,2	16,0	26,2	8,8	13,6	14,4	12,2	15,1	4,6	5,0

Tabla A.34. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) del suelo DUR-1.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
DUR-1	Ap	8,5	0,55	1,2	nd	nd	0,13	0,76	7,15	7,08	15,12	100
	Bt1	8,3	0,46	1,0	1,87	1,1	0,15	0,51	13,97	6,90	17,19	100
	Bt2	8,2	0,45	0,5	1,96	1,2	0,26	0,40	10,23	5,60	16,33	100
	Ckm	8,4	0,33	30,7	2,11	nd	0,03	0,15	12,23	1,22	3,44	100

Tabla A.35. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina del suelo DUR-1.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
DUR-1	Ap	58,76	19,06	7,32	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Bt1	53,03	22,90	8,93	0,06	1,28	1,18	0,63	2,81	0,70	0,09	161,6
	Bt2	56,30	22,12	8,52	0,07	1,59	0,99	0,74	2,80	0,77	0,10	178,0
	Ckm	48,08	10,91	4,18	0,06	1,09	16,70	0,83	1,64	0,52	0,05	148,8

Tabla A.36. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en el suelo DUR-1.

Perfil	Horizonte	Fed	Feo	Fed/	Feo/	Ald	Alo	Ald/	Alo/
		(%)	(%)	Fet	Fed	(%)	(%)	Alt	Ald
DUR-1	Ap	3,22	0,07	0,44	0,02	nd	nd	nd	nd
	Bt1	4,02	0,07	0,45	0,02	0,19	0,20	0,008	1,05
	Bt2	3,16	0,04	0,37	0,01	0,14	0,09	0,006	0,60
	Ckm	0,37	0,03	0,09	0,08	0,05	0,05	0,004	1,00

• **Sector de Nigüelas (NIG)**

**1. Macromorfología**

A continuación se muestra la descripción macromorfológica de los suelos estudiados en el sector de Nigüelas, así como las características generales del área donde se encuentran situados. Estas últimas son comunes a todos los perfiles, por tratarse de una serie de suelos enterrados formados sobre depósitos de similar litología.

**Localidad:** Término municipal de Nigüelas (Granada).

**Situación:** Junto al desvío de la carretera nacional Granada-Motril que lleva a Nigüelas.

**Coordenadas U.T.M.:** 450800/4091250/Huso 30.

**Altitud:** 857 m.

**Pendiente:** Suavemente inclinado.

**Posición Fisiográfica:** Glacis.

**Vegetación:** Almendros.

**Material Original:** Conglomerado metamórfico (micasquistos y cuarcitas).

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Libres de sales.

**Erosión:** Hídrica severa.

**Influencia humana:** Cultivo.

---

**Perfil NIG-5**

---

<b>Hor.</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Descripción macromorfológica</b>
Ap	0-15	Color pardo pálido (10YR 6/3) en seco. Textura franco arenosa. Estructura en bloques subangulares, fina, débil. Calcáreo. Frecuentes gravas.
C	15-292	Color pardo amarillento claro (10YR 6/4) en seco. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Calcáreo. Frecuentes gravas.

---

**Clasificación:** Regosol calcárico (FAO, 1998); Xerorthent típico (Soil Survey Staff, 1999).

## Perfil NIG-4

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Bt1b	292-309	Color rojo amarillento (5YR 4/6) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Frecuentes cútanos de arcilla. Muy pocas raíces. Frecuentes gravas redondeadas, de 1-3 cm de diámetro, de naturaleza esquistosa y cuarcítica. Los esquistos están muy meteorizados, tienden a romperse. No calcáreo.
Bt2b	309-326	Color rojo oscuro (2,5YR 4/4) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo. Textura franco arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Frecuentes cútanos de arcilla. Muy pocas raíces. Frecuentes gravas. No calcáreo. Límite plano.
BCb	326-340	Color pardo oscuro (7,5YR 5/6) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura en bloques subangulares, mediana, débil. Sin raíces. Frecuentes gravas (1-3 cm) de naturaleza esquistosa, menos alterados y más redondeados que en los horizontes superiores. No calcáreo. Límite irregular y quebrado.
CBb	340-352	Color pardo amarillento claro (10YR 6/4) en seco y pardo (10YR 4/3) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura en bloques subangulares, fina, débil. Sin raíces. Menos alteración que en el horizonte superior. Frecuentes gravas (1-3 cm). No calcáreo. Límite irregular.
Ckb	352-442	Color gris pardo claro (2,5Y 6/2) en seco y pardo grisáceo oscuro (2,5Y 4/2) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Sin raíces. Frecuentes gravas, de hasta 7 cm de diámetro, con recubrimientos de carbonato, frecuentemente bajo las caras inferiores de las gravas. Fuertemente calcáreo, con abundantes micelios de carbonatos. Límite brusco y plano.

**Clasificación:** Luvisol crómico cutánico (FAO, 1998); Palexeralf cálcico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil NIG-3

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Bt1b	442-492	Color rojo (10R 4/6) en seco y rojo (10R 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares, mediana, fuerte. Muy abundantes cútanos de arcilla. Sin raíces. Frecuentes gravas de hasta 29 cm de diámetro. No calcáreo.
Bt2b	492-532	Color rojo (10R 4/6) en seco y rojo (10R 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Muy abundantes cútanos de arcilla. Sin raíces. Frecuentes gravas. No calcáreo.
Ckb	532-560	Color pardo pálido (10YR 6/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Sin raíces. Frecuentes gravas. Calcáreo.

**Clasificación:** Luvisol hipocálcico crómico cutánico (FAO, 1998); Rhodoxeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

### Perfil NIG-2

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btk1b	560-595	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 3/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Abundantes cútanos de arcilla. Sin raíces. Frecuentes gravas. Calcáreo.
Btk2b	595-638	Color rojo oscuro (2,5YR 4/4) en seco y rojo oscuro (2,5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques subangulares, mediana, moderada. Abundantes cútanos de arcilla. Sin raíces. Frecuentes gravas. Calcáreo.
Ckb	638-788	Color pardo pálido (10YR 6/3) en seco y pardo (10YR 4/3) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Sin raíces. Frecuentes gravas. Calcáreo.

**Clasificación:** Luvisol hipocálcico crómico cutánico (FAO, 1998); Palexeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

## Perfil NIG-1

Hor.	Prof. (cm)	Descripción macromorfológica
Btb	788-868	Color rojo oscuro (2,5YR 4/6) en seco y rojo oscuro (2,5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques angulares, mediana, moderada. Abundantes cútanos de arcilla. Sin raíces. No calcáreo. Frecuentes gravas.
BCb	868-898	Color amarillo rojizo (7,5YR 6/6) en seco y pardo oscuro (7,5YR 5/6) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura en bloques angulares, fina, moderada. Sin raíces. No calcáreo. Frecuentes gravas.
Ckb	898-1150	Color pardo pálido (10YR 6/3) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura masiva. Sin raíces. Ligeramente calcáreo. Frecuentes gravas.

**Clasificación:** Luvisol crómico cutánico (FAO, 1998); Palexeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

## 2. Datos analíticos

Tabla A.37. Análisis granulométrico de los suelos del sector Nigüelas (G= Grueso; F= Fino; 1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Horizonte	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
NIG-5	Ap	34,8	62,5	nd	nd	28,7	8,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	C	35,6	60,3	nd	nd	30,3	9,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NIG-4	Bt1b	36,5	42,1	7,1	15,1	22,2	35,7	7,9	7,2	5,6	11,0	4,9	5,5
	Bt2b	37,1	46,3	11,6	15,1	26,7	27,0	6,8	6,9	6,4	13,5	6,0	6,7
	BCb	42,6	52,2	11,6	18,2	29,8	18,0	7,5	8,2	7,9	16,1	6,6	5,9
	CBb	43,7	55,0	12,3	19,5	31,8	13,2	7,0	9,4	8,3	16,8	6,9	6,6
	Ckb	44,0	60,0	13,2	19,2	32,4	7,6	11,1	10,5	9,7	18,5	5,5	4,7
NIG-3	Bt1b	37,0	30,5	5,2	9,2	14,4	55,1	5,5	5,3	4,3	8,0	3,5	3,9
	Bt2b	43,5	32,1	4,6	8,1	12,7	55,2	5,1	5,4	6,2	9,5	3,2	2,7
	Ckb	49,3	64,8	13,9	15,5	29,4	5,8	9,5	11,2	9,3	18,1	8,3	8,4
NIG-2	Btk1b	39,3	37,1	5,6	12,1	17,7	45,2	10,4	7,3	4,9	7,8	3,4	3,3
	Btk2b	39,1	41,9	10,4	19,2	29,6	28,5	8,3	7,5	5,7	10,5	4,7	5,2
	Ckb	47,6	57,5	13,2	19,3	32,5	10,0	9,8	10,5	8,5	14,7	7,1	6,9
NIG-1	Btb	38,7	41,7	6,4	16,3	22,7	35,6	8,9	8,5	6,3	9,9	3,7	4,4
	BCb	43,3	65,5	7,4	15,1	22,5	12,0	15,4	15,3	10,2	15,0	4,8	4,8
	Ckb	49,3	58,4	11,3	19,4	30,7	10,9	9,5	12,4	10,2	16,0	5,7	4,6

Tabla A.38. pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) de los suelos del sector de Nigüelas.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
NIG-5	Ap	8,5	0,62	3,7	nd	nd	0,11	0,69	1,97	3,02	5,59	100
	C	8,1	0,55	4,1	nd	nd	0,15	0,38	2,14	3,17	5,42	100
NIG-4	Bt1b	7,3	0,32	0,5	2,07	1,84	0,10	0,16	10,00	2,70	12,46	100
	Bt2b	7,4	0,25	0,6	2,06	2,83	0,14	0,13	9,98	2,72	9,02	100
	BCb	7,1	0,16	0,6	2,03	3,10	0,14	0,07	8,48	2,76	6,44	100
	CBb	7,4	0,18	0,6	2,22	3,23	0,19	0,04	7,49	2,90	6,01	100
	Ckb	8,3	0,20	17,5	2,11	2,74	0,20	0,04	15,97	3,17	5,01	100
NIG-3	Bt1b	8,3	0,14	0,4	1,99	0,68	0,12	0,39	10,23	5,00	14,20	100
	Bt2b	8,3	0,14	0,5	1,97	0,71	0,10	0,36	9,90	4,70	14,50	100
	Ckb	9,1	0,14	6,4	1,76	0,54	0,02	0,04	10,48	3,57	4,30	100
NIG-2	Btk1b	8,6	0,16	2,2	2,04	0,46	0,09	0,26	7,24	9,18	14,18	100
	Btk2b	8,3	0,21	2,8	2,03	2,60	0,07	0,18	6,24	7,31	10,31	100
	Ckb	8,5	0,20	2,3	1,93	4,08	0,07	0,05	5,74	5,93	8,59	100
NIG-1	Btb	8,5	0,20	0,4	2,00	0,66	0,09	0,35	2,99	7,31	9,88	100
	BCb	8,8	0,23	0,7	2,03	0,90	0,05	0,07	4,24	3,75	7,73	100
	Ckb	8,9	0,25	1,2	2,05	0,85	0,02	0,07	4,24	2,68	4,73	100

Tabla A.39. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina de los suelos del sector de Nigüelas.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
NIG-5	Ap	58,43	15,17	5,49	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	C	58,92	15,32	5,42	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NIG-4	Bt1b	62,54	18,60	7,58	0,06	1,31	0,81	1,32	2,59	1,05	0,08	260,2
	Bt2b	61,94	17,51	6,83	0,05	1,61	0,95	1,50	2,58	1,17	0,09	260,7
	BCb	65,65	16,91	6,78	0,06	1,25	0,67	1,55	2,60	1,16	0,06	274,9
	CBb	65,89	16,34	6,27	0,05	1,41	0,94	1,38	2,68	1,11	0,06	281,7
	Ckb	67,04	17,15	6,24	0,06	1,50	10,02	1,37	2,89	1,01	0,07	269,9
NIG-3	Bt1b	53,12	22,35	9,59	0,07	2,54	2,54	0,89	2,32	1,06	0,11	170,1
	Bt2b	53,41	22,00	9,45	0,07	2,49	2,59	0,93	2,29	1,06	0,10	180,4
	Ckb	64,81	14,25	5,46	0,06	1,44	3,61	1,92	2,24	1,10	0,06	270,9
NIG-2	Btk1b	58,03	20,39	8,60	0,05	1,43	1,61	1,06	2,37	1,04	0,11	221,7
	Btk2b	58,71	18,79	8,21	0,07	1,65	2,24	0,79	2,12	1,24	0,09	262,0
	Ckb	62,79	16,31	6,89	0,08	1,95	2,12	1,62	2,26	1,10	0,04	271,2
NIG-1	Btb	61,59	18,34	8,03	0,07	1,50	0,78	0,96	2,59	0,96	0,13	235,6
	BCb	69,09	14,50	6,06	0,07	1,29	1,06	1,31	2,15	1,05	0,08	322,6
	Ckb	66,36	15,90	6,73	0,07	1,55	0,96	1,32	2,43	1,20	0,07	292,7

Tabla A.40. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en los suelos del sector de Nigüelas.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
NIG-5	Ap	1,37	0,06	0,25	0,04	nd	nd	nd	nd
	C	1,52	0,04	0,28	0,03	nd	nd	nd	nd
NIG-4	Bt1b	2,77	0,09	0,36	0,03	0,47	0,12	0,03	0,26
	Bt2b	2,82	0,06	0,41	0,02	0,43	0,06	0,02	0,14
	BCb	2,50	0,06	0,37	0,02	0,09	0,05	0,01	0,56
	CBb	2,27	0,04	0,36	0,02	0,31	0,04	0,02	0,13
	Ckb	1,57	0,03	0,25	0,02	0,24	0,03	0,01	0,12
NIG-3	Bt1b	3,70	0,06	0,38	0,02	0,35	0,08	0,02	0,23
	Bt2b	3,58	0,06	0,38	0,02	0,31	0,08	0,01	0,26
	Ckb	1,16	0,03	0,21	0,03	0,12	0,02	0,01	0,17
NIG-2	Btk1b	3,65	0,06	0,42	0,02	0,33	0,06	0,02	0,18
	Btk2b	3,23	0,07	0,39	0,02	0,28	0,06	0,01	0,21
	Ckb	1,87	0,03	0,27	0,02	0,17	0,04	0,01	0,24
NIG-1	Btb	1,99	0,10	0,25	0,05	0,14	0,07	0,01	0,50
	BCb	0,74	0,04	0,12	0,05	0,12	0,04	0,01	0,33
	Ckb	0,53	0,04	0,08	0,08	0,09	0,04	0,01	0,44

• **Sector de la Cuesta del Desmayo (CD)**

*1. Macromorfología*

**Perfil CD-1**

**Localidad:** Entre Hueter-Vega y El Purche.

**Situación:** Cuesta del Desmayo.

**Coordenadas U.T.M.:** 453100/4110475/Huso 30.

**Altitud:** 1104 m.

**Pendiente:** Escarpada (35%).

**Posición Fisiográfica:** Ladera.

**Vegetación:** Matorral xerofítico.

**Material Original:** Conglomerado metamórfico (Block Formation).

**Condiciones de drenaje:** Imperfectamente drenado.

**Pedregosidad:** Sin piedras.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica en cárcavas moderada.

**Influencia humana:** No.

**Clasificación:** Luvisol crómico cutánico (FAO, 1998); Palexeralf típico (Soil Survey Staff, 1999).

---

<b>Hor.</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Descripción macromorfológica</b>
A	0-2	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura migajosa a bloques subangulares, de grado débil. No calcáreo. Frecuentes gravas.
C	2-17	Color pardo (7,5YR 5/4) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arenosa. Estructura en bloques subangulares, de grado débil. No calcáreo. Frecuentes gravas.
Bt1b	17-56	Color rojo amarillento (5YR 4/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques angulares, de grado fuerte. No calcáreo. Frecuentes gravas.
Bt2b	56-75	Color rojo amarillento (5YR 4/6) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arcillo arenosa. Estructura en bloques

---

		angulares, fuerte. No calcáreo. Frecuentes gravas.
BCb	75-250	Color pardo rojizo (5YR 4/4) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arcillo arenosa. Estructura en bloques angulares, de grado moderado. No calcáreo. Frecuentes gravas.
Cgb	>250	Color pardo intenso (7,5YR 5/6) en seco. Textura franca. Sin estructura. No calcáreo. Frecuentes gravas.

## 2. Datos analíticos

Tabla A.41. Análisis granulométrico del suelo CD-1 (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Hor.	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
CD-1	A	33,8	68,5	8,7	12,9	21,6	9,9	9,3	9,0	10,9	22,6	10,8	6,0
	C	38,6	60,6	10,5	16,6	27,1	12,3	11,4	9,1	9,1	17,4	8,3	5,3
	Bt1b	33,8	39,5	8,1	14,1	22,2	38,3	5,6	6,3	6,6	11,8	6,2	2,9
	Bt2b	39,7	47,3	8,1	12,7	20,8	31,9	7,4	9,3	8,4	12,6	6,4	3,2
	BCb	50,0	53,9	9,2	14,6	23,8	22,3	14,6	10,9	7,8	11,1	6,4	3,1
	Cgb	50,9	42,1	14,5	21,7	36,2	21,7	6,5	6,5	6,3	11,6	8,6	2,6

Tabla A.42. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) del suelo CD-1.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
CD-1	A	7,1	1,24	0,0	nd	nd	0,03	0,07	3,36	1,04	7,02	64,1
	C	7,1	0,65	0,0	nd	nd	0,03	0,05	2,94	1,11	7,02	58,8
	Bt1b	6,8	0,41	0,0	nd	nd	0,10	0,09	8,82	5,80	18,96	78,1
	Bt2b	7,0	0,35	0,0	nd	nd	0,10	0,05	9,03	6,36	17,56	88,5
	BCb	6,9	0,26	0,0	nd	nd	0,10	0,04	7,98	6,22	15,45	92,8
	Cgb	6,2	0,30	0,0	nd	nd	0,07	0,04	8,19	8,50	18,96	88,6

Tabla A.43. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina del suelo CD-1.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
CD-1	A	65,54	17,34	5,80	0,12	1,23	0,68	0,85	2,37	1,07	0,10	313,1
	C	62,93	19,51	5,60	0,12	1,28	0,54	0,95	2,51	1,01	0,07	290,7
	Bt1b	52,78	23,71	8,95	0,10	1,41	0,75	0,54	2,09	0,65	0,06	189,7
	Bt2b	54,20	23,04	8,83	0,11	1,45	0,74	0,54	2,20	0,66	0,07	192,7
	BCb	58,58	19,08	8,78	0,13	1,32	0,67	0,54	2,24	0,79	0,07	170,8
	Cgb	53,33	24,28	7,93	0,10	1,66	0,57	0,92	2,46	0,71	0,04	260,7

Tabla A.44. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en el suelo CD-1.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
CD-1	A	2,19	0,44	0,38	0,20	nd	nd	nd	nd
	C	2,14	0,44	0,38	0,20	nd	nd	nd	nd
	Bt1b	4,22	1,14	0,47	0,27	nd	nd	nd	nd
	Bt2b	3,86	1,04	0,44	0,27	nd	nd	nd	nd
	BCb	3,17	1,00	0,41	0,28	nd	nd	nd	nd
	Cgb	3,12	1,06	0,39	0,34	nd	nd	nd	nd

• **Sector de Sierra Nevada (SN)**

*1. Macromorfología*

**Perfil SN-1**

**Localidad:** En la falda SW del pico Mulhacén. (Sierra Nevada).

**Situación:** Alto del Chorrillo.

**Coordenadas U.T.M.:** 472986/4096301/Huso 30.

**Altitud:** 2709 m.

**Pendiente:** Suavemente inclinada (4%).

**Posición Fisiográfica:** Llanura de crioplanación.

**Vegetación:** Piornal.

**Material Original:** Micaesquistos.

**Condiciones de drenaje:** Bien drenado.

**Pedregosidad:** Moderadamente pedregoso.

**Afloramientos rocosos:** Ninguno.

**Salinidad:** Sin sales.

**Erosión:** Hídrica moderada.

**Influencia humana:** No.

**Clasificación:** Acrisol abruptico crómico (FAO, 1998); Hapludalf últico (Soil Survey Staff, 1999).

<b>Hor.</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Descripción macromorfológica</b>
A	0-11	Color pardo amarillento brillante (10YR 6/4) en seco pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo. Textura franca. Estructura laminar. Muy abundantes poros vesiculares debido a la acción del proceso hielo-deshielo. Pequeños polígonos en superficie (17 cm de ancho aproximadamente), formando una orla de piedras de 4 cm. Abundante grava fina orientada verticalmente. Muy escasas raíces. No calcáreo. Límite brusco.
Bt1b	11-33	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura arcillosa. Estructura en bloques angulares y subangulares de hasta 2,5 cm. Frecuente grava fina. Muy escasas raíces. No calcáreo. Límite neto.
Bt2b	33-45	Color rojo amarillento (5YR 5/6) en seco y rojo amarillento (5YR 4/6) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques

		angulares y subangulares. Abundante grava de todos los tamaños (hasta 10 cm), muy alterada, tipo regolita. Sin raíces. No calcáreo. Límite difuso.
BCb	45-70	Color pardo fuerte (7,5YR 5/6) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura en bloques angulares y subangulares. Abundante grava de todos los tamaños muy alterada. Sin raíces. No calcáreo. Límite difuso.
Cb	>70	Color pardo fuerte (7,5YR 5/6) en seco y pardo (7,5YR 4/4) en húmedo. Textura franco arcillo arenosa. Estructura masiva. Sin raíces. Abundante grava de gran tamaño. No calcáreo.

## 2. Datos analíticos

Tabla A.45. Análisis granulométrico del suelo SN-1 (1 = 2-1 mm; 2 = 1-0,5 mm; 3 = 0,5-0,25 mm; 4 = 0,25-0,1 mm; 5 = 0,1-0,075; 6 = 0,075-0,05).

Perfil	Hor.	Gravas (%)	Arena (%)	Limo G. (%)	Limo F. (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fracciones de arena (%)					
								1	2	3	4	5	6
SN-1	A	58,0	41,8	12,0	26,5	38,5	19,7	11,8	7,9	4,7	8,4	4,8	4,2
	Bt1b	34,0	23,7	5,5	16,7	22,2	54,1	4,0	5,0	4,0	5,6	2,6	2,5
	Bt2b	56,6	38,4	6,7	15,1	21,8	39,8	8,7	9,0	5,9	8,2	4,7	1,9
	BCb	56,1	41,5	6,6	13,3	19,9	38,6	9,3	11,4	7,0	7,8	3,4	2,6
	Cb	52,1	51,9	7,8	15,9	23,7	24,4	8,3	14,2	10,4	10,4	5,3	3,3

Tabla A.46. Valores de pH, carbono orgánico (CO), carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), densidad aparente (Da), conductividad eléctrica (CE), bases y capacidad de cambio y saturación en bases (V) del suelo SN-1.

Perfil	Horizonte	pH	CO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Da (g cm <sup>-3</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Bases de cambio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					V (%)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CIC	
SN-1	A	6,5	0,09	0,50	1,50	0,42	0,06	0,19	3,25	0,58	7,16	57,0
	Bt1b	5,7	0,04	0,40	1,52	0,06	0,03	0,30	4,00	1,33	11,45	49,5
	Bt2b	5,6	0,09	0,10	1,70	0,05	0,03	0,19	3,25	1,00	10,17	44,0
	BCb	5,5	0,06	0,00	2,17	0,10	0,09	0,19	3,00	1,17	9,30	47,7
	Cb	5,7	0,05	0,30	2,29	0,07	0,03	0,15	2,50	1,08	7,16	52,6

Tabla A.47. Contenido en elementos mayores (% de óxidos) y Zr (ppm) de la fracción tierra fina del suelo SN-1.

Perfil	Horizonte	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zr
SN-1	A	60,30	19,70	7,55	0,08	0,84	0,35	0,78	2,69	1,03	0,20	288,9
	Bt1b	47,59	26,76	10,63	0,11	0,46	0,17	1,53	2,44	0,86	0,31	193,6
	Bt2b	51,50	24,15	10,38	0,13	0,38	0,11	0,48	2,50	1,00	0,28	181,2
	BCb	53,87	23,72	9,61	0,09	0,39	0,11	0,53	2,47	0,97	0,26	214,4
	Cb	56,93	20,96	9,64	0,19	0,35	0,42	0,69	2,36	0,94	0,25	262,2

Tabla A.48. Formas libres (d) y amorfas (o) de hierro y aluminio en el suelo SN-1.

Perfil	Horizonte	Fed (%)	Feo (%)	Fed/ Fet	Feo/ Fed	Ald (%)	Alo (%)	Ald/ Alt	Alo/ Ald
SN-1	A	2,29	0,21	0,30	0,09	0,43	0,17	0,02	0,40
	Bt1b	3,98	0,50	0,37	0,13	0,71	0,23	0,03	0,32
	Bt2b	5,40	0,39	0,52	0,07	0,85	0,19	0,04	0,22
	BCb	4,43	0,36	0,46	0,08	0,66	0,16	0,03	0,24
	Cb	3,38	0,36	0,35	0,11	0,50	0,18	0,02	0,36