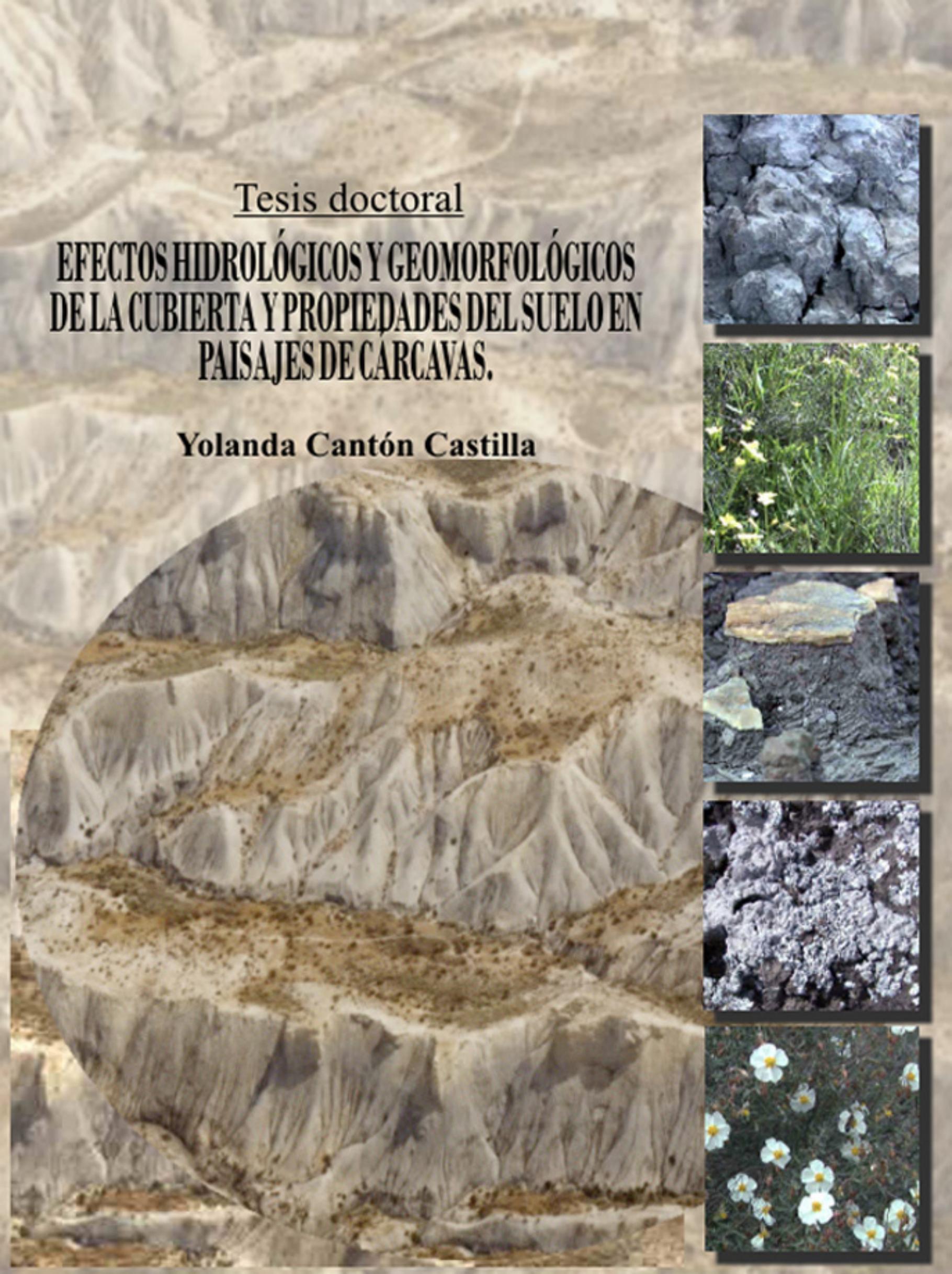


Tesis doctoral

**EFFECTOS HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS
DE LA CUBIERTA Y PROPIEDADES DEL SUELO EN
PAISAJES DE CARCAVAS.**

Yolanda Cantón Castilla



Tesis doctoral

EFFECTOS HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS
DE LA CUBIERTA Y PROPIEDADES DEL SUELO
EN PAISAJE DE CÁRCAVAS

YOLANDA CANTÓN CASTILLA

Director: ALBERTO SOLÉ BENET

ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE ZONAS ÁRIDAS

CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
(C.S.I.C.)

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE
EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA

Tesis doctoral

EFFECTOS HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS
DE LA CUBIERTA Y PROPIEDADES DEL SUELO
EN PAISAJE DE CÁRCAVAS

Memoria presenta por la Lda.
M^a Yolanda Cantón Castilla
para optar al grado de Doctor
Ciencias Biológicas.

Director: Dr. Alberto Solé
Benet, Científico Titular de
la Estación Experimental en
de Zonas Áridas (C.S.I.C.)

Fdo: Yolanda Cantón Castilla

V^oB^o: Alberto Solé Benet.

Almería, Mayo de 1999

**ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE ZONAS ÁRIDAS
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
(C.S.I.C.)**

a Paco

AGRADECIMIENTOS

A principios de 1994 me concedieron una beca del Plan Nacional de Formación de Personal Investigador del M.E.C. en el marco del proyecto DESERMA (Dinámica y Evolución de Sistemas Erosivos Mediterráneos Abarrancados. AMB93-0844-C06-01) gracias a la cual ha sido posible realizar esta tesis. Esta beca me permitió integrarme en la Estación Experimental de Zonas Áridas (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), en la que he estado trabajando entre principios de 1994 y Abril de 1999, lo que ha supuesto una gran experiencia en mi vida, tanto profesional como personal. Y como para mí son muy importantes ambas cosas quiero expresar en estas páginas mis agradecimientos en ambos sentidos.

Mi director de tesis Albert Solé, ha supervisado este trabajo con gran entusiasmo, participando activamente en el mismo, tanto en la identificación de problemas y orientación del trabajo como en los muestreos de campo. Se ha ocupado de mi formación y ha corregido este trabajo. Durante estos cinco años me ha contagiado su vitalidad, aconsejado y cuando mi ánimo flaqueaba siempre me ha mostrado su apoyo.

Roberto Lázaro ha vivido muy de cerca este trabajo y ha colaborado en gran parte del mismo. Me ha ayudado a marcar mis objetivos, a encontrar el hilo conductor de esta tesis, en el trabajo de campo y ha corregido parte de la misma. Ha discutido conmigo durante horas sobre la mayoría de temas tratados en este trabajo con gran interés. Me alegro mucho de haber compartido mis inquietudes científicas con una persona tan especial.

Gabriel del Barrio ha dirigido los análisis topográficos de esta tesis. Ha aportado ideas decisivas para este trabajo y ha corregido algunos capítulos. Resolvió ágilmente mis numerosas dudas estadísticas, siempre tuvo un momento para atender mis preguntas respondiéndolas sabiamente y me ha ofrecido su ayuda en todo momento.

A Juan Puigdefábregas le quiero agradecer haber sido una inspiración para mí durante estos años por su rigor científico, capacidad para integrar todos los aspectos de los problemas y su tenacidad. Sus comentarios han constituido una fuente de ideas determinantes en esta tesis. También le agradezco que haya corregido algunas partes de este trabajo.

Al profesor Aaron Yair le agradezco sus constructivos comentarios respecto al comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

La concesión por parte de la división de asuntos científicos de la OTAN de una “acción de colaboración” con la Universidad de Wolverhampton (Investigador principal David Mitchell) hizo posible una estancia en la School of Applied Sciences de la Universidad de Wolverhampton (UK) a la que agradezco permitirme el uso del microscopio electrónico.

Mathias Boer fue mi compañero de fatigas el último año y más penoso de este trabajo. Me introdujo en el mundo de la modelización espacial con PCraster. Ha aportado buenas ideas a este trabajo y sus comentarios siempre me han obligado a replantearme los problemas (a mi pesar muchas veces) y a abordarlos. Me ha resuelto muchas dudas, me ha aconsejado y ha sido un consuelo el sentir que no era la única que sufría tanto con la tesis.

Cristina Armas me enseñó a trabajar con SIG. En cualquier momento estuvo dispuesta a resolver los múltiples problemas que me surgían. También me ayudó con PATN y discutiendo con ella sobre este trabajo fue surgiendo esta tesis. Además de ser una compañera ideal, quiero agradecerle el haber sido una gran amiga.

Montse ha hecho gran parte de los análisis de laboratorio con gran rigurosidad e interés. Ha compartido conmigo los buenos y malos momentos de este trabajo. Es la amiga (“*sin coma*”) y una gran persona a la que aprecio mucho.

Enrique ha hecho posible la instalación y funcionamiento de las sondas de humedad (SBIBS), ha soportado mis interminables pruebas y siempre estuvo dispuesto a venir al Cautivo a poner en marcha alguno de los circuitos que se turnaban para fallar.

Alfredo Durán ha montado todas las instalaciones de campo que se han utilizado en esta tesis, y ha colaborado en muchos de los trabajos de campo. Y lo más importante ha trabajado con ahínco, sin importarle las contrariedades. Además es un buen amigo, dispuesto a aconsejar y ayudar ante cualquier problema.

Paco Domingo elaboró la programación de los datalogger para los SBIBS. Me ayudó con la parte de hidrología orientándome en el tratamiento de estos datos. Ha resuelto muchas de mis dudas y ha aportado ideas interesantes. Siempre me ha dado buenos consejos profesionales y como amigo, es una persona estupenda.

Sebastián Vidal ha inventado numerosos “*artefactos*” que he usado en este trabajo, como los SBIBS, sistemas de muestreo y transmisión de datos y otras muchas historias *circuito-dependientes*. Cuando algo me parecía imposible de resolver, él encontraba la solución, aunque entre medias introdujera alguna idea descabellada.

Ramón Ordiales, Alberto Ruíz y Juanjo Moreno han sanado en numerosas ocasiones mi ordenador, que tiene gran tendencia a enfermar y me han hecho sentir protegida en el tenebroso mundo cibernético con sus copias de seguridad (aunque yo continúo cargando con los zip de la tesis a todas partes por si hay un incendio).

Miguel Angel Domene me ha enseñado a hacer muchos de los análisis de laboratorio, supervisando los resultados de los mismos.

A M^a José Jorquera le agradezco haber realizado los análisis de cationes y aniones solubles y haberme animado y asesorado en "otras muchas cuestiones".

Juan París realizó gran parte de los análisis granulométricos de los suelos.

Isabel y Paquita se han encargado durante todos estos años de conseguirme rápidamente la bibliografía, de mantenerme al día y se han preocupado por la evolución de este trabajo.

Paqui, Angeles, Cristobal y Juan atendieron mis llamadas y recados siempre con diligencia.

A Cecilio Oyonarte y Manolo les agradezco haberme ayudado tan amablemente con los análisis de pF.

Roberto Pini y Miquele Lamarca me ayudaron en los análisis de porosidad con el Quantimet 570.

Pascual siempre estuvo dispuesto a resolver cualquier duda geomorfológica o de tratamiento de fotos. Además le agradezco haber sido tan generoso al aceptar la herencia que le dejé ("los flumes").

Marieta en varias ocasiones me ha asesorado con los cambios de formato de las imágenes y otros problemas con las mismas.

Paco Pugnaire me ha mantenido al día con las convocatorias de becas postdoctorales y me ha aconsejado en estas cuestiones.

Hector calibró los SBIBS y se preocupa de proporcionarnos religiosamente las vacunas antivíricas.

Luis me ha ayudado a hacer menos aburrida esta tesis, con su simpatía y sus historias se han hecho más agradables estos años.

Eva ha resuelto algunas de mis dudas sobre interceptión y siempre ha tenido palabras de ánimo, sobre todo en los últimos tiempos al igual que María.

Ana ha intentado mantener el orden en mi mesa pese a que cada día yo se lo impedía con ahínco desordenándolo todo en pocos minutos.

Olga, Andrés y Mari Carmen me han ayudado con el "papeleo" y problemas burocráticos.

A Teresa Abaigar quiero agradecerle el haber actuado como amiga, madre y hermana con la que he compartido muchos momentos buenos y también ha

estado para los malos, siempre ha sido una estupenda consejera en todos los “temas”, encantadora y divertida y gracias a sus consejos y plazos marcados he acabado la tesis antes del 2018.

Y Leo, mi compañero de despacho, me ha ayudado con los líquenes y hablando con él sobre muchos de los temas de este trabajo han surgido ideas y hemos resuelto dudas. Ha compartido mis inquietudes, dudas, euforias, malhumores siempre con gran paciencia y cariño. Gracias por ser tan buen amigo.

Carmen Mari, mi amiga, como siempre desde hace muchos años ha estado a mi lado animándome y en los momentos claves escuchándome. Miguel siempre ha estado muy interesado por este trabajo.

Elena me ha asesorado en todos los temas de formato de este trabajo. Y junto con Pablo, Javi y Lolina hemos compartido penas, glorias y sobre todo amistad desde la universidad hasta hoy.

Juan Caballero siempre ha estado dispuesto a ayudarme y a Pepa le agradezco ser tan buena amiga y animarme tanto. Juan y Pablo me alegran la vida.

A María, José y Pepe les agradezco su paciencia, apoyo y sobre todo cariño durante todos estos años.

Antonio Ruiz siempre me ha animado y durante todo este tiempo no solo me escuchaba atentamente cuando hablaba de los temas de la tesis (cosa que nadie hacía), sino que incluso se interesaba por muchas cuestiones.

Encarnita y JÓse algunas veces me han acompañado al campo, siempre estuvieron muy motivados con este trabajo y me han ayudado a desconectar de la línea directa que establecí con la tesis hace algunos años, gracias a su buen humor. Pero sobre todo quiero agradecerles el estar siempre ahí, para todo.

Mis padres han hecho posible esta tesis gracias a su sacrificio y esfuerzo durante toda la vida. Siempre han estado a mi lado apoyándome e interesados por este trabajo, viviéndolo como todo lo que a mí me afecta. Gracias por todo.

Y “mi” Paco ha vivido desde el primer día este trabajo, ha colaborado en los trabajos de campo, ha preparado algunas de las figuras y sobre todo ha estado conmigo durante todos estos años, apoyándome incondicionalmente, soportando con tolerancia mis malos momentos, entusiasmándose con lo que llama “el centro de nuestra vida (esta tesis)” a pesar de privarle de mí. Este trabajo se lo dedico a él. Gracias por estar a mi lado.

INDICE

Capítulo 1: Introducción general

1.1.- Objetivos	1
1.2.- Desarrollo del trabajo.....	3
1.3.- Aspectos no considerados	4

Capítulo 2: Paisajes de cárcavas: superficie del suelo y procesos asociados. Revisión bibliográfica

2.1.- Introducción.....	9
2.2.- Factores que controlan el desarrollo de los paisajes de cárcavas y procesos que intervienen.....	10
2.3.- Heterogeneidad en la superficie del suelo	13
2.4.- Control topográfico sobre la distribución espacial de los tipos de cubierta del suelo	15
2.5.- Relaciones cubierta-suelo-topografía.....	18
2.5.1.- Propiedades del suelo en paisajes de cárcavas y su influencia en la heterogeneidad de la cubierta del suelo	18
2.5.2.- Relaciones cubierta-suelo con la posición en el paisaje	22
2.5.3.- Relaciones cubierta, humedad del suelo y topografía	24
2.6.- Procesos de meteorización en <i>badlands</i>	27
2.7.- Generación de escorrentía y erosión en paisajes de cárcavas.....	28
2.7.1.- ¿Por qué se estudian los procesos de erosión y escorrentía?	28
2.7.2.- Variabilidad espacial y temporal en los comportamientos hidrológicos y erosivos	29
2.7.3.- Respuesta hidrológica integrada	32
2.8.- Implicaciones hidrológicas y ecológicas de la variabilidad en la cubierta superficial en un ecosistema acarcavado.....	34

Capítulo 3: Descripción de la zona de estudio: *El Desierto de Tabernas*.

3.1.- Introducción.....	37
3.2.- Situación geográfica	37
3.3.- Características generales de la zona de estudio.....	39
3.3.1.- Geología	39
3.3.2.- Clima	40

3.3.3.- Geomorfología	41
3.3.4.- Suelos	43
3.3.5.- Vegetación.....	43
3.3.6.- Fauna.....	44
3.3.7.- Usos	45
3.4.- Instrumentación en la zona de estudio	45

Capítulo 4: Variabilidad espacial en la cubierta del suelo

4.1.- Introducción.....	49
4.2.- Metodología	50
4.3.- Resultados	51
4.3.1.- Tipos de teselas y distribución.....	51
4.3.2.- Características de cada tipo de tesela	54
4.4.- Discusión.....	57

Capítulo 5: Influencia de la topografía sobre la distribución espacial de las teselas.

5.1.- Introducción.....	61
5.2.- Metodología	62
5.2.1.- Asociación geoformas-teselas.....	62
5.2.1.1.- Extracción de los atributos topográficos	62
5.2.1.2.- Regionalización	64
5.2.1.3.- Caracterización de la geoformas.....	65
5.2.1.4.- Dependencia de la topografía. (asociación topografía-teselas)	65
5.2.2.- Caracterización topográfica de cada tesela y distribución sobre los gradientes topográficos	66
5.2.2.1.- Características topográficas de cada tesela	66
5.2.2.2.- Ordenación de las teselas según gradientes topográficos (de una o más variables).....	66
5.2.2.3.- Abundancia de cada tesela a través del gradiente de cada variable topográfica	67
5.2.3.- Predicción de la distribución espacial de las teselas a partir de la topografía	69
5.3.- Resultados	69
5.3.1.- Asociación topografía-teselas	69
5.3.1.1.- Caracterización topográfica de la zona de estudio	69
5.3.1.2.- Regionalización	74
5.3.1.3.- Caracterización topográfica de las geoformas.....	74

5.3.1.4.- Asociación Geoformas-teselas	79
5.3.2.- Comparación de la topografía asociada a cada tesela y distribución sobre los gradientes topográficos	82
5.3.2.1.- Comparación de las características topográficas de las teselas	82
5.3.2.2.- Relaciones entre las variables topográficas y ordenación de las teselas según gradientes topográficos	89
5.3.2.3.- Abundancia relativa de las teselas a través del gradiente de cada variable topográfica	93
5.3.2.3.a).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de pendiente.....	94
5.3.2.3.b).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de altitud.....	95
5.3.2.3.c).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de orientación.....	96
5.3.2.3.d).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de radiación	96
5.3.2.3.e).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de forma cóncava a convexa de la ladera.....	97
5.3.2.3.f).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de distancia al cauce.....	99
5.3.2.3.g).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de área drenada	99
5.3.2.3.h).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente del atributo topográfico W.....	100
5.3.2.3.i).- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente del atributo topográfico LSF.....	100
5.3.2.4.- Influencia de la topografía sobre la diferencias en la cobertura dentro de un mismo tipo de tesela	100
5.3.2.- Predicción de la distribución espacial de las teselas a partir de la topografía	101
5.4.- Discusión.....	103
5.5.- Conclusiones.....	108

Capítulo 6: Propiedades del suelo y procesos edáficos.

6.1.- Introducción.....	109
6.2.- Métodos	111
6.3.- Resultados	114

6.3.1.- Características edáficas generales de la zona de estudio	114
6.3.2.- Características de los suelos de cada tipo de tesela y relación con el tipo de cobertura de la tesela	116
6.3.2.1.- Características del suelo en las teselas PER y ANU.....	116
6.3.2.2.- Características del suelo en la tesela STI	122
6.3.2.3.- Características del suelo en la tesela LQC	126
6.3.2.4.- Características del suelo en la tesela LQB	130
6.3.2.5.- Características del suelo en la tesela LIQ.....	130
6.3.2.6.- Características del suelo en las teselas LQD y LIM.....	135
6.3.2.7.- Características del suelo en la tesela MAR	138
6.3.3.- Comparación de las propiedades del suelo en las distintas teselas y relación con el tipo de cobertura de la tesela	142
6.3.4.- Relación de las propiedades del suelo con la posición en el paisaje	147
6.3.5.- Relaciones entre las características del suelo, la topografía y cobertura de la tesela.....	151
6.4.- Discusión.....	152
6.5.- Conclusiones.....	160

Capítulo 7: Regímenes de humedad y temperatura de la superficie del suelo

7.1.- Introducción.....	163
7.2.- Metodología	165
7.2.1.- Regímenes de humedad y temperatura del suelo	165
7.2.2.- Predicción de la humedad del suelo	168
7.3.-Resultados	169
7.3.1.-Humedad del suelo.....	169
7.3.1.1.- Características generales de la humedad del suelo en las diferentes teselas. Escala anual.....	170
7.3.1.1.1.- Ladera A, tesela PER	170
7.3.1.1.2.- Ladera A, tesela LIQ.....	173
7.3.1.1.3.- Ladera B, tesela MAR.....	175
7.3.1.1.4.- Ladera C, tesela STI.....	177
7.3.1.2.- Características de la humedad del suelo de las diferentes teselas a escala estacional.....	180
7.3.1.2.1.- Ladera A, tesela PER	181
7.3.1.2.2.- Ladera A, tesela LIQ.....	182
7.3.1.2.3.- Ladera B, tesela MAR.....	183

7.3.1.2.4.- Ladera C, tesela STI.....	184
7.3.1.2.5.- Relaciones humedad del suelo, topografía y propiedades del suelo	185
7.3.1.3.- Características de la humedad del suelo a escala de evento de precipitación	187
7.3.1.3.1.- Cambios en la humedad del suelo con la precipitación.....	187
7.3.1.3.1.1.- Ladera A, tesela PER.....	187
7.3.1.3.1.2.- Ladera A, tesela LIQ	189
7.3.1.3.1.3.- Ladera B, tesela MAR	192
7.3.1.3.1.4.- Ladera c, tesela STI.....	192
7.3.1.3.1.5.- Comparación del aumento de la humedad del suelo por la lluvia en las distintas teselas	192
7.3.1.3.2.- Curvas de secado del suelo en las distintas teselas tras la precipitación	195
7.3.1.3.2.1.- Ladera A, tesela PER.....	195
7.3.1.3.2.2.- Ladera A, tesela LIQ	195
7.3.1.3.2.3.- Ladera B, tesela MAR	195
7.3.1.3.2.4.- Ladera C, tesela STI	197
7.3.1.3.2.5.- Comparación del secado del suelo de las distintas teselas.....	197
7.3.2.-Temperatura del suelo	199
7.3.2.1.- Características generales de la temperatura del suelo en las diferentes teselas	199
7.3.2.1.1.- Ladera A, tesela PER	199
7.3.2.1.2.- Ladera A, tesela LIQ.....	200
7.3.2.1.3.- Ladera B, tesela MAR.....	200
7.3.2.1.3.- Ladera C, tesela STI.....	200
7.3.2.2.- Comparación de la temperatura del suelo en las diferentes teselas en cada estación	202
7.3.2.3.- Ciclos diarios de temperatura del suelo en las diferentes teselas..	202
7.3.3.- Predicción de la humedad del suelo en las distintas teselas.....	205
7.4.- Discusión.....	209
7.5.- Conclusiones.....	217

Capítulo 8: Procesos de meteorización

8.1.- Introducción.....	219
8.2.-Métodos	220

8.2.1. Meteorización experimental en laboratorio	220
8.2.2. Meteorización en parcelas de campo	220
8.3.-Resultados	221
8.3.1.- Meteorización de la marga en laboratorio.....	221
8.3.2.- Meteorización de la marga en parcelas de campo.....	225
8.4.- Discusión.....	226
8.5.- Conclusiones.....	227

**Capítulo 9: Respuesta hidrológica y erosiva de las teselas y
respuesta integrada a escala de microcuenca**

9.1.- Introducción.....	229
9.2.- Metodología	232
9.2.1.- Características de la precipitación	232
9.2.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas. Escala de parcela	232
9.2.2.1.- Escorrentía	232
9.2.2.2.- Sedimentos	233
9.2.3.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las teselas. Escala de microcuenca	233
9.2.4.- Desarrollo de un modelo de escorrentía que simule la contribución de cada tesela a la respuesta total de la microcuenca	236
9.3.- Resultados	238
9.3.1.- Características de la precipitación	238
9.3.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas a escala de parcela	244
9.3.2.1.- Escorrentía	244
9.3.2.1.1 Parcelas de escorrentía	244
9.3.2.2.- Erosión.....	247
9.3.2.2.1.- Parcelas de escorrentía y erosión.....	247
9.3.2.2.2.- Clavos de erosión.....	248
9.3.3.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las teselas. Escala de microcuenca	252
9.3.3.1.- Escorrentía	252
9.3.3.1.1.- Microcuenca 3.....	252
9.3.3.1.2.- Microcuenca 2.....	253
9.3.3.1.3.- Microcuenca 4.....	254
9.3.3.1.4.- Microcuenca 1.....	255

9.3.3.2.- Erosión.....	261
9.3.3.2.1.- Microcuenca 3.....	262
9.3.3.2.2.- Microcuenca 2.....	262
9.3.3.2.3.- Microcuenca 4.....	262
9.3.3.2.4.- Microcuenca 1.....	263
9.3.4.- Generación de escorrentía y evolución de la humedad del suelo en las diferentes teselas ante un evento de precipitación (Lluvia del 31/5/97).....	267
9.3.5.- Modelo de simulación de la escorrentía superficial a escala de microcuenca a partir de los comportamientos hidrológicos de las teselas que la integran.....	270
9.4.- Discusión.....	275
9.4.1.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas a escala de parcela	275
9.4.1.1.- Escorrentía	275
9.4.1.2.- Erosión.....	277
9.4.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las teselas. Escala de microcuenca	279
9.4.2.1.- Escorrentía	279
9.4.2.2.- Erosión.....	283
9.4.3.- Respuesta hidrológica: evolución de la humedad del suelo en las teselas y generación de escorrentía	285
9.4.4.- Simulación de la generación de escorrentía a escala de microcuenca a partir de los comportamientos hidrológicos de las superficies que la integran.....	286
9.5.- Conclusiones.....	287

Capítulo 10: Síntesis y Conclusiones

10.1.- Síntesis	289
10.1.1.- Unidades del terreno	289
10.1.2.- Implicaciones de la organización de las teselas y sus interacciones. Efectos hidrológicos y geomorfológicos	293
10.2.- Conclusiones.....	297

Bibliografía 301-318

Anexo 319-389

Sección A.5..... 319

Sección A.6.....	325
Sección A.6.1. Descripción de perfiles	325-370
Sección A.7.....	371
Sección A.9.....	376
Sección A.9.1.- Modelo de generación de escorrentía	376
Sección A.9.2.- Regresiones escorrentía vs precipitación para cada tesela ..	379

CAPITULO 1

INTRODUCCION GENERAL

Aceptamos como muy buena la tendencia humana a buscar y descubrir regularidades en la aparente confusión de las observaciones y colocar luego las regularidades identificadas, que hay que formular necesariamente de manera abstracta, dentro de un sistema intelectual de relaciones, al que damos valor explicativo y predictivo, Margalef 1982.

1.1.- INTRODUCCION

Los cambios en los patrones espaciales y temporales del paisaje debido a perturbaciones naturales y humanas suelen tener efectos dramáticos sobre los procesos ecológicos y sobre los organismos (Hansen, et al. 1992). Por ello es importante conocer los componentes del paisaje y su dinámica. Las herramientas disponibles que permiten comprender y predecir los cambios que sufre el paisaje a lo largo del tiempo, son aún muy toscas (Puigdefábregas, 1993), por lo que existe un interés creciente en las últimas décadas en la construcción de estas herramientas, sobre todo en un momento en que tanto se está escribiendo acerca de los impactos ecológicos, agronómicos, socioeconómicos y geomorfológicos del cambio climático (Mulligan, 1998).

Parece evidente que son probables unas condiciones climáticas más secas que pueden tener importantes repercusiones sobre la cubierta vegetal y los sistemas hidrológicos y erosivos (Puigdefábregas, 1992), por lo que si somos capaces de predecir como serán estos efectos podremos planificar las estrategias a seguir ante los posibles cambios.

La evolución del paisaje depende de las relaciones espaciales entre sus elementos. El estudio de asociaciones entre geoformas, suelo y vegetación hace que el paisaje sea más predecible. Sin embargo, aunque estas primeras aproximaciones permiten concebir al paisaje como una entidad integrada, únicamente conducen a una descripción estructural del mismo. Para comprender y predecir los cambios que sufre el paisaje a lo largo del tiempo es necesario, por un lado plasmar en el relieve el funcionamiento de los principales agentes geomorfológicos responsables del transporte de materia entre los elementos del paisaje, tales como los flujos de agua, sedimentos, solutos y aire, y por otro lado reconocer la existencia de retroalimentaciones entre la actuación de esos agentes geomorfológicos y la evolución de la vegetación (Puigdefábregas, 1993).

En medios acarcavados el potencial para que los cambios ocurran rápidamente los ha convertido históricamente en lugares preferidos para estudiar la evolución del paisaje y los procesos que afectan a su morfología (Campbell, 1989).

Los *badlands* son paisajes muy encajados, donde la vegetación es muy escasa o ausente, e inútiles para la agricultura. Se caracterizan por una densa red de drenaje, valles en forma de V, laderas abruptas que a menudo terminan en superficies planas que conocemos como pedimentos, (Bryan y Yair, 1982). Otra característica típica es que muchas de sus geoformas se asemejan a paisajes áridos en miniatura y los procesos que las moldean operan a una velocidad y escala que permiten las observaciones y mediciones detalladas. Estos paisajes en muchos aspectos son laboratorios geomorfológicos ideales (Campbell, 1974).

El desierto de Tabernas es un paisaje de cárcavas ("*badlands*") que cubre unos 150 km², a escala de tiempo geológico, el primer control en la evolución del paisaje lo constituye la actividad tectónica reciente (Harvey, 1987; Delgado y Puigdefábregas, 1994) que ha provocado sucesivos encajamientos de la red de drenaje que han dejado al descubierto taludes margosos inestables. Sin embargo a medio y corto plazo los procesos de estabilización de las superficies de los *badlands* controlan la dinámica de este paisaje, los cuales a su vez varían en función de factores locales como la orientación (Calvo et al. 1991), pendiente o hidrología (Alexander et al. 1994). Los procesos de erosión hídrica activos, que constituyen el principal control de la dinámica actual de este paisaje, están fuertemente influenciados por la cubierta y características de la superficie del suelo (Calvo et al. 1991b; Solé et al., 1997). En este contexto parece muy adecuado estudiar los efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en el paisaje.

Nuestra aproximación al estudio de la dinámica del paisaje consiste en estudiar algunos aspectos de su estado actual lo cual proporciona indicadores de su potencial de evolución. El primer paso es definir e inventariar los componentes del sistema que se va a estudiar. Posteriormente se deben incluir las interacciones entre dichos componentes y saber como evolucionan (Perez-Trejo, 1993). Hay que tener en cuenta que los patrones de un sistema dependen de la escala de observación (Levin, 1992) y se espera que los factores que controlan la heterogeneidad también varíen con la escala. Aunque la elección de la escala es arbitraria, algunas escalas pueden ser especialmente relevantes para los procesos investigados (O'Neill, et al.1991), por ejemplo a escala decamétrica el medio físico es el principal factor que controla la estructura de los paisajes de alta montaña (del Barrio et al. 1997).

La hipótesis de partida de este trabajo es que el ecosistema del área acarcavada del desierto de Tabernas, a escala métrica, está constituido por unos componentes que denominamos *unidades del terreno* o *teselas* y que constituyen la mínima unidad del paisaje caracterizada por su homogeneidad en la cobertura biótica y abiótica, clima, litología, topografía, suelo, y comportamiento hidrológico y erosivo. Este conjunto de atributos estáticos y dinámicos y sus interacciones dentro de cada unidad y entre unidades determinarán la respuesta de estas unidades ante cualquier cambio o al paso del tiempo y en definitiva la respuesta del paisaje a la escala de estudio.

El estudio de dichas unidades y sus interacciones (como flujos de materia entre ellas) permitirá explicar la respuesta del mosaico, en que se organizan estas unidades, ante los procesos que controlan la evolución actual de este paisaje (procesos de erosión hídrica) y proporciona una herramienta de aproximación al análisis de la dinámica del paisaje.

1.2.- OBJETIVOS

El objetivo final de este trabajo es comprender la variabilidad y organización espacial de los componentes (unidades del terreno o teselas) de un paisaje semiárido de cárcavas y sus procesos edáficos, hidrológicos y erosivos derivados y sus implicaciones en la dinámica actual del paisaje.

Este objetivo general se resuelve en los objetivos específicos siguientes:

1.- Definir las unidades del terreno o teselas que componen el paisaje en términos de atributos de cobertura, topográficos, edáficos, hidrológicos y erosivos y estudiar las interrelaciones entre todos estos atributos.

1.- Introducción

2.- Determinar la organización espacial de las unidades, comprobar si la topografía controla dicha organización y cómo influye sobre la misma.

3.- Conocer el comportamiento hidrológico y erosivo de las unidades del terreno y la respuesta integrada a escala de microcuenca (2 ha).

4.- Comprender y modelizar espacialmente el funcionamiento de procesos, como la escorrentía, para explicar la respuesta hidrológica del mosaico de unidades y sus implicaciones en la dinámica del paisaje.

Finalmente con este trabajo se pretende comprender un poco mejor un paisaje tan complejo como el desierto de Tabernas, fomentar su valoración y proporcionar los elementos necesarios que impulsen a su conservación.

1.3.-DESARROLLO DEL TRABAJO

La definición de las unidades del terreno que componen este ecosistema comienza con la identificación de los atributos más obvios, como la cobertura vegetal. En ecosistemas donde la vegetación es tan escasa, la superficie del suelo, por sí misma, debe constituir un objeto de atención tanto como la vegetación (Graetz, 1990), por lo que las unidades se identifican en función del tipo de cubierta biótica y abiótica, basándonos en las definidas por Solé et al. (1997). Luego sigue el estudio de las geoformas, suelos y atributos dinámicos como los procesos hidrológicos y erosivos. Las unidades que componen el ecosistema quedarán definidas por todos los atributos mencionados y sus interacciones.

Estudios previos en la zona (Alexander y Calvo, 1990), (Calvo et al.,1991b), (Lázaro, 1995) y (Solé et al.1997) señalan la existencia de unos patrones en la distribución espacial de las superficies. Se determinará si existe un control topográfico en la distribución espacial de las teselas, definidas en términos de cobertura, es decir, si se distribuyen independientemente o si están asociadas a las geoformas. Y se investigan las relaciones entre gradientes topográficos y cada tipo de cubierta, para entender la organización espacial que observamos y la respuesta de las unidades del terreno a cambios en el medio físico.

Si existe dicha asociación podremos generar una herramienta que permita crear mapas de teselas o unidades del terreno en otras zonas del desierto de Tabernas, a partir de la topografía.

La superficie del suelo, a través de su comportamiento hidrológico y topografía asociada, controla la evolución del suelo que, a su vez, determina el tipo de cubierta. Se estudiarán las principales características físicas y químicas del suelo de cada tipo de tesela definida anteriormente, se analizarán los principales factores

responsables de este desarrollo diferencial del suelo y las relaciones entre las propiedades del suelo, las características topográficas o su posición en el paisaje y el tipo de cubierta.

En los ecosistemas áridos la heterogeneidad en la distribución espacial de la cubierta de la superficie está relacionada con los patrones de humedad del suelo (Evenari et al. 1971). La capacidad para almacenar agua de un suelo depende de las propiedades físicas y químicas del mismo y de la posición topográfica (Reynolds, 1970; Beckett y Webster, 1971; Bert y Butcher, 1985). El tipo de cubierta que presenta la superficie, que depende del régimen de humedad del suelo, influye en las condiciones hidrológicas del mismo (Sharma et al., 1980), es decir, en la cantidad de agua que le llega y en la que se pierde por evapotranspiración, y a su vez, afecta a los procesos de erosión y pedogenéticos (Puigdefábregas, 1996), los cuales retroalimentan la evolución de la cubierta superficial. Por ello, se describirán y compararán los regímenes de humedad del suelo de las unidades más representativas y se relacionarán con el tipo de cubierta que presentan, características del suelo y atributos topográficos.

Para entender los procesos edáficos que tienen lugar en las diferentes teselas es indispensable comprender la variabilidad espacial de la humedad del suelo, la hidrología de estas unidades y el comportamiento integrado de las mismas.

En este paisaje, los procesos erosivos son los principales responsables de su evolución y la erosión por escorrentía es el proceso de erosión dominante (Calvo y Harvey, 1989). En estos ecosistemas las propiedades del material superficial, más que la propia lluvia, controlan los patrones de escorrentía superficial y así, al menos en parte, los procesos y tasas de erosión (Bryan et al. 1978). Numerosos estudios en otras zonas (Yair et al, 1980; Campbel, 1982) constatan que la variabilidad espacial en la generación de escorrentía y sedimentos está controlada por diferencias en la morfología de la superficie del suelo. Y en la zona acarcavada del desierto de Tabernas, trabajos anteriores (Calvo et al.1991b; Solé et al, 1997;) demuestran los diferentes comportamientos hidrológicos asociados a cubiertas del suelo distintas. Teniendo en cuenta que la evolución de este paisaje depende de los procesos de erosión hídrica, se determinará como responden las unidades del terreno ante precipitaciones naturales, en términos de escorrentía y exportación de sedimentos y la respuesta integrada de las unidades a escala de microcuenca.

A partir de los comportamientos hidrológicos de cada unidad y las características topográficas de la zona, se investigará la contribución de cada unidad a la respuesta de toda la cuenca. Para ello se construye un sencillo modelo

de simulación capaz de predecir a intervalos pequeños de tiempo, durante un evento de precipitación, la descarga de escorrentía en cada metro cuadrado de una cuenca. El modelo se basa en la organización espacial de las unidades del terreno y en las tasas de infiltración que caracterizan a cada unidad determinadas mediante simulación de lluvia (Solé et al., 1997). A medida que se introduce la precipitación en el sistema, estima qué cantidad de lluvia se infiltra en cada metro cuadrado y cuánto se exporta. La escorrentía se distribuye en función de la topografía y se calcula cuanta escorrentía se infiltra en las zonas por las que va discurriendo.

Este modelo de simulación suministrará información acerca del funcionamiento de los flujos de agua entre las unidades y sus implicaciones y permitirá hacer predicciones para otras zonas del desierto y ayudará a comprender y predecir cambios en el paisaje.

Además en un futuro se podrán extender mapas de unidades del terreno a otras zonas del desierto de Tabernas, a partir de la topografía, y podremos simular el comportamiento hidrológico integrado de estas unidades y la respuesta total de zonas más extensas y explorar las interrelaciones en estas unidades a mayor escala.

Asimismo es importante que este estudio contribuya en lo posible a conocer mejor y comprender este sorprendente paisaje y oriente las decisiones para su óptimo manejo y conservación.

1.4.- ASPECTOS NO CONSIDERADOS.

En este trabajo no se abordan las causas que dieron lugar al desarrollo de este paisaje, ni la evolución del paisaje a escala de tiempo geológico.

Y dentro de la escala temporal y espacial considerada hay procesos erosivos como la erosión en túnel, por salpicadura, erosión remontante o movimientos en masa que no se estudian, así como otros temas importantes para entender exhaustivamente la dinámica de este paisaje como la morfología de cauces, el desarrollo de la red de drenaje y la dinámica de sedimentos en los cauces, por lo que aunque tenemos ciertas ideas acerca de los procesos de erosión, sin embargo quedan muchas incógnitas en este sentido que deberán tratarse próximamente.

El modelo de simulación de escorrentía sólo hace referencia a la escorrentía superficial que suponemos es la principal fuente de escorrentía, pero existen evidencias, en cuencas adyacentes a la objeto de estudio, de la existencia de otros procesos de generación de escorrentía, cuya contribución al sistema desconocemos.

Por otra parte el modelo de simulación no incluye los procesos de erosión ni los flujos de sedimentos entre unidades que son fundamentales para entender la dinámica de este paisaje. Sólo es posible plantear algunas hipótesis en base a los flujos de escorrentía y al comportamiento aislado de las unidades del terreno e integrado a escala de microcuenca, pero es necesario continuar trabajando en esta línea para perfeccionar nuestra comprensión del paisaje.

CAPITULO 2

PAISAJES DE CARCAVAS: SUPERFICIE DEL SUELO Y PROCESOS ASOCIADOS. REVISION BIBLIOGRAFICA.

2.1.-INTRODUCCION.

Los paisajes de cárcavas o “*badlands*” son áreas de escaso o ningún valor económico, generalmente desprovistas de vegetación, a menudo, se trata de un terreno tremendamente accidentado, que dificulta el acceso humano, por lo que son vistas como tierras inútiles (Campbell, 1989). La palabra “*badlands*” se deriva de un término empleado por los pioneros del oeste, atribuido a un paisaje extremadamente disectado, difícil de atravesar a caballo e inútil para la agricultura. Se caracterizan por presentar una red de drenaje muy densa y pendientes cortas y abruptas, con interfluvios estrechos (Scheidegger et al., 1968). Desde el punto de vista geomorfológico parecen paisajes desérticos en miniatura desarrollados sobre rocas blandas y relativamente impermeables, expuestos a una rápida erosión fluvial (Campbell, 1989).

Muchos autores han sugerido que los *badlands* constituyen laboratorios de campo ideales para comprobar las teorías de evolución de las geoformas. Esto está relacionado con tres hipótesis básicas: a) que las geoformas de este tipo de paisajes evolucionan rápidamente facilitando su seguimiento; b) que las geoformas de los *badlands* son análogas, excepto en escala, a las principales geoformas fluviales; y c) que los procesos geomorfológicos, dominados, por la escorrentía superficial, son comparativamente simples y fáciles de estudiar.

Sin embargo Bryan y Yair (1982) señalan que la hipótesis de rápida evolución no se puede aplicar a todos los *badlands*. Por otro lado aunque exista analogía morfológica de las geoformas, los datos acerca de la naturaleza y tasas de los procesos son tan escasos, que intentar hacer analogías geomorfológicas es prematuro. Y finalmente, lo más difícil es asumir la hipótesis de la simplicidad de los procesos, pues muchos estudios han demostrado que la evolución de estos paisajes es compleja y variada e incluye un amplio rango de procesos superficiales y

subsuperficiales. La aparición e importancia relativa de estos varía entre *badlands* y dentro de una misma área con el tiempo.

Según estos autores, probablemente uno de los enfoques más interesantes, en estos paisajes, es aplicar estos conocimientos en los planes de uso del suelo. Muchos autores señalan que la acción del hombre puede extender el desarrollo de *badlands* más allá de su rango climático o litológico, a causa de prácticas agrícolas imprudentes. Por lo tanto sería un gran avance si los resultados de los estudios en este tipo de paisaje pudieran usarse para predecir áreas de degradación severa, su naturaleza y tasa de evolución, y proporcionar bases para su rehabilitación. En el sudeste de España, la construcción y abandono de terrazas agrícolas en los fondos de valle, a menudo desemboca en la degradación de los pedimentos basales (Rodríguez, 1992), y como consecuencia toda la ladera puede verse afectada por la erosión (Cerdá y García-Fayos, 1997). La interrupción de la actividad humana no garantiza la recuperación del paisaje a largo plazo, por lo que debemos enfrentarnos a un mayor riesgo de inestabilidad del paisaje, especialmente si el clima fluctúa (Puigdefábregas et al., 1996).

Los *badlands* son paisajes complejos cuyas formas reflejan, por un lado, gran variedad de modificaciones superficiales y subsuperficiales generadas por procesos externos e internos, y por otro, repuestas complejas dentro de un rango de condiciones delicado y equilibrado (Campbell, 1989). En un ecosistema caracterizado por un equilibrio tan delicado y donde las respuestas a un cambio ya sea climático o antrópico son rápidas, un tema crucial para la investigación es la modelización de la evolución de este paisaje, y cómo se manifiesta ante determinados estímulos, con objeto de pronosticar las consecuencias y comprender mejor los procesos dominantes. Esta modelización requiere un conocimiento previo de los procesos hidrológicos, erosivos, edáficos o bióticos, entre otros, asociados a este paisaje.

2.2.- FACTORES QUE CONTROLAN EL DESARROLLO DE LOS PAISAJES DE CARCAVAS Y PROCESOS QUE INTERVIENEN.

En el desarrollo de un paisaje de “*badlands*” influyen numerosos factores y procesos, que dan lugar a una compleja diversidad de geofomas a varias escalas. No obstante la mayoría de áreas en las que el desarrollo natural de los *badlands* es extenso comparten ciertas características litológicas y climáticas (Bryan y Yair, 1982).

Se desarrollan en un amplio rango de materiales y climas, desde sedimentos marinos en el ártico hasta profundos granitos en los húmedos trópicos. Pueden formarse como paisajes naturales sobre litologías favorables, o pueden ser en parte o totalmente creaciones del hombre (Campbell 1989).

Aunque existen numerosos ejemplos de *badlands* inducidos por el hombre en áreas húmedas, todos los *badlands* naturales (excepto los de Hong Kong con una precipitación media de $1899\text{mm}\text{año}^{-1}$) parecen estar caracterizados por precipitaciones limitadas y fuertes contrastes estacionales, normalmente con una estación seca larga o periodos de sequía. A *grosso modo* las áreas donde aparecen los *badlands* naturales se pueden clasificar en dos grupos:

a) áreas mediterráneas semiáridas y áridas, donde la mayor parte de la precipitación tiene lugar en forma de tormentas de alta intensidad de corta duración durante el invierno y prácticamente no hay actividad geomorfológica durante los largos periodos de sequía. En el Mediterráneo han operado desde la época romana, dos importantes factores: un régimen climático oscilante pero progresivamente más seco y una tendencia concomitante hacia la superpoblación y sobrepastoreo. La erosión por escorrentía superficial es el proceso erosivo dominante, pero con variaciones locales considerables en frecuencia, duración y efectividad, que reflejan las características climáticas y del regolito.

b) áreas continentales en latitudes más altas, donde durante el invierno prevalecen condiciones muy frías. La acción de las heladas es geomorfológicamente significativa en las regiones más montañosas, como el oeste de Colorado, y la acción fluvial tiene lugar en la estación del deshielo. Las precipitaciones en forma de lluvia están confinadas al verano (Bryan y Yair 1982). Los procesos geomorfológicos más importantes son el “creeping” o deslizamientos de material congelado, en la estación invernal y ciclos de hielo-deshielo; y a medida que llega el verano todavía están activos los deslizamientos, por la inestabilidad que confieren el impacto de la lluvia y el hinchamiento de las arcillas, pero las tasas de deslizamiento son menores y se hace más significativa la erosión por escorrentía superficial.

Con respecto a la litología, favorecen el relieve de *badlands* los materiales poco consolidados o débilmente cementados como sedimentos de arcillas y limos, con minerales solubles tales como el yeso o la halita (Scheidegger et al., 1968). Los ejemplos más extendidos y mejor desarrollados se dan en esquistos, margas o formaciones limo-arcillosas, pero también se pueden desarrollar sobre conglomerados arenosos con matrices arcillosas, areniscas débilmente cementadas e incluso sobre una capa de meteorización arenosa derivada del granito. Debido a la

pobre consolidación del material, el control estructural es limitado, pero esto no impide marcadas variaciones topográficas en distancias cortas relacionadas con cambios en las propiedades mecánicas, químicas o mineralógicas del regolito (Bryan y Yair, 1982). El clima es significativo, pero el control primario es el carácter fácilmente erosionable de las rocas (Campbell, 1989).

Calvo et al. (1991) estudian el desarrollo de *badlands* en España e identifican 5 factores que controlan su distribución:

1) La litología subyacente es el más importante: margas arcillosas fácilmente erosionables y esquistos son litologías particularmente propensas al desarrollo de *badlands*. 2) El alto relieve disponible permite la profunda disección del terreno sobre una roca blanda. 3) Estos dos factores están previamente controlados por procesos tectónicos del Neógeno, con diferencias en el estilo de desarrollo de *badlands* entre los sedimentos plegados de las Cordilleras Prebéticas, y levantamiento de las cuencas sedimentarias de las cordilleras Béticas. 4) El clima también es importante en este desarrollo de *badlands*, más acentuado en áreas más secas. 5) En parte dependiente del clima, y en parte de la actividad humana, la cubierta vegetal parece ser significativa: los *badlands* son comunes en las áreas de menor cobertura vegetal. Estos factores se combinan para producir un fuerte contraste entre las partes norte y sur de la región con muchas áreas grandes de *badlands* totales o parciales en Murcia y Almería y zonas de *badlands* menores y más pequeñas en Alicante y Valencia.

En los *badlands* de zonas áridas y semiáridas, la erosión por escorrentía superficial es el proceso erosivo dominante. En los *badlands* de Tabernas, aunque a largo plazo el primer control lo constituyen causas extrínsecas como procesos tectónicos o control climático Pleistoceno/Holoceno sin embargo a medio y corto plazo la evolución está controlada por las características del sitio y las propiedades del material (Calvo et al. 1991) y el proceso dominante es la escorrentía superficial (Calvo y Harvey, 1989).

En los *badlands*, en general, actúan diferentes procesos en la generación de escorrentía. Estos procesos pueden variar en distancias pequeñas sobre una misma ladera, y están relacionados con la humedad antecedente y las características de la superficie del suelo (Yair et al., 1980; Bryan y Yair, 1982).

En el desierto de Tabernas trabajos previos (Calvo et al. 1991b, Solé et al. 1997) constatan la variabilidad espacial en la escorrentía y erosión. Son las propiedades de la superficie del suelo las que controlan los patrones de escorrentía superficial y así, los procesos y tasas de erosión. La erosión en surcos ("rilling") (Figura 2.1) es el proceso dominante en Tabernas (Calvo y Harvey, 1989). Hay

evidencias de erosión en túnel (“piping”), que normalmente son de poca extensión y en general localizados (Harvey, 1982; Harvey, 1987; Alexander et al. 1994).

Otros procesos de erosión hídrica, como la erosión por salpicadura (o por impacto de las gotas de lluvia), son importantes en estos paisajes, como un agente directo que arranca el material y lo transporta, e indirectamente porque la disgregación del material que provoca el impacto de las gotas de lluvia contribuye a la erosión por escorrentía y afecta a la hidráulica del flujo superficial (Howard, 1994). Investigaciones llevadas a cabo dentro de la zona de estudio ponen de manifiesto que este proceso es bastante activo en el área acarcavada del desierto de Tabernas, y que la cantidad de material movilizado por el impacto de las gotas de lluvia, varía considerablemente de un tipo de tesela a otra (Downward, 1998 comunicación personal).

Los movimientos en masa son otros procesos erosivos característicos de los “*badlands*”, e igual que el resto de procesos erosivos muestran una compleja variabilidad espacial y temporal (Bryan et al. 1978; Yair et al., 1980). En el desierto de Tabernas hay evidencias de movimientos en masa (Harvey, A. 1982), que provocan desprendimientos de material desde menos de un kilogramo o unos pocos kilos (Figura 2.2), hasta otros de varias toneladas (Figura 2.3).

En paisajes acarcavados de este tipo, el control que constituye el clima, la litología, o procesos tectónicos, son muy importantes cuando se comparan *badlands* diferentes, o a largo plazo. Sin embargo, para un clima y una litología homogénea, el modelo de iniciación de escorrentía y los procesos activos están fuertemente influenciados por las características de la superficie del suelo y material subsuperficial (Yair et al., 1980; Bryan et al., 1978; Bryan y Yair, 1982; Campbell, 1989; Calvo et al. 1991; Solé et al., 1997).

Por lo tanto resulta de gran interés el estudiar los diferentes tipos de cubiertas de la superficie del suelo que caracterizan este tipo de paisajes y los procesos que dependen o se ven influenciados por las diferencias en la morfología superficial, para comprender la dinámica de estos paisajes.

2.3.- HETEROGENEIDAD EN LA SUPERFICIE DEL SUELO.

Numerosos trabajos en *badlands* ponen de manifiesto la variabilidad en la superficie del suelo y que pequeñas diferencias en las características de la superficie afectan a los procesos como infiltración o erosión, motor de evolución en este paisaje.

Varios trabajos estudian las diferentes comunidades vegetales en estos ecosistemas y su relación con variables geomorfológicas o edáficas (Butler y Goetz,

2.- Revisión bibliográfica

1986; Guardia y Ninot, 1992; Guardia et al., 1992) y algunos de ellos en el desierto de Tabernas (Peinado et al., 1992; Kunkel, 1993; Alexander y Calvo, 1990; Alexander et al., 1994; Lázaro y Puigdefábregas, J., 1994; Lázaro et al. 1999).

Otros muchos trabajos estudian las costras bióticas o abióticas y su relación con la hidrología y erosión en zonas áridas o semiáridas en general (Mücher et al., 1988; Watson, 1979; Johansen, 1993; Moore y Singer, 1990; Brotherson y Rushforth, 1983) y en particular en *badlands* (Finlayson et al., 1987), así como la cobertura de piedras y su relación con procesos hidrológicos o geomorfológicos (Abrahams y Parsons, 1991; Poesen et al. 1990; Bunte y Poesen, 1993 y 1994).

Sin embargo se encuentran pocos trabajos que integren el estudio de las relaciones de la cubierta de la superficie biótica y abiótica y los procesos geomorfológicos, pedogenéticos o hidrológicos. Y en un paisaje de *badlands*, donde la vegetación es tan escasa y las superficies no vegetadas son mayoritarias, es importante estudiar la cubierta de la superficie vegetal o abiótica.

Algunos autores reconocen la importancia de las condiciones de la superficie del suelo, como cobertura vegetal o encostramiento, en la producción de escorrentía (Morin y Benyamini, 1977; Wilcox et al., 1990) más que otros factores como la topografía. Casenave y Valentin (1992) en zonas semiáridas del Oeste de Africa, llevan a cabo una clasificación de las características de las superficies del suelo que influyen en los procesos de infiltración y escorrentía, que les lleva al concepto de *unidad de superficie*, caracterizada en términos de propiedades genéticas, morfológicas e hidrológicas. Para llevar a cabo la clasificación hasta unidades de superficie tienen en cuenta criterios de identificación que, en orden de mayor a menor influencia son: costra superficial, cubierta vegetal, actividad animal y rugosidad de la superficie.

Unos años después en 1997, d'Herbes y Valentin construyen un mapa de superficies de la región del Niamey, Níger, a partir de imágenes de satélite, e identifican 16 clases basadas en las geoformas, vegetación (arbustos y estrato herbáceo), tipo de costra y uso del suelo, que utilizan para hacer predicciones hidrológicas.

En el desierto de Tabernas, estudios previos, describen la existencia de diferentes tipos de superficies del suelo, que denominamos unidades del terreno o teselas que se caracterizan por comportamientos hidrológicos y erosivos diferentes (Calvo et al., 1991b; Solé et al., 1997). Calvo et al. (1991b) iniciaron el estudio del comportamiento hidrológico de un rango de superficies desde superficies de marga desnuda, superficies cubiertas con líquenes hasta superficies con vegetación superior. Posteriormente Solé et al. (1997) estudian 16 tipos de superficies,

caracterizadas por el área ocupada por grietas, fragmentos de roca, líquenes, plantas superiores y rugosidad de la superficie. Estos trabajos ponen de manifiesto la heterogeneidad espacial en la cubierta de la superficie del suelo en este ecosistema y su importancia en los procesos hidrológicos y erosivos, y de ellos se desprende la necesidad de estudiar más detalladamente los tipos de unidades del terreno o teselas, definidas en función de la cobertura biótica o abiótica, y sus relaciones con los factores ambientales y procesos más importantes en la evolución de este paisaje.

2.4.-CONTROL TOPOGRAFICO SOBRE LA DISTRIBUCION ESPACIAL DE LOS TIPOS DE CUBIERTA DEL SUELO.

Los efectos de las geoformas sobre los patrones y procesos de los ecosistemas están ampliamente documentados (Moore et al., 1993). Numerosos estudios, sobre distintos tipos de ecosistemas, muestran relaciones entre la composición y estructura de estos ecosistemas con la altitud, pendiente, orientación o índices topográficos de humedad relativa basados en la insolación potencial y redistribución topográfica de la vegetación (Pinder et al. 1997; Frank, 1988) y con las geoformas en general (Stewart et al., 1993; del Barrio et al. 1997)

A menudo la variabilidad en la vegetación y los suelos de un sitio en particular se atribuye a diferencias en la posición topográfica. Las posiciones en el paisaje modifican la hidrología local y condiciones microclimáticas que influyen en la disponibilidad de agua. La orientación y los vientos dominantes influyen en la temperatura del suelo, demanda evaporativa y movimiento del aire que afectan a la humedad del suelo (Rosenverg, 1974).

La pendiente influye en la infiltración del agua, la escorrentía y erosión y procesos de sedimentación, lo cual afecta a la génesis del suelo y al desarrollo de la vegetación. Wollenhaupt y Richardson (1982) encontraron que la concavidad del paisaje y más alta humedad del suelo estaban relacionados con mayor densidad vegetal y más biomasa.

Satterwhite y Ehlen (1982) en el norte del desierto de Chihuahuan, estudiaron las relaciones entre vegetación, geoformas y suelo, mediante fotointerpretación y llegaron a la conclusión de que las relaciones eran tales que las geoformas, más fácilmente observables con fotografía aérea, se pueden usar como indicadores de la vegetación y suelo.

Las geoformas controlan los patrones espaciales de la disponibilidad de recursos, la extensión y localización de perturbaciones, y el patrón de los parches de vegetación (Swanson et al. 1992) o el mosaico de teselas dentro del paisaje.

En muchos ecosistemas áridos o semiáridos, se considera que los patrones de la vegetación están controlados por el movimiento superficial de agua, como en Jornada (Nuevo Méjico), donde las zonas vegetadas atraviesan las laderas, orientándose perpendicularmente a las direcciones de flujo del agua controladas gravitacionalmente (Swanson et al. 1992).

En las zonas áridas y semiáridas de Africa existen unos patrones muy particulares de vegetación, comunidades de plantas que se disponen en bandas paralelas alternado con bandas no vegetadas y perpendiculares a la pendiente, que se ha descrito en muchas regiones áridas y semiáridas del mundo. El punto clave lo constituye la dinámica de los flujos de agua superficiales que justifican el establecimiento y mantenimiento de este tipo de vegetación, flujos que están controlados por la topografía, y el resultado es un equilibrio dinámico entre la estructura de la vegetación y la redistribución del agua de la lluvia a través de flujos de escorrentía superficial (Cornet et al., 1992).

En los paisajes acarcavados también se han encontrado numerosas relaciones entre la cubierta de la superficie del suelo y la topografía. Butler y Goetz (1986) demuestran en los *badlands* de Dakota del Norte, que la posición en el paisaje está correlacionada con la composición vegetal, y las características del suelo incluyendo la humedad el suelo. Yair et al.(1980) en los *badlands* del Zin Valley describen diferencias en el desarrollo del suelo en función de la orientación.

Los factores microclimáticos determinados por la insolación diferencial influyen en las características de las teselas. Los efectos de la orientación sobre las características del suelo y de la vegetación es un tema ampliamente debatido. Sus efectos serán más pronunciados en regiones donde la aridez general promueve variaciones extremas en la humedad del suelo y es probable que estas variaciones tengan una papel importante en controlar la forma de las laderas de los “*badlands*”. Las formas de estos paisajes favorecen importantes contrastes microtopoclimáticos, que se acentúan en las zonas desprovistas de vegetación (Campbell, 1989).

Guardia y Ninot (1992) y Guardia et al. (1992) estudiando las relaciones entre la vegetación y la topografía en los *badlands* del Alto Llobregat, llegaron a

la conclusión de que los atributos topográficos constituyen el principal control en la composición de comunidades de cada substrato.

En el desierto de Tabernas, se propone que la orientación constituye un control local de los procesos superficiales e influye en la estabilización a través de

la colonización de los líquenes y plantas superiores (Alexander y Calvo, 1990). Alexander et al.(1994) estudiando los mecanismos de estabilización natural en los *badlands* de Tabernas llegan a la conclusión de que se pueden identificar una secuencia sucesional de la vegetación que está asociada con una secuencia paralela de desarrollo del suelo. Dentro de esta secuencia, los controles topográficos como la pendiente u orientación son importantes dando lugar a variaciones locales considerables.

Lázaro (1995) estudia las relaciones entre la vegetación y la geomorfología en el área acarcavada del desierto de Tabernas, y constata que la vegetación superior está estrechamente relacionada con la geomorfología. Variables geomorfológicas como la pendiente, orientación, posición en ladera o profundidad del regolito juegan un papel muy importante en la distribución de las comunidades vegetales.

Los *badlands* de Tabernas, presentan una topografía muy accidentada, responsable de variaciones microclimáticas en distancias muy cortas, que explican la heterogeneidad en la cobertura de la superficie del suelo en un espacio reducido, donde clima y litología son homogéneos. Para estudiar los patrones de distribución espacial de los diferentes tipos de cubierta de la superficie del suelo y su relación con las geoformas, es necesario implicar un número muy elevado de muestras para abarcar la complejidad de estas relaciones, por lo que parece muy apropiado construir un sistema de información geográfica que facilite la investigación de estas relaciones.

Si la distribución espacial de las teselas o unidades del terreno está asociada a la topografía, es posible:

- determinar la influencia sobre las teselas de los atributos topográficos y procesos que se pueden inferir a partir de las variables topográficas.
- plantear hipótesis para predecir la respuesta de las unidades del terreno a cambios en el medio físico.
- generar herramientas para cartografiar las teselas a partir de la topografía y extender mapas de teselas, a otras zonas del desierto, a partir de la topografía.
- usar estas teselas como indicadores de los procesos hidrológicos y erosivos, cuando se conocen los comportamientos hidrológicos y erosivos de las mismas.

2.5.- RELACIONES CUBIERTA-SUELO-TOPOGRAFIA.

2.5.1.- Propiedades del suelo en paisajes de cárcavas y su influencia en la heterogeneidad de la cubierta del suelo.

Buena parte de la variabilidad ambiental que controla los patrones de distribución de las teselas puede atribuirse a los factores topográficos y su influencia en las condiciones microclimáticas de cada superficie. Sin embargo los procesos geomorfológicos activos y otros factores pueden causar patrones que se desvíen de los predecibles por las características microclimáticas (Brown, 1994). Otras variables (como el espesor y la textura del suelo), aparte de las topográficas son importantes para definir el patrón espacial de las unidades del terreno.

La textura del suelo afecta a la capacidad de retención de agua del suelo. Textura y profundidad del suelo conforman el almacén de agua en el suelo y la distribución de la biomasa vegetal difiere a través de gradientes de textura (Singh et al.1998).

Los suelos de ecosistemas áridos se caracterizan por una baja actividad bioquímica. Los procesos pedogenéticos están controlados principalmente por las influencias climáticas y por la disponibilidad de humedad. En desiertos cálidos debido a la poca humedad disponible las reacciones químicas y físicas en el suelo generalmente son menos intensas, y los suelos heredan muchas de las características del material parental. La característica más notable de los suelos de ecosistemas áridos es la presencia de horizontes de acumulación de carbonato cálcico, yeso, cloruro sódico u otras sales, horizontes que se usan como diagnóstico en la clasificación de estos suelos, (Claridge, y Campbell, 1982)

Wieder et al.(1985) estudiando catenas, en laderas de climas áridos, concretamente en el Negev, encontró que la característica más indicativa de edafogénesis en la zona de estudio, era la acumulación de sales solubles en el perfil a través de los procesos de lavado y redistribución.

En *badlands* el suelo o regolito está constituido por un material no consolidado o muy pobremente cementado, algunas veces con minerales solubles tales como el yeso o la halita (Scheidegger et al., 1968). Generalmente presentan regolitos muy delgados en regiones áridas, alrededor de 30cm hasta la roca madre. Muchos *badlands* poseen en común las características de los perfiles de regolito, con un horizonte superficial de 1 a 5cm que presenta grietas de desecación. Este horizonte superficial está compactado y se caracteriza por la presencia de grietas con un patrón poligonal cuando los procesos de expansión-retracción son moderados, como en los *badlands* de Mancos Shales, en Utah, la formación Brule

en los *badlands* del sur de Dakota (Schumm, 1956) y en parte de los *badlands* Dinosaur, Canadá (Bryan et al., 1978), y cuando son fuertes los procesos de expansión-retracción el horizonte superficial se rompe en fragmentos sueltos irregulares “*popcorn*” entre los que aparecen grandes huecos, como ocurre en los *badlands* de la formación Chadron en Dakota Sur y en zonas de los *badlands* Dinosaur, Canada. Aunque este horizonte superficial puede contener fragmentos de roca madre parcialmente meteorizados, así como algún nódulo, está compuesto principalmente por material no agregado, limo y arenas procedentes de la meteorización del material parental y que suele estar lavado en los componentes solubles (Howard, 1994).

Por debajo de este horizonte superficial, aparece un subhorizonte de 5 a 10cm de espesor, que puede variar de una costra amorfa y densa (Hodges and Bryan, 1982) a un horizonte granular suelto. Y por debajo se encuentra un horizonte con un espesor variable entre 10 y 40cm, que consiste en fragmentos de la roca madre parcialmente disgregados y meteorizados, con una gradación de tamaños hasta la roca madre no meteorizada. No obstante existe una variabilidad considerable en los regolitos de los *badlands*, como afloramientos de areniscas cementadas, finos horizontes de arena débilmente cementados (a menudo el cemento es CaCO_3) (Hodges y Bryan, 1982), recristalizaciones de sales en horizontes subsuperficiales o costras salinas superficiales (Laronne, 1982).

Determinadas propiedades de un suelo son indicadores de su susceptibilidad a la erosión y a su vez nos informarán del tipo de cubierta superficial que es capaz de sostener. A las propiedades relacionadas con la dispersión se presta una particular atención. Los sistemas de suelo con procesos de dispersión se caracterizan por alta densidad aparente, baja permeabilidad y tasa de infiltración y alta resistencia mecánica en seco y baja en húmedo. La composición química de la solución del suelo también influye en el expansión y retracción de la masa del suelo. Sin embargo las condiciones químicas que favorecen la expansión y/o dispersión no son esenciales para el desarrollo de los *badlands*. Un regolito altamente erosionable podría ser suficiente, particularmente si contiene bajas cantidades de materia orgánica. En tales casos las propiedades del suelo que influyen en la tasas de captación de agua por el suelo, son importantes, particularmente la estabilidad de los agregados. La relación entre la expansión y dispersión del suelo son útiles para estudiar los procesos de acarcavamiento, pues pueden indicar el potencial para la erosión. No obstante estos procesos no son requisito previo para la formación de cárcavas y desarrollo de *badlands*, aunque donde los suelos se expanden y dispersan se pueden esperar tasas de erosión altas (Imeson et al., 1982).

Varios estudios sobre estabilidad de los agregados de arcilla en el suelo indican que algunos constituyentes como la materia orgánica y los óxidos de hierro y aluminio tienden a estabilizar los agregados (Emerson y Greenland, 1990), mientras que la presencia de cationes sodio en el complejo de cambio causa dispersión de los agregados de arcilla y acelera la erosión. El contenido en sodio intercambiable es un indicador de la capacidad de dispersión de un suelo. Benito et al., (1993) estudian la influencia de las propiedades fisico-químicas del suelo en los procesos de erosión de los *badlands* de la cuenca del Ebro y llegan a la conclusión de que las propiedades fisico-químicas de un suelo juegan un papel muy importante en las tasas de erosión. En suelos no susceptibles a la dispersión, la escorrentía superficial es el proceso predominante. Cuando el suelo es muy susceptible a la dispersión hay gran tendencia a que se desarrolle erosión en túnel (“*piping*”) y densidades muy altas de erosión en surcos (“*rills*”). Los procesos de erosión en túnel son más severos en materiales con alto contenido en sodio respecto a la concentración total de cationes, y la erosión en surcos prevalece cuando aumenta el contenido en cationes bivalentes.

Las propiedades físicas y químicas de los minerales de arcilla, la distribución granulométrica, densidad, y cementación del regolito afectan a la meteorización por humectación y lavado, a las características de la escorrentía y producción de sedimentos y solutos y a la forma de los *badlands* (Howard, 1994).

En los *badlands* del Zin Valley, Israel, el material parental es rico en arcillas y presenta un alto contenido en montmorillonita, sin embargo los test de laboratorio muestran poca expansión por hidratación, parece que se debe a la presencia de grandes cantidades de compuestos de calcio que inhibe la expansión y provoca floculación, lo cual junto con la estabilidad de los agregados ricos en arcilla da lugar a tasas altas de infiltración. Esto reduce la tasa de escorrentía que estará esencialmente confinada a sistemas de surcos y canales (*rills* y *pipes*). La infrecuente y baja tasa de escorrentía da lugar a unas tasas de denudación bajas. La estabilidad de los agregados, que no se dispersan fácilmente bajo el impacto de las gotas de lluvia, contribuye también a la baja erosión, pues minimiza el efecto de la erosión por impacto de la lluvia (Yair et al. 1980).

En Tabernas, Alexander et al. (1994) estudian los suelos en superficies geomorfológicas de distintas edades (Calvo et al., 1991), analizan las características del suelo en el primer centímetro, y del resto del perfil (de 14 a 90cm), y exponen que las margas miocenas de Tabernas dan lugar a suelos de textura arcillo o limo-arcillosa, con abundantes fragmentos subangulares de roca del tamaño de la arena o mayores, contenidos en materia orgánica bajos y en general calcáreos, variando el

contenido en carbonato cálcico entre 14-32%. Encuentran que el yeso solo está presente en forma de trazas, en la mayoría de muestras. En las superficies más antiguas observan un lavado de bases en los 60cm superiores, en particular de sodio, mientras que en las superficies más jóvenes las concentraciones de sodio soluble son significativamente más altas en la superficie, y aunque el SAR (relación de absorción de sodio) es bajo, el sodio parece tener un efecto significativo sobre la dispersión y posiblemente expansión de arcillas en las superficies geomorfológicas más jóvenes. El carbono orgánico es más elevado en la superficie de todos los perfiles que estudiaron. Sugieren una ligera eliminación de carbonatos en los primeros 20cm y picos de deposición entre 20 y 40cm, al menos en las superficies más antiguas. El color de los suelos refleja los cambios en los óxidos de hierro a través del tiempo, pasan de gris oscuro o marrón grisáceo a marrón amarillento cuando aumenta la edad. Los parámetros del suelo que estudian son consistentes con la secuencia de edad establecida en el área (Alexander et al., 1994).

Lázaro (1995) estudiando las relaciones entre la vegetación y la geomorfología en el área acarcavada del desierto de Tabernas encuentra que la vegetación a escala de parcela está estrechamente relacionada con las características físico-químicas del substrato como pH, conductividad eléctrica, concentración de carbonato cálcico, relación carbono/nitrógeno y concentración de azufre total. La ausencia o coberturas bajas de líquenes y plantas superiores “edificadoras”, así como la presencia de especies “resistentes”, están asociadas a concentraciones altas de yeso, cloruros y carbonato cálcico, muy poca materia orgánica y pH menor de 7; mientras que coberturas importantes de vegetación “edificadora” están asociadas a condiciones inversas. A escala de ladera, los factores principales que actúan sobre la vegetación son la profundidad y grado de estabilidad del regolito, la disponibilidad de agua y el tiempo, a los que habría que añadir las condiciones físico-químicas del substrato, que podrían sintetizarse en concentraciones bajas de sulfatos, cloruros y carbonatos y concentración relativamente alta de carbono orgánico y pH básico.

De todos estos estudios fácilmente se desprende que el suelo en estos ecosistemas desempeña un papel fundamental en dos sentidos principalmente: a) sus características físicas y químicas pueden favorecer en mayor o menor grado la erosión, y b) por otra parte condiciona el tipo y características de vegetación o el tipo de cubierta. No hay que olvidar que a su vez la vegetación mejora las condiciones hidrológicas del suelo, aportan materia orgánica al suelo, favorece la estructura, la infiltración y la actividad biológica y limita la erosión, en definitiva la potencia la pedogénesis (Puigdefábregas, 1996).

El suelo va a determinar el tipo de cubierta de su superficie, y al mismo tiempo las características de la superficie pueden favorecer o no la pedogénesis, controlan los procesos de generación de escorrentía y erosión, que a su vez impiden o favorecen la pedogénesis. En este marco se justifica el estudio de las relaciones entre las características del suelo y el tipo de cubierta sobre su superficie, y si además las teselas están asociados a la topografía, es necesario estudiar las relaciones del suelo con su posición en el paisaje.

2.5.2.- Relaciones cubierta-suelo con la posición en el paisaje.

La topografía es uno de los cinco factores que intervienen en la formación del suelo, y muchas propiedades del suelo están relacionadas con su posición en la ladera, Milne (1935) usó el término *catena* para describir la variabilidad de las propiedades del suelo a lo largo de una ladera.

Desde hace mucho tiempo se vienen relacionando las propiedades del suelo, como materia orgánica, espesor del horizonte A y B, grado de desarrollo, moteado del suelo, pH, profundidad de los carbonatos y retención de agua, con la posición en el paisaje (Kreznor et al., 1989), así como la composición granulométrica, y cationes intercambiables (Brubaker et al., 1993) y también se relaciona la clase de erosión a la que pertenece el suelo y su posición topográfica (Daniels et al. 1985).

Wieder et al.(1985) estudiando catenas, en laderas de climas áridos, en el Sede Boqer (Negev), observan que la parte alta de las laderas, con importantes afloramientos rocosos (la roca desnuda constituye entre el 50 y 80% de la superficie), está más lavada que los coluviones situados en la parte baja de la ladera, a diferencia de lo que ocurre normalmente en zonas húmedas, donde los estudios de catenas sugieren que los procesos de lavado aumentan ladera abajo. En otras regiones semiáridas de Israel con precipitaciones anuales mayores de 200mm también se ha observado esa tendencia de aumento del lavado hacia la parte baja de la ladera, pero en la cuenca del Sede Boqer, con 90mm de precipitación media anual la tendencia es contraria. Este hecho se atribuye a una disminución de las entradas de agua ladera abajo, que se debe a que la frecuencia y magnitud de eventos de escorrentía es mayor en la parte alta de la ladera, donde la capacidad de infiltración es baja. La mayoría de la escorrentía generada en esta parte alta de la ladera es absorbida por la parte más alta del coluvión, donde la capacidad de infiltración es alta, y casi nunca alcanza la base de la ladera porque la mayoría de lluvias son de muy corta duración.

Años más tarde en la misma zona Kadmon et al. (1989) estudian las propiedades del suelo en dos laderas con orientación contrastada, una al norte y otra al sur, y observan tendencias similares en ambas laderas y además encuentran mayor contenido en arena en la parte alta de ambas laderas, con respecto a la parte baja. La única diferencia que encuentran entre ambas laderas es que los suelos de la ladera sur están más lavados que los de la ladera norte.

Yair (1990) estudia el papel de la topografía y de la cobertura superficial sobre la formación del suelo a lo largo de la ladera, en la misma zona del Norte del Negev, encuentra que las diferencias en las propiedades del suelo con la posición están estrechamente relacionadas con la redistribución del agua y partículas erosionadas a lo largo de la ladera. Las entradas de agua en el suelo, y como consecuencia la intensidad de lavado está relacionada con la tasa roca desnuda/suelo. En la sección rocosa de la ladera, con infiltración más limitada, se producen grandes cantidades de esorrentía hacia la zonas adyacentes con suelo (espacios entre rocas) que presentan mayor infiltración e intensidad de lavado. En la sección coluvial, donde desciende la tasa roca desnuda/suelo, la capacidad de infiltración es mayor y la esorrentía limitada con lo que se reduce el agua disponible para el lavado, esto conduce a lo largo del tiempo a la acumulación de sales a una profundidad relativamente superficial, teniendo en cuenta que la profundidad de infiltración es bastante superficial, debido a la limitada precipitación.

Variaciones sistemáticas en las propiedades del regolito pueden estar asociadas a la orientación de la ladera (Howard, 1994). Churchill (1981) estudia los *badlands* en el sur de Dakota y encuentra que las laderas orientadas al norte presentaban regolitos más profundos (más de 30cm), mientras que en las orientadas al sur los regolitos eran más superficiales (de 3 a 10cm).Yair et al (1980) en los *badlands* del Zin valley también observa, regolitos más profundos en laderas orientadas al norte.

Butler y Goetz (1986) estudiando los *badlands* del norte de Dakota, concluyen que la posición en el paisaje estaba correlacionada con la composición de la vegetación y con las características del suelo, incluyendo la humedad del suelo. Observaron que los suelos de las cumbres eran cronológicamente más antiguos y resultaban de procesos pedogenéticos más que de procesos de sedimentación, mientras que los suelos en el resto de posiciones están sometidos a procesos de deposición y erosión principalmente. El espesor de la superficie del suelo, porcentaje de arcilla y contenido en humedad aumentaba ladera abajo.

Scoging (1982) en los *badlands* de Ugijar (Granada), estudia 4 zonas con diferentes litologías y descubre variabilidad espacial en la distribución

granulométrica. En dos de las zonas disminuye el tamaño de las partículas del suelo ladera abajo, el material fino es removido de las partes altas y se acumula en las bajas, debido a que en las partes altas la generación de escorrentía era muy alta y rápida. Mientras que en las otras dos zonas las partículas más gruesas aparecen en la parte baja de la ladera, debido a que las partículas finas son eliminadas selectivamente dejando el depósito de gruesos. En estas zonas la escorrentía es relativamente uniforme a lo largo de la ladera, pero la baja capacidad de almacenaje en la parte baja, hace que aumente la escorrentía y arrastre al limo, junto con algo de material grueso, dejando las fracciones más gruesas.

Los estudios llevados a cabo por Harvey (1987), Calvo et al.(1991) y Alexander et al.(1994) en Tabernas revelan diferencias en las características del suelo en función de la edad de los diferentes niveles de encajamiento, y también se encontraron diferencias en el espesor del regolito que es más potente en los pedimentos de las laderas orientadas al norte que en las orientadas al sur, donde no hay suelo sino un regolito margoso (Solé et al. 1997).

Lázaro (1995) encuentra que determinadas características del suelo, aparte de estar relacionadas con la vegetación, están asociadas a las geoformas, como el pH, la conductividad eléctrica y el carbonato cálcico, este último señala que se concentra más en cabeceras, lomos y taludes erosionados, donde la infiltración es muy baja y se lava poco y la composición es similar a la original.

2.5.3.-Relaciones cubierta, humedad del suelo y topografía.

Características como el tipo cubierta de la superficie del suelo (porcentajes relativos de roca y suelo o acostamiento) constituyen los principales controles de la distribución de la humedad del suelo a varias escalas, en ecosistemas como el desierto del Negev (Yair et al, 1978 y 1980b). Además en los ecosistemas áridos una de las principales causas de la heterogeneidad espacial de la cubierta del suelo es la variación espacial en la disponibilidad de agua. (Evenari et al. 1971). El análisis de la distribución espacial de la vegetación, en el desierto del Negev, demuestra que existen relaciones entre los patrones de organización espacial, la estructura de la superficie del suelo, las características del suelo y los movimientos de agua (Olsvig-Whittaker, et al., 1983).

Por lo tanto en ecosistemas áridos, el tipo de cubierta superficial depende de los regímenes de humedad, que a su vez están controlados por propiedades de la superficie, como el tipo de cubierta que presenta: piedras, grietas, costras y vegetación.

Los climas semiáridos se caracterizan por cubiertas vegetales dispersas, con huecos de suelo desnudo entre las plantas o rodales. Esta característica refleja el ajuste entre la superficie foliar transpirante y la disponibilidad de agua en el suelo. La proporción de espacio cubierto por la vegetación se halla pues limitada por la disponibilidad de agua en el suelo y por la demanda evaporante de la atmósfera, (Thornes, 1985; Puigdefábregas, 1996), pero también por factores edáficos y topográficos locales (Thornes, 1985). Además la vegetación en zonas semiáridas suele presentar distribuciones espaciales aglomeradas, constituyendo mosaicos, de parches vegetados que alternan con áreas de suelo desnudo, y esta distribución tiene importantes consecuencias hidrológicas y edáficas. En los agregados vegetales la infiltración, el aporte de materia orgánica y nutrientes y la actividad biológica son mayores y protegen de la radiación excesiva (Puigdefábregas, 1996). Además se sabe que muchas especies leñosas, en clima semiárido, depositan parte del agua del flujo xilemático en las capas superiores del suelo (Dawson 1993). Mejoran las condiciones del suelo y favorecerán el régimen de humedad del suelo, aunque en contrapartida el consumo de agua es mayor.

Los estudios de suelo y vegetación en zonas áridas y semiáridas muestran grandes variaciones espaciales, resultantes de diferencias en muchos factores que afectan al suelo y la vegetación (Wierenga et al., 1987).

Un estudio de la variación espacial de la vegetación con el régimen de humedad del suelo a escala de ladera, al norte del Negev (Israel), indicaba que el mejor régimen de agua y mayor diversidad vegetal aparecía en las partes altas de la ladera, con afloramientos rocosos, pues las mismas entradas de agua se distribuyen en un volumen menor de suelo, el situado en las grietas entre rocas, en las cuales a su vez la evaporación es menor, por la mayor protección frente a la radiación solar. Mientras que en la sección coluvial, en la parte baja de la ladera, los regímenes de humedad son peores, pues se ha de redistribuir la misma cantidad de agua en un mayor volumen de suelo (Yair y Danin, 1980). La disponibilidad de agua en este tipo de ecosistemas (desiertos no arenosos) depende de la tasa roca desnuda/suelo y este mismo índice explica la variación en las propiedades del suelo y de la vegetación a lo largo de la ladera (Kadmon et al., 1989).

En las regiones áridas, el régimen de agua es uno de los factores más importantes que influyen sobre los patrones de la vegetación, por un lado los flujos laterales de agua favorecen las condiciones de algunos microhabitats, y por otro la disponibilidad de agua para la planta está muy limitada por la salinización que conduce a estrés osmótico. El carácter de la superficie de suelo puede ser

importante para el establecimiento de la vegetación y como consecuencia para la composición de especies en los diferentes sitios (Jenny et al., 1990).

La humedad del suelo es función de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo (Reynolds, 1970) y está controlada por variables como la textura (Beckett y Webster, 1971), la vegetación (Sharma et al., 1980) y la topografía (Burt y Butcher, 1985). La variabilidad espacial de los patrones de humedad del suelo reflejarán la distribución espacial de todas esas variables que lo controlan (Campbell y Honsaker, 1982).

Singh et al. (1998) estudian la dinámica de la humedad del suelo y los patrones de la vegetación en un pastizal semiárido al norte de Colorado, y subrayan la importancia de la variabilidad de la textura del suelo como un factor que controla la disponibilidad de agua en esta región seca; las entradas procedentes de la lluvia, se almacenan en función de la granulometría del suelo.

En *badlands*, Campbell (1989) apunta que los efectos de la orientación sobre el grado de desecación y otras características del suelo, serán más pronunciados donde la aridez potencie variaciones extremas en la humedad del regolito, variaciones que son de especial importancia en el control de la forma de las laderas de los *badlands*.

Fitzjohn et al (1998) estudian los patrones espaciales de la humedad de la superficie del suelo durante periodos secos y húmedos, en un cuenca de *badlands* en Guadalajara y encuentran que la variabilidad en la humedad del suelo está relacionada predominantemente con la composición granulométrica del suelo más que con los flujos de convergencia de agua.

En los *badlands* de Tabernas se estudia la humedad en 3 transectos de laderas NNE, SWW y SSW (Lázaro, 1995) y encuentra que con carácter general en profundidad se conserva más la humedad, así como una importante variabilidad espacial en la humedad del suelo asociada a orientaciones contrastadas y dentro de una misma ladera, la ladera norte, observa diferencias entre la parte alta y baja de la ladera. Y señala las importantes interrelaciones entre la estabilidad del sustrato, la disponibilidad de agua y la vegetación.

En cualquier caso no existen muchos trabajos, donde se estudien detalladamente los regímenes de la humedad del suelo y su relación con el tipo de cubierta que presenta la superficie, o en distintas posiciones (bajo mata versus claro) o con las características topográficas. En este tipo de paisaje despiertan más interés los procesos de erosión y generación de escorrentía. En los ecosistemas semiáridos la escorrentía superficial resultante de que la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración de suelo, es el mecanismo más importante de

generación de escorrentía, y en esta situación la humedad antecedente puede no ser importante (Yair y Lavee, 1985). Sin embargo en muchas situaciones (Scoging, 1982) la escorrentía se genera debido a la saturación de horizontes próximos a la superficie. En estos casos la humedad antecedente es muy importante, así como la conectividad entre áreas fuente y el desarrollo de flujos hidrológicos continuos son críticos para determinar la escorrentía y erosión. Por lo tanto también interesa comprobar la importancia de la humedad antecedente en la generación de escorrentía.

2.6.- PROCESOS DE METEORIZACION EN BADLANDS.

El papel de la meteorización es fundamental en el moldeado de la roca madre. La génesis del suelo y sus características dependen de la meteorización (Porta et al. 1994), que además prepara la roca madre para la actuación de los procesos erosivos (Goudie, 1989).

Los procesos de meteorización responsables del desarrollo del regolito de los *badlands*, implican pocos cambios mineralógicos. La simple humectación del material puede ser suficiente para disgregar el material y dispersar los minerales de arcilla. La dispersión de los minerales de arcilla es todo lo necesario para formar un regolito desagregado (Finlayson et al., 1987). En algunos casos la humectación del material hará que se disgregue y disperse en un intervalo de tiempo de unos minutos a unas pocas horas, siempre que haya suficiente agua para completar la saturación de la muestra. En otros casos se descomponen más lentamente, con menor expansión y dispersión incompleta, a veces se produce una dilución de sales como calcio y magnesio (Laronne, 1982), cuya acumulación aparentemente inhibe la posterior desintegración. Supuestamente se requiere el lavado de dichos solutos para completar la meteorización, y la concentración de sales disminuye hacia arriba en el perfil de regolito.

La meteorización de las rocas por la cristalización de sales, hidratación y expansión térmica de sales se reconocen como causas poderosas de la desintegración de las rocas en áreas desérticas.

En estos ambiente los ciclos de humedecimiento-deseccación del material parental son cruciales provocando cambios en el estado de las sales en los poros y grietas de las rocas y dispersando las arcillas, en definitiva, promoviendo la desintegración de la roca. De ahí que sean muy apropiados diseños experimentales que simulen los ciclos de humectación-deseccación del material para comprobar las tasas de meteorización y su relación con los procesos edafogenéticos y de erosión.

2.7.- GENERACION DE ESCORRENTIA Y EROSION EN ESTE TIPO DE PAISAJES.

2.7.1.- ¿Por qué se estudian los procesos de erosión y escorrentía?

El movimiento del agua en el paisaje, tanto superficial como subsuperficial, es el mecanismo dominante para moldear las geoformas y es fundamental en la formación del suelo que las cubre (Birkeland, 1984). Aparte del control litológico, climático o tectónico (Campbell, 1989), los procesos erosivos constituyen el motor de evolución en paisajes acarcavados. Y los procesos de erosión por escorrentía superficial suelen ser los más importantes en *badlands*, cuya alta densidad de la red de drenaje pone de manifiesto la dominancia de estos procesos (Bryan y Yair, 1982).

Por otra parte las diferencias en las propiedades del suelo con la posición dependen de la redistribución del agua y de las partículas erosionadas a lo largo de las laderas. El flujo subsuperficial probablemente juega un papel menor en los ambientes áridos, la escorrentía superficial puede considerarse como el principal agente en la redistribución de agua, procesos de erosión y deposición. Es necesario entender la hidrología a escala de ladera para comprender los procesos edafogénicos que tienen lugar a lo largo de laderas áridas (Yair, 1990).

Los procesos de escorrentía y erosión condicionan la distribución de la cobertura de la superficie del suelo. En zonas áridas la cubierta vegetal está limitada por la disponibilidad de agua, y también está influenciada por el tipo de suelo y presencia de nutrientes, y varía espacialmente debido a la redistribución de la lluvia y de la escorrentía, en función de la topografía (Pickup y Chewings, 1996). El tipo de suelo y la disponibilidad de nutrientes también varía espacialmente, y es frecuente encontrar áreas deposicionales que constituyen un ambiente más apropiado para el desarrollo de la vegetación frente a zonas que se están erosionado (Friedel et al., 1993).

En definitiva la variabilidad espacial en los procesos de escorrentía y erosión es determinante en la distribución y evolución de las unidades del terreno, en las características de su cubierta, las características del suelo, regímenes de humedad y en definitiva en la evolución de este paisaje.

2.7.2.- Variabilidad espacial y temporal en los comportamientos hidrológicos y erosivos.

Existe una gran variabilidad en cuanto a las tasas de erosión entre diferentes paisajes de cárcavas (Bryan y Yair, 1982). La tabla 2.1 muestra las tasas de erosión medidas para algunos *badlands*.

Localización	Material	Precipitación anual	Tasa Erosión	Referencia
Norte del Negev, Israel	Margas del Plioceno y esquistos blandos	90mm	0.45mm/año	Yair et al., (1982)
Dinosaur Provincial Park, Alberta, Canadá	Cretáceo superior Esquistos y areniscas	330mm	2.5mm/año	Bryan y Campbell,(1986)
<i>Badlands</i> National Monument, Dakota Sur, USA.	Oligoceno. Arcillas y Limos poco consolidadas y areniscas en cauces.	380mm	19.9mm/año	Schumm (1956)
Bianca <i>badlands</i> Orcia, SE Toscana, Italia	Plioceno superior. Depósitos sedimentarios de arcilla y limos.	600-800mm	20mm/año	Alexander(1982)
Valle del Ebro, España	Sedimentos del Holoceno. Arcillas del Terciario	650mm	5-8mm/año hasta 14-22mm/año	Benito et al. (1993)
St Genis SE Francia	Jurásico. Margas negras.	840mm	190t/ha/año	Bufalo y Nahon, (1992)
Tai Lam Chung región, Hong Kong	Granito Jurásico muy meteorizado	1900mm	17.3mm/año	Lam, (1977)

Tabla 2.1: Tasas de erosión en diferentes *badlands*.

Por otra parte dentro de un mismo paisaje de cárcavas es frecuente encontrar una importante variabilidad espacial y temporal en la generación de escorrentía. En zona semiáridas y áridas la escorrentía superficial que resulta de que la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo es el mecanismo más importante en la generación de escorrentía en áreas con precipitaciones de alta intensidad (Dune, 1978; Campbell, 1989; Yair y Lavee, 1985). La escasez de precipitaciones, las limitadas cantidades de lluvia, los suelos poco profundos y la baja densidad de la cubierta vegetal inhiben contribuciones significativas de flujos subterráneos, escorrentía por saturación y flujo subsuperficial. Como las capacidades de infiltración son menores que las intensidades de la lluvia de la mayoría de tormentas, la escorrentía superficial se

podría considerar como la contribución más importante (Yair y Laave, 1985). En zonas áridas el tipo de suelo y las propiedades superficiales probablemente juegan un papel primario en la producción de escorrentía (Pilgrim et al., 1987).

Estudios en Israel (Morin y Bemyamini, 1977; Yair et al., 1980) y en Túnez (Berndtsson y Larson, 1987) muestran que aparte de las características de la lluvia, las condiciones de la superficie del suelo, como costras, presencia de rocas, cobertura vegetal o situación geomorfológica, juegan un papel muy importante en la producción de escorrentía. Casenave y Valentine (1992) analizan los factores que influyen en la infiltración y escorrentía, en zonas semiáridas del oeste de Africa y constatan el papel dominante de las condiciones de la superficie del suelo en la producción de escorrentía, en particular de los diferentes tipos de costras que aparecen y los distintos comportamientos hidrológicos que inducen, y el ampliamente conocido efecto de la vegetación como factor limitante de la escorrentía.

Las variaciones espaciales y temporales en la escorrentía causadas por las características de la lluvia, pueden verse potenciadas por las variaciones espaciales en la capacidad de infiltración del material superficial. La generación de escorrentía presenta una gran variabilidad espacial y es muy poco uniforme, y a menudo, solo una pequeña proporción del área de la cuenca contribuye a las salidas de la misma, y dicha variabilidad espacial está controlada principalmente por las propiedades físicas y químicas del material superficial. Estudios llevados a cabo en los *badlands* de Alberta, Canadá, donde la precipitación anual media es de 325mm, y en el Zin Valley de Israel con una precipitación media de 90mm revelaron que las capacidades de infiltración variaban tremendamente en distancias muy cortas (Bryan et al., 1978; Yair et al., 1980; Hodges y Bryan, 1982; Hodges, 1982) y eran las características de los materiales superficiales (como encostramiento superficial o proporción de piedras), más que la lluvia, las que controlaban la escorrentía y en buena parte los procesos y tasas de erosión. La respuesta de las superficies de los *badlands* a los procesos de erosión, especialmente por impacto de las gotas de lluvia y generación de escorrentía, depende de las capacidades de infiltración, grado de permeabilidad, cohesión y estabilidad del material superficial (Campbell, 1989).

En los *badlands* de Tabernas, Calvo et al.(1991b) y Solé et al.(1997), encuentran una gran complejidad en la repuesta de las superficies de *badlands* a la lluvia, superficies que equivalen en términos de cubierta a las teselas o unidades del terreno que definimos en el capítulo 1. Mediante experimentos de simulación de lluvia encuentran diferentes tasas de escorrentía y erosión.

Calvo et al.(1991b) llevaron a cabo un estudio sobre la respuesta hidrológica de las superficies de los *badlands* mediante simulaciones de lluvia, sobre distintas litologías en el SE de España entre Valencia y Almería, y encontraron que la generación de escorrentía siempre era rápida y variaba en términos de velocidad y máxima tasa de escorrentía alcanzada en función de los tipos de superficies del suelo. Las superficies desnudas con rápido sellado de grietas presentaban las máxima escorrentía y ésta comenzaba antes. En segundo lugar, aparecían las superficies con líquenes o piedras pequeñas y otras superficies acostradas con pocas grietas. El tercer grupo lo constituían superficies vegetadas con plantas vasculares y líquenes y otras desnudas con un sistema de grietas bien desarrollado. Y finalmente un cuarto grupo muy similar al anterior en cuanto a los tipos de superficies que lo integran, que se caracterizaba por necesitar más de 20 minutos para alcanzar una escorrentía estable. Llegan a la conclusión de que los factores que controlan la erosión están relacionados con la cubierta de la superficie del suelo, particularmente con la existencia de un umbral entre laderas desnudas y laderas cubiertas por piedras o plantas, especialmente líquenes. Cualquier tipo de cobertura por encima del 20% da lugar a una reducción considerable en la tasa de erosión a cualquier intensidad.

Unos años después Solé et al, (1997) estudiaron el comportamiento hidrológico de las superficies de los *badlands* de Tabernas mediante simulaciones de lluvia. Se estudian las superficies más representativas de la zona acarcavada del desierto de Tabernas y encontraron que en las superficies desnudas o acostradas, el tiempo necesario para que se iniciara la escorrentía era inferior a 4 minutos y de 5 a 21 minutos para las superficies vegetadas. En las parcelas correspondientes a superficies con suelos profundos, cerca de divisorias vegetadas o en pedimentos vegetados la escorrentía era baja, lo que se explicaba por la existencia de suelos profundos, pendientes suaves y existencia de cubierta vegetal. En superficies con líquenes o con pedestales con clastos, divisorias desnudas y margas desnudas que se caracterizaban por presentar suelos poco profundos y pendientes elevadas, la escorrentía aumentaba rápidamente alcanzando valores elevados. Finalmente en las superficies con una cubierta de limos acostrados o con líquenes degradados la escorrentía no aumenta tan rápidamente como en el caso anterior y alcanza valores intermedios. Distinguieron 4 grupos de erosión: a) alta erosión: formada por las superficies de marga desnuda o cubiertas con limos (entre 255 y 567g/m²); b) baja erosión que incluye a los pedimentos vegetados y divisorias con líquenes (con erosión inferior a 10 g/m²) y c) dos grupos de erosión intermedia: -media alta (entre 90 y 122 g/m²) formada por las superficies con líquenes degradados o limos (en

este caso cubiertos por piedras de pequeño tamaño que originan pedestales con clastos), y -media baja representado por la superficies con líquenes(18 a 49 g/m²).

La variabilidad en la escorrentía y erosión en estos paisajes se atribuye fundamentalmente a diferencias en las propiedades de la superficie del suelo, y estas características están controladas por la cantidad de agua que llega a cada sitio y la energía erosiva a que se ve sometida. Las relaciones entre lluvia, escorrentía superficial y producción de sedimentos son complejas y reflejan la variabilidad espacial y temporal de la lluvia y de las diferentes condiciones de la superficie del suelo (López-Bermúdez y Romero-Díaz, 1989).

2.7.3- Respuesta hidrológica integrada.

Distintos autores (de Boer,1992; Pilgrim et al., 1987) han descrito el problema de transferir información obtenida a cierta escala a sistemas hidrológicos de diferente escala. Tales problemas surgen debido a que un cambio en la escala no solo implica cambios en las dimensiones espaciales y temporales y en el número de componentes de un sistema, sino que resultan nuevas variables, nuevas relaciones que conducen a la identificación de nuevos problemas.

Pilgrim et al., (1987) exponen los problemas para modelizar la precipitación-escorrentía en zonas áridas y semiáridas. Estas zonas presentan caracteres distintivos como: la existencia de una mezcla de procesos hidrológicos (escorrentía superficial, pérdidas por transmisión, y a veces puede existir escorrentía por saturación en horizontes superficiales, Scoging, 1982); un balance hidrológico delicado que puede cambiar a causa de un periodo húmedo prolongado o seco; la precipitación tiende a ser más variable espacial y temporalmente; la cubierta vegetal es dispersa y su densidad puede variar después de un periodo seco o húmedo.

Las áreas parciales de escorrentía, que según Pilgrim et al (1987) equivalen al término área de contribución variable que se usa para zonas húmedas, se han encontrado en varias regiones áridas donde el principal mecanismo de generación de escorrentía es la escorrentía superficial según Horton (Horton, 1933). Otros investigadores encuentran áreas parciales de escorrentía (Yair y Lavee, 1985) en cuencas de zonas áridas. La principal causa de la existencia de estas áreas parciales de escorrentía son las diferencias espaciales en la capacidad de infiltración. Por lo tanto estas características distintivas de zonas áridas y semiáridas y el efecto de los procesos hidrológicos en ellas, constatan la necesidad de generar modelos diferentes a los desarrollados para zonas húmedas (Pilgrim et al. 1987).

La dificultad para obtener datos hidrológicos en zonas áridas, debido a la escasez de eventos de precipitación, inaccesibilidad, bajo potencial económico, hace que la red de estaciones en estos ecosistemas sea bastante limitada y como consecuencia de la poca disponibilidad de datos hidrológicos convencionales, existe un interés creciente en el uso de la teledetección para estudiar estas zonas. La íntima conexión entre cobertura vegetal, humedad del suelo y estado de erosión hace muy atractivo el usar la cubierta vegetal, como un indicador de los procesos hidrológicos y erosivos, dado que la cobertura puede medirse con relativa facilidad mediante teledetección (Pickup y Chewings, 1996). Y en paisajes donde la cubierta vegetal es escasa, se puede usar la cubierta biótica o abiótica. Para ello se divide la compleja superficie de la zona en cuestión, en una estructura de celdas. Existirán muchas celdas dentro de la cuenca de drenaje que sean hidrológicamente similares, para ello deben tener el mismo tipo de suelo, de cubierta vegetal o abiótica, pendiente y geología. Tales grupos de celdas pueden agruparse formando unidades de respuesta hidrológica (Beven, 1989). Cada unidad tendrá unos atributos de tipo de suelo, cobertura y topográficos, y los parámetros del modelo se derivan de los mapas digitales usando un sistema de información geográfico. Así se construyen modelos de Precipitación-Escorrentía distribuidos en el espacio (Sharma et al. 1996).

D'Herbes y Valentin (1997) obtienen un mapa de superficies del suelo de la región de Niamey, Nigeria, a partir de imágenes de satélite y usando un sistema de clasificación basado en características importantes en el comportamiento hidrológico de las superficies (Casenave y Valentin, 1992) como geoforma, vegetación, tipo de costra y uso del suelo. Asignan a cada clase (celda de 20 x 20m) un rango de coeficientes de escorrentía derivados de experimentos de simulación de lluvia, y conociendo la distribución de estas superficies predicen la producción de escorrentía de toda la cuenca y encuentran que un modelo hidrológico tan simple, predice la escorrentía de forma satisfactoria para cuencas entre 1 y 10 Km².

El potencial de estos modelos es usarlos como una herramienta que ligada a los modelos de los sistemas biológicos, permita predecir el efecto ecológico de cambios en el uso del suelo o en el clima (Pilgrim et al. 1987). Además ayudarán a investigar las relaciones entre las distintas unidades de respuesta hidrológica y como contribuye cada unidad a la escorrentía total, y simular como afecta una perturbación en una o más unidades a la respuesta total del sistema y a las unidades próximas.

2.8.-IMPLICACIONES HIDROLOGICAS Y ECOLOGICAS DE LA VARIABILIDAD EN LA CUBIERTA SUPERFICIAL EN UN ECOSISTEMA ACARCAVADO.

Zonneveld (1972) estudia el paisaje como una entidad holística constituida por diferentes elementos, todos ellos influyendo sobre el resto. Topografía, características del suelo, vegetación (o cobertura de la superficie del suelo) y clima interaccionan de forma compleja para determinar los tipos, intensidades y localizaciones de la escorrentía y el transporte de sedimentos y compuestos químicos y orgánicos en el paisaje. Cualquier perturbación en alguna de las variables que controlan estos procesos alterará la respuesta hidrológica y erosiva del sistema y por tanto afectará a su evolución. La predicción de los cambios resultantes en el patrón de distribución espacial de la cobertura de la superficie, producción de escorrentía y sedimentos requiere una representación explícita de las relaciones entre hidrología, vegetación y clima (Wigmosta et al., 1994).

En un trabajo muy reciente, Lázaro et al, (1999) ponen de manifiesto la rica variedad de microhabitats vegetales que existe en los *badlands* de Tabernas como consecuencia de la compleja geomorfología, y explican que los patrones de distribución que muestran los principales tipos fisionómicos vegetales se explican en términos de la topografía y características edáficas y erosivas de cada sitio. En términos del valor ecológico de un área, la variabilidad del suelo es beneficiosa, en el sentido de que variaciones distintas en el suelo soportan ecosistemas distintos (Ibañez et al., 1995). La variabilidad de las características de la superficies del suelo pueden constituir una ventaja en el control de la escorrentía y erosión. En zonas semiáridas, numerosos estudios demuestran que la superficie del suelo, cuando está expuesta, a menudo es muy susceptible a la erosión, con lo pueden aparecer zonas con erosión muy severa en distancias muy cortas. Cuando aparece un patrón espacial en mosaico, en el cual las zonas “*buffer*” aparecen adyacentes a otras zonas con potencial para producir escorrentía, este patrón puede constituir una estrategia efectiva en el control de la escorrentía superficial y de la erosión en ambientes semiáridos. Se pueden crear sumideros para la escorrentía superficial y deposición de sedimentos estableciendo patrones en mosaico manipulando la vegetación en localizaciones concretas. Donde este mosaico aparece de forma natural, se pueden evitar perturbaciones, mientras que un cambio en el patrón del mosaico aumentará la escorrentía y la erosión (Cerdá, 1995). En la gestión de ambientes semiáridos, cuando se pretende controlar la escorrentía y la erosión, es

necesario por un lado promover el patrón espacial en mosaico con unidades de respuesta hidrológica contrastadas, aumentando la variabilidad espacial (aumentando la variabilidad en el uso del suelo, lo cual también confiere la diversidad y aumenta el valor ecológico) y disminuir los umbrales de las unidades hidrológicas de respuesta (mejorando las propiedades físicas e hidrológicas del suelo) (Fitzjohn et al. 1998).



Figura 2.1: Erosión en surcos en los *badlands* de Tabernas



Figura 2.2: Movimiento en masa de unos pocos kg (banda roja 5cm)



Figura 2.3: Desprendimiento de varias toneladas.

CAPITULO 3

DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO: EL DESIERTO DE TABERNAS

3.1- INTRODUCCION

Los paisajes de *badlands* son importantes en la geomorfología de SE de España y frecuentes en las regiones semiáridas. Se desarrollan sobre diferentes materiales y muestran morfologías erosivas diferentes (Harvey y Calvo, 1989; López-Bermudez y Romero-Díaz, 1989; Calvo et al. 1991) Las principales litologías sujetas al desarrollo de *badlands* en el SE de España incluyen margas más o menos yesíferas del Triásico, margas marinas del Cretácico u Oligoceno, margas marinas del Mioceno superior, incluyendo margas yesíferas, y limos terrestres Plio-Cuaternarios (Harvey y Calvo, 1989). La morfología varía desde *badlands* totales, con poca o ninguna cubierta vegetal y poca o ninguna superficie previa remanente, o *badlands* parciales, donde las cárcavas están encajadas en una superficie previamente estable, hasta simples cárcavas aisladas. Los procesos erosivos en algunos *badlands* están dominados por la erosión en surcos, mientras que en otros se dan interacciones complejas entre erosión en surcos, erosión en túnel, expansiones del material y movimientos en masa (Calvo y Harvey, 1989).

La región almeriense, es la única de Europa cuya geomorfología se ve influenciada por dos factores: tectónica activa y climas casi áridos. Y en este contexto aparece el desierto de Tabernas.

El desierto de Tabernas es la zona más extensa de *badlands* del sureste de España y una de las más extensas de España, unos 150 km² de cárcavas, que se extienden al Sur de la península, en la provincia de Almería .

3.2.- SITUACION GEOGRAFICA

La zona de estudio está situada en la cuenca de Sorbas-Tabernas, a unos 20Km al Norte de la ciudad de Almería, y al Sureste del pueblo de Tabernas, en frente de la gasolinera y del restaurante Venta Alfaro, y cerca del poblado del

3.- Zona de Estudio

“MiniHollywood”, donde se graban películas del oeste, en el margen derecho de la Rambla de Tabernas (figura 3.1).



Figura 3.1: Localización de la zona de estudio

La cuenca de Tabernas es una de las cuencas del Neógeno de las Cordilleras Béticas, situada en una zona de cizalla transcurrente de la corteza. Es una depresión intramontañosa limitada por la Sierra de Filabres al Norte y la Sierra Alhamilla al Sur. Se extiende hacia el Este y su margen se abre en la cuenca de Sorbas, mientras que al Oeste se angosta para formar el Corredor de la Alpujarra. Concretamente el área de estudio se localiza en una zona muy acarcavada del desierto de Tabernas, de unas 12.65 hectáreas, localizada entre las coordenadas UTM 549712, 4096215 y 550162, 4096704, y se extiende en un intervalo de altitud desde los 247.5 y 382.5 metros.

3.3.- CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.

3.3.1.- Geología.

La litología dominante está constituida por margas muy bioturbadas y poco estratificadas de la formación de Chozas de la edad del Serravallense?-Tortonense-Messinense (Kleverlaan,1989). Existe otro conjunto lito-sedimentario de origen continental, representado por facies terminales de abanicos aluviales, del Pleistoceno Superior, pero solo se reconoce en la parte superior de algunos cerros y en la periferia del área (Delgado y Puigdefábregas, 1994).

Desde el Serravallense, la cuenca se formó mediante plegamientos y fallas del substrato metamórfico. Luego se rellenó con sedimentos continentales y marinos del Serravallense-Meseniense temprano. La pendiente general del fondo de la cuenca se orientó al Sur y Sudoeste, abierta hacia el sur. Una cobertura de lodos marinos se depositó por toda la cuenca sobre conglomerados continentales y marinos poco profundos indicando una rápida transgresión. Al final del Messinense el levantamiento y la erosión precedió a la transgresión del Plioceno. Después un gran delta clástico cubrió los sedimentos más antiguos.

La cuenca estuvo sujeta a deformación post-Tortonense y ascenso sostenido, que continua en el Plioceno y Cuaternario. La yuxtaposición del máximo ascenso en el extremo Oeste de la cuenca de Tabernas y la falla del corredor de Rioja, dio como resultado la coincidencia de la zona de máximo relieve inducido tectónicamente, con el afloramiento de gruesas secuencias de sedimentos del Tortonense débiles (Alexander et al. 1994).

Las series estratigráficas que dan lugar a los *badlands* son de 150 m de espesor aproximadamente (Kleverlaan, 1989). Durante el Cuaternario, tectónica y clima conducen al desarrollo de un paisaje dominado por la profunda disección, caracterizado por cañones a lo largo de las ramblas principales y laderas de *badlands* erosionadas y poco vegetadas.

Los ascensos y disecciones durante el Cuaternario parecen haber sido episódicos, produciendo un paisaje de *badlands* de múltiples edades. Desde el Pleistoceno tardío, se han desencadenado encajamientos hasta el nivel de base actual y el desarrollo de *badlands* ha tenido lugar a través de varias etapas de evolución de laderas durante el Holoceno. Las posibles causas del desarrollo episódico de las geoformas incluyen los ascensos episódicos y respuestas erosivas, las fluctuaciones climáticas del Cuaternario y también los ciclos intrínsecos de erosión/estabilización de los *badlands* (Alexander et al. 1994).

Lateralmente por el NE, NW y puntualmente, por el SE de la cuenca de Tabernas, la serie sedimentaria de margas contacta con evaporitas, fundamentalmente yesos, que afloran cubriendo una importante extensión en varios parajes de los alrededores. En nuestra área es relativamente frecuente encontrar puntos en que las margas son ricas en sulfato de calcio. Existen numerosas fallas del Neógeno, en la zona, en distintas direcciones, la mayoría de cuales siguen activas (IGME, 1975 y 1983).

El material parental es una roca dura y compacta, petrográficamente identificada como calcárea y compuesta predominantemente por partículas silíceas y calcáreas de limo (entre 40 y 50%). La arena gruesa está prácticamente ausente, la arena fina oscila entre el 10 y 30% y la arcilla entre el 15 y 20%. La composición mineralógica es cuarzo, moscovita, paragonita, calcita y algo de yeso (hasta 30% en algunos estratos) y cantidades menores de esmectita (menos de 5% de la fracción de arcilla). La porosidad de la marga está en torno a un 2%, y consiste en finas fisuras. Algunas grietas de origen tectónico o estratigráfico están rellenas por depósitos de unos pocos centímetros de grosor de calcita cristalina (esparita), la cual cuando queda expuesta a la erosión, se rompe en fragmentos de tamaño grava que cubren parcialmente pedimentos y cauces. (Solé et al., 1997).

3.3.2.- Clima.

El clima del área es mediterráneo cálido y semiárido (Lázaro y Rey, 1990). La precipitación media anual es de 218mm (para un periodo de 25 años registrados en la estación meteorológica de Tabernas, cercana a la zona de estudio) y el coeficiente de Pearson de variación mensual oscila entre 76 y 215. La precipitación anual en la estación meteorológica de Tabernas oscila en un rango entre 115 y 431mm (coeficiente de Pearson de variación interanual de 37.4). El número de días de lluvia varía entre 25 y 55 (con un promedio de 37 y un coeficiente de variación de 23). Eventos de precipitación de más de 20mm solo representan el 6% y solo el 0.7% excedieron 50mm/día (Lázaro y Puigdefábregas, 1994; Solé y Alexander, 1996).

Se dispone de una estación meteorológica en la zona de estudio desde 1991 y desde entonces hasta final de 1997, la precipitación media por año hidrológico fue de 250.65 mm/año con una elevada variación interanual (desviación estándar 97.97). La máxima precipitación anual en este intervalo de tiempo fue de 416.72 mm/año, y la mínima de 151.04mm/año.

La precipitación presenta un pico en invierno, cuando tiene lugar entre el 31 y 55% del total de precipitación anual, el resto de la precipitación se distribuye entre

primavera y otoño, el verano suele ser muy seco. Los eventos pequeños son los más frecuentes, el 53% del total de los eventos son menores o iguales a 1mm, y el 86% menores o iguales a 10mm.

El número de días de precipitación al año en la estación situada en la zona de estudio para el periodo estudiado oscila entre 32 y 69 días con precipitación por año hidrológico. Y la máxima intensidad de la lluvia registrada fue de 85.2 mm/h durante 5.7 minutos. Solo tres eventos presentaron intensidades horarias por encima de 20mm/h.

La temperatura media anual en la estación meteorológica de Tabernas, es de 17.9°C, con un mínimo promedio de 4.1°C en el mes más frío, y un máximo promedio de 34.7°C en el mes más cálido. Las amplitudes diarias medias son de 13.7°C en verano. Temperatura máxima absoluta registrada de 43.5°C y la mínima absoluta -5.5°C. Durante el periodo de estudio en la estación meteorológica situada dentro de la zona de estudio las amplitudes diarias varían entre 11.6°C en verano y 9.6°C en invierno (Lázaro y Puigdefábregas, 1994; Solé y Alexander, 1996).

La evaporación potencial es alrededor de 4 ó 5 veces mayor que la precipitación anual. La insolación anual es superior a 3000 horas (Lázaro, 1997 guía de campo no publicada).

3.3.3.- Geomorfología.

En general los valles están disectados en dirección Norte-Sur o Este-Oeste. Las laderas Norte y Este por un lado y las Sur y Oeste por otro difieren considerablemente en pendiente, profundidad del regolito y cobertura vegetal. Las laderas orientadas al Norte y Este presentan pendientes de $28^{\circ}\pm 8^{\circ}$, con mayor cobertura vegetal, mientras que las orientadas al Sur y Oeste son mucho más abruptas (alrededor de $47^{\circ}\pm 9^{\circ}$) y en general desnudas o muy escasa cubierta vegetal (figura 3.2). Al pie de algunas laderas se puede formar un pedimento, más frecuente y de mayor extensión en las laderas orientadas al Norte; sus pendientes son por término medio de 10° (Solé et al. 1997).

Los procesos geomorfológicos actuales en los *badlands* de Tabernas, están dominados por los procesos de escorrentía, produciendo superficies de *badlands*, especialmente sobre laderas casi desnudas orientadas al Sur y Oeste (figura 3.2). Los procesos de expansión-retracción del material y agrietamiento están limitados y son la escorrentía superficial y la erosión en surcos los procesos dominantes (Harvey, 1987). Hay evidencias de erosión en túnel, pero es menos significativa. Tampoco son muy frecuentes los grandes movimientos en masa, los pequeños son más comunes.

3.- Zona de Estudio

Las laderas orientadas al Norte muestran un desarrollo mayor del regolito, y a menudo líquenes y algunas plantas superiores (Alexander y Calvo, 1990), mientras que las laderas orientadas al Sur, muestran un claro desarrollo de redes de regueros (figura 2.1) y especialmente bien desarrolladas sobre las laderas más inclinadas en las cabeceras de las cárcavas (Calvo y Harvey, 1989).



Figura 3.2: Contraste entre laderas orientadas al Norte y Este frente a laderas orientadas al Sur y Oeste. La imagen corresponde a la microcuenca instrumentada 1.

3.3.4.- Suelos

El material parental, una limolita yesífera, se meteoriza (por los efectos combinados de la humectación-deseccación y precipitación-solubilización de sales) y se rompe en trozos irregulares de unos pocos centímetros de tamaño, aún reconocibles como marga dura. Tras someterse a saturación bastante tiempo y/o después de varios ciclos de humectación-deseccación, estos fragmentos se desintegran en granos de arena y finalmente en granos de tamaño limo. Estas partículas son fácilmente erosionadas y transportadas ladera abajo; cuando se depositan, pueden formar delgados estratos superficiales, blanquecinos, sobre las inclinadas laderas o gruesos pedimentos, de varios metros de profundidad. Sin embargo los suelos pedogenéticamente diferenciados solo se encuentran en superficies de pedimentos antiguos, donde el paso del tiempo y la reducida erosión permitieron el desarrollo del suelo (Solé et al. 1997).

En general son suelos poco evolucionados, y en buena parte de la zona solo existe un regolito margoso. Los suelos de la zona están clasificados como Solonchacks órticos, con inclusiones de Regosoles calcáricos según el mapa de suelos del Lucdeme (1:100000), (1987). Estos suelos aparecen en los pedimentos de laderas y mesas de la zona de estudio, mientras que en las partes altas de las laderas aparecen Leptosoles eútricos o líticos, según se trate de laderas cubiertas con líquenes o completamente desprovistas de vegetación. En muchas divisorias aparecen suelos con horizonte gypsicos como estudiaremos en el capítulo 6.

3.3.5.- Vegetación

El área no puede sostener vegetación arbórea zonal por causas fitoclimáticas (Lázaro y Rebollar, 1988). Caméfitos y terófitos son los biótijos mejor adaptadas a este entorno semiárido y templado y entre ambos suponen la gran mayoría de la flora.

La vegetación es un matorral mediterráneo a menudo de poca talla y casi siempre de escasa cobertura, actualmente muy degradado, por el efecto combinado de la erosión los varios milenios de asentamiento humano y la dificultad de recuperación en un entorno tan seco (Lázaro y Puigdefábregas, 1994).

El estrato arbustivo presenta comunidades ricas y originales desde el punto de vista florístico. En los lugares más estables y con poca influencia antrópica, al menos actual (casi siempre fuera o por encima de lo que es el área abarrancada propiamente) es un espartal (fuerte dominio de *Stipa tenacissima*), salpicado ocasionalmente de *Genista umbellata* y *Rhamnus lycioides lycioides*. El resto está, o desprovisto de vegetación, o poco cubierto con un matorral enano (tomillar)

dominado por caméfitos xerófilos, más o menos halófilos y, a menudo, caducifolios de verano. Abundan las plantas de distribución ibérico-norteafricana (*Frankenia corymbosa*, *Fagonia cretica*, *Genista umbellata*, *Stipa tenacissima*, *Anthyllis terniflora*), mediterráneo-árida (*Launaea lanifera*, *Anabasis articulata*), endemismos SE ibérico-norteafricanos (*Launaea arborescens*, *Thymus hyemalis*, *Hammada articulata*, *Salsola genistoides*), endemismos ibéricos (*Artemisia barrelieri*), endemismos del SE ibérico (*Sideritis pusilla*, *Heliathemum almeriense*, *Limonium insigne*, *Salsola papillosa*) y endemismos locales (*Herniaria fontanesii* ssp. *almeriana*, *Euzomodendron bourgaeum*) (Lázaro y Puigdefábregas, 1994).

En el estrato herbáceo hay comunidades compuestas casi íntegramente por terófitos (*Aizoon hispanicum*, *Asteriscus aquaticus*, *Koelpinia linearis*, *Limonium echioides*, *Moricandia foetida*, *Plantago amplexicaulis*). Las comunidades principales están dominadas o bien por *Stipa capensis* y *Plantago ovata* o bien por *Moricandia foetida* (Lázaro y Puigdefábregas, 1994). Son colonizadoras y presentan fenómenos de dominancia por lo general fuertes, así como segregación espacial entre comunidades por lo común más marcada que en las perennes.

Los líquenes son muy importantes en el área, tanto desde el punto de vista de la cobertura como por su función y efecto sobre el medio. A menudo son abundantes en laderas orientadas al N o al E, en muchos pedimentos y también en algunas divisorias y escasos o nulos en laderas orientadas al Oeste o Sur y en divisorias con menos regolito o no estabilizadas. Se trata, en su gran mayoría de líquenes terrícolas, con talo por lo común crustáceo, lobulado o no, o escuamuloso. Pueden desarrollarse hasta cubrir la mayor parte de la superficie mientras la vegetación superior no sea densa. Destacan por su frecuencia y cobertura *Diploschistes diacapsis*, *Squamarina lentigera*, *Fulgensia fulgida*, *Placynthium nigrum*, *Catapyrenium lachneum*, *Toninia coeruleonigrans*, *Buellia zoharyi*. Así mismo otras costras bióticas no líquénica, constituida probablemente por cianobacterias y otras algas presentan a menudo importantes coberturas en la mayoría de las geoformas (Lázaro, 1995).

3.3.6.- Fauna

Se han clasificado quince especies de mamíferos, unas setenta de aves, once de reptiles y tres de anfibios entre los vertebrados y la relación de invertebrados (especialmente insectos y arácnidos) sería interminable. Entre los vertebrados destaca la presencia del camachuelo trompetero, típicamente africano

y solo citado en estas latitudes en el subdesierto de Tabernas. También aparecen eslizón tridáctilo, ortegas y gangas. Asimismo es notable la presencia del pito real (*Picus viridis*) por tratarse de un pájaro carpintero de bosque y no existir bosques en el ecosistema. El secreto puede ser la gran abundancia de hormigas y la especialidad de este pájaro en comerlas. Entre los invertebrados cabe citar la abundancia de caracoles blancos y chapas (Rueda, 1982).

En general la fauna del desierto de Tabernas tiende a tonalidades oscuras que se justifica por el mimetismo que proporciona con los fuertes contrastes de sombras de ramblas y barrancos.

Son muy abundantes los conejos, el mochuelo, la abubilla, y entre los reptiles la lagartija colirroja y lagartos ocelados. El superpredador más abundante es el zorro.

3.3.7.- Usos

Los principales usos humanos en la zona, actualmente, son la caza de conejo y perdiz, el rodaje de películas, recolección de plantas aromáticas y extracciones de arenas, gravas y yeso. No hay muchos indicios de pastoreo actual. Con frecuencia en los pedimentos se siembra cebada para facilitar el crecimiento de las especies cinegéticas. Estos pedimentos cultivados terminan erosionándose y como consecuencia para la nueva siembra es necesario labrarlos para lo cual se introduce maquinaria pesada con la consiguiente degradación que provoca.

3.4.- INSTRUMENTACION EN LA ZONA DE ESTUDIO.

La zona de estudio constituye una estación de campo experimental, en la que se desarrollan numerosas investigaciones que forman parte de diferentes proyectos.

La figura 3.4 muestra la localización en la zona de estudio de la instrumentación empleada en este trabajo. Esta figura es una imagen compilada del modelo digital de elevaciones (DEM) cuya construcción se explica en el capítulo 5.

La instrumentación empleada consiste en:

- Una estación meteorológica que mide:
 - radiación global
 - temperatura
 - humedad del aire
 - lluvia e intensidad de lluvia
 - dirección y velocidad del viento.

3.- Zona de Estudio

- Cuatro aforadores tipo H (1,2, 3 y 4), para medir la escorrentía de forma continua de una microcuenca principal (1) y otras tres microcuencas incluidas en la anterior(microcuencas 2, 3 y 4).
Cada una de estas estaciones de aforo dispone de un dispositivo para medir la carga de sedimentos del agua de escorrentía.
- Doce parcelas de escorrentía, donde se mide escorrentía y erosión total tras cada evento de precipitación.
- Diez parcelas con clavos de erosión de 2x2 metros y dos laderas con orientación contrastada con clavos de erosión cada metro cuadrado.
- Sondas HS-SBIBS para medir la humedad y temperatura del suelo en tres transectos de ladera.
- Dos parcelas experimentales de meteorización.

Zona de estudio: El Cautivo

Mapa compilado del Modelo Digital de Elevaciones a 1m de resolución

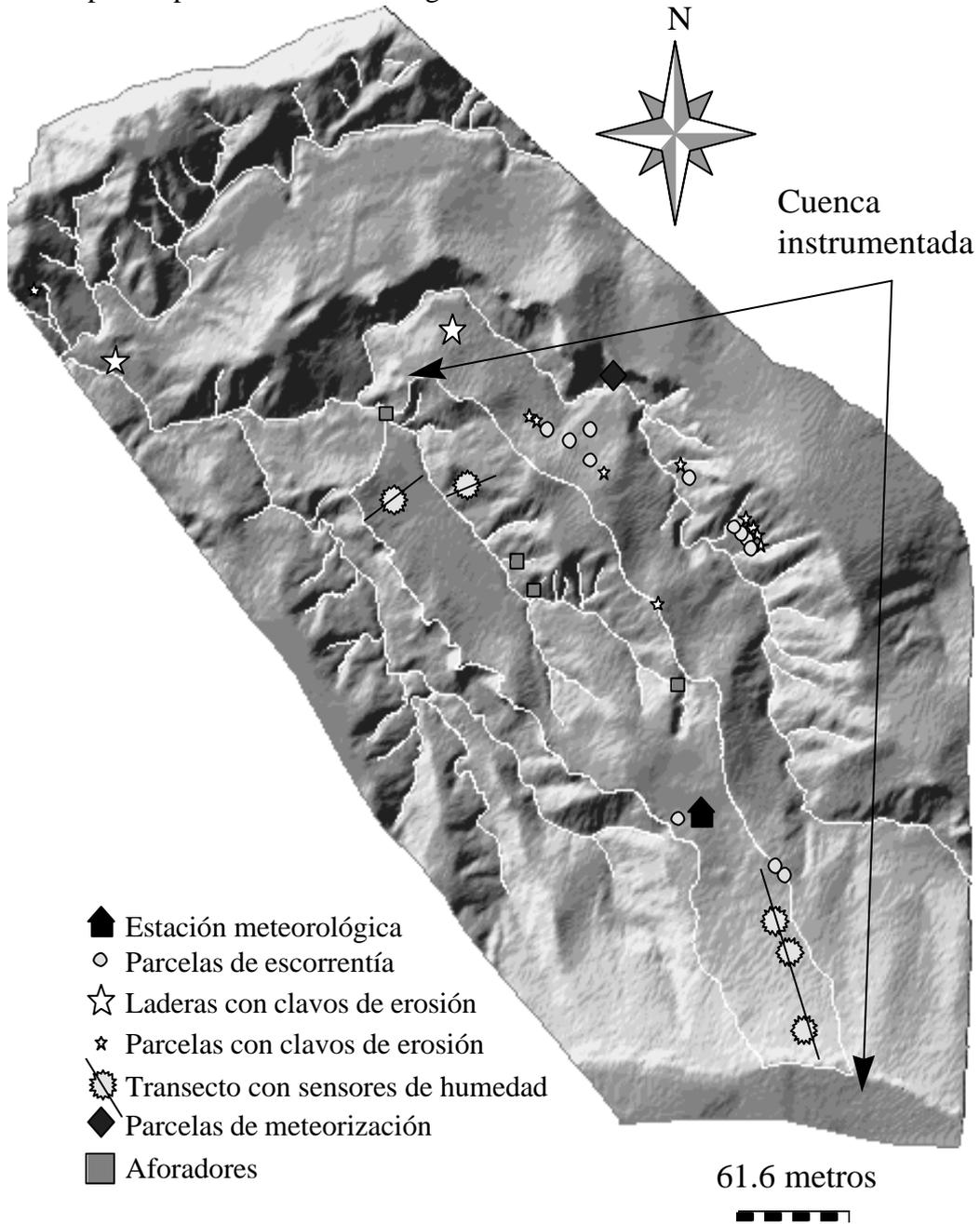


Figura 3.4: Instrumentación en la zona de estudio

CAPITULO 4

VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA CUBIERTA DEL SUELO

4.1.- INTRODUCCION

Para los ecosistemas semiáridos y áridos, donde la vegetación es muy escasa la superficie del suelo, por si misma, debería constituir un objeto de atención tan especial como la vegetación (Graetz, 1990)

La interacción de procesos y estructura o litología, en *badlands* da lugar normalmente a una erosión rápida que inhibe la disponibilidad de un regolito o suelo adecuado para que se establezca un cubierta vegetal densa, y a veces cualquier tipo de cubierta vegetal. La ausencia de vegetación a su vez favorece la erosión. El resultado son extensas superficies desprovistas de vegetación y edáficamente desprotegidas (Campbell, 1989), que pueden adoptar morfologías diferentes. Existe una gran variabilidad en las condiciones superficiales que se refleja en la diferentes tasas de erosión que registran (Yair et al. 1980).

En los *badlands* de Tabernas, cuando se analiza la cobertura superficial a escala de hectómetro a decámetro (Solé et al 1997) se pone de manifiesto la existencia de una gran variabilidad. La vegetación muestra importantes variaciones tanto en estructura como en grado de cobertura, en el área acarcavada de Tabernas (Alexander et al. 1994). La morfología superficial varía en distancias muy cortas, de metros, de manera que junto a una zona con una cubierta vegetal densa de arbustos altos y gramíneas perennes (*Stipa tenacissima*), puede aparecer una superficie de regolito margoso completamente desprovista de cubierta vegetal. Estas superficies se caracterizan por comportamientos hidrológicos y erosivos diferentes(Calvo-Cases et al.,1991b; Solé et al., 1997). El patrón superficial que observamos es una consecuencia de la evolución de este paisaje, por lo que la comprensión de este patrón podría informar sobre la dinámica y tendencias del paisaje.

Los siguientes capítulos estudiarán los factores que controlan esta variabilidad.

Este capítulo pretende identificar los tipos de superficies del suelo o teselas (definidas en función de su cobertura) más representativos en términos de área que ocupan, cuales son sus características principales y cómo se distribuyen.

4.2.- METODOLOGIA

En 1997 Solé et al. estudiaron los comportamientos hidrológicos de los tipos de superficies del suelo más representativas desde el punto de vista hidrológico. Tomando como base este trabajo se trata de construir un mapa de superficies o tipos de cobertura de la superficie del suelo.

En un primer momento se distinguieron 27 tipos de cubiertas, se consideraron todas las teselas que visualmente, en el campo, parecían diferentes entre si en términos de tipo y densidad de la cobertura. Y se cartografiaron 27 tipos de teselas del suelo. Como resultaba muy difícil trabajar con un número tan elevado de unidades se resumieron en 9 tipos. Para reducir las 27 teselas iniciales hasta 9 se agruparon dentro de la misma tesela aquellas con coberturas muy similares siempre que tuvieran el mismo tipo de suelo y comportamientos hidrológicos similares.

En la primera aproximación intentamos generar el mapa de teselas del suelo mediante fotointerpretación, a partir de una fotografía aérea a escala 1:3500. Sin embargo en los ecosistemas desérticos o semidesérticos la superficie del suelo no suele estar completamente cubierta de vegetación, por lo que es muy difícil valorar directamente sobre la imagen, pues la vegetación superior constituye menos del 20% e incluso a veces menos del 10% (Zonneveld, 1989). En nuestro caso no era posible distinguir, a partir de la fotografía aérea, teselas con líquenes frente a otras teselas desnudas.

Como consecuencia decidimos construir un mapa de tipos de cubiertas del suelo sobre el terreno, usando como soporte un mapa topográfico 1:500 (obtenido a partir de la fotografía aérea 1:3500). Sobre este mapa topográfico y en el campo se dibujaron las teselas definidas en función del tipo de cubierta del suelo. Con un mapa topográfico tan detallado (curvas de nivel cada 0.5 metros) fue relativamente sencillo construir el mapa de tipos de teselas del suelo usando como guía las curvas de nivel.

El mapa se digitaliza, y se consigue un mapa de teselas o tipos de cubiertas del suelo georreferenciado.

Para describir cada tipo de tesela, definida en términos de cobertura, se midieron las coberturas de: piedras; hojarasca; regolito margoso (es decir

afloramiento de la marga meteorizada, que normalmente está acostrada en la superficie); suelo acostrado (corresponde al suelo entre los claros de la vegetación, o depósitos de limos); líquenes blancos; otros líquenes y costra biótica no liquénica; plantas anuales; plantas vivaces con altura inferior a 35cm; y planta vivaces con altura por encima de 35cm. Y se toma nota de otras características de interés como la presencia de grietas o características de las costras.

En el caso de los líquenes se distinguen por un lado los líquenes blancos, que son los líquenes más representativos en la zona, y por otro lado otros líquenes y costra biótica no liquénica constituida por algas, entre ellas diversas *Cyanobacterias* fijadoras de nitrógeno, (Alexander et al. 1994; Lázaro, 1995). La distinción que hacemos entre líquenes blancos y otras criptógamas (donde se incluyen otros líquenes, si bien son poco abundantes), se debe a que este muestreo de coberturas se pretende utilizar en un futuro para crear mapas de coberturas a partir de unas imágenes de satélite que se tomaron en el momento del muestreo.

Para cada tipo de tesela se muestrean 5 áreas de 6 x 6 m cada una. Dentro de cada una de estas áreas se eligen al azar 3 pixeles de 2 x 2m de los 9 posibles, y se usa un cuadro de 50 x 50cm con una rejilla de 10cm para estimar las coberturas, dicho cuadrado se coloca 16 veces en cada pixel de 2m x 2m (4 veces por cada metro cuadrado). Cada área de muestreo se georreferencia.

4.3.- RESULTADOS.

4.3.1.- Tipos de teselas y distribución.

La figura 4.1 muestra los 9 tipos de teselas (definidas en términos de cobertura de la superficie del suelo por lo que también las llamamos superficies) y cómo se organizan espacialmente en la zona de estudio.

Dentro de alguno de los tipos de teselas se identifican subclases que se diferencian según la densidad de la cubierta, como en el caso de PER que se distinguen 3 subclases en función de que la cubierta vegetal sea más o menos densa.

También se representan los cauces, en los que unas veces aflora la roca madre (la marga), otras veces la marga aparece cubierta por depósitos de sedimentos sobre los que a veces pueden aparecer plantas perennes.

El área ocupada por cada tipo de tesela viene representada en la figura 4.2:

4.- Cubierta del suelo

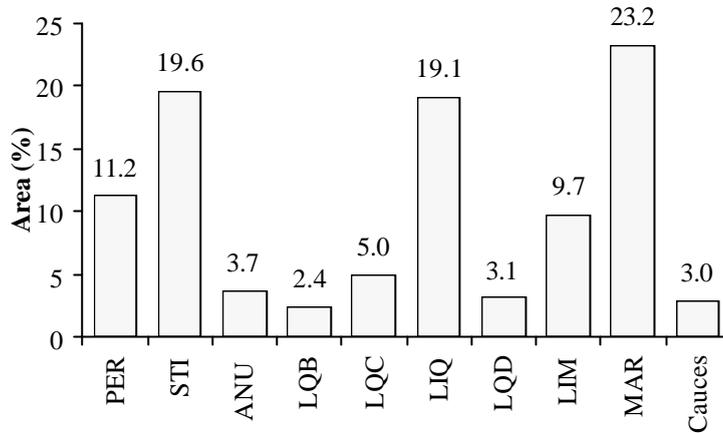


Figura 4.2: Area ocupada por cada tipo de tesela.

Para cada una de los 9 tipos de teselas se promedian las coberturas muestreadas en las 5 áreas (Tabla 4.1), y mediante un análisis multivariante de la varianza se demuestra que los valores medios para cada tipo de cobertura de las 9 teselas son significativamente diferentes entre si.

Wilks' Lambda = 0.000037 Rao's R = 7.39 df (72,123) p < 0.000000

Wilks' Lambda es valor multivariante de F

La tabla 4.1 muestra los valores medios de cada tipo de cobertura, para cada uno de los tipos de teselas. Se presenta la cobertura de piedras (Pied), de regolito margoso (Regm), suelo acostrado (Suac), hojarasca (Hoja), líquenes blancos (Liqb), anuales (Anua), viváces menores de 35cm (V<35) y viváces mayores de 35cm (V>35).

	Pied	Regm	Suac	Hoja	Crip	Liqb	Anua	V<35	V>35
PER	1.03	0.00	19.62	20.50	11.04	3.11	8.78	16.22	19.71
ANU	1.21	0.00	20.96	31.44	6.50	1.60	27.78	4.57	5.95
STI	29.14	0.00	6.76	4.45	13.36	9.94	0.59	10.03	25.73
LIQ	3.62	0.00	8.72	1.61	33.84	44.41	0.33	5.49	1.99
LQC	2.93	0.00	8.61	2.36	27.69	41.98	6.06	10.11	0.27
LQB	15.41	0.00	10.69	1.43	50.08	14.10	0.82	7.38	0.09
LQD	2.36	6.36	62.64	0.96	17.23	7.31	0.12	2.26	0.75
LIM	1.99	30.60	60.12	0.37	4.70	0.05	0.06	0.71	1.42
MAR	0.91	96.14	2.17	0.15	0.13	0.02	0.01	0.41	0.07

Tabla 4.1: Coberturas medias para cada tipo de tesela.

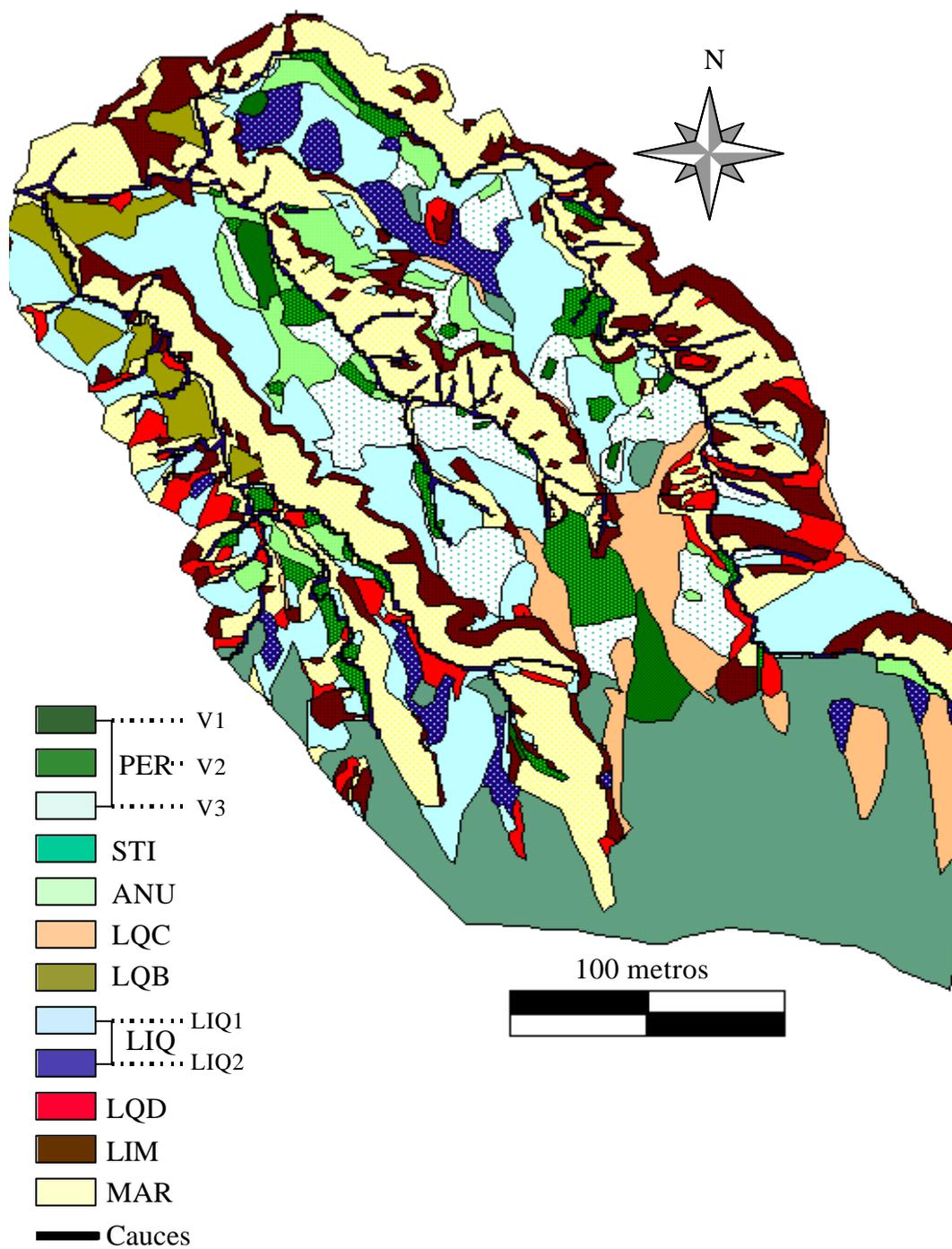


Figura 4.1: Mapa de tipos de cubierta del suelo en la zona de estudio.

4.3.2.-Características de cada tipo de tesela:

PER (Matorral): Constituida por un matorral enano y disperso que forma manchas más o menos densas y normalmente no muy extensas. Estas manchas en su conjunto constituyen la tesela PER y se distinguen 3 subclases (subclase V1, V2 y V3 de la figura 4.1) que representan las distintas densidades de la vegetación en la tesela (V1: matorral más denso; V2: matorral con densidad intermedia y V3: matorral poco denso). En los claros aparecen plantas anuales (las más abundantes son *Stipa capensis* y *Bromus rubens*), y suelo acostrado. La costra que aparece en los claros, suele ser delgada de uno a algunos milímetros, y presenta una estructura laminar. Esta costra a veces puede ser biótica y otras veces física.

La hojarasca es muy abundante en estas teselas.

Dentro del matorral las especies más abundantes son: *Helianthemum almeriense*, *Hammada articulata*, *Artemisia barrilieri*, *Salsola genistoides*.

Los líquenes son escasos por la cobertura de plantas superiores, en los claros aumenta su frecuencia aunque normalmente sigue siendo baja y suele aparecer *Diploschistes diacapsis*, *Squamarina lentigera*, *Buellia zoharyi*, *Buellia epigaea*, así como costra biológica no líquénica.

La figura 4.3 presenta la apariencia de esta tesela.

STI (Espartal): Matorral de porte mediano, dominado por la presencia de esparto, con cobertura discontinua, entremezclado con un estrato de vivaces que no suele superar los 50cm de altura, formado por diversos caméfitos (figura 4.4). Es una tesela con una cobertura muy importante de piedras, las cuales cubren alrededor de un tercio de la superficie. Estas piedras tienen tamaños muy variables desde pocos centímetros a bloques de más de 1 metro. Es una tesela pobre en anuales. En los claros aparecen líquenes y suelo acostrado, la costra a veces es biológica (cianofíceas u otras algas) y otras veces es física, y en general no es muy gruesa de algunos milímetros, con estructura laminar.

En el estrato dominante resalta: *Stipa tenacissima* y entre los caméfitos más representativos están *Helianthemum almeriense*, *Thymus hyemalis*, *Anthyllis terniflora*.

Aparecen determinadas especies de líquenes que son frecuentes en estas laderas pero que prácticamente no aparecen en otros sitios: *Lepraria crassisima*, *Squamarina cartilaginea*, *Collema cristatum*, *Cladonia pyxidata* y *Psora albilabra*.

ANU (Hierbas): Tesela que se caracteriza por el dominio de plantas anuales que representa casi un tercio del total de la cobertura de la superficie

(figura 4.5) y las especies más abundantes son *Stipa capensis* fundamentalmente, seguida por *Plantago ovata* y *Bromus rubens*. En los claros aparece suelo acostrado, se trata de una costra delgada 0.5mm aproximadamente, esta costra suele ser física, con una estructura laminar. La hojarasca es muy abundante.

LQC (Líquenes): La cubierta líquénica representa el 42% del total de la cobertura (figura 4.6) y la costra biótica no líquénica el 27.7%, y las plantas anuales son más abundantes que en estas zonas con líquenes.

Los líquenes más representativos de esta tesela son *Diploschistes diacapsis*, *Squamarina lentigera*, *Fulgensia gr fulgida*,

Stipa capensis es la anual que suele aparecer en estas teselas.

LQB(Líquenes y halófitas): Tesela con importante cobertura de líquenes, y otras costras bióticas no líquénica, poca cobertura de anuales y algunas vivaces dispersas (figura 4.7).

La vivaces que suelen aparecer en este tipo de tesela son xerófilo-halófitas del tipo de *Anabasis articulata*, que es la más abundante, también aparecen *Salsola papillosa* y *Salsola genistoides*

En cuanto a los líquenes son comunes *Endocarpon pusillum* y *Psora decipiens*. Y es muy abundante la costra biológica no líquénica.

LIQ(Líquenes): Costra líquénica bastante continua que constituye la mayor parte de este tipo de tesela, aparecen algunas vivaces bastante dispersas. (figura 4.8).

Los líquenes más abundantes en estas teselas son *Diploschistes diacapsis*, *Squamarina lentigera*, *Buellia zoharyi* y *Buellia epigaea*. También aparece *Fulgensia fulgida*. Además es muy abundante la costra biótica no líquénica.

Cuando este tipo de tesela aparece orientada al S, S-W aumenta la proporción de especies líquénicas propias de LQB e incluso de LQD.

Las vivaces más abundantes en este tipo de tesela son *Launaea fragilis*, *Euzomodendron bourgaeum* y *Helianthemum almeriense*

En determinadas zonas la cubierta de vivaces puede alcanzar una densidad importante, concretamente en las zonas de convergencia de agua, siempre que la ladera sea lo suficientemente estable y el suelo relativamente desarrollado (LIQ2 en la figura 4.1).

LQD (Líquenes degradados): Tesela o tipo de superficie donde la costra biótica no líquénica domina la cobertura, alternando con manchas de líquenes y regolito margoso y algunas piedras pequeñas (1 ó 2 cm). La figura 4.9 muestra esta la apariencia de la superficie del suelo en esta tesela.

Los líquenes más representativos en este tipo de tesela son *Verrucaria* cf. *obductilis* y *Psorotichia* sp

En unos casos esta tesela se corresponde a zonas con limos o regolito margoso donde existe una cierta estabilidad que permite la aparición de la vegetación criptogámica, aunque está bastante limitada porque las condiciones no son muy adecuadas y puede evolucionar hacia la agradación o degradación. En otros casos aparece en zonas que presentaban un cubierta líquénica desarrollada, pero debido a una perturbación del tipo de la aparición de una cárcava, aparece una zona degradada, y podemos encontrar este tipo de tesela.

LIM(Limos): Se caracteriza por la presencia de un depósito de limos muy acostado sobre el regolito margoso(figura 4.10). Esta costra puede física o biológica, compuesta por Cyanobacterias y otras algas. Tiene un grosor muy variable de algunos milímetros hasta más de 5cm.. A veces aparecen algunas plantas anuales, pero muy pocas especies pueden aparecer, siendo característica *Moricandia foétida*, y alguna vivaz muy dispersa, también son muy pocas las especies que pueden colonizar esta tesela típicamente es *Salsola genistoides*.

Aparecen grietas originadas por la expansión-retracción del material. Estas grietas suelen delimitar polígonos de alrededor de 10 cm.

En algunas ocasiones en estas teselas aparecen piedras pequeñas de 1 a algunos centímetros. Estas piedras y la acción de la erosión hídrica genera una morfología típica de “pedestales con clastos” (figura 4.11), en la que el material bajo el clasto queda protegido de la erosión por impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía se localiza entre dichos “pedestales”.

En la tesela LIM es frecuente encontrar ríngolas, con mayor o menor densidad.

MAR (Regolito margoso): Se trata del regolito margoso que aflora en superficie. Suele presentar una morfología consistente en una costra física con pequeños fragmentos de marga muy meteorizada y muy abundantes sobre esta superficie (figura 4.12) o una morfología en que denominamos “pseudopopcorn” que consiste en agregados muy sueltos e hinchados, (figura 4.13), similar a la morfología en "popcorn" descrita en muchas zonas de *badlands* pero no tienen las mismas características en cuanto al tipo de arcilla que se suele asociar a esa morfología.

En estas teselas al igual que en la anterior, aparecen de forma muy dispersa viváceas (*Salsola genistoides*), y anuales (*Moricandia foétida*), algunos años esta planta anual es muy abundante y forma manchas en las que alcanza coberturas considerables como el 20 ó 25% (Lázaro, 1995).

También pueden aparecer piedras de diferente tamaño, que normalmente son calcoarenitas procedentes de los niveles superiores de la zona de estudio.

La tesela MAR en muchas ocasiones presenta una importante red de ríngolas o surcos (figura 2.1), cuya permanencia es variable, y que en muchos casos observamos como aumenta la incisión en estos surcos tras un evento de precipitación de gran magnitud.

4.4.- DISCUSION

Aunque se trata de un paisaje muy acarcavado, las teselas completamente desprovistas de vegetación sólo constituyen un 33%. Prácticamente el mismo área ocupan las teselas con vegetación superior (PER, STI y ANU) el 34.5%. Y el 37% de la zona de estudio está constituida por teselas donde la cubierta criptogámica es dominante.

Llama la atención en las teselas vegetadas lo abundante que es la cubierta biótica no liquénica, integrada entre otras algas por *Cyanobacterias* fijadoras de nitrógeno, (Alexander et al., 1994; Lázaro, 1995), que podrían tener un efecto significativo suministrando nitrógeno al sistema (Lázaro, 1995).

La gran heterogeneidad en la cubierta de la superficie del suelo, se pone de manifiesto en la figura 4.1. que pone de manifiesto que en un espacio pequeño se encuentra una gran variedad de teselas, y dentro de cada tipo de tesela también existe una importante variabilidad, como ponen de manifiesto las descripciones de las teselas y los datos de cobertura en cada tipo de tesela.

FIGURAS DE TESELAS



Figura 4.3: Tesela PER



Figura 4.4: Tesela STI



Figura 4.5: Tesela ANU



Figura 4.6: Tesela LQC



Figura 4.7.: Tesela LQB



Figura 4.8: Tesela LIQ



Figura 4.9.: Tesela LQD



Figura 4.10: Tesela LIM



Figura 4.11.: Tesela LIM (Pedestales con clastos)

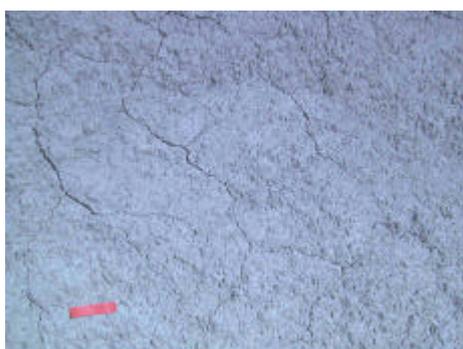


Figura 4.12: Tesela MAR



Figura 4.13: Tesela MAR ("pseudopopcorn")

*La banda roja equivale a 5cm.

CAPITULO 5

INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFIA SOBRE LA
DISTRIBUCION ESPACIAL DE LAS TESELAS.

5.1.- INTRODUCCION

Las características topográficas como, posición en la ladera, pendiente, orientación o altitud influyen en las condiciones microclimáticas, que a su vez contribuyen a la formación de mosaicos de teselas dentro del paisaje. La influencia de las geoformas sobre los microclimas y los patrones de vegetación son mayores en paisajes con mayor complejidad topográfica (Swanson, 1992). En los paisajes acarcavados los frecuentes y abruptos cambios en las facetas de las laderas, el profundo encajamiento del paisaje y las rápidas alteraciones en la orientación y exposición de las pendientes favorecen contrastes microtopoclimáticos pronunciados, a lo que se une que en muchas zonas el efecto tampón de la cubierta vegetal no existe (Campbell, 1989).

En el desierto de Tabernas se observan unos patrones en la distribución espacial de las teselas (definidas en términos de cobertura biótica o abiótica) o tipos de superficie del suelo que se repiten por todo el área acarcavada. En las laderas más inclinadas y orientadas al sur y sudoeste no aparece cubierta vegetal, mientras que las laderas orientadas al norte y noreste, menos inclinadas, están vegetadas, lo que nos hace pensar que la topografía va a jugar un papel importante en la distribución espacial de las teselas que integran este paisaje de *badlands*. Estudios previos en la zona (Alexander y Calvo, 1990; Calvo et al., 1991b; Lázaro, 1995; Solé et al., 1997) ponen de manifiesto estas diferencias en la morfología superficial asociadas a laderas con orientación contrastada. Se ha demostrado que ciertas características de la vegetación de este ecosistema, particularmente la composición florística, están asociadas significativamente con las geoformas (Lázaro y Puigdefábregas, 1994; Lázaro, 1995).

Para entender la heterogeneidad en la distribución espacial las teselas y predecir la respuesta de éstas a cambios en el medio físico es necesario estudiar la

influencia de la topografía sobre la organización espacial de las teselas (definidas en términos de cobertura en el capítulo 4) y sobre procesos que se pueden inferir a partir de las variables topográficas. Las diferencias en los procesos asociadas a distintas teselas se comprenden mejor si se estudia la influencia del medio físico en dichos procesos, de ahí nuestro interés en las relaciones entre la topografía y las teselas.

Los objetivos de este capítulo son:

- Comprobar si la organización espacial de los tipos de cubiertas del suelo o teselas está controlada por la topografía y estudiar las relaciones entre las teselas y los gradientes topográficos para entender la heterogeneidad de coberturas y su organización.

- Demostrar si a partir de las variables topográficas, podemos estimar la distribución espacial de las teselas, lo que nos permitiría extender mapas de teselas a otras zonas del desierto de Tabernas.

5.2.- METODOLOGIA

5.2.1.-Asociación geofomas-teselas

Se pretende comprobar si las teselas, definidas por el tipo de cubierta del suelo, se distribuyen en el espacio con independencia de la topografía o no. Para ello se lleva a cabo una regionalización basada en las variables topográficas más importantes que dará lugar a una serie de geofomas y se compara su distribución espacial con la de las teselas.

5.2.1.1.- Extracción de los Atributos Topográficos

A partir de un mapa topográfico 1:500 (obtenido de una fotografía aérea 1:3500 adquirida gracias a la contratación de un vuelo especial), con una equidistancia entre las curvas de nivel de 0.5 metros, construimos el Modelo Digital de Elevaciones de 1 metro de resolución con el programa ANUDEM versión 4.4 (Hutchinson 1995), que implementa un algoritmo que fuerza la interpolación de elevaciones a la red de drenaje.

Moore et al. (1991) proponen que los atributos topográficos pueden dividirse en Atributos Primarios y Secundarios (o Compuestos). Los Atributos Topográficos Primarios se calculan directamente de los datos de elevación e incluye variables como orientación o pendiente. Los Atributos Topográficos Secundarios implican combinaciones de los atributos primarios y son índices que describen o caracterizan la variabilidad espacial de procesos específicos que

ocurren en el paisaje, tales como distribución del agua en el suelo o potencial para la erosión laminar.

A partir del Modelo Digital del Terreno, extraemos (PCRaster, versión 2 , 1996) los siguientes atributos topográficos:

⌘ *Atributos Topográficos Primarios:*

-Altitud (ALT)

-Pendiente (PEND)

-Orientación (ORI)

-Curvatura en dirección de la máxima pendiente (CURV1). Para pendientes cóncavas es negativa, y para pendientes convexas es positiva. Esta variable es muy importante para caracterizar los cambios en la velocidad de la escorrentía y procesos de transporte de sedimentos.

-Curvatura en dirección transversal a la pendiente, cambio de la pendiente con la distancia en dirección horizontal (CURV2). Es una medida de la convergencia/divergencia topográfica y por extensión de la concentración de agua en el paisaje. Adopta valores positivos en las formas cóncavas y negativos en las convexas.

-Área drenada (ARE): es el número de celdas ladera arriba que drenan a través de cada localización. Es proporcional a la escorrentía superficial o subsuperficial poco profunda en un punto dado del paisaje e integra los efectos del área de contribución ladera arriba y la convergencia y divergencia de la cuenca para la escorrentía.

⌘ *Atributos Topográficos Secundarios:*

-Índice topográfico W descrito por Beven y Kirkby (1979), que se usa para describir los efectos de la topografía sobre la localización y tamaño de las áreas fuente de escorrentía generada al excederse la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, escorrentía por saturación (O'Loughlin, 1986). Moore et al. (1988) encontraron una fuerte correlación entre la distribución de éste índice y la distribución del contenido en agua de la superficie del suelo en cuencas pequeñas, bajo condiciones de flujo estacionario.

Este atributo topográfico viene definido por la ecuación:

$$W = \ln (A/\tan\beta)$$

con A: área drenada ; y β : pendiente

-Índice de transporte potencial de sedimentos (LSF): Representa los efectos de la topografía sobre los procesos de transporte de sedimentos, es una medida de la capacidad de transportar sedimentos del flujo de agua en un punto de dado del paisaje (Moore y Burch, 1985). Es una medida explícita de los efectos de

5.- Control Topográfico

la convergencia de la escorrentía formando surcos (*rilling*). El LSF puede escribirse como:

$$LSF=(n+1)(A/22.13)^n(\sin\beta/0.0896)^m$$

$$n=0.4; m=1.3$$

- Distancia al cauce más cercano (DIST)

-Radiación potencial de onda corta (RAD): Se calcula la radiación extraterrestre de onda corta (total diario). Para ello utilizamos el programa SCANHOR (L.Hazelhoff, v.1.0, 1996, no publicado) que crea contornos de los horizontes vistos por cada pixel a partir del DEM, y posteriormente el programa SUNSHAD (L. Hazelhoff, v.1.1, 1996, no publicado) genera el mapa de insolación potencial a partir del mapa de horizontes, y los mapas de pendiente y orientación, para una latitud dada (37°) y un día juliano determinado. Se ha de elegir una imagen lo más representativa posible del efecto de la insolación. Otros autores como Boer et al.(1996) usan el total diario en invierno, que es el periodo con máxima humedad en el suelo y mayor contraste en la insolación, sin embargo en nuestro caso en invierno hay una parte del área total a la sombra, donde la radiación incidente es 0. La presencia de muchos ceros en la matriz de datos que será sometida a clasificaciones multivariantes podría provocar una tendencia a agregar las celdas con este valor, para evitarlo se usa la radiación de onda corta diaria en equinoccio de primavera, que presenta unos patrones de radiación muy contrastados, hay un número mucho menor de celdas completamente a la sombra, hay agua disponible en el suelo y es un momento importante en el ciclo de vida de la vegetación.

5.2.1.2.- Regionalización

Se crea una matriz con las siguientes variables topográficas:

- Altitud
- Pendiente (Logaritmo de la pendiente)
- Orientación
- Curvatura en dirección a la máxima pendiente
- Curvatura en dirección transversal a la pendiente
- Area específica o área drenada (Logaritmo de Are)
- Índice de transporte potencial de sedimentos (Logaritmo)
- Índice Topográfico W
- Distancia al cauce más cercano
- Radiación de onda corta total diaria en el equinoccio de primavera.

Con las imágenes correspondientes a cada una de estas variables se construye una matriz de datos de 78868 filas por 10 columnas, donde cada celda (m^2 de la zona de estudio) es una observación (Fila) y cada observación toma 10 valores, correspondientes al valor en dicha celda de cada una de las variables topográficas expuestas. Para crear esta matriz se usa el programa Idrmat34 (del Barrio, 1995, no publicado). Con esta matriz se llevan a cabo siguientes tratamientos estadísticos usando PATN (Belbin, L. 1991) para la regionalización siguiendo el protocolo de del Barrio et al. 1996.

- Clasificación no jerárquica de la matriz de datos usando el índice *Gower metric* (Belbin, 1991), para obtener 23 clases. El algoritmo no jerárquico se adapta mejor a los requerimientos de los SIG, que pretenden optimizar la división de datos y no requiere una matriz de asociación previa (que con este volumen de datos es difícil de construir).

- Clasificación Jerárquica, aglomerativa, secuencial y sin solapamiento de las 23 clases anteriores. Se usa *UPGMA* (Belbin, 1991) para unir los centroides medios y el dendrograma resultante se corta en el nivel más adecuado, obteniendo 9 clases de centroides.

- Las 9 clases resultantes se expanden a 9 clases de celdas a partir de la primera clasificación, que darán lugar a las geoformas.

- Se crea un vector de afinidad de grupos para exportarlo como una nueva imagen (el vector de afinidad de grupos es simplemente una serie de 78868 números en el mismo orden que la matriz de datos original, donde cada número se refiere a la clase a la que pertenece esa celda). Para crear este vector se usa el programa Matidr, (del Barrio, 1993, no publicado).

5.2.1.3.- Caracterización de la geoformas

Para caracterizar las geoformas se estudia (PATN, Belbin, L. 1991), para cada una de las variables usadas en la regionalización, la mediana y valor máximo y mínimo que toma la variable en cada una de las geoformas.

Creamos un máscara para cada geoforma que aísla el área ocupada por dicha geoforma y ésta imagen de cada geoforma se superpone a los mapas de las variables topográficas, lo que nos permitirá obtener para cada geoforma los valores de los diferentes atributos topográficos y así caracterizar detalladamente cada geoforma. Las máscaras se crean en Idrisi para Windows v 2.0 (1995).

5.2.1.4.- Dependencia de la Topografía (Asociación Topografía-Teselas)

Para demostrar que la distribución espacial de las teselas depende de la topografía, se genera una tabla de contingencia con las 2 clasificaciones: mapa de

teselas y regiones topográficas y se crea también una imagen que muestra las localizaciones de todas las combinaciones de las categorías de las dos clasificaciones. La tabla consta de 9 columnas (geoformas) y 9 filas (teselas). A partir de esta tabla de contingencia se hace una prueba de χ^2 para comprobar si existe asociación entre la topografía y los tipos de teselas y se estudian las desviaciones de las frecuencias observadas respecto de las esperadas y su contribución a la χ^2 total ya que la magnitud de estas contribuciones puede resultar muy útil para interpretar la asociación entre ambas clasificaciones.

5.2.2.- Caracterización topográfica de cada tesela y distribución sobre los gradientes topográficos

5.2.2.1.- Características topográficas de cada tesela

Se crean máscaras para cada tipo de tesela, que se superponen a las diferentes variables topográficas, y extraemos los valores de cada variable topográfica para cada una de las celdas de una tesela. Una vez extraídas las variables topográficas para cada tesela, se genera una matriz de datos (76165 filas por 11 columnas), donde cada fila es una celda del mapa de teselas (76165 filas), que presenta una marca (primera columna) que informa del tipo de tesela al que pertenece dicha celda y el resto de las columnas corresponden a los valores que cada variable topográfica presenta en esa celda.

Comprobamos si las distintas teselas presentan diferencias significativas para los valores medios de cada variable topográfica mediante un Análisis de la Varianza.

Con objeto de analizar en qué parte del rango total de distribución de una variable topográfica se sitúa cada tesela se construyen, para cada variable topográfica, gráficos donde se representa el rango de distribución de dicha variable en cada una de las teselas, y se comparan las teselas.

5.2.2.2.- Ordenación de las teselas según gradientes topográficos (de una o más variables)

Las relaciones de las variables topográficas entre si y como se distribuyen u ordenan el total de teselas para gradientes constituidos por una o varias variables topográficas, se estudian mediante un Análisis Factorial (que se implementa en Statistica for Windows 4.5, 1993).

5.2.2.3.- Abundancia de cada tesela a través del gradiente de cada variable topográfica

Investigamos la abundancia de cada tipo de tesela a través del gradiente de cada variable topográfica mediante tablas de contingencia que permitieron contrastar el área donde la tesela estaba presente con el área donde estaba ausente a través del rango de una variable topográfica (Pinder et al. 1997).

Para ello se construyen para cada uno de los 9 tipos de teselas (del capítulo 4) tablas de contingencia con la estructura siguiente:

Pendiente: Tablas 2 x 5. Presencia o ausencia de un tipo de tesela frente a 5 intervalos de *pendiente*. El rango de la variable *pendiente* se divide en 5 clases: - menor o igual a 15°; - entre 15 y 30°; - de 30 a 45°; - de 45 a 60° y - superior a 60°.

Altitud: Tablas 2 x 4. Se establecen 4 intervalos de elevación: (240 a 280m); (280 a 320m); (320 a 360m) y (360 a 383m).

Orientación: Tablas 2 x 4. Se crean 4 clases de orientación que constituyen un gradiente de orientaciones de menor a mayor exposición a la insolación, clases de orientación establecidas por Parker (1982) para calcular el TRMI (Índice Topográfico de Humedad Relativa): (343° a 62°); (63° a 116° y 298° a 342°); (117° a 152° y 253° a 297°) y (153° a 252°).

Radiación potencial de onda corta diaria: Tablas 6 x 2. Se usa la radiación total incidente de onda corta diaria en equinoccio de primavera como se justificó previamente, y se genera un gradiente con esta variable constituido por 6 clases: (0 MJ/m²día); (0 a 5 MJ/m²día); (5 a 10 MJ/m²día); (10 a 15 MJ/m²día); (15 a 20 MJ/m²día) y (20 a 32 MJ/m²día).

Radiación potencial de onda corta horaria. Tablas 4 x 2. Se trata de comprobar si las tendencias son similares, al considerar en lugar de un total diario de insolación, la radiación horaria cuando es extrema y existe agua en el suelo, para lo cual se elige el equinoccio de primavera y se calcula la media horaria en las cinco horas de más insolación de ese día. La media horaria se transforma a W/m² y se establecen 4 clases: (0 a 300 W/m²); (300 a 600 W/m²); (600 a 900 W/m²) y (900 a 1200 W/m²).

Curvatura en la dirección de la pendiente. Tablas 2 x 3. Tres valores para la configuración de la pendiente: cóncava, plana y convexa. Gradiente de cóncava a convexa.

Curvatura en la dirección transversal a la pendiente. Tablas 2 x 3. Tres valores: cóncava, plana y convexa. Gradiente de cóncava a convexa.

5.- Control Topográfico

Área drenada: Tablas 2 x 6. El área drenada se clasifica en los siguientes intervalos: (1 a 5m²); (5 a 25 m²); (25 a 50 m²); (50 a 100 m²); (100 a 1000 m²); (superior a 1000 m²).

W: Tablas 2 x 8. La variable W se divide en las siguientes clases: (-10 a -5); (-5 a 0); (0 a 2); (2 a 4); (4 a 6); (6 a 8); (8 a 10); (10 a 15).

LSF: Tablas 2 x 6. El rango en el que se distribuye la variable L.S.F. se divide en 5 clases: (0 a 5); (5 a 10); (10 a 15); (15 a 20); (20 a 30) y (30 a 400).

Para identificar como responde una tesela, en términos de abundancia, ante un gradiente topográfico concreto, hacemos una prueba de regresión lineal en tablas r x 2 (Steel y Torrie, 1985) o tendencia lineal en proporciones (Snedecor y Cochran, 1984).

La χ^2 total de la tabla de contingencia creada para cada tesela y para cada variable topográfica se descompone en: 1) test de regresión lineal que implica una χ^2 como criterio para probar la significación estadística de una tasa de cambio lineal en la abundancia de una tesela a través de un gradiente topográfico, es decir si a medida que nos desplazamos en el gradiente aumenta el área relativa ocupada por una tesela, y 2) test de la varianza residual (desviaciones de la regresión) en el que participa una χ^2 que prueba la significación estadística de los residuales, es decir la varianza no explicada que queda tras fijar la tendencia lineal. El uso de estos test combinados permite determinar si existen tendencias en el área relativa ocupada por un tipo de tesela a través de un gradiente topográfico. De manera que: una χ^2 significativa para ambos test implica una tendencia no lineal de aumento o disminución del área relativa ocupada por un tipo de tesela a medida que nos desplazamos por el gradiente topográfico; si la χ^2 del test lineal es significativa, pero la del test de los residuales no, sugiere una tasa de cambio constante en la abundancia de la tesela a través del gradiente; y si el test de los residuales es significativo, pero el test lineal no lo es, se interpreta como que la abundancia de un tipo de tesela difiere entre las condiciones topográficas establecidas por el gradiente, con unas tendencias de aumento o disminución de las abundancias proporcionales no significativas.

Se calcula un parámetro b ("*pendiente*"), que expresa la tasa de cambio en la proporción de área ocupada por el tipo de tesela a través del gradiente. Se calcula como parte del test lineal y se expresa en unidades de abundancia proporcional (área ocupada por el tipo de tesela/área total), valores positivos de b indican que el área relativa aumenta al desplazarnos hacia valores más elevados en el gradiente topográfico, mientras que valores negativos de b constituyen una disminución de las abundancias proporcionales al aumentar el gradiente topográfico

(es decir, un ejemplo podría ser la tesela es menos abundante a medida que aumenta la insolación).

5.2.3.- Predicción de la distribución espacial de las teselas a partir de la topografía.

Se reduce la información topográfica mediante un Análisis de Componentes Principales. Las variables topográficas se estandarizan a una escala común de 0 a 255. Los mapas de curvatura, que presentan valores positivos y negativos según la convexidad o concavidad se subdividen cada uno en 2 mapas, uno para las formas cóncavas y otro para las convexas, ambos con escala positiva y luego se estandarizan. De esta forma se obtienen unas componentes topográficas no correlacionadas entre si, y se reduce la información topográfica (Boer et al. 1996).

Se eligen puntos de entrenamiento para cada tipo de teselas, es decir puntos georreferenciados que sabemos pertenecen a un tipo determinado de tesela. Para cada tesela se eligen aproximadamente un número de puntos de entrenamiento que corresponde a un 5% del total de celdas que constituyen ese tipo de tesela. A partir de estos puntos de entrenamiento y de las componentes topográficas (resultantes del análisis de componentes principales) extraídas para cada tesela se crean unas firmas o marcas para cada tipo de tesela. Estas firmas servirán para supervisar una clasificación de máxima probabilidad (en Idrisi for Windows v2.0, 1995), que se basa en la información topográfica asociada a estas áreas de entrenamiento (firmas o marcas topográficas), es decir en la comparación de la probabilidad de que una celda pertenezca a cada una de las firmas, y además en la probabilidad a priori basada en el área proporcional que se espera ocupe cada tipo de tesela.

5.3.- RESULTADOS

5.3.1.- Asociación topografía-teselas

5.3.1.1 Caracterización topográfica de la zona de estudio

Se construye un Modelo Digital de Elevaciones (M.D.E.) con una resolución de 1 metro, con un error vertical de 17.2 cm (error aceptable serían 25 cm, la mitad de la equidistancia entre las curvas de nivel, Moore et al. 1990).

El M.D.E. hace posible la extracción de los principales atributos topográficos y a partir de ellos es posible una caracterización topográfica general. A continuación se exponen las características topográficas generales para el área de estudio, y en la figura 5.1 se presenta el modelo digital de elevaciones y las

5.- Control Topográfico

imágenes de patrones espaciales de las principales variables topográficas estudiadas.

En la zona de estudio las pendientes oscilan entre 0 y 78°, es un paisaje bastante accidentado con pendientes elevadas. La pendiente del 53% del área total oscila entre 20 y 40°, sólo un 7.45 % del área tiene pendientes inferiores a 10°, y un 4.6% mayores de 50°. La figura 5.3 muestra el diagrama de distribución de la pendiente en la zona de estudio.

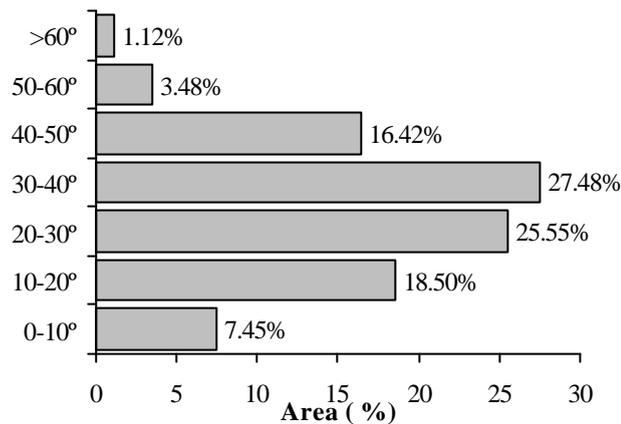


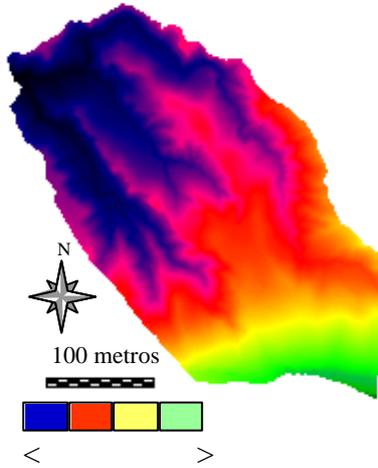
Figura 5.3: Distribución de la pendiente en el área de estudio.

La mitad de la zona de estudio se orienta al Norte, concretamente el 45.98%, el 25.5% al oeste y al sur sólo se orienta el 12.3% del área total.

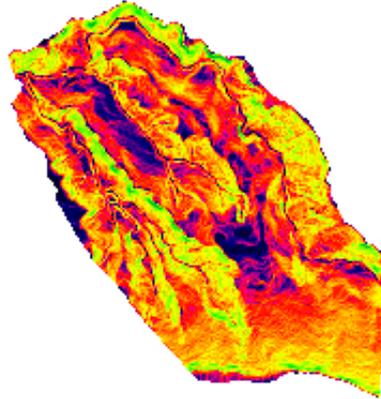
Con respecto a la curvatura en dirección a la máxima pendiente (CURV1) el 47.5% del área de zona de estudio es cóncava, el 6.3% plana y el 46.5% convexa, y en dirección transversal a la pendiente (CURV2) el 45.8% de la zona de estudio presenta una forma convexa, el 43.2% cóncava y el 11% plana.

El área drenada (ARE) para la mayor parte de la zona no es muy grande, el 94.4% del área de estudio tiene un área drenada menor de 100 m², el 25% del total de la zona de estudio tiene un área drenada de 1m², es decir no reciben agua de ninguna celda, excepto la que reciben directamente de la lluvia y el 48% tienen un área drenada entre 2 y 10 m².

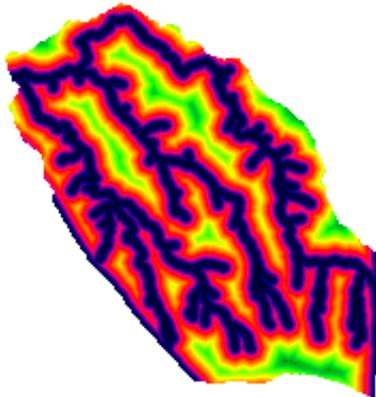
Modelo Digital de Elevaciones



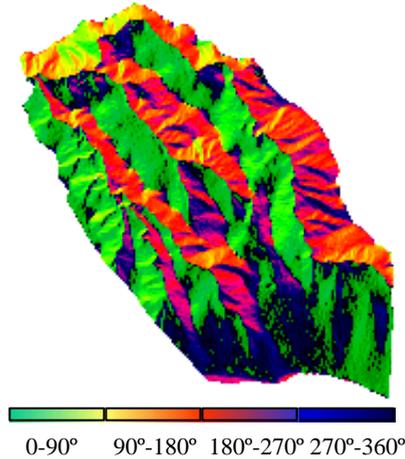
Pendiente



Distancia al cauce



Orientación



0-90° 90°-180° 180°-270° 270°-360°

Curvatura en dirección a la pendiente



Más oscuro \Rightarrow más cóncavo

Curvatura transversal a la



Más claro \Rightarrow más cóncavo

Indice W



Indice LSF

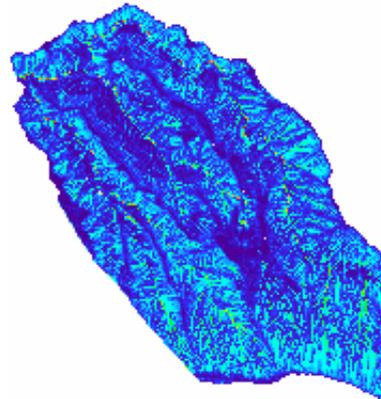
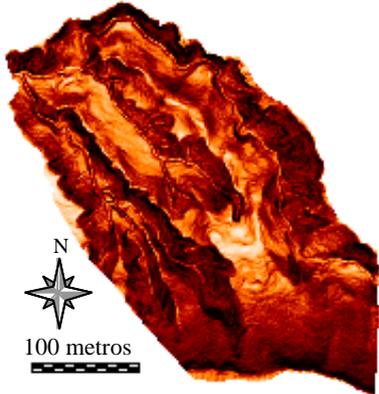


Figura 5.1: Mapas de los principales atributos topográficos. Todas las imágenes tienen la misma escala y orientación. Para los índices W y LSF: color más claro \Rightarrow > valor del índice

Equinoccio de Primavera



Solsticio de Verano



Equinoccio de Otoño



Solsticio de Invierno



Figura 5.2: Patrones de la radiación potencial de onda corta directa total diaria en solsticios y equinoccios. Color más claro \Rightarrow > radiación incidente. Se incluye efecto de las sombras

Un porcentaje pequeño del área de estudio, el 1.5% (que corresponde a los cauces), presenta un área drenada grande, superior a 1000 m².

Como consecuencia de las altas pendientes características de este paisaje y la pequeñas áreas drenadas los valores de W suelen ser bajos en la mayor parte del territorio (figura 5.4), lo que se traduce en que no se favorece el almacenamiento de agua en el suelo desde el punto de vista topográfico.

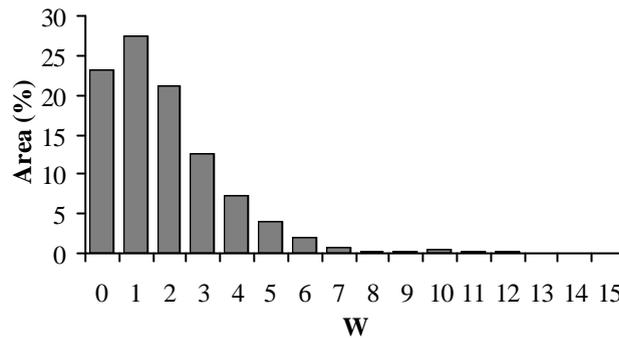


Figura 5.4: Distribución del índice topográfico W en la zona de estudio.

El potencial para el transporte de sedimentos (LSF) presenta, en general, valores elevados. El 60.5% presentan un LSF entre 2 y 10, sólo un 11% del área presenta valores inferiores a 2, y para el resto del área, un 28.5%, es mayor de 10.

Al ser la red de drenaje muy densa, los cauces están cerca de todas las celdas que componen la zona de estudio, de manera que para el 95% del área la distancia a los cauces es menor de 25m.

La accidentada topografía se pone de manifiesto cuando se estudia el patrón de radiación incidente (nos referimos siempre a la radiación extraterrestre de onda corta) que es muy contrastado, siendo las teselas planas (pedimentos y mesas) las que mayor insolación diaria reciben a lo largo de todo el año. La radiación extraterrestre de onda corta que incide sobre el área oscila entre 0 y 42.24 Megajulios/m² total diario, máximo registrado en solsticio de verano. En la figura 5.2 se presentan los patrones de la distribución espacial de la radiación extraterrestre de onda corta total diaria en los solsticios y equinoccios.

En invierno existen zonas que prácticamente no reciben radiación directa, debido a las sombras generadas por el relieve vecino. En verano las diferencias en la insolación entre las distintas zonas no son tan acentuadas, siendo en general muy elevada la radiación potencial de onda corta recibida por el área. La figura 5.5 compara las radiaciones de onda corta totales recibidas en los solsticios y equinoccios.

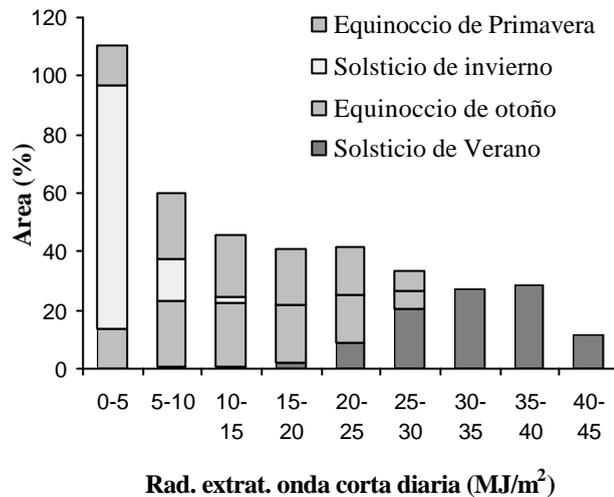


Figura 5.5. Distribución de la radiación extraterrestre de onda corta total diaria en equinoccios y solsticios en la zona de estudio.

5.3.1.2.- Regionalización

La regionalización da lugar a 8 geoformas que se distribuyen como representa la figura 5.6.

El porcentaje de área ocupada por cada geoforma se representa en la figura 5.7. Las geoformas 2 y 4 constituyen entre las dos el 50% del área de estudio.

Los valores máximos, medios y mínimos que toma cada variable topográfica en cada geoforma se exponen en la tabla del anexo A.5.1.

5.3.1.3.- Caracterización topográfica de las geoformas

Se estudia detalladamente cada geoforma para reconocer las características topográficas que las definen.

Geoforma 1 (Pedimentos). Son zonas con poca pendiente entre 0 y 30°, aunque suele ser inferior a 15°. Se sitúa a distintas altitudes, en niveles de distinta edad (Calvo et al., 1991). La forma del relieve es suave tanto horizontal como transversalmente a la pendiente, la concavidad y convexidad en ambas direcciones no es muy acentuada, por lo que no se ven favorecidos los procesos de transporte de sedimentos ni la convergencia/divergencia de los flujos de aguas de escorrentía. El 70% del área ocupada por la geoforma 1 está orientada al norte, y el 26.25% al este, sin embargo aunque la orientación no favorece la insolación, la radiación potencial de onda corta incidente es elevada, porque se trata de zonas planas con pocas sombras.

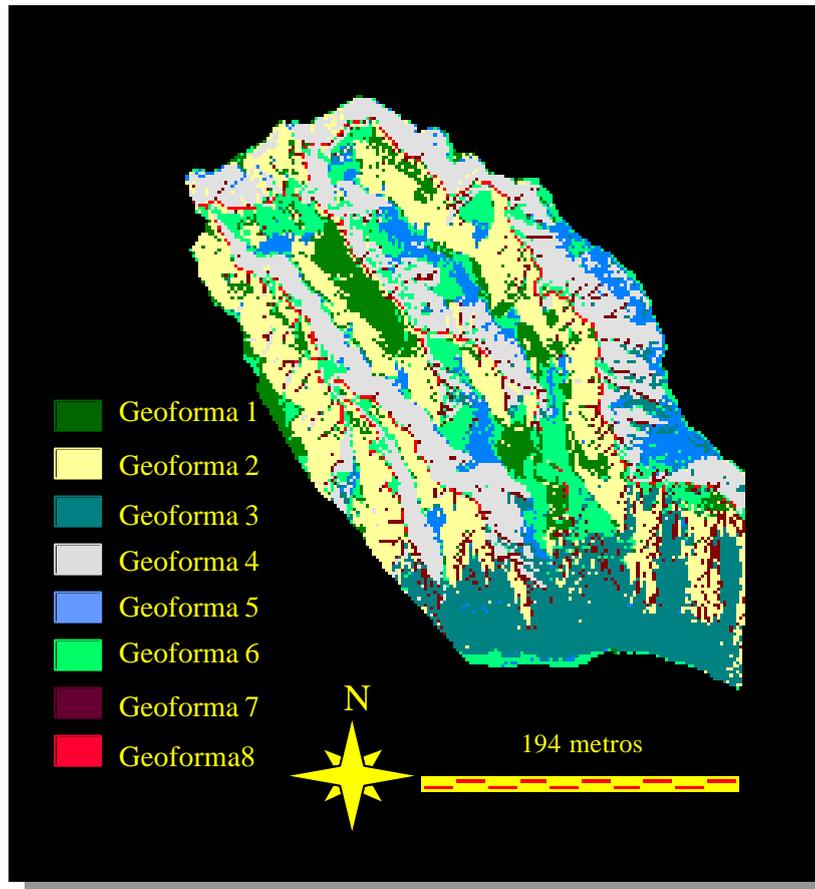


Figura 5.6: Geoformas resultantes de la regionalización topográfica.

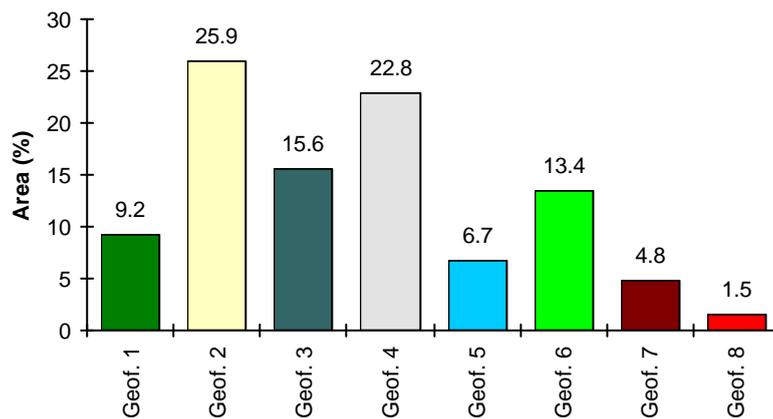


Figura 5.7: Distribución del área ocupada por cada geoforma.

En la geoforma 1 el atributo topográfico W presenta valores elevados con respecto al resto de la zona de estudio (figura 5.8), topográficamente se favorece la presencia de agua en el suelo, como consecuencia de las reducidas pendientes y

extensas áreas drenadas (la mayor parte de esta geoforma se sitúa en la base de laderas). El LSF presenta valores bajos (figura 5.9), lo que indica bajo potencial para el transporte de sedimentos en esta geoforma.

Geoforma 2 (Laderas orientadas al norte, noreste). Es una geoforma de gran extensión (figura 5.7). Son zonas con una pendiente elevada entre 0 y 74°, el 91.8% de la geoforma presenta pendientes superiores a 20° y más de la mitad del área que ocupa esta geoforma tiene una pendiente por encima de los 30°. La curvatura en ambas direcciones es más acentuada que en la geoforma 1. Orientadas al norte el 55.1% de la geoforma y al este el 42.1%. El 44% de la geoforma tiene una zona de contribución o área drenada de entre 1 y 3 m². El índice topográfico W toma valores bajos (figura 5.8), como era de esperar al tener áreas drenadas pequeñas y pendientes altas, lo que se traduce en que el contenido en agua del suelo no se ve favorecido topográficamente. Los valores del atributo L.S.F. para esta geoforma no son muy elevados. lo que indica que esta geoforma no es tan eficaz en el transporte de sedimentos como otras.

Geoforma 3 (Laderas orientadas al norte sobre niveles antiguos, constituyen las cabeceras de las cuencas). Se caracteriza por presentar elevadas pendientes, sólo 2.8% del área de la geoforma tienen pendientes por debajo de los 25° y el 57% de la geoforma presentan pendientes entre 30 y 40°. La radiación total extraterrestre que recibe es baja, en invierno una parte importante de la geoforma permanece prácticamente a la sombra. Se trata de una geoforma con pendientes elevadas y áreas drenadas extensas en la parte baja de la ladera, pero reducidas en la parte alta, W presenta valores intermedios (figura 5.8). El atributo LSF toma valores bastante elevados en algunos puntos de la geoforma (con extensas áreas drenadas y pendientes elevadas), que son zonas situadas en las partes bajas de estas laderas que tienen un alto potencial para el transporte de sedimentos. Sin embargo, en el campo se comprueba que es una geoforma sobre una ladera bastante estabilizada en general, con excepción de algunas cárcavas que aparecen en las partes bajas.

Geoforma 4 (Laderas orientadas al oeste y sur). Las pendientes son muy elevadas hasta 79°, el 40% de la geoforma presenta pendientes entre 45 y 60°. La radiación potencial de onda corta diaria total sobre esta geoforma es menor de lo que cabría esperar según su orientación debido al efecto de las sombras que es

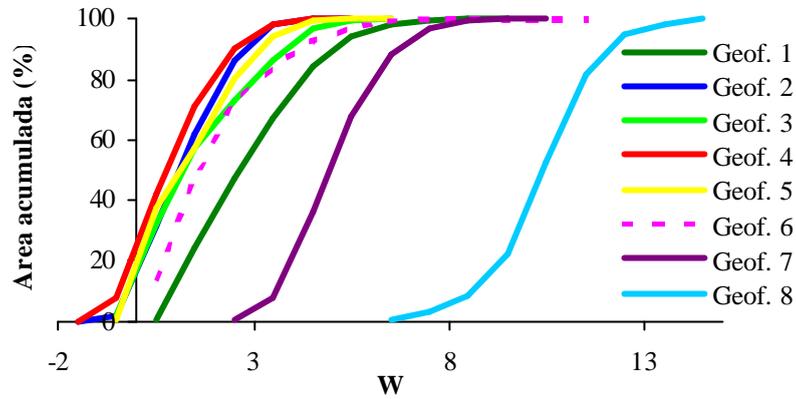


Figura 5.8.: Distribución acumulada del atributo W en cada geoforma.

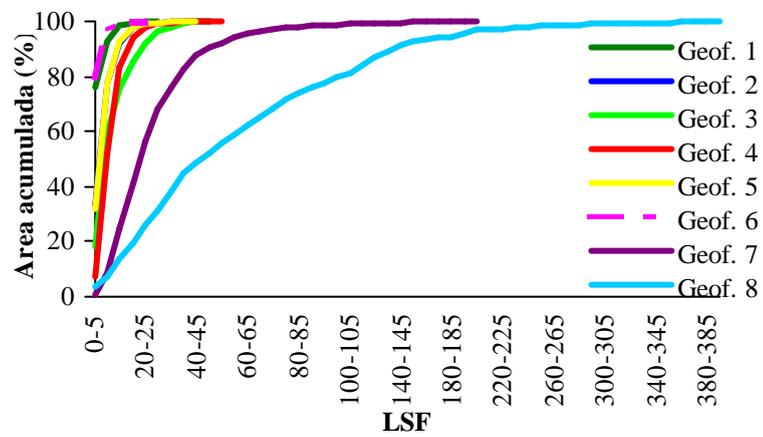


Figura 5.9.: Distribución acumulada del atributo LSF en cada geoforma.

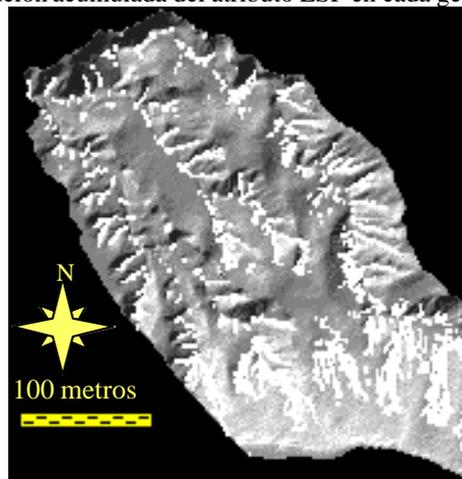


Figura 5.10. Geoforma 8 sobre mapa compilado del modelo digital de elevaciones muy importante en esta geoforma que presenta una curvatura muy acentuada tanto en dirección a la pendiente como transversal a la misma. En cuanto al área drenada

no es muy extensa para la mayor parte de la geoforma, excepto en un 3.3% de la geoforma que presenta zonas de contribución superiores a 34 m^2 , que coinciden con los surcos o microcauces, frecuentes en esta geoforma, donde se concentra la escorrentía superficial. Áreas drenadas pequeñas y elevadas pendientes no favorecen la acumulación de agua en el suelo, así encontramos que es la geoforma con menores valores para el índice W, como se observa en la figura 5.8. Las elevadas pendientes, favorecen valores altos del índice LSF y por tanto alto potencial para el transporte de sedimentos. Si observamos la figura 5.9 se comprueba que la geoforma4 presenta unos valores muy elevados para este índice, sólo por debajo de las geoformas 7 y 8.

Geoforma 5 (Ladera suaves orientadas al sur y al oeste). Geoforma poco extensa (6.7% del área total estudiada). La pendiente oscila entre 15 a 55° , el 85.7% del área que ocupa la geoforma tiene una pendiente entre 25 y 45° . La curvatura es suave. Recibe una insolación intermedia. La zona de contribución es pequeña, el 70% de la geoforma tiene un área drenada inferior a 7 m^2 , y como consecuencia W toma valores bajos. En la figura 5.9 se observa que al igual que la geoforma2, en esta geoforma no está favorecido el transporte de sedimentos.

Geoforma 6. (Pequeños pedimentos). Pendientes suaves entre 0 y 37° , el 64% del área ocupada por la geoforma 6 presenta pendientes menores de 20° . En cuanto a la curvatura, predominan las zonas convexas. La radiación potencial total diaria de onda corta es bastante elevada. La extensión de las áreas drenadas es variable. El índice topográfico W se ve favorecido por las suaves pendientes y presenta valores elevados. El potencial para el transporte de sedimentos es reducido.

Geoforma 7 (Surcos, cárcavas y zonas susceptibles al acarreamiento). Se caracteriza por presentar pendientes elevadas entre 10 y 63.4° , el 82.2% de la geoforma presenta pendientes entre 20 y 50° . En dirección a la pendiente es predominantemente cóncava (63.5% de la geoforma) y además la concavidad es bastante acentuada. Sólo el 25.5% de la geoforma es convexa. La curvatura va a favorecer la aceleración del flujo de agua y el transporte de sedimentos, lo que confiere alto potencial de erosión en esta geoforma. En dirección transversal a la pendiente son áreas prácticamente cóncavas 79.78%, sólo un 7.6% son convexas y 12.6% planas. Orientadas en todas las direcciones y con insolación también muy variable. Áreas drenadas muy extensas, el 85% de la geoforma tienen áreas drenadas superiores a 50 m^2 y un 5% de la geoforma presenta áreas drenadas superiores a 1000 m^2 , hasta 13426 m^2 . El índice topográfico W también es muy elevado (figura 5.8), por ser las áreas drenadas tan altas, sin embargo cuando se

forma la cárcava, la roca aflora y la capacidad de ser una zona con alto contenido en agua en el suelo desaparece al retirarse el suelo, será una zona receptora de la escorrentía para cederla a los cauces. Los valores del LSF son muy elevados, como se observa en la figura 5.9, al tratarse de zonas con grandes áreas drenadas y pendientes elevadas.

Geoforma 8 (Cauces). Pendientes entre 0 y 50°, aunque en realidad en su mayoría son suaves, un 44% de la geoforma presenta pendientes menores de 11°. Cóncava en dirección de la pendiente en un 88.15% del total de la geoforma y muy acentuada la concavidad. En dirección transversal a la pendiente, el 89.96% de la geoforma es cóncava, sólo un 7.2% es convexa. Orientados en todas las direcciones, insolación potencial variable. Áreas drenadas muy grandes entre 190 y 79175m², sólo un 4.7% de los cauces tienen una zona de contribución menor de 1000m². El W es el más elevado (figura 5.8), si bien no se traduce en un alto contenido en agua en el suelo pues en la mayoría de los casos están constituidos por la roca madre. El LSF también muestra los mayores valores (figura 5.9).

5.3.1.4.- Asociación Geoformas-teselas

Si se compara el mapa de geoformas con el mapa de teselas (tipos de cubiertas) del capítulo 4, se observan patrones de distribución similares que inducen a suponer que existe una estrecha relación entre la topografía y la organización espacial de las teselas. Tratamos de comprobar si estas geoformas se asocian a tipos de teselas concretos.

Para comprobar si existe asociación entre la topografía y los tipos de teselas, se crea una tabla de contingencia, con las geoformas y los tipos de teselas, tal y como hemos explicado en el apartado de metodología (sección 5.2.1.4), y a partir de la tabla de contingencia se hace una prueba de χ^2 . El resultado es $\chi^2 = 75456.9$ que es muy superior al valor de F para una $p=0.000001$ con 64 grados de libertad ($F= 133.51$). Por lo tanto existe una asociación altamente significativa entre la topografía y los tipos de teselas, es decir la topografía de alguna manera controla la distribución espacial de las teselas.

Para interpretar la significación de esa asociación interesa estudiar la contribución de cada casilla de la tabla en la obtención de la χ^2 y en qué forma difieren los valores observados y los esperados, para ello estudiamos las desviaciones individuales, que se presentan en la tabla 5.1.

5.- Control Topográfico

	Geof1	Geof2	Geof3	Geof4	Geof5	Geof6	Geof7	Geof8
STI	-949	-1299	5568	-3388	-814	-773	516	-217
PER	1540	202	-904	-1600	-167	1025	11	71
ANU	1099	-289	-481	-814	27	660	-91	-28
LQB	264	303	-237	-356	-112	246	-41	-27
LQC	385	341	42	-862	-88	394	-82	-59
LIQ	-168	3362	-1193	-2413	1105	22	-224	-165
LQD	-163	669	-58	-333	51	-152	42	0
LIM	-519	-583	-741	2075	437	-314	-113	-73
MAR	-1488	-2706	-1996	7690	-439	-1108	-18	498

Tabla 5.1: Desviaciones de las frecuencias observadas de cada tipo de tesela sobre las geoformas, respecto de las frecuencias esperadas.

Al cruzar ambas imágenes se pone de manifiesto con qué tipo/s de teselas se asocia cada geoforma, y el resultado es el siguiente:

Geoforma1 y Geoforma6: Sobre estas geoformas aparecen los tipos de teselas: PER, ANU, LQC, y LQB. Como muestra la tabla 51 las frecuencias observadas de estos tipos de teselas sobre estas geoformas son mayores que las frecuencias esperadas (desviaciones positivas), contribuyendo de forma muy importante a la χ^2 total, y para el resto de las teselas las desviaciones son negativas. Estas teselas por sus cubiertas vegetales, sobre todo PER y ANU (perennes y anuales), se adecuan a las características topográficas de estas geoformas, pendientes suaves, áreas drenadas extensas (aporte importante de agua desde las partes altas de la ladera) y baja capacidad para evacuarla, que favorece el almacenamiento de agua en el suelo, necesario para estas plantas, así como un bajo potencial para el transporte de sedimentos relacionado con la estabilidad indispensable para este tipo de vegetación, excepto en el caso de LQC y LQB, que al tratarse de líquenes no parece que sea tan exigente en cuanto al agua disponible, ni a la estabilidad, por lo que se sitúan en las partes de esta geoforma próximas a las divisorias (donde llega menos agua) o pedimentos muy reducidos, además de la posible intervención de otros factores.

Geoforma 2 y Geoforma 5: Teselas con cubierta líquénica se localizan sobre estas geoformas, concretamente la tesela LIQ (líquenes) y LQD (cubierta líquénica degradada). Las frecuencias observadas para estos tipos de teselas y estas geoformas, sobre todo para la tesela LIQ, son muy superiores a las frecuencias esperadas, lo que da una importante desviación positiva contribuyendo mucho a la χ^2 total. Las pendientes relativamente elevadas que caracterizan a esta geoforma, así como una curvatura más acentuada tanto horizontal como transversalmente, áreas drenadas pequeñas y el hecho de que no se favorezca la acumulación de agua en el suelo, hace que sean zonas inhóspitas para la vegetación

superior, por lo que son los líquenes los que se benefician de esta situación, uniéndose la circunstancia de que el potencial para el transporte de sedimentos no es muy elevado, con lo que se mantiene una cierta estabilidad que permite la supervivencia de estos líquenes.

Geoforma 3: Esta geoforma corresponde a laderas localizadas sobre los niveles más antiguos de la zona de estudio (Calvo-Cases et al. 1991). Sobre esta geoforma aparece una densa cubierta vegetal, donde *Stipa tenacissima* es la vivaz más representativa (tesela STI). A primera vista no parece que sea la topografía más adecuada para que se de este tipo de tesela, pues las pendientes son muy fuertes y también el potencial para transportar sedimentos. Topográficamente por un lado se ven favorecidos los procesos de erosión, pero por otra parte las extensas áreas drenadas, sobre todo en la parte baja de esta ladera y la menor insolación que recibe esta tesela potencian la presencia de agua en el suelo y la existencia de la cubierta vegetal que a su vez aumentará la estabilidad de esa geoforma. La tabla 5.1 muestra desviaciones positivas importantes para las combinaciones STI-GF3, constituyendo una de las contribuciones más altas a la χ^2 total, y presenta desviaciones negativas para el resto de las teselas.

Geoforma 4: Asociadas a esta geoforma se encuentran las teselas desprovistas de vegetación, MAR y LIM. Las características topográficas de estas geoformas, laderas de elevadas pendientes, fuerte curvatura, y un considerable potencial para la erosión y posiblemente otros factores no considerados aquí, constituyen una situación lo suficientemente inhóspita como para que la vegetación no tenga éxito en la colonización, con excepción de alguna especie "resistente" (Lázaro, 1995). La frecuencia observada de estos tipos de teselas sobre la geoforma 4 es muy superior a la frecuencia esperada, y contribuye significativamente a la χ^2 total. Desviaciones negativas para el resto de teselas.

Geoforma 7: Corresponde a zonas con cárcavas o zonas con alta susceptibilidad al acaravamiento, que pueden ir asociadas a diferentes tipos de teselas, PER, STI y LQD. En esta geoforma los procesos erosivos están potenciados por las fuertes pendientes, la concavidad horizontal y transversal, así como las extensas áreas de drenaje, todo ello contribuye a que las aguas de escorrentía fluyan a gran velocidad hasta estas zonas, con una gran capacidad para erosionar y transportar sedimentos. Estos procesos se ven facilitados en esta geoforma, independientemente del tipo de tesela sobre el que se encuentre, aunque las desviaciones son más frecuentes sobre STI y LQD.

5.- Control Topográfico

Geoforma 8. Los cauces aparecen en la marga desnuda, MAR, en la mayoría de casos, si bien en algunos casos es la tesela PER la que penetra en los cauces (por tratarse de una zona del cauce con más sedimentos). La combinación MAR-GF8 contribuye de forma muy importante a la asociación total.

5.3.2.- Comparación de la topografía asociada a cada tesela y distribución sobre los gradientes topográficos.

5.3.2.1.- Comparación de las características topográficas de las teselas

Existen teselas diferentes, tales como PER y ANU, que están asociadas a las mismas geoformas, por lo que en primer lugar es necesario comprobar si esas teselas son significativamente diferentes entre si desde el punto de vista topográfico o no, en cuyo caso las diferencias que observamos se deben a otras causas. Para ello se lleva a cabo un análisis de la varianza que pone de manifiesto que existen diferencias significativas entre los valores medios de cada variable topográfica en cada tesela. (La orientación no se ha tenido en cuenta, por tratarse de una variable direccional, en su lugar se ha tenido en cuenta la radiación extraterrestre de onda corta diaria incidente). La siguiente tabla presenta los valores medios de cada variable topográfica para las teselas:

	ALT (m)	PEND (°)	ARE (m ²)	CURV1	CURV2	DIST (m)	RAD (MJ/m ²)	W	LSF
STI	325.90	33.94	43.61	0.00	0.00	29.87	10.08	2.42	12.35
PER	283.50	21.05	31.98	0.00	0.12	12.48	18.04	2.90	6.36
ANU	276.62	17.22	22.88	0.02	0.08	14.25	20.59	2.92	4.56
LQB	261.97	21.60	16.08	0.03	-0.02	8.45	17.55	2.42	5.42
LQC	306.60	24.62	8.77	0.03	-0.04	18.46	16.49	2.11	6.04
LIQ	282.34	29.05	18.31	0.02	-0.02	17.90	13.42	2.04	7.69
LQD	286.06	35.77	23.57	0.00	0.00	15.73	8.91	1.90	10.30
LIM	285.26	38.95	14.52	0.07	-0.02	15.96	8.23	1.51	9.68
MAR	279.52	40.12	25.63	-0.05	0.01	11.16	7.21	1.77	11.54
Cauces	272.30	13.97	17210.15	-0.52	0.35	0.00	18.86	11.08	72.07

Tabla 5.2: Valores medios de cada variable en cada tipo de tesela y en cauces.

La descripción estadística de las variables topográficas para cada una de las teselas, se presenta en las tablas del anexo A.5.2 a A.5.10 que muestran las diferencias topográficas entre las teselas, y A.5.11 en cauces.

La representación gráfica de la distribución de cada variable topográfica en las diferentes teselas, muestra que las teselas ocupan zonas concretas (regiones diferenciadas) del rango total de distribución de cada variable, que además están muy relacionadas con el tipo de cubierta que caracteriza a cada tesela.

Las teselas se distribuyen sobre zonas con pendientes diferentes, de manera que las teselas vegetadas, con cubierta predominantemente de plantas vasculares, se localizan sobre pendientes más suaves, que no suele superar los 30°

(en PER, el 81.7% del área que ocupa presenta pendientes inferiores a 30° y tesela ANU el 91.2% del área ocupada por esta tesela es sobre zonas con pendientes inferiores a 30°). En zonas con pendientes intermedias entre 10 y 40° se sitúan las teselas con líquenes LIQ, LQB y LQC (LIQ: 88.7% entre 10° y 40°; LQB: 91.5% de la tesela entre 5° y 35° y LQC el 90.69% del área entre pendientes de 5° y 40°). Las teselas no vegetadas aparecen donde las pendientes son más elevadas por encima de 20° hasta 60° (el 96.1% del total del área que ocupan las margas se sitúan entre 20° y 60°). Los líquenes degradados (LQD), aparecen en pendientes intermedias entre las asociadas a margas y a cubiertas liquénicas (entre 20 y 50° el 91.96%). La figura 5.11 compara las distribuciones de la pendiente en las distintas teselas. Muestran los valores máximos, mínimos, la mediana. La caja delimita el 80% de la distribución.

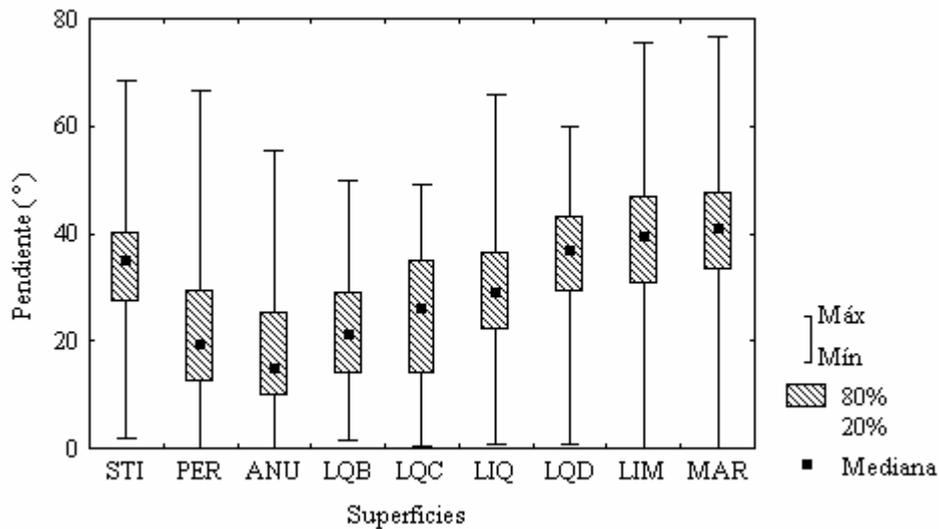


Figura 5.11. Distribución de la pendiente en las diferentes teselas

Asociada también a pendientes fuertes, entre 30 y 40°, aparece un tipo de tesela con densa cubierta vegetal, en contra de lo que cabría esperar, además tiene un elevado potencial para el transporte de sedimentos, variable topográfica que se distribuye en las teselas siguiendo unos patrones muy similares a los de la pendiente según se pone de manifiesto la figura 5.12.

En las zonas con bajo potencial para el transporte de sedimentos se sitúan las teselas con cubierta de vegetación superior, exceptuando STI, y las teselas desnudas se corresponden con las zonas con alto potencial para el transporte de sedimentos.

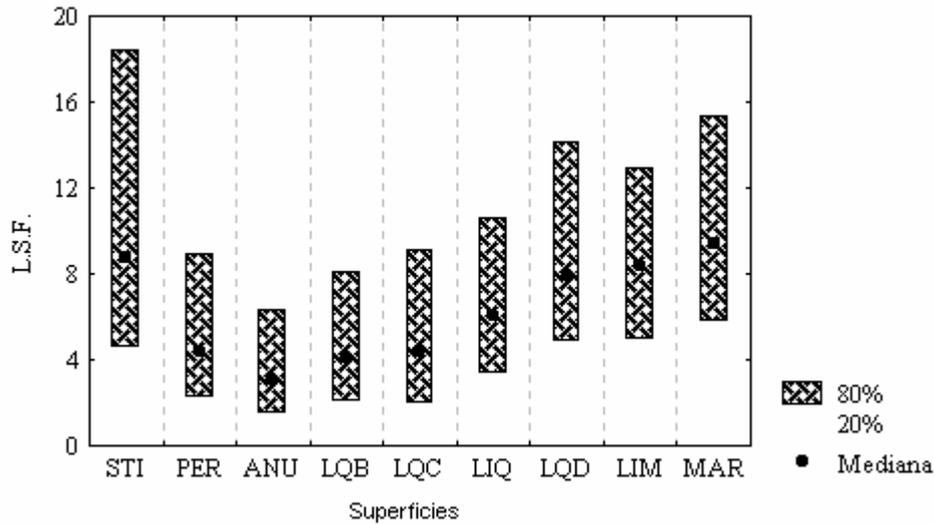


Figura 5.12. Distribución de LSF en las diferentes teselas.

La tesela STI, presenta pocas pero importantes cárcavas que corroboran el alto potencial para el transporte de sedimentos, sin embargo se trata de una superficie muy antigua y estabilizada, y probablemente es la densa cubierta vegetal la que estabiliza esta superficie y frena la degradación.

El desarrollo de esta cubierta vegetal debe estar muy favorecido por la orientación menos “expuesta” a la insolación, de esta tesela, como se observa en la figura 5.13 que muestra la distribución de las teselas en orientaciones de mayor a menor exposición a la insolación, sin tener en cuenta el efecto de las sombras.

Sin embargo la radiación potencial de onda corta que reciben las teselas no coinciden con la esperada según los patrones de orientación, lo cual se explica por el importante efecto de las sombras en un paisaje tan accidentado.

Cuando observamos las distribuciones de área de cada tesela en las orientaciones teóricamente más expuestas a la insolación, (Parker, 1982) entre 153° y 252°; 117° a 152°; 253° a 297°, MAR es la que más área ocupa. Sin embargo la radiación potencial de onda corta sobre esta tesela es relativamente baja (figura 5.14), lo que se explica por el efecto de las sombras que en esta tesela es muy importante debido a la importante curvatura de estas laderas. Sobre la tesela STI la insolación es también baja (figura 5.14). En invierno el patrón es aún más contrastado, y la mayor parte del área de STI no recibe radiación directa, lo cual

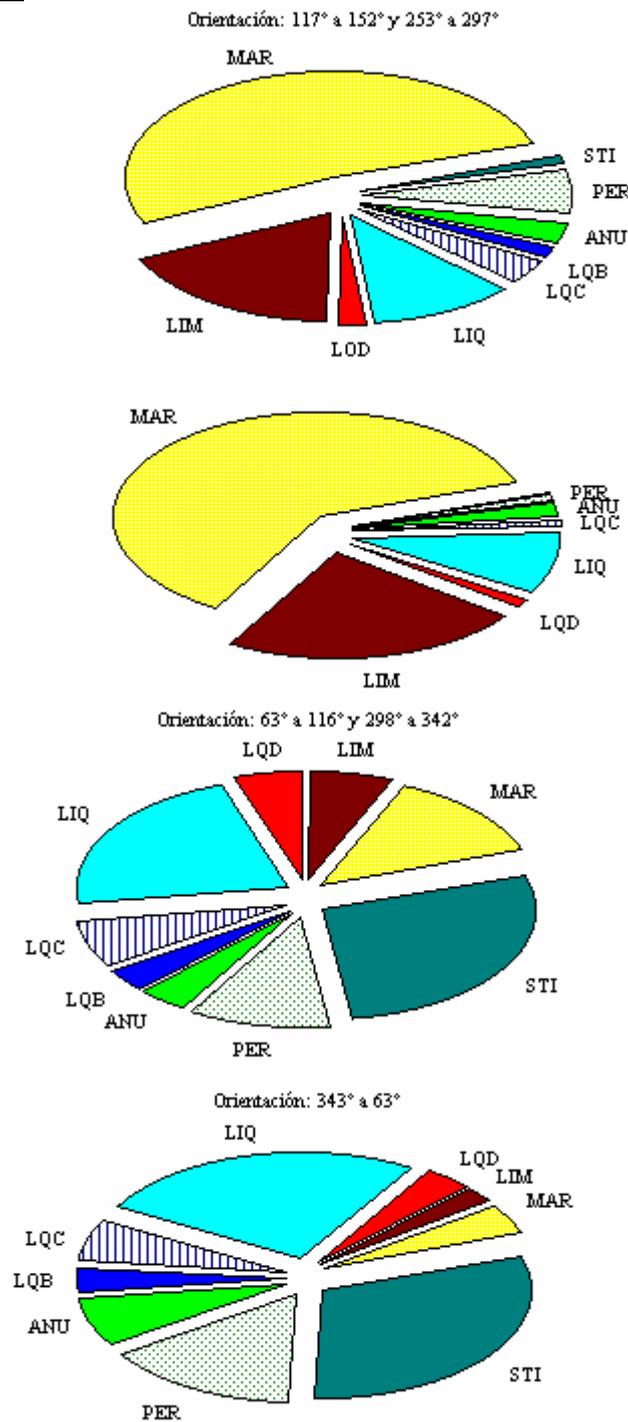


Figura 5.13. Distribución del área ocupada por las teselas en intervalos de orientación.

estará íntimamente relacionado con la conservación en agua del suelo.

5.- Control Topográfico

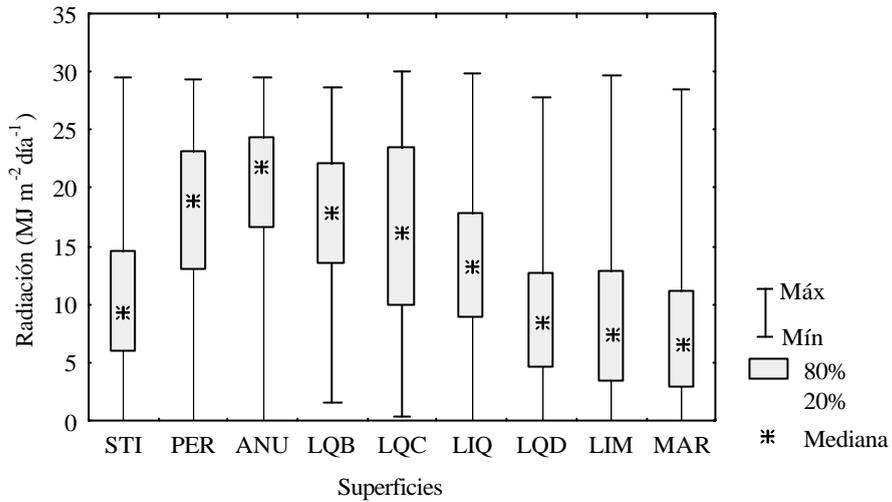


Figura 5.14. Distribución de la radiación potencial de onda corta diaria en equinoccio de primavera sobre cada tesela.

Asimismo la media horaria durante las 6 horas del día en que la intensidad de la radiación incidente es máxima en el equinoccio de primavera, en un momento del año en el que hay agua disponible en el suelo, también muestra una distribución diferenciada en cada tipo de tesela, muy similar a la observada para el total diario (figura 5.15).

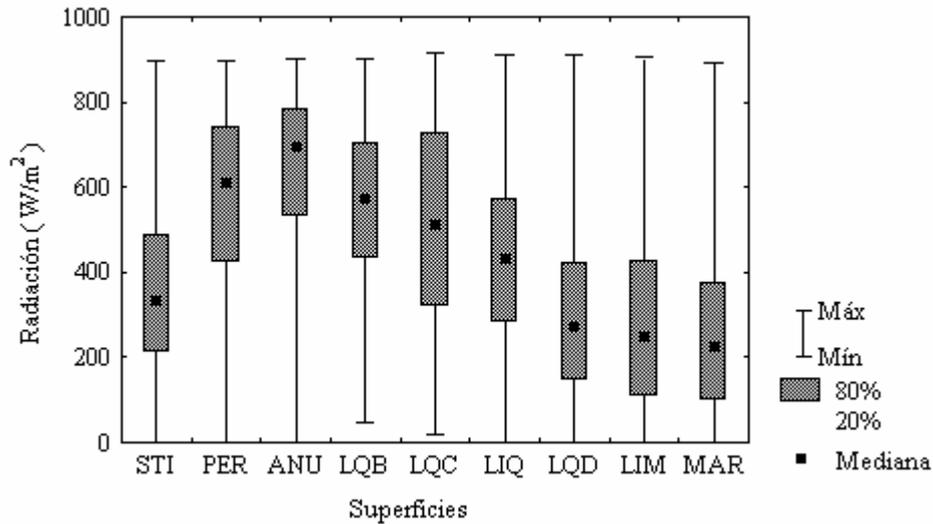


Figura 5.15: Distribución de la radiación potencial de onda corta horaria incidente sobre cada tesela (media de las horas de mayor intensidad de la insolación).

Las teselas con una cubierta constituida principalmente por plantas superiores se sitúan en las zonas con áreas drenadas más extensas (figura 5.16).

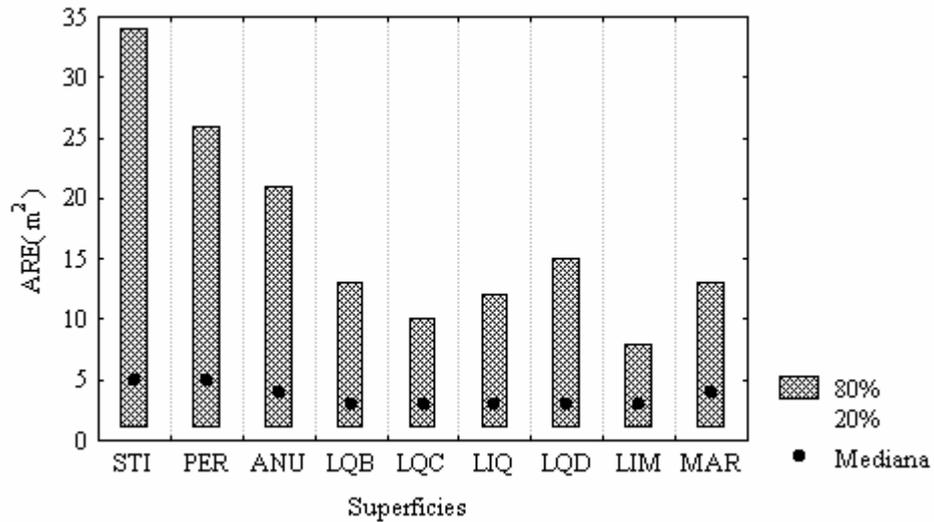


Figura 5.16. Distribución de la variable área drenada en cada tesela.

En las teselas PER y ANU las grandes áreas de drenaje unidas a las bajas pendientes favorecen la reserva de agua en el suelo, es decir las zonas sobre las que se sitúan presentan valores de W elevados, mientras que en las teselas no vegetadas como LIM y MAR, las altas pendientes ayudan a la evacuación de agua y los valores de W son bajos (figura 5.17).

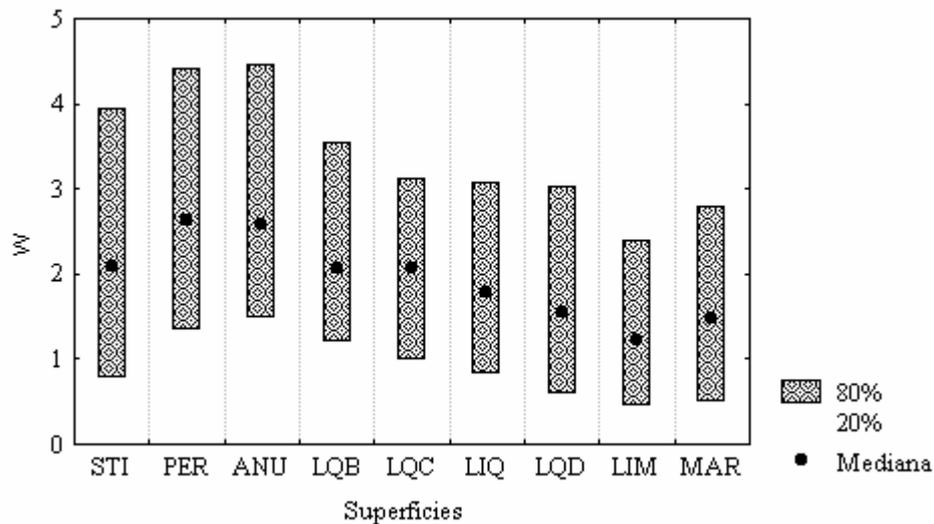


Figura 5.17: Distribución del índice topográfico W en cada tesela.

5.- Control Topográfico

La forma del relieve es diferente para las teselas, en la dirección de la pendiente las teselas vegetadas presentan formas con curvatura más suave que las no vegetadas (figura 5.18). Y en dirección transversal a la pendiente las teselas PER y ANU tienen más área con forma cóncava que convexa, y comparándolas con el resto de teselas, se sitúan en zonas más cóncavas en dirección transversal a la pendiente, lo que está relacionado con la convergencia de agua.

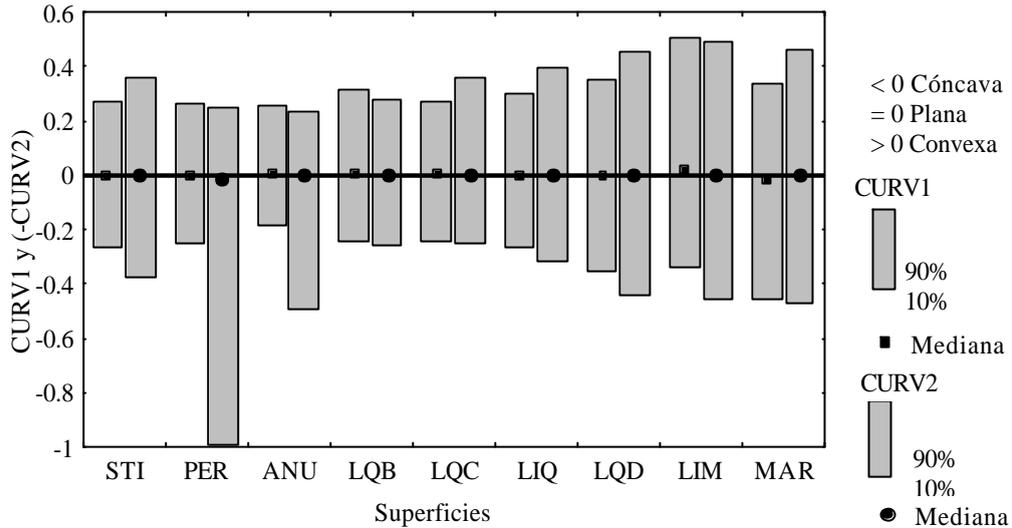


Figura 5.18: Distribución de la curvatura en dirección a la pendiente y transversal a la pendiente en cada tesela. Los valores negativos de esta Curv2 representan zonas convexas, y no cóncavas como para Curv1. Representando el opuesto de Curv2 (-Curv2), todos los valores negativos representarán zonas cóncavas para ambos atributos topográficos.

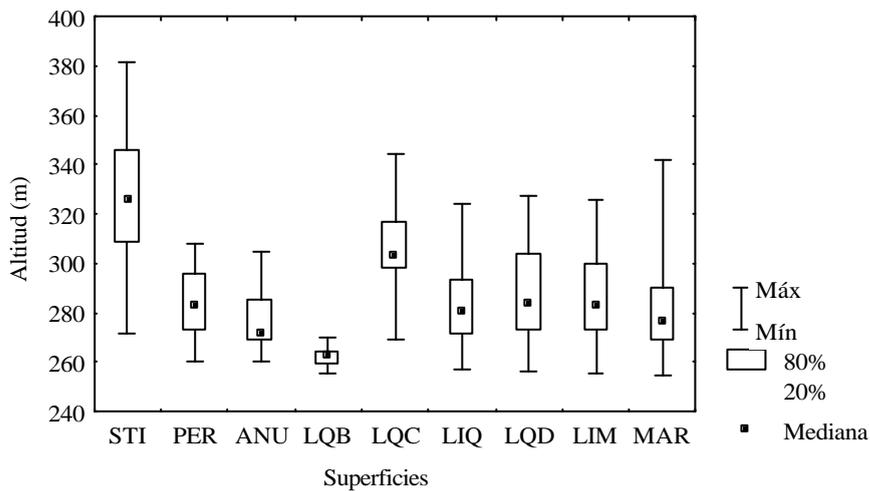


Figura 5.19. Distribución de la altitud en cada tipo de tesela.

Por último la altitud también constituye una diferencia clara para algunas teselas (figura 5.19), sobre todo la STI, que es la que aparece en las partes más altas de la zona de estudio, seguida de la LQC

5.3.2.2.- Relaciones entre las variables topográficas y ordenación de las teselas según gradientes topográficos.

Cada variable topográfica está significativamente correlacionada con el resto, según se pone de manifiesto al calcular los coeficientes de correlación de Pearson, que se exponen en la tabla 5.3.

	ALT	PEND	ARE	CURV1	CURV2	DIST	RAD	W	LSF
ALT	1.00	0.19	0.02	0.06	-0.03	0.51	-0.17	-0.02	0.15
PEND	0.19	1.00	-0.16	0.01	-0.06	0.13	-0.79	-0.43	0.53
ARE	0.02	-0.16	1.00	-0.34	0.48	-0.20	0.08	0.92	0.74
CURV1	0.06	0.01	-0.34	1.00	-0.50	0.17	0.06	-0.33	-0.30
CURV2	-0.03	-0.06	0.48	-0.50	1.00	-0.03	0.02	0.55	0.40
DIST	0.51	0.13	-0.20	0.17	-0.03	1.00	-0.02	-0.15	-0.07
RAD	-0.17	-0.79	0.08	0.06	0.02	-0.02	1.00	0.33	-0.46
W	-0.02	-0.43	0.92	-0.33	0.55	-0.15	0.33	1.00	0.50
LSF	0.15	0.53	0.74	-0.30	0.40	-0.07	-0.46	0.50	1.00

Tabla 5.3: Coeficientes de correlación de Pearson entre variables topográficas. N=76165 y todos los coeficientes entre las variables son significativos para $p < 0.05$

Se observa que existe una elevada correlación positiva del área drenada con W y LSF. W y ARE se correlacionan positivamente con la curvatura transversal a la pendiente que está relacionada con la concentración del agua en el paisaje (cuanto mayor es el valor de CURV2 más cóncava es la forma de la ladera), y W se correlaciona negativamente con la pendiente.

Existe una fuerte correlación negativa entre la pendiente y la radiación, y es que las teselas con mayor pendiente, MAR, LIM, STI y LIQ son las menos radiación reciben.

Con objeto de examinar más detalladamente las relaciones entre las variables topográficas y cómo se ordenan las teselas según las variables topográficas se lleva a cabo un análisis factorial. El resultado es la extracción de 5 factores, calculados a partir de las variables, con raíces características (*eigenvalues*), desde el Factor1 al 5 de 3.02, 2.20, 1.11, 0.63 y 0.33 respectivamente y acumulan el 81.2% de la varianza. Nos quedamos sólo con los factores 1, 2 y 3 que presentan raíces características mayores de 1 y que acumulan un 70.4% de la varianza.

5.- Control Topográfico

Las cargas de los factores rotados ortogonalmente aparecen en la tabla 5.4:

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3
ALT	0.05	0.13	0.94
PEND	-0.08	0.98	0.05
ARE	0.94	-0.05	0.01
CURV1	-0.18	-0.05	0.02
CURV2	0.28	-0.02	-0.04
DIST	-0.11	0.03	0.40
RAD	0.06	-0.81	-0.09
W	0.86	-0.35	-0.01
LSF	0.74	0.61	0.04

Tabla 5.4: Relaciones entre factores rotados y variables topográficas. Cargas de cada variable topográfica sobre los factores

Las cargas de los factores indican la potencia de la relación entre cada variable topográfica y cada factor.

El Factor 1 está fuertemente relacionado con el área drenada o zona de contribución, con el índice topográfico W y con la variable LSF (para estas dos últimas variables la relación debería ser opuesta, es decir para una positiva y para la otra negativa) con todos ellos la relación es positiva, especialmente fuerte con el área drenada. Altos valores del factor 1 indicarán pues altas áreas de drenaje, facilitación topográfica del almacenaje de agua en el suelo y alto potencial para el transporte de sedimentos.

El Factor 2 representa la pendiente (positivamente) y la radiación (negativamente). El LSF también está relacionado positivamente con el factor 2. Altos valores del Factor 2 corresponden a elevadas pendientes, un alto potencial para el transporte de sedimentos y baja radiación incidente de onda corta.

El Factor 3 está muy relacionado con la altitud, las mayores altitudes coinciden con los valores más altos que presenta el Factor 3, y al relacionarse con la altitud indirectamente lo hace con los niveles de antigüedad definidos por Calvo et al. (1991), donde los más antiguos corresponden las partes más altas y a medida que vamos descendiendo aparecen los más jóvenes.

En definitiva podríamos atrevernos a decir que el primer factor es la disponibilidad de agua, el segundo factor la pendiente y el tercer factor la edad de estabilización.

Se estiman los coeficientes de cada objeto (celda) para cada factor. Para representar gráficamente las celdas de cada teselas respecto a esos factores, las 76165 celdas del total de teselas, por motivos de limitación del programa para las

representaciones gráficas, se eligen aleatoriamente 10000, (mediante un mapa de números aleatorios generado en IDRISI, que a su vez consta de 76165 celdas) y se representan los coeficientes de los factores estimados para cada una de las celdas.

Se comprueba que las celdas pertenecientes a un mismo tipo de tesela tienden a situarse próximas entre si y ocupan una posición más o menos diferenciada con respecto a las pertenecientes a otras teselas, es decir se pueden diferenciar los tipos de teselas por la posición que ocupan a través de los gradientes topográficos que representan los Factores 1, 2 y 3. Las figuras 5.20 y 5.21 muestran esta ordenación.

En estas figuras podemos observar como el Factor 2 constituye un claro gradiente de pendiente sobre el que se sitúan las teselas, de manera que desde valores bajos del Factor 2, es decir, pendientes bajas y a medida que va aumentando el valor del Factor 2 se encuentra:

PER, ANU, LQC y LQB → LIQ → LQD → STI → MAR y LIM

Los cauces se localizan a lo largo de todo el gradiente.

El Factor 1 establece un gradiente de ladera, desde valores bajos del Factor 1, que corresponden a pequeñas áreas drenadas, bajo potencial para el transporte de sedimentos y bajo contenido en agua en el suelo hasta valores altos del factor. El Factor 1 no diferencia de forma clara las teselas, y esto se debe a que este factor representa a 3 variables y está relacionado positivamente con las tres, aún cuando dos de ellas, LSF y W presenta tendencias opuestas en las teselas, por lo tanto teselas muy diferentes aparecen con valores similares para este factor. Así pues hemos de abordar esta cuestión con otro tipo de estudio que nos permita estudiar el efecto de los gradientes topográficos de cada variable por separado.

El Factor 3 representa un gradiente altitudinal, o mejor de antigüedad de los niveles de estabilización, donde las teselas se distribuyen de menor a mayor altitud de la siguiente forma:

LQB (Pedimentos con líquenes) → MAR, LIQ, PER, ANU y LIM →
LQC (Cuerdas con líquenes) → STI (Esparto).

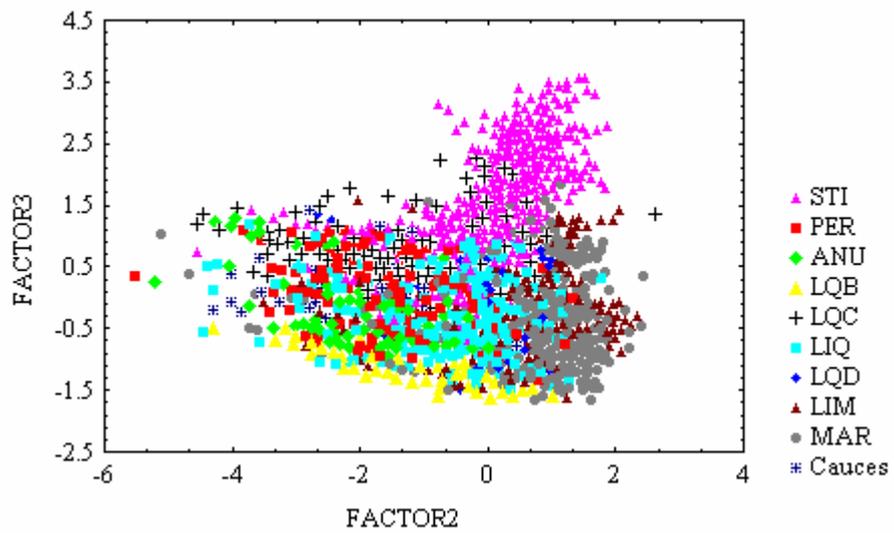
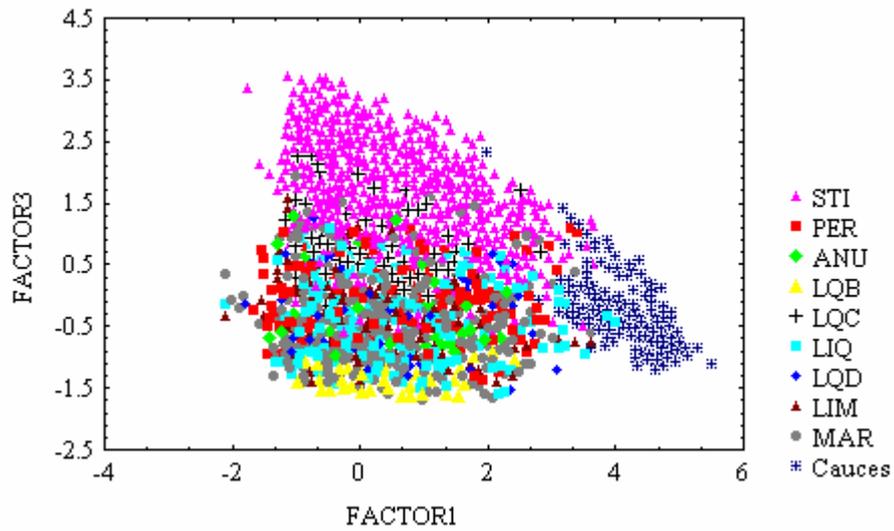


Figura 5.20 y 5.21. Ordenación de las celdas individuales en función de los factores extraídos en el Análisis Factorial. Se representa en distintos colores las teselas a las que pertenece cada celda.

5.3.2.3.-Abundancia relativa de las teselas a través del gradiente de cada variable topográfica

En la sección anterior las teselas se segregan sobre gradientes establecidos por unos factores que representan a una o más variables topográficas. Este análisis si bien nos permite comparar el conjunto de las teselas con la totalidad de variables topográficas, sin embargo no todos los gradientes resultantes ordenaron las teselas de forma que aparecieran segregadas a través del gradiente, ocupando posiciones diferentes, debido a la interacción de varias variables sobre dichos gradientes.

Algunos factores, como el Factor 1, representan más de una variable topográfica, que no se relacionan con las teselas de la misma forma. Para comprender mejor las relaciones entre las teselas y los gradientes topográficos se estudia más detalladamente como se relaciona cada tipo de tesela con el gradiente de una variable topográfica concreta. Por ello recurrimos al uso de tablas de contingencia y regresión lineal en tablas $r \times 2$ (Sección 5.2.2.3).

Se analizan los cambios en la abundancia relativa de cada tipo de tesela, es decir el área ocupada por la tesela/área total, para comprobar si a medida que nos desplazamos sobre un gradiente topográfico constituido por una variable topográfica, hay tendencia a que aumente o disminuya el área relativa de cada tipo de tesela. Para cuantificar las tendencias se calcula un parámetro pendiente b , que expresa la tasa de cambio en la proporción de área del total ocupada por el tipo de tesela a través del gradiente. Esta pendiente, b , se calcula como parte del test lineal (Steel y Torrie, 1980) y se expresa en unidades de abundancia proporcional (área ocupada por el tipo de tesela/área total). Los valores positivos de b indican que la tesela es más abundante al aumentar el gradiente topográfico y los negativos indican que el área proporcional ocupada por la tesela disminuye al aumentar el gradiente.

Las tablas 5.5 y 5.6 muestran las relaciones entre las áreas relativas de cada tipo de tesela y los gradientes crecientes de pendiente, altitud, distancia al cauce principal, área drenada (ARE), W, LSF, radiación (en primavera, total diario y media horaria de las 11 a las 16h) y orientación (gradiente de mayor a menor exposición) y curvatura (gradiente de concavidad a convexidad). En los métodos de este capítulo, sección 5.2.2.3 se detallan las categorías en que se subdivide el rango de cada variable topográfica para generar el gradiente. Se presenta la pendiente de la regresión (regresión lineal en tablas $r \times 2$), b , la significación del test lineal y significación del test de los residuales que corresponde a la variación no explicada tras fijarse la tendencia lineal.

5.- Control Topográfico

	PENDIENTE			ALTITUD			ORIENTACION			RAD. DIARIA			RAD. HORARIA		
	b	χ^2_{reg}	χ^2_{rs}	b	χ^2_{reg}	χ^2_{rs}	b	χ^2_{reg}	χ^2_{rs}	b	χ^2_{reg}	χ^2_{rs}	b	χ^2_{reg}	χ^2_{rs}
STI	0.037	*	*	0.354	*	*	-0.113	*	ns	-0.030	*	*	-0.033	*	*
PER	-0.101	*	*	-0.037	*	*	-0.046	*	ns	0.057	*	*	0.083	*	*
ANU	-0.066	*	*	-0.039	*	ns	-0.016	*	ns	0.038	*	*	0.054	*	*
LQB	-0.023	*	*	-0.036	*	ns	-0.010	*	ns	0.013	*	*	0.018	*	*
LQC	-0.032	*	ns	0.042	*	*	-0.018	*	*	0.020	*	ns	0.029	*	*
LIQ	-0.049	*	*	-0.083	*	ns	-0.056	*	ns	0.024	*	*	0.036	*	*
LQD	0.011	*	*	-0.011	*	*	-0.008	*	*	-0.008	*	*	-0.014	*	ns
LIM	0.065	*	*	-0.021	*	*	0.071	*	*	-0.030	*	*	-0.047	*	ns
MAR	0.181	*	*	-0.155	*	ns	0.193	*	*	-0.094	*	*	-0.142	*	ns

Tabla 5.5. Resultados del test de χ^2 total fraccionada en test lineal y residual para la pendiente altitud, orientación, radiación diaria y horaria. Para cada variable se han representado los resultados resumidos en tres columnas: a) pendiente de la regresión, b, que expresa la tasa lineal de cambio al desplazarnos a través del gradiente, b) significación de la χ^2 del test lineal que prueba si la tendencia es lineal, c) significación de la χ^2 del test de los residuales, que prueba la significación de la variación no explicada tras fijarse la tendencia lineal.* corresponde a $p < 0.01$.

5.3.2.3.a)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de pendiente

Las relaciones de las teselas con el gradiente de pendiente son significativas y pronunciadas como podemos ver en la tabla 5.5. A medida que aumenta la pendiente se incrementa el área relativa ocupada por teselas no vegetadas MAR, LIM, principalmente las margas MAR ($b=0.18$). Asimismo aumenta el área relativa ocupada por los líquenes degradados (LQD), pero con una tasa muy baja. La tendencia es opuesta para las teselas vegetadas que tienden a ser más abundantes en zonas con pendiente baja, disminuye el área relativa que ocupan al aumentar la pendiente. Existe la excepción de una tesela vegetada que aumenta su área relativa al aumentar la pendiente, es la tesela STI, que como ya habíamos comentado es un caso especial, de una superficie antigua y muy estabilizada.

Estas tasas de cambio, en general, no son constantes, sólo lo son para la tesela LQC, para el resto existe una variación residual significativa que no explica las tasas lineales de cambio en las abundancias proporcionales. Estos efectos residuales demuestran que las relaciones no son simplemente aumentos o disminuciones lineales en la abundancia de la tesela a través del gradiente de pendiente. Esto se puede deber, según Pinder et al. 1997, a la expresión compleja de los efectos de otras variables sobre la disponibilidad de agua por ejemplo, o por la reducción de estos gradientes complejos a una escala arbitraria de valores asignados o debido al potencial de cambio en la composición de la tesela, por ejemplo que dentro de una tesela exista una zona con mayor proporción en su

composición de una cobertura con mayor o menor tendencia a situarse en zonas más pendientes. La figura 5.22 representa las tasas de cambio (b) para las diferentes teselas:

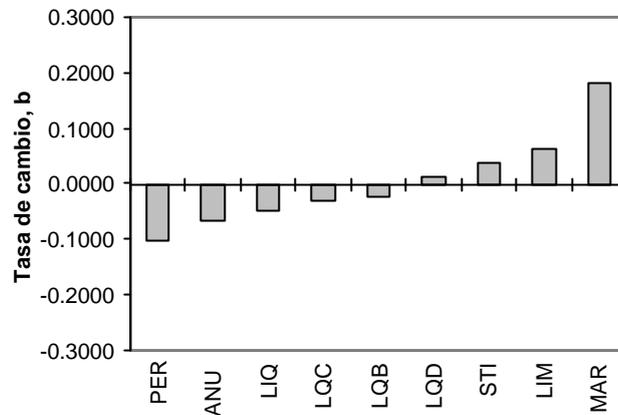


Figura 5.22: Tasas de cambio del área relativa de cada tesela al aumentar la pendiente a través del gradiente de pendiente establecido.

5.3.2.3.b)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de altitud.

Los cambios en la abundancia relativa de las teselas al aumentar la altitud (antigüedad de estabilización) son significativos, y para ANU, LIQ, MAR y LQB son constantes a través del gradiente. Las tasas de cambio son positivas sólo para STI y LQC (figura 5.23). Esto se explica porque STI y LQC son las teselas más abundantes en las parte altas o niveles de estabilización más antiguos y desconectados de la red de drenaje actual, especialmente STI ($b = 0.35$).

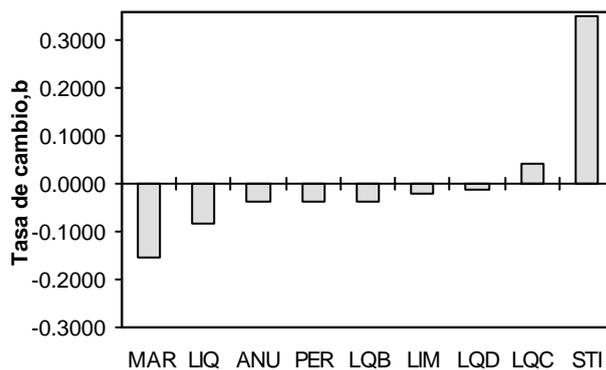


Figura 5.23: Tasas de cambio del área relativa de cada tesela al aumentar la altitud.

El área proporcional de MAR aumenta al disminuir la altitud (hacia niveles de estabilización más recientes), lo que está relacionado con la mayor activación de

5.- Control Topográfico

la erosión en las zonas más recientes, de menor elevación y más conectados con la red de drenaje actual y próximas a la Rambla de Tabernas (la incisión principal).

5.3.2.3.c)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de orientación.

Todas las teselas muestran cambios en su abundancia relativa a través de un gradiente desde orientaciones con menor exposición a la insolación potencial (sin tener en cuenta el efecto de las sombras) hasta orientaciones con mayor exposición, las tasas de cambio son significativas en todos los casos y para PER, ANU, LIQ, STI y LQB las tasas de cambio son constantes. Para todas estas teselas que están vegetadas, así como para LQC y LQD, el área relativa que ocupan disminuye a medida que nos desplazamos hacia orientaciones de mayor exposición a la insolación, mientras que aumenta la presencia de las teselas no vegetadas MAR y LIM, (figura 5.24). Estos patrones de las abundancias proporcionales de las teselas frente al gradiente de orientación no coinciden con los que muestran frente al gradiente de radiación de onda corta, como se puede apreciar gráficamente, en la figura 5.25, excepto para STI y LQD.

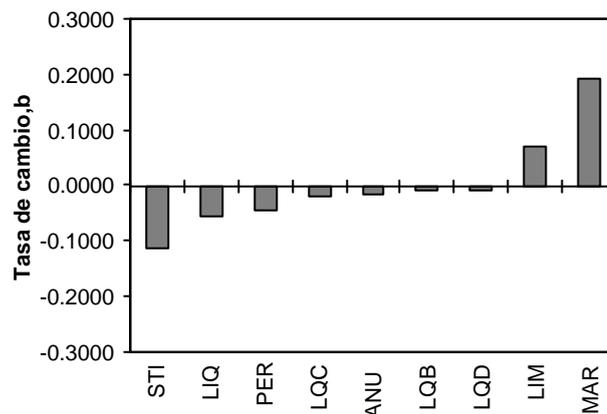


Figura 5.24: Tasas de cambio del área relativa de cada tesela (área ocupada por el tipo de tesela/área total) al desplazarnos hacia orientaciones con mayor exposición a la insolación potencial, sin tener en cuenta el efecto de las sombras.

5.3.2.3.d)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de radiación.

Todas las teselas vegetadas excepto STI son más abundantes a medida que la radiación incidente es mayor, y el orden de la tasa de cambio en la abundancia proporcional de la tesela de mayor a menor es: PER>ANU>LIQ>LQC>LQB, tanto más aumenta el área relativa con la radiación incidente cuanto más desarrollada es la cubierta vegetal (con excepción de STI), cuando era de esperar lo contrario, pues

las teselas vegetadas disminuyen su abundancia relativa hacia orientaciones con mayor insolación potencial (sin tener en cuenta el efecto de las sombras o de la pendiente) y además en este ecosistema se podría esperar que el aumento de la radiación incidente fuese un factor limitante para la aparición de teselas vegetadas.

El efecto de las sombras y la pendiente en la zona hace que las relaciones de las teselas con el gradiente de radiación presente unos patrones considerablemente diferentes al que muestran con el gradiente de orientación.

Las diferencias en la cobertura vegetal entre las laderas orientadas al norte y este frente a las no vegetadas orientadas al sur y oeste, probablemente no se explican por la insolación que reciben actualmente y sus consecuentes diferencias en la humedad del suelo, como se pensaba en un principio (Solé et al. 1997). Las teselas completamente desnudas, MAR, aumentan el área relativa que ocupan en las orientaciones con mayor exposición a la insolación potencial (sin el efecto de las sombras o la pendiente) y sin embargo reciben menos radiación de onda corta.

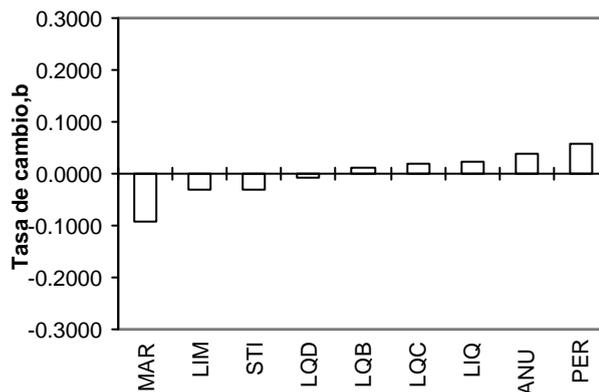


Figura 5.25: Tasas de cambio del área relativa de cada tesela (área ocupada por el tipo de tesela/área total) al aumentar la radiación extraterrestre de onda corta.

5.3.2.3.e)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de forma cóncava a convexa de la ladera.

Las relaciones de las teselas para las dos variables que caracterizan la forma del relieve no son tan significativas, ver tabla 5.6, como para los gradientes anteriores. Los gradientes establecidos para ambas variables, si recordamos la metodología, eran de cóncavo a convexo.

5.- Control Topográfico

	CURV1			CURV2			DIST		
	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}
STI	-0.001	ns	*	-0.001	ns	*	0.153	*	*
PER	-0.002	ns	*	-0.017	*	*	-0.028	*	ns
ANU	0.004	*	*	-0.003	*	*	-0.009	*	ns
LQB	0.002	*	ns	0.002	*	*	-0.014	*	ns
LQC	0.007	*	*	0.009	*	*	0.003	*	*
LIQ	0.013	*	*	0.015	*	*	0.006	*	*
LQD	0.000	ns	*	0.001	ns	*	-0.003	*	*
LIM	0.012	*	*	0.005	*	*	-0.008	*	*
MAR	-0.023	*	*	0.003	ns	*	-0.088	*	ns

Tabla 5.6 Resultados del test de χ^2 total fraccionada en test lineal y residual para las variables de curvatura de la ladera, distancia al cauce. Para cada variable se han representado los resultados resumidos en tres columnas: a) pendiente de la regresión (b) que expresa la tasa lineal de cambio al desplazarnos a través del gradiente, b) significación de la χ^2 del test lineal que prueba si la tendencia es lineal, c) significación de la χ^2 del test de los residuales, que prueba la significación de la variación no explicada tras fijarse la tendencia lineal. * corresponde a $p < 0.01$.

En dirección a la pendiente, aumenta el área relativa de todas las teselas vegetadas e incluso de la tesela LIM, a medida que la ladera se hace convexa (excepto PER y STI cuyas abundancias proporcionales difieren entre las condiciones topográficas pero la tasa de disminución que muestran no es significativa), y disminuye el área relativa de las teselas desnudas como MAR al desplazarnos hacia la convexidad. Al desplazarnos a formas convexas disminuye la velocidad de la escorrentía y la capacidad de erosión, lo cual favorece a estos tipos de teselas vegetadas.

En dirección transversal a la pendiente el área relativa de teselas con cubierta vegetal de plantas superiores, PER y ANU disminuye al hacerse la forma convexa, por tanto estas teselas tienden a ocupar zonas cóncavas, que suponen una mayor convergencia de agua y mayor contenido en agua del suelo. La tasa de disminución es mayor para PER que para ANU, lo que podría indicar que las matas tienden a ocupar zonas donde se disponga de más agua, y resisten mejor el mayor potencial de erosión que tiende a producir la escorrentía concentrada. Las figuras 5.26 y 5.27 muestran una mayor concavidad en la zona ocupada por PER que en ANU.

Por el contrario, las teselas con líquenes y las teselas desnudas tienden a aumentar su abundancia relativa al aumentar la convexidad, lo cual supone menor disponibilidad de agua (quedan relegadas a estas zonas en la competencia con perennes y anuales).

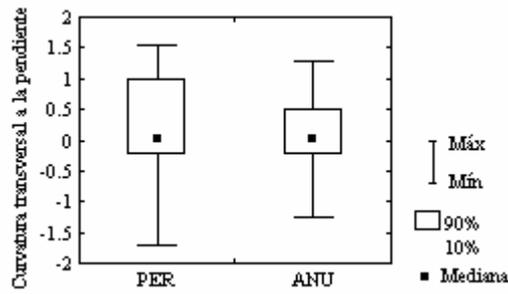


Figura 5.26: Comparación de la distribución de la curvatura transversal a la pendiente en las teselas PER y ANU.

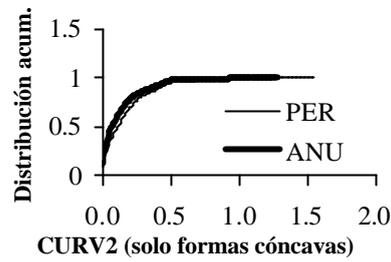


Figura 5.27: Distribución acumulada de la curvatura transversal a la pendiente. Incluidas sólo las celdas cóncavas.

5.3.2.3.f)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de distancia al cauce.

Estas tasas de cambio de la abundancia relativa de cada tesela a medida que aumenta la distancia a los cauces ponen de manifiesto que las teselas PER, ANU y LQB suelen localizarse en pedimentos próximos a los cauces, mientras que STI y LQC que eran las teselas asociadas a niveles más antiguos de estabilización, son más abundantes lejos de los cauces, lo que pone de manifiesto su limitado grado de conexión con la red de drenaje actual. Por último las teselas, no vegetadas, son más abundantes en las proximidades de la red de drenaje.

5.3.2.3.g)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente de área drenada.

Las tasas de cambio del área relativa ocupada por las teselas a medida que el área drenada o zona de contribución es mayor son muy pequeñas, prácticamente nulas, aunque las relaciones son significativas como muestra la tabla 5.7.

	ARE			W			LSF		
	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}	b	X ² _{rgr}	X ² _{rs}
STI	0.0001	*	*	0.0064	*	*	0.0018	*	*
PER	0.0000	*	*	0.0129	*	*	-0.0011	*	*
ANU	0.0000	*	*	0.0060	*	*	-0.0007	*	*
LQB	0.0000	*	*	0.0004	ns	*	-0.0004	*	*
LQC	-0.0001	*	ns	-0.0019	*	*	-0.0007	*	*
LIQ	-0.0004	*	*	-0.0109	*	*	-0.0019	*	*
LQD	0.0000	*	*	-0.0027	*	ns	0.0000	ns	*
LIM	-0.0002	*	*	-0.0172	*	ns	-0.0006	*	*
MAR	-0.0004	*	*	-0.0285	*	*	0.0001	ns	*

Tabla 5.7 Resultados del test de χ^2 total fraccionada en test Ineal y residual para las variables de ARE, W y L.S.F. Para cada variable se han representado los resultados resumidos en tres columnas igual que en las tablas 5.5 y 5.6.

5.- Control Topográfico

5.3.2.3.h)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente del atributo topográfico W.

Las teselas con una cubierta vegetal de plantas superiores, es decir PER, ANU y STI, presentan tendencias a que aumente el área relativa ocupada por dichas teselas a medida que aumenta el valor de W o lo que es lo mismo a medida que se favorece topográficamente la presencia de agua en el suelo. Por el contrario las teselas desprovistas de vegetación o con una cubierta criptogámica (excepto LQB, con tasa no significativa) presentan la tendencia contraria, disminuyen su abundancia relativa al aumentar W, pues se sitúan en las zonas con bajo potencial desde el punto de vista topográfico para almacenar en agua en el suelo. La tasa de aumento del área relativa al aumentar W es mayor para PER que para ANU, como se puede observar en la tabla 5.7, lo que corrobora la tendencia de la tesela PER a ocupar zonas con mayor disponibilidad de agua en el suelo, frente a la tesela ANU.

5.3.2.3.i)- Abundancia relativa de las teselas a través de un gradiente del atributo topográfico LSF.

Las relaciones son muy similares a las presentadas para la pendiente, pero las tasas de cambio son menores. Las teselas vegetadas PER, ANU, LIQ, LQC y LQB, excepto la STI, presentan la tendencia a que disminuya el área relativa ocupada por estas teselas al aumentar el potencial para transportar sedimentos. La tesela STI, presenta una tasa positiva, tiende a ser más abundante en las zonas donde es alto el potencial para el transporte de sedimentos, que es lo que ocurre en las laderas sobre las que aparece dado sus elevadas pendientes y extensas áreas de drenaje, sin embargo la erosión está muy limitada por la cubierta vegetal que constituye esta tesela STI, aunque en estas laderas aparecen en determinados puntos de confluencia de agua importantes cárcavas que constituyen las cabeceras de las cuencas que integran el área de estudio.

5.3.2.4.- Influencia de la topografía sobre la diferencias en la cobertura dentro de un mismo tipo de tesela

En el mapa de teselas del capítulo 4, se distinguieron dentro de la tesela PER, 3 subclases que llamábamos V1, V2 y V3, de mayor a menor densidad de vegetación desde V1 a V3. La cuestión que nos planteamos es si hay diferencia topográficas que justifiquen las diferentes densidades de la cobertura vegetal de V1 a V3. Un análisis de la varianza muestra que estas 3 subclases de la tesela PER son significativamente diferentes, para todas las variables topográficas.

Los gráficos de distribución de cada variable topográfica en V1, V2 y V3 que se presentan en el anexo (figuras A.5.1 a A.5.5) muestran que: V1 (vegetación

más densa) se localiza en pendientes menores que V2 y V3. V2 se localiza sobre las zonas donde más se favorece topográficamente la existencia de agua en el suelo (valores de W mayores) seguido de cerca por V1.

Las zonas de mayor concavidad tanto en dirección a la pendiente como transversal a la misma, son ocupadas por V2 y a su vez presenta los mayores valores de LSF y la mayor pendiente. En las zonas con valores intermedios para estas últimas variables se localizaría V3.

Estos resultados (figuras de A5.1 a A5.5 del Anexo) hacen pensar que V1, con mayor densidad vegetal y con plantas de mayor porte, prefiere las zonas de los pedimentos con pendientes más bajas, y bajo potencial para la erosión, y donde se favorezca topográficamente la acumulación de agua en el suelo, aunque W no tome los valores más elevados, o zonas de mayor convergencia de agua, sacrifica esto a expensas de la mayor estabilidad. Por su lado V2, soporta pendientes más elevadas y mayor potencial para el transporte de sedimentos a costa de localizarse en zonas de convergencia de agua, y V3 ocupa zonas intermedias.

En las laderas con líquenes existe una situación parecida, en cuanto a que se distinguen 2 subclases LIQ1 y LIQ2 que en conjunto constituyen la tesela LIQ, ambas se diferencian en que LIQ2 presenta una mayor cobertura de perennes que LIQ1, aunque la cobertura de líquenes sigue siendo lo suficientemente alta y decidimos considerarla dentro de LIQ, aunque se parece bastante a V3. Estudiamos las diferencias topográficas entre LIQ1 y LIQ2. Un análisis de la varianza pone de manifiesto que son significativamente diferentes excepto para la curvatura en la dirección a la pendiente y transversal a la pendiente. Sin embargo cuando se estudia la distribución de cada variable topográfica en LIQ1 y LIQ2 la única diferencia importante la constituye la zona de contribución o ARE que es mayor en LIQ2 que en LIQ1. LIQ2 recibe mayor aporte de agua de las zonas aguas arriba, pero para el resto de las variables topográficas las distribuciones son muy similares (figura A.5.6 de anexo).

5.3.3.- Predicción de la distribución espacial de las teselas a partir de la topografía.

Una vez demostrada la asociación entre la topografía y los tipos de teselas deberíamos ser capaces de predecir a partir de la topografía la distribución espacial de las teselas. De esta manera podremos extender un mapa de teselas a una zona más amplia del desierto de Tabernas.

5.- Control Topográfico

El Análisis de Componentes Principales da lugar a 7 factores que absorben el 99.44% de la varianza. En el anexo la tabla A.5.11 muestra las cargas de cada componente.

La clasificación de máxima probabilidad a partir de los puntos de entrenamiento y componentes topográficas genera un mapa potencial de los 9 tipos de teselas estudiados. Este mapa tiene un error de un 0.4%, sólo en un 58% de los casos era capaz de predecir adecuadamente el tipo de tesela que iba a aparecer en función de la topografía. En este mapa potencial se comprueba que la mayor parte del error se comete cuando trata de discernir entre PER(Perennes) y ANU (Anuales), pues como hemos visto a lo largo de todo este capítulo si bien presentan diferencias topográficas son bastante más sutiles que las diferencias entre teselas vegetadas y no vegetadas. De igual modo se comete un error importante (0.55)cuando se trata de predecir la distribución espacial de la tesela LIM y para la tesela LQD, pues no las distingue de forma clara de la tesela MAR. Por ello se decide crear un mapa potencial donde se predecirá la distribución espacial de 6 tipos de teselas, de manera que, se considerará PER y ANU como un sólo tipo PER/ANU, que se tratará de una tesela vegetada con perennes y/o anuales, y MAR, LIM y LQD se designarán como MAR/LIM/LQD que se tratará de teselas desprovistas de vegetación, consistiendo en una marga desnuda o cubierta por limos acostrados con o sin líquenes degradados. El error cometido al calcular el mapa potencial es de 0.35, ambos mapas coinciden en un 65 %.

En la tabla 5.8 podemos observar las proporciones de cada combinación de teselas resultante de comparar ambos mapas, el real y el estimado. Se comprueba que la predicción de algunas teselas es más exacta que la de otras, así para la tesela STI el solapamiento entre el mapa real y potencial es del 78%, mientras que para LIQ es sólo de un 45%.

	PER/ANU	LIQ	STI	LQC	MAR/LIM/LQD	LQB	Cauce
PER/ANU	0.54	0.18	0.05	0.05	0.14	0.05	0.00
LIQ	0.18	0.45	0.09	0.05	0.19	0.02	0.01
STI	0.01	0.06	0.78	0.09	0.06	0.00	0.00
LQC	0.19	0.12	0.29	0.31	0.08	0.00	0.00
MAR/LIM/LQD	0.06	0.17	0.04	0.01	0.70	0.01	0.00
LQB	0.02	0.17	0.00	0.00	0.31	0.51	0.00
Cauce	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabla 5.8. Proporción de celdas solapadas para cada combinación entre tipos de teselas. Las filas corresponden al mapa potencial y las columnas al mapa real y el solapamiento es la diagonal.

La figura 5.28 muestra que los patrones de distribución espacial del mapa real y el potencial son bastante similares.

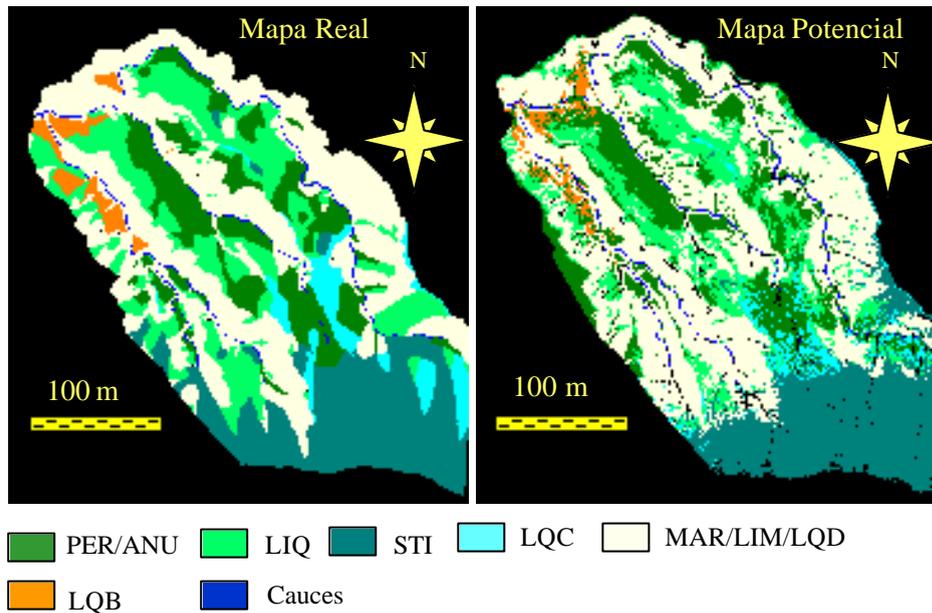


Figura 5.28: Mapa real y potencial de teselas.

5.4.- DISCUSION

La caracterización topográfica de este paisaje de cárcavas revela su complejidad, desde zonas bastante planas, poco pendientes y estables hasta pendientes de 78° , acentuadas curvaturas y poca estabilidad. Como consecuencia de esta topografía tan accidentada el efecto de la pendiente y de las sombras es muy importante, por lo que los patrones de insolación potencial son muy diferentes de los que podríamos esperar a partir de los patrones de orientación.

Mediante taxonomía numérica sobre la información topográfica distribuida espacialmente, es posible reconocer ocho geoformas que componen este paisaje. Estas geoformas presentan características topográficas contrastadas y se organizan en el espacio según unos patrones similares a los que presentaban las teselas, definidas en términos de cobertura en el capítulo 4.

Existe una importante asociación entre los patrones de distribución de las teselas y los topográficos. La topografía constituye unas geoformas que están asociadas a las teselas y las características topográficas asociadas a cada tesela justifican el tipo de cobertura que presenta dicha tesela.

Las zonas degradadas o susceptibles de serlo constituyen una geoforma, caracterizada por unos rangos determinados de cada variable topográfica, los

cuales pueden utilizarse como indicadores de degradación, toda vez se superen los umbrales, establecidos por esta geoforma, para el conjunto de la topografía, nos encontramos en una zona degradada o susceptible de degradarse.

Cada tesela presenta unas características topográficas diferentes del resto, y se sitúa en una zona concreta del rango de distribución de cada variable topográfica de acuerdo con su tipo de cobertura.

Las variables topográficas estudiadas afectan a la distribución espacial de todos los tipos de teselas, la mayoría de estas variables, tienen un efecto significativo sobre cada tesela.

La pendiente, la altitud, la orientación y la radiación son las variables topográficas que provocaron las mayores tasas de cambio del área relativa ocupada por cada tipo de tesela al desplazarnos a través del gradiente topográfico constituido por cada una de estas variables.

Las tasas de cambio (aumento o disminución de área ocupada por una tesela a través del gradiente) no son constantes en la mayoría de los casos ya que existe una variación residual no explicada, que demuestra que las relaciones no son simples aumentos o descensos lineales de la abundancia de los tipos de teselas a través de un gradiente, sino que los efectos de las variables topográficas se expresan de forma compleja, debido a la interacción de otras variables topográficas y a otras causas no topográficas (como propiedades del suelo).

La pendiente es una variable con un papel muy importante en la distribución espacial diferencial de las teselas, como ya ha sido descrito en numerosas ocasiones para la vegetación sobre todo forestal (Completar McCay et al. 1997; Davis et al 1990; Pinder et al.1997). En la zona acarcavada del desierto de Tabernas constituye un gradiente en el que a medida que aumenta la pendiente son las teselas no vegetadas las más abundantes, mientras que las vegetadas con cubierta criptogámica tienden a situarse en zonas con pendientes intermedias y las zonas con pendientes suaves son ocupadas por teselas con vegetación superior.

La tesela STI (espartal) muestra unas relaciones con la topografía bastante diferentes del resto de teselas, y para algunas variables topográficas incluso opuestas a las que presentan otras teselas como PER con una cubierta vegetal relativamente similar. La tesela STI, se sitúa en zonas con pendientes elevadas, alta capacidad para el transporte de sedimentos, condiciones no muy acordes con la densa cubierta vegetal que presenta, según los patrones de distribución de otras teselas, en el área de estudio, con cobertura próxima a la de STI, como PER. Esto se puede explicar porque se trata de una tesela que se localiza casi exclusivamente sobre laderas situadas en niveles de estabilización antiguos, en las partes más altas

de la zona de estudio, que por su topografía no reciben radiación directa prácticamente en todo el invierno, y en verano la radiación incidente es considerablemente menor que para el resto de teselas vegetadas, lo cual supondrá menores pérdidas de agua por evapotranspiración y más agua disponible en el suelo, lo que ha debido fomentar el desarrollo de esta cubierta vegetal. Otro factor a considerar es la importante cubierta de piedras que presenta este tipo de superficie, que actúa frenando el agua de escorrentía, aumenta el tiempo de contacto del agua con el suelo favoreciendo la infiltración, y protegen a la superficie (Poesen et al 1990) de la erosión. Sólo en alguna zona de la parte baja de las laderas sobre las que se localiza esta tesela, existen puntos donde se concentra masivamente la escorrentía, con formas cóncavas en dirección a la pendiente y transversalmente a la pendiente, con alto potencial para el transporte de sedimentos donde se favorecen los procesos de erosión y aparecen cárcavas importantes

La orientación y la radiación incidente presentan relaciones opuestas con las teselas, pues las teselas vegetadas que se localizan sobre orientaciones con menor exposición aparente a la insolación, sin tener en cuenta el efecto de la pendiente y de las sombras, son las que reciben mayor radiación de onda corta directa tanto diaria como horaria, mientras que las no vegetadas que aparecen sobre orientaciones con mayor exposición aparente, son las que menos insolación reciben. Así pues el efecto de las sombras y la pendiente es muy importante, pues provoca unos patrones de insolación diferentes a los de la orientación. El hecho de que sean las teselas vegetadas las que más insolación reciben hace pensar la radiación no actúa como un factor limitante en la presencia de teselas con cubierta vegetal densa. Las teselas PER y ANU, con una relativamente densa cubierta vegetal se localizan en pedimentos y mesas donde la insolación potencial es máxima, sin embargo otras características topográficas y no topográficas son muy favorables para el desarrollo de este tipo de teselas en esa localización. Además las plantas que componen estas teselas están muy adaptadas a evitar la radiación (adaptaciones estructurales) y a las pérdidas de agua por evapotranspiración. Serán otras variables topográficas (como la pendiente, el LSF o el W) u otros factores no topográficos como características del suelo o presencia de nutrientes los determinantes para la distribución espacial de estas teselas. Posiblemente el efecto de la radiación esté más relacionado con lo densa que sea la vegetación en una tesela o con la composición en especies que aparece en la tesela.

En cuanto al potencial para el transporte de sedimentos, es muy alto en las teselas no vegetadas, mientras que las vegetadas tienden a ocupar las zonas con baja capacidad para el transporte de sedimentos.

Las teselas vegetadas con plantas superiores ocupan mayor área relativa en las zonas de convergencia de agua, es decir en zonas cóncavas en dirección transversal a la pendiente, mientras que las teselas con cubiertas criptogámicas o no vegetadas son más abundantes en las zonas convexas lo que se explica porque sus requerimientos de agua son mucho menores, además las cubiertas criptogámicas podrían aprovechar el agua procedente del rocío que podría ser importante en esta zona. Además las teselas vegetadas presentan áreas drenadas más extensas que las no vegetadas.

Las teselas con vegetación superior son más abundantes donde W es más elevado, es decir donde topográficamente se ve favorecida la acumulación de agua en el suelo, por el aporte de escorrentía de las zonas aguas arriba y por tener bajas pendientes que evitan la pérdida de agua.

Aunque hasta ahora en la discusión, se han tratado las teselas PER y ANU como teselas con vegetación superior en general, que muestran patrones de distribución muy diferenciados del resto de las teselas, es también evidente en los análisis, que existen diferencias topográficas entre ellas, de forma que si bien el área relativa de PER (perennes) y de ANU (anuales) aumenta en zonas cóncavas en la dirección de las curvas de nivel, la tasa de aumento es mayor para las teselas dominadas por perennes que para las de anuales. Ambas teselas PER y ANU presentan un mayor porcentaje de celdas cóncavas en dirección transversal a la pendiente (figura 5.18) y cuando se analiza con más detalle esta concavidad se observa que PER aparece en zonas más cóncavas que ANU (figuras 5.26 y 5.27), además la figura 5.16 muestra que la zona de contribución es mayor en PER que en ANU, las plantas perennes tienden a ocupar las zonas de mayor convergencia de agua, lo que está justificado por sus mayores necesidades de agua disponible. Esta distribución diferencial de las perennes hacia zonas con mayor disponibilidad de agua, con respecto a las anuales también se manifiesta en los valores de W y de radiación incidente que es menor en las teselas con matas para evitar las pérdidas por evaporación. Por otra parte las anuales suelen asociarse a zonas con pendientes menores que las perennes, menos cóncavas en dirección a la pendiente y valores inferiores para el atributo LSF que las perennes, así pues, quedan relegadas a las zonas de los pedimentos menos susceptibles a la erosión, más estables, y aparentemente con mayor limitación para el agua disponible, si bien para las anuales esto no supone ningún problema ya que sólo usan el agua disponible en los centímetros más superficiales y en durante la estación favorable, lo que si necesitan es la estabilidad.

En cuanto a las zonas desprovistas de vegetación, se pone de manifiesto que las teselas con una cubierta de limos muestran tendencia a aumentar el área que ocupan al aumentar la pendiente, pero siempre con una tasa de aumento menor que para la tesela MAR de marga desnuda, es decir la asociación con fuertes pendientes es menor, y de hecho suelen localizarse en pendientes ligeramente más suaves que MAR. Los limos aparecen sobre orientaciones con menor exposición a la insolación potencial, sin tener en cuenta el efecto de las sombras, comparados con la tesela MAR, pero reciben mayor insolación. Aparecen asociados principalmente a zonas cóncavas en dirección a la pendiente, a diferencia de las margas que ocupan mayor área sobre zonas convexas en dirección a la pendiente. Sin embargo el potencial para el transporte de sedimentos en las teselas cubiertas por limos es menor que en las margas, posiblemente esto permita la existencia de esta cubierta limosa. El hecho de que aparezcan en zonas más cóncavas posiblemente esté relacionado con el hecho de que en su mayoría proceden del transporte a través de las aguas de escorrentía, de limos de los pedimentos y mesas que se sitúan sobre las laderas donde los limos aparecen, y serán depositados en zonas más cóncavas.

Finalmente la tesela LQD, con líquenes degradados, tiende a aumentar su abundancia relativa con la pendiente a diferencia de la tesela LIQ (líquenes), pero la tasa de aumento es mucho menor que para las teselas completamente desprovistas de vegetación (LIM y MAR). Este tipo de tesela se localiza sobre orientaciones de menor exposición que las margas y tienen tendencia a disminuir su abundancia proporcional cuando aumenta la radiación incidente, quizá para este tipo de tesela tan delicada en términos de estabilidad, si sea importante una menor radiación incidente.

Las variables topográficas relacionadas con los procesos de transferencia de agua y sedimentos desempeñan un papel importante en el control de la topografía de este paisaje y así influyen sobre la distribución espacial de las teselas. Pero el agua circula raramente y cuando lo hace es en forma de flujo no estacionario lo que explica que las relaciones entre la abundancia relativa de las teselas a través de gradientes de estas variables sean menos intensas. Mientras que factores locales como la pendiente presentan unas relaciones más fuertes con la distribución espacial de las teselas.

Una vez demostrado que la heterogeneidad espacial de las teselas en este paisaje está controlada por la topografía será posible generar hipótesis de predicción sobre como afectaría un cambio en el medio físico a estas teselas y al paisaje.

La compleja topografía de este paisaje proporciona una variabilidad que explica la gran heterogeneidad espacial en los tipos de cobertura o teselas que caracteriza a este paisaje en mosaico.

La asociación entre la topografía y la distribución espacial de las teselas en la zona acarcavada del desierto de Tabernas permite que a partir de la topografía y unos puntos de control sea posible construir mapas de teselas.

5.5.-CONCLUSIONES.

El área acarcavada del desierto de Taberna constituye un paisaje muy accidentado, con importantes contrastes topográficos, que determinan la existencia de diferentes microambientes que favorecen la heterogeneidad de la cobertura superficial.

Gran parte de variabilidad ambiental que controla los patrones de distribución espacial de las superficies del suelo puede atribuirse a factores topográficos. La distribución espacial de las teselas depende de la topografía.

El área relativa ocupada por cada tesela varía a través de gradientes topográficos. La distribución de las teselas a través de cada gradiente topográfico está muy relacionada con el tipo de cobertura que caracteriza a cada tesela. Existe un gradiente de pendiente sobre el que se distribuyen las teselas, a medida que aumenta la pendiente disminuye la cubierta vegetal. El potencial para el transporte de sedimentos constituye un gradiente similar. La curvatura transversal a la pendiente constituye otro gradiente importante en el que las teselas vegetadas tienden a situarse en zonas cóncavas de convergencia de agua, con extensas áreas drenadas y elevados valores para W . Las teselas no vegetadas se sitúan en los extremos opuestos de estos gradientes. Sin embargo existen excepciones para teselas vegetadas como STI, donde la edad de estabilización, en este caso la más antigua, desempeña un papel muy importante dominando sobre algunas características topográficas (pendiente y LSF) que caracterizan a esta tesela y que por lo se comprueba para el resto de la zona de estudio, no son muy favorables para el desarrollo de su cubierta vegetal.

La asociación entre la organización en el espacio de las teselas y la topografía permite predecir la distribución espacial de las teselas y generar mapas de teselas para otras zonas del desierto de Tabernas a partir de la topografía.

CAPITULO 6

PROPIEDADES DEL SUELO Y PROCESOS EDAFICOS.

*Ahora sabemos más del movimiento celestial
de los cuerpos que del suelo que pisamos.
Leonardo da Vinci 1452-1519*

6.1.-INTRODUCCION

En los ecosistemas áridos los factores abióticos parecen tener una mayor influencia en la vida de las plantas que los factores bióticos (Evenari et al., 1971). Los cambios en las condiciones edáficas son relativamente más importantes en los desiertos que en los ambientes mésicos (Yair y Berkowicz, 1989).

Las características de la superficie del suelo reflejan la estructura del suelo y el uso de dicha superficie (Hairsine, 1992), por lo que se esperan suelos diferentes asociados a superficies del suelo distintas, y las propiedades y procesos edáficos asociados a cada tipo de superficie del suelo (o tesela) nos ayudarán a comprender la heterogeneidad en la cobertura superficial.

Los estudios de suelo y vegetación en zonas semiáridas y áridas muestran que existe una gran variabilidad espacial que resulta de diferencias en factores que afectan al suelo y vegetación (Wierenga, et al 1987). Lázaro y Puigdefábregas (1994) encuentran en la zona de estudio que la distribución de las plantas anuales depende de la geomorfología, pero al mismo tiempo es importante la profundidad del suelo y la composición química del substrato, en particular pH, conductividad eléctrica, concentración de carbonato cálcico, concentración de carbono orgánico, relación carbono/nitrógeno y concentración de azufre total en el horizonte superficial, características que encuentran están relacionadas significativamente con la distribución espacial de las distintas comunidades de plantas anuales del

área. Concluyen que la ausencia o poca cobertura tanto de líquenes como de terófitos está asociada a concentraciones altas de yeso, cloruros y carbonato cálcico, muy poca materia orgánica y pH menor de 7, mientras que las coberturas altas de ambos estratos están asociadas a condiciones inversas.

Lázaro (1995) posteriormente encuentra que las vivaces presentan asociaciones con las variables químicas del suelo parecidas a las de la anuales, excepto para el carbonato cálcico. Por lo tanto al igual que existen relaciones entre las comunidades vegetales más importantes y las características del suelo, es muy probable que existan también entre los tipos de teselas (definidas en el capítulo 4) y las características del suelo.

En el capítulo 5 se concluye que la distribución espacial de las teselas está asociada a la topografía. La distribución de los suelos es función de la fisiografía del terreno (Jungerius, 1985). La topografía es uno de los cinco factores de la formación del suelo. A escala de ladera, numerosos estudios han mostrado que varias propiedades del suelo están relacionadas con la posición del mismo a lo largo de la ladera, así como con el gradiente de pendiente (Yair, 1990). Las diferencias en las propiedades del suelo con respecto a la posición topográfica normalmente se atribuyen a diferencias en escurrimiento y procesos de erosión y deposición (Conacher y Dalrymple, 1977; Birkeland, 1984).

Muchos autores han descrito diferencias en la productividad de los suelos en función de su posición en el paisaje, por ejemplo se ha visto que la producción en los pedimentos es significativamente más alta que en la parte alta de la ladera (Spomer y Piest, 1982). La influencia de la posición en el paisaje sobre las propiedades del suelo se ha relacionado con la formación del suelo y erosión; los suelos situados a los pies de la ladera tienen más contenido en carbono orgánico, mayor estabilidad de los agregados y menor contenido en arcilla que otros en las partes altas (Pierson y Mulla, 1990). Otros autores encuentran que el contenido en carbono orgánico, arcilla y espesor del suelo aumentan hacia los pies de la ladera (Malo et al. 1974). Resultados similares encuentran Gregorich y Anderson (1985). Blackburn et al (1992) en estudios llevados a cabo sobre campos cultivados, constatan que existen diferencias significativas de la mayoría de las propiedades del suelo en función de la posición en el paisaje.

Nuestra hipótesis de partida es que la topografía es probablemente el principal factor que controla el desarrollo del suelo en este área, directamente o a través de la vegetación e hidrología. La posición en el paisaje no solo influirá en las propiedades del suelo sino también en la formación y erosión del suelo (Brubaker et

al. 1993). Y las características del suelo condicionan el tipo de cobertura capaz de sostener, en definitiva el tipo de superficie, que aparece.

Los objetivos de este capítulo son:

- Conocer las principales características edáficas de cada tipo de tesela y relacionarlas con el tipo de cubierta de la tesela y analizar los principales factores responsables del desarrollo diferencial del suelo.

-Estudiar las relaciones entre las propiedades del suelo y las características topográficas.

6.2.- METODOS

Se estudian los suelos sobre 4 transectos topográficos para estudiar las relaciones entre el suelo y la topografía, y al mismo tiempo, como las teselas están asociadas a la topografía, se estudian los suelos de los principales tipos de teselas.

Se estudian 3 transectos transversales, a través de la cuenca, en dirección O-E. Y un transecto longitudinal en dirección N-S, como muestra la figura 6.1. Se describieron y analizaron un total de 23 perfiles.

Los perfiles se describieron y muestrearon para análisis de laboratorio según el Soil Survey Manual (1993).



Figura 6.1: Transectos topográficos donde se muestrean los perfiles de suelo. TV: Transectos verticales, TLE: Transecto longitudinal sobre la ladera cubierta por la tesela STI, ★: Perfiles fuera de los transectos. (TV1: 7 perfiles; TV2: 6 perfiles; TV3: 3 perfiles; TLE: 4 perfiles; ★: 3 perfiles fuera de los transectos)

6.- Propiedades del suelo

Se determina la densidad aparente, en los primeros horizontes, mediante el método del cilindro indeformable. Se tomaron de 3 a 5 muestras por cada horizonte.

Preparación de las muestras: Las muestras de cada horizonte se secan al aire, posteriormente se pasan por tamices de 64, 32, 16, 8, 4 y 2mm. Los agregados fueron destruidos a mano y con un rodillo de madera, sin ejercer una presión fuerte para impedir la rotura de los fragmentos de marga.

En la fracción menor de 2mm se realizan los siguientes análisis:

- Análisis granulométrico por sedimentación discontinua (Método de la pipeta de Robinson y tamizado en húmedo de las arenas), (Gee y Bauder, 1986). Estos suelos son muy ricos en carbonatos y yeso, por lo que antes de la dispersión de la muestra, se realiza la eliminación de carbonatos y yeso. Los carbonatos se eliminan con HCl 0.1N, y posteriormente se lava el ácido centrifugando. El yeso se elimina por lavados sucesivos (Porta et al. 1986).

- Contenido en humedad a diferentes potenciales mátricos mediante placa de presión de Richards, (1965). Las muestras inicialmente saturadas se dejan equilibrar a potenciales de -10kPa, -33kPa, -100kPa, -300kPa, -1000kPa, y -1500kPa. Transcurrido el tiempo de equilibrio se despresuriza la cámara y se determina gravimétricamente la humedad.

- Determinación de la materia orgánica mediante oxidación del carbono orgánico con dicromato potásico (Método Walkley-Black) (Porta et al., 1986).

-Determinación de sulfatos totales por gravimetría. Se atacan los sulfatos con HCl concentrado, posteriormente se precipitan como sulfato bórico (Porta et al., 1986).

-Determinación de carbonato cálcico mediante titulación con hidróxido sódico.

-Determinación del pH en el extracto de pasta saturada.

-Determinación de la conductividad eléctrica en el extracto de pasta saturada.

-Determinación de iones solubles: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- y SO_4^{2-} . Se han determinado cationes mediante absorción atómica, a partir de los extractos acuosos de pasta saturada y los aniones por cromatografía iónica. A partir de los cationes se determina el SARp (SAR “práctico” no corregido para complejos de pares iónicos).

Se estudia la porosidad de los 3 primeros centímetros del suelo de perfiles característicos de cada tesela. En dos perfiles representativos (norte y sur) se estudia la porosidad de todo el perfil. La medida de la porosidad se llevó a cabo

mediante análisis de imagen (Quantimet 570). Se tomaron de 3 a 5 muestras para cada tesela. Se prepararon láminas delgadas que se obtuvieron impregnando las muestras de suelo en vacío con una resina poliéster (Resipol HD 0059) a la cual se añadió Uvitex DB, un colorante fluorescente, de tal manera que cuando se iluminan con luz UV solo aparecen visibles los poros rellenos de resina. Una videocámara recoge la imagen y la transfiere al procesador de imágenes. Dentro de cada lámina se estudiaron 4 campos de 15.5 x 15.5 mm, que luego se promedian.

La resolución es de 30.3µm, este es el tamaño más pequeño de poro que es capaz de detectar. El analizador de imágenes Quantimet 570 permite medir la superficie total ocupada por poros y el número total de poros. El tipo de poros viene definido por un factor de forma que es $(\text{Perímetro})^2 / 4\pi \text{Area} * (1/1.064)$, de manera que cuando oscila entre 1 y 1.999 se trata de poros redondeados, entre 2 y 4.499 los poros son irregulares y cuando el factor de forma es mayor de 4.5 son elongados. Para cada muestra obtenemos el número de cada uno de los tres tipos de poros, así como el porcentaje de área que ocupan del total de área ocupada por poros. Además dentro de cada tipo de poros se estudió la distribución a intervalos de 100µm (desde 30-100µm, 100-200µm y sucesivamente hasta la última clase que corresponde a poros de tamaños superior a 2000µm), tanto del número de poros como del área que ocupan. En algunas muestras también se analiza la orientación de los poros elongados.

Para poder comparar los perfiles entre si y con las características topográficas se calculó para cada variable edáfica, el promedio por perfil, ponderando el valor de la variable en cada horizonte con el espesor del horizonte y se obtiene un valor medio por perfil.

La comprobación de que los suelos de las diferentes teselas son significativamente diferentes entre si se hace un análisis de la varianza.

Las relaciones entre las propiedades del suelo (medias por perfil, ponderadas por el espesor de los horizontes) y la topografía se hace mediante análisis de correlación (coeficiente de correlación de Pearson). Para ello, es necesario previamente conocer los valores de cada uno de los atributo topográficos en cada perfil. Esto se consigue georrefenciando con un G.P.S. cada uno de los perfiles, y se extraen en un Sistema de Información Geográfica los valores de cada atributo topográfico (calculados en el capítulo 5) para cada uno de los perfiles.

Para estudiar las relaciones de los suelos con su posición, se tienen en cuenta 2 transectos verticales y uno longitudinal a la cuenca estudiada. Se examina el valor que toma una propiedad del suelo, por horizontes, a lo largo del transecto (perfiles del transecto).

Se analizan las relaciones entre las propiedades del suelo, la topografía y la cobertura de las teselas. En este análisis de relaciones se implican 23 puntos de muestreo, donde se han determinado estudiado las propiedades del suelo, la cobertura de la superficie y se han calculado los principales atributos topográficos. Se lleva a cabo un análisis de componentes principales (con Statistica for Windows 4.5) con objeto de reducir la información edáfica, topográfica y de cobertura a unos pocos ejes que absorban la mayor parte de la variación, y se ordenan los 23 puntos en función de estos ejes o gradientes de topografía-suelo-cobertura para visualizar de forma integrada estas relaciones.

6.3.- RESULTADOS.

6.3.1.- Características edáficas generales de la zona de estudio

En el anexo de este capítulo se presenta la descripción de cada uno de los perfiles muestreados. La zona de estudio se caracteriza porque en un reducido espacio existe una gran variabilidad topográfica (hemos descrito 8 geoformas en el capítulo 5) y condiciones topográficas tan contrastadas potencian la variabilidad espacial en las propiedades físicas y químicas del suelo.

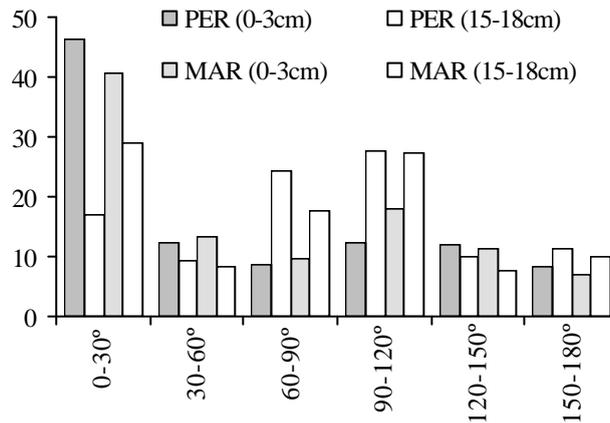
Las descripciones de campo ponen de manifiesto que, en general, son suelos muy poco desarrollados, en buena parte de la cuenca estudiada ni siquiera se trata de un suelo, sino que aflora un regolito margoso. En otros casos el regolito en su superficie, presenta un suelo incipiente poco profundo. Sin embargo, también aparecen suelos profundos de más de 1.5m de espesor, que se localizan en pedimentos de ladera y mesas.

Los suelos de todas estas teselas se caracterizan porque todos están cubiertos por una costra física o biológica, y en los primeros milímetros o centímetros del suelo (según la tesela) aparece una estructura laminar.

La fracción granulométrica mayoritaria es el limo fino, excepto en determinadas partes de la ladera de esparto, donde la fracción dominante es la arena fina. Se ha comprobado la distribución granulométrica sin eliminar carbonatos (el yeso si se eliminó para evitar la floculación), y no se observan diferencias importantes en la distribución, tan solo que en las series con carbonatos, el contenido en arcilla es un poco menor, a expensas del aumento del limo fino en unos casos y de la arena fina en otros.

La capacidad de retención de agua es bastante variable de unos suelos a otros. La densidad aparente también varía según el tipo de suelo, y oscila entre 920 y 1470 kg m⁻³ y el promedio se sitúa en torno a 1220 kg m⁻³.

El estudio de la porosidad mediante análisis de imagen sobre láminas delgadas pone de manifiesto que si bien la porosidad varía de un tipo de tesela a otro, hay unos patrones generales en la distribución de la misma, que consisten en que el mayor porcentaje de área la ocupan los poros elongados y el mayor número de poros corresponde a poros redondeado. El mayor porcentaje de la superficie ocupada por poros elongados se explica porque la porosidad se mide en los 3 primeros centímetros, y estos suelos se caracterizan por acostamiento superficial y estructura laminar en los primeros milímetros. En algunos casos se midió el ángulo de orientación de los poros elongados con respecto a la horizontal y se observa que en los primeros centímetros el mayor porcentaje de poros corresponde a poros que forman un ángulo entre $0-30^\circ$, tendencia que no se observa en el segundo horizonte, como muestra la figura 6.2 para el primer y segundo horizonte



del suelo de las teselas PER y MAR.

Figura 6.2: Distribución de frecuencias de los ángulos que forman los poros elongados con la horizontal, en los primeros centímetros y en el segundo horizonte para 2 perfiles en MAR y PER.

Son suelos pobres en materia orgánica, en general, excepto en determinadas zonas donde el horizonte superficial puede contener hasta un 2.5%, e incluso bajo mata de 3.5%.

Los carbonatos están presentes en toda el área y el contenido en carbonatos oscila entre el 11.2 y el 33.4%.

El material parental es una marga yesífera, si bien el yeso está presente sólo se acumula en determinadas zonas, donde el contenido en yeso puede llegar a representar hasta 36.75% del suelo. En todos los casos, se observa que un aumento

en el contenido en yeso va acompañado de una disminución del contenido en carbonatos, muy probablemente debido a la competencia por el ión Ca.

El pH es bastante homogéneo en toda la zona, ligeramente alcalino, aunque muy próximo 7, oscila entre 6.7 y 8.13. Suele ser menor (entre 6.7 y 7.6) en los horizontes C de todos los pediones.

La Conductividad Eléctrica varía en un rango muy amplio, entre 0.0375 y 2.38 S m⁻¹.

En cuanto a los iones solubles, los más abundantes son Ca²⁺ en primer lugar y le sigue el Mg²⁺, más frecuentes en los horizontes C, y cuyas concentraciones oscilan entre 0.04 y 9.02 cmol kg⁻¹ para el Ca²⁺ y entre 0.025 y 10.13 cmol kg⁻¹ el Mg²⁺. Los cationes Na⁺ y K⁺ son menos abundantes, no superan 0.3 cmol kg⁻¹.

Los aniones solubles son el carbonato (mayoritario) y el sulfato, cuya concentración es bastante variable de un perfil a otro y de un horizonte a otro, como el contenido en yeso. Los cloruros y fosfatos son escasos y se limitan al material parental (especialmente los cloruros).

6.3.2.- Características de los suelos de cada tipo de tesela y relación con el tipo de cobertura de la tesela.

No todas las teselas se caracterizan por suelos diferentes, algunas teselas como PER y ANU presentan características edáficas muy similares, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que las características topográficas de ambas teselas son similares, y el tipo de cobertura es más próxima entre ellas que con cualquier tesela no vegetada. En cambio son muy contrastadas las diferencias en las propiedades del suelo de otras teselas, como PER y MAR, al igual que sus características topográficas.

6.3.2.1.- Características del suelo en las teselas PER y ANU.

Se estudian las propiedades físicas y químicas de 6 perfiles en estas teselas. Estos 6 perfiles se describen y muestrean. Los análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo y una foto de uno de los perfiles aparecen en el anexo sección A.6.1. Los perfiles se denominan: TV1N3, TV1N4, TV1N5, PEDCOL, TV2MP, TV3ME1.

Son suelos profundos, entre 120 y 170cm. En los dos primeros centímetros superficiales suele aparecer una estructura laminar, bajo suelo desnudo, resultante de una costra estructural formada por impacto de las gotas de lluvia como se

deduce del estudio micromorfológico (Solé, 1998 comunicación personal). El resto del perfil suele presentar una estructura poliédrica subangular o masiva. La porosidad en general es alta y se trata de poros muy finos a finos. Las raíces son bastante frecuentes a lo largo de todo el perfil, excepto en las zonas más profundas que a veces son menos abundantes, muy finas y finas y aparecen con mayor grado de descomposición. La presencia de raíces descompuestas en los horizontes profundos, pone de manifiesto la baja tasa de incorporación de la materia orgánica de este suelo en las zonas profundas.

En las zonas de transición entre los pedimentos y la ladera, aparece el mismo tipo de suelo, con las mismas características, pero menos profundo, los horizontes son los mismos que en el pedimento localizado un poco más abajo, pero con espesores menores.

Estos suelos muestran patrones discontinuos en profundidad, tanto en la distribución del contenido en gravas, como en la distribución granulométrica y características químicas. La figura 6.3 muestra para un perfil situado sobre una tesela PER (perfil PEDCOL) que si bien presenta la tendencia típica de disminución del porcentaje de tierra fina al profundizar en el perfil (desde el 97.7% en superficie hasta un 35.5% en el último horizonte) y aumento del contenido en gravas (desde menos del 1% en superficie hasta un 30% en alguna de las fracciones) ocurre de forma discontinua.

Discontinuidades similares se observan en el resto de perfiles sobre las teselas PER y ANU. En el perfil PEDCOL encontramos que a 145cm aproximadamente y justo por encima de la roca madre aparecen fragmentos de calcoarenita, procedentes de las partes más altas de la microcuenca.

La fracción de granulométrica más abundante es el limo fino, que oscila entre el 35% y 40% en general en todo el perfil y aumenta bruscamente en las proximidades del C hasta un 50%. Le sigue la arena fina en abundancia, que tiene tendencia a disminuir en profundidad, desde un 30% que puede haber en superficie hasta un 10% en las proximidades del horizonte C o en el C. El limo grueso constituye alrededor del 20%. La arena gruesa, normalmente representa menos del 3% y es ligeramente más abundante en superficie. Y la arcilla oscila entre el 15 y el 25% y su contenido es inferior en superficie. La figura 6.4 constituye un ejemplo de un perfil, el PEDCOL.

La capacidad de retener agua a distintos potenciales es bastante similar en los distintos horizontes, y para todos los perfiles sobre estas teselas. El contenido en agua a -33kPa en el horizonte superficial oscila entre 25 y 33% según el perfil y

6.- *Propiedades del suelo*

a -1500kPa entre 6 y 9.2%. En el anexo (sección A.6.1) se presentan para cada perfil estudiado el contenido de humedad del suelo a -10kPa, -33 kPa, -100 kPa, -1000 kPa, y -1500kPa en los distintos horizontes de cada perfil. Se observa la típica tendencia de que horizontes que contienen más arcilla y menos arena presentan una mayor capacidad para retener el agua.

La densidad aparente de estos suelos está en torno 1200kg m³. Para el primer horizonte oscila entre 1140 y 1230 kg m³.

Suelen ser los suelos más ricos en materia orgánica, de toda la zona de estudio, y el contenido en el horizonte superficial oscila entre 1 y 2.4%, y en la mayoría de perfiles de estas teselas suele ser más abundante en el primer horizonte (anexo, sección A.6.1).

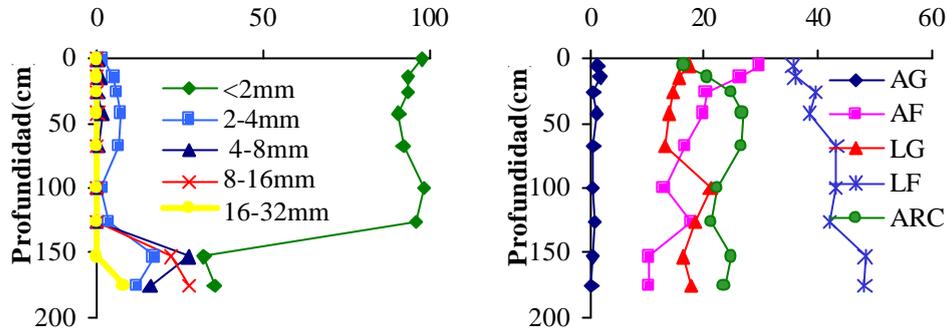
El carbonato cálcico en estos suelos representa del 15.5 al 33.4% del suelo. El contenido suele ser inferior en el horizonte superficial y mayor en el B (figura 6.5).

En algunos perfiles se observan cantidades importantes de yeso en el horizonte C, o en horizontes muy próximos a él (figura 6.5), y en el resto del perfil prácticamente no hay. A veces como en el perfil PEDCOL, como muestra la figura 6.6 casi no hay yeso en todo el perfil.

La conductividad eléctrica en estos suelos muestran un patrón común en todos los perfiles: en el horizonte superficial hay una concentración mayor de sales con respecto al segundo o tercer horizonte, y vuelve a aumentar en los horizontes próximos a la roca madre o en la roca madre meteorizada.

Cuando se estudia los iones solubles en el extracto de pasta saturada, a lo largo del perfil, las tendencias son similares a las observadas para la conductividad. La concentración de iones solubles es más elevada en profundidad, lo que indica un lavado de sales, pero se observa una clara acumulación de sales en el horizonte más superficial, como resultado del ascenso y evaporación de agua del suelo, que transporta las sales disueltas y cuando se evapora el agua las sales se concentran en el horizonte superficial. Los iones solubles más abundantes son calcio y magnesio en primer lugar y le siguen cloro, sulfatos y sodio. Se observan en algunos de los perfiles, cambios bruscos en la salinidad con la profundidad, no hay un aumento gradual.

En estos suelos los valores del SAR_p suelen ser bajos (inferiores a 1), excepto en los horizontes más profundos donde alcanza valores entre 10 y 30, pero en estos horizontes coincide con una alta concentración de electrolitos en el extracto de pasta saturada (C.E. entre 0.8 y 2 Sm⁻¹), lo que da lugar a un ambiente químico no dispersivo (Imeson et al. 1982).



Figuras 6.3 y 6.4 :Distribución granulométrica en el perfil PEDCOL (tesela PER). La figura de la derecha (figura 6.4) corresponde a la distribución granulométrica de la tierra fina AG: Arena gruesa; AF:Arena fina; LG: Limo grueso; LF: Limo fino y ARC: Arcilla.

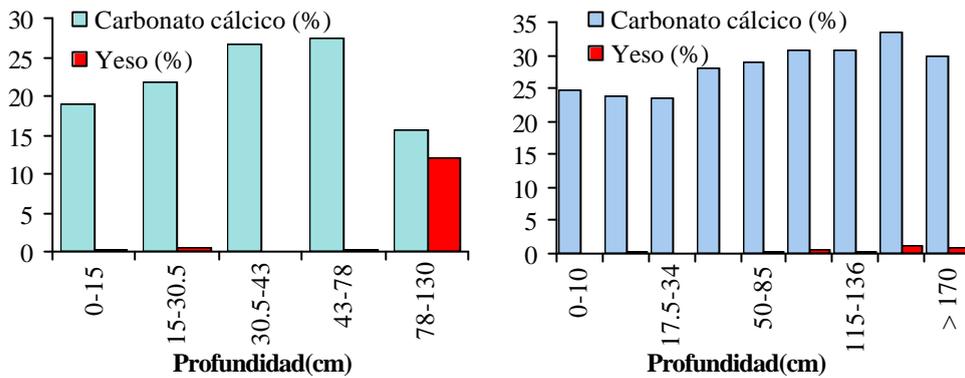


Figura 6.5 y 6.6 : Contenido en carbonato cálcico y yeso por horizontes para el perfil TV3ME1 (a la izquierda, figura 6.5) y para el perfil PEDCOL (a la derecha, figura 6.6)

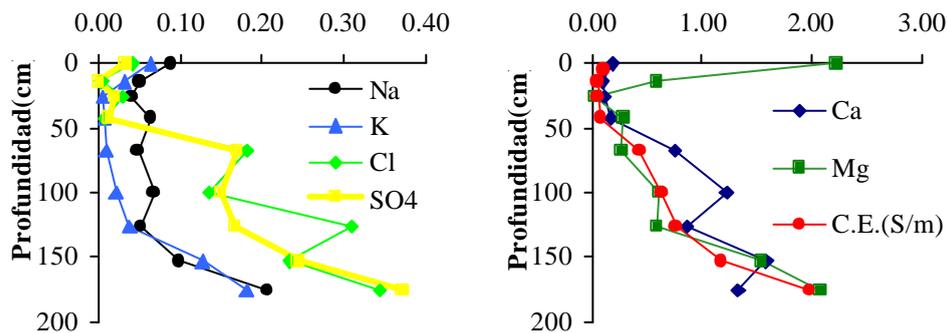


Figura 6.7 y 6.8: Concentración de iones solubles (extracto de pasta saturada) expresados en cmol kg^{-1} y conductividad eléctrica (C.E.) a lo largo del perfil PEDCOL.

6.- Propiedades del suelo

La macroporosidad de la superficie de estos suelos (3 primeros centímetros) es baja, el promedio de todas las muestras de estas teselas está en torno a un 13.57% para el primer centímetro y medio y 12.81% para el siguiente centímetro y medio. Los poros mas abundantes son los poros redondeados, pero son los poros elongados los que ocupan mayor área, como muestran la figura 6.9.

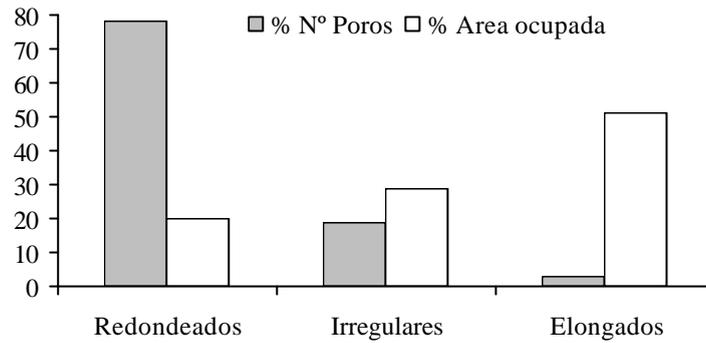
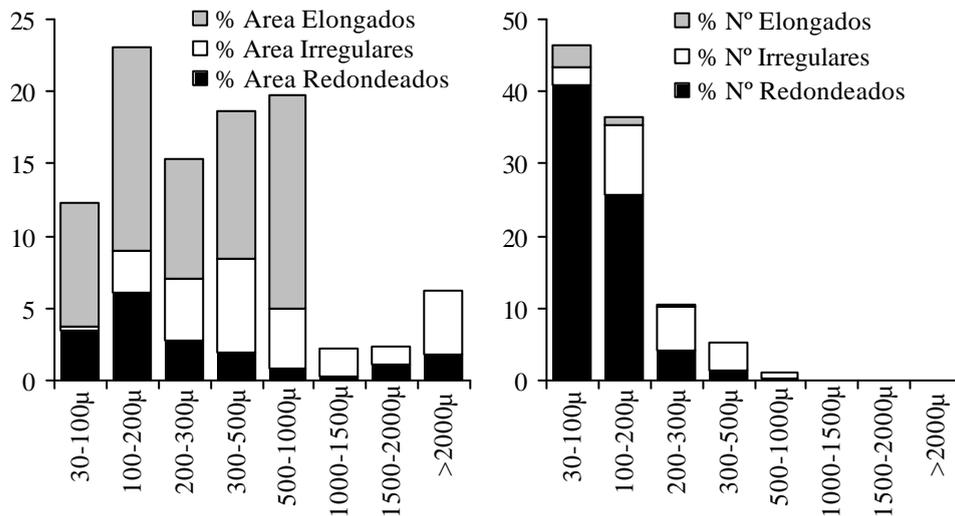


Figura 6.9: Distribución del n° de poros y área ocupada por poros redondeados, irregulares y elongados. Se representa el promedio de todas las muestras de las teselas PER y ANU estudiadas de los 3 primeros centímetros de la superficie del suelo.

Con respecto a la distribución por tamaños, las figura 6.10 y 6.11 muestran que la mayoría de poros redondeados, y como consecuencia la mayoría de poros, pues constituyen casi el 80% del número total de poros, son muy pequeños menores de 100 μ m y también son abundantes los poros entre 100 y 200 μ m.



Figuras 6.10 y 6.11: Distribución por tamaños del número de poros y área ocupada por poros en los 3 primeros cm de suelo de la tesela PER.

Estos poros pequeños corresponden a vacuolas de desgasificación (figura 6.13) generadas por el impacto de las gotas de lluvia. Sin embargo el área que representan del total de área ocupada por poros, es muy pequeña.(sólo el 9.47% del total de área ocupada por poros), como se observa en la figura 6.10.

Los poros elongados son los más representativos en cuanto al área ocupada por poros, constituyen más del 50% de la macroporosidad total. Los poros elongados más abundantes son los pequeños, inferiores a $200\mu\text{m}$, aunque el área ocupada por los poros elongados en general está muy repartida entre 30 y $1000\mu\text{m}$, así por ejemplo entre 500 y $1000\mu\text{m}$ hay solo 5 poros en la totalidad de láminas delgadas estudiadas de estas teselas, pero constituyen casi un 15% de la porosidad.

Finalmente los poros irregulares se distribuyen de forma bastante equitativa, tanto en número como en área que ocupan, en todos los intervalos.

En estos suelos, los 2 ó 3 primeros centímetros presentan una estructura laminar, el suelo está compactado debido al impacto de las gotas de lluvia y aparece una costra en los claros, así que parece lógico que la porosidad más representativa en términos de área ocupada sean los poros elongados, lo cual se pone de manifiesto cuando se estudia la micromorfología de la superficie de estos suelos, que presenta una microestructura laminar (figura 6.12), con abundantes vacuolas de desgasificación (figura 6.13).

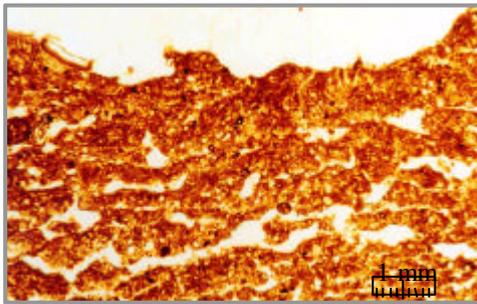


Figura 6.12: Estructura laminar de la superficie del suelo en PER. La parte de arriba de la imagen corresponde a la superficie del suelo.

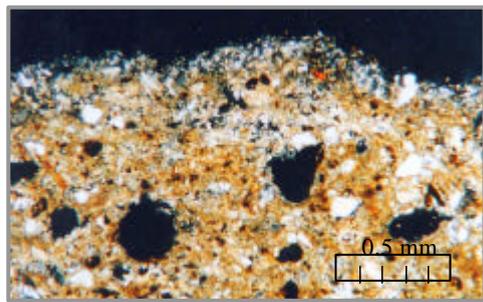


Figura 6.13 :Vacuolas de desgasificación en la superficie del suelo en PER. La parte arriba de la imagen corresponde a la superficie del suelo.

6.3.2.2.- Características del suelo en la tesela STI

Se estudian 4 perfiles sobre una ladera asociada con la tesela STI, que son TV4E1, TV4E2, TV4E3, TV4E4 (figura 1, transecto TLE).

En el anexo (sección A.6.1) se presentan las descripciones de campo y resultados analíticos de cada perfil.

Los suelos de esta tesela se caracterizan por la variabilidad espacial en todas las características del suelo entre puntos próximos dentro de esta tesela, que se explica por carácter coluvial de estos suelos.

Esta ladera está constituida por una mezcla coluvial de material (margas y calcoarenitas). La calcoarenita recubre a la marga y los procesos de erosión hídrica han provocado la mezcla de material sobre todo en la parte media y baja de la ladera, donde aparecen suelos más o menos profundos dependiendo de la cantidad de material depositado.

Aparecen grandes bloques de piedra enterrados que imposibilitan continuar el perfil hasta el horizonte C, por lo que no conocemos la profundidad de los suelos en la parte media baja de la ladera con la tesela STI.

Parte del material calcoarenítico aún cubre a la marga en determinadas zonas, lo cual afecta directamente a las propiedades físicas y químicas del suelo, mientras que en otras zonas ha sido transportada aflorando el material de la marga. En estas laderas son diferentes los suelos de la parte alta a los de la parte baja, aunque presentan algunas características comunes.

En la parte alta de la ladera, los suelos tienen un espesor aproximado de 70 a 90cm. Los primeros milímetros de suelo están acostrados y presentan una estructura laminar, el resto del perfil suele presentar una estructura poliédrica subangular. La porosidad en general es alta y las raíces frecuentes en los horizontes superficiales.

En la parte baja los suelos son más profundos, aunque la presencia de grandes piedras en estos coluviones imposibilitaron profundizar más de 82 cm.

El contenido en fragmentos gruesos en estos suelos varía mucho de un perfil a otro. Las figuras 6.14 y 6.15 muestran la distribución de gravas para un perfil en la parte alta de la ladera y otro en la parte baja, y se observa la mayor proporción que representan las gravas en estos suelos frente a los suelos de otras teselas como PER y ANU, y es aún mayor en la parte baja de la ladera.

Granulométricamente se caracterizan por el alto contenido en arena fina, que en la mayoría de los perfiles es la fracción mayoritaria, excepto en un perfil en la parte alta de la ladera de esparto, donde es el limo fino (TV4E2, en figura 6.16). Éste último perfil corresponde a una zona donde el material margoso queda

expuesto y la mayor parte del material calcoarenítico que la cubría ha sido retirado por erosión. Las tablas de distribución granulométrica del anexo muestran los contenidos en cada fracción para cada perfil, y se puede comprobar que la arena fina es la fracción más abundante, probablemente por la influencia de la calcoarenita, que prácticamente sólo aparece representada en estas laderas donde aparece la tesela STI. Los contenidos en las diferentes fracciones granulométricas y su variación con la profundidad no siguen unas tendencias claras, es bastante impredecible, como era de esperar por su carácter coluvial. Las figuras 6.16 y 6.17 muestran la distribución granulométrica a través de dos perfiles uno en la parte alta de la ladera y otro en la baja.

La retención de agua a distintos potenciales también es bastante variable de un perfil a otro, debido a los cambios en la composición granulométrica, sin embargo si se observa que la retención de agua es mayor cuando es más alto el contenido en arcilla y menor el de arena, así el suelo del perfil TV4E2 que presenta una composición granulométrica más fina, presenta una mayor capacidad para retener agua que el suelo del perfil TV4E3 que es más arenoso. El contenido de humedad de estos suelos oscila entre 31.61% y 17.11% a -33 kPa y entre 13.42% y 4.34% a -1500kPa.

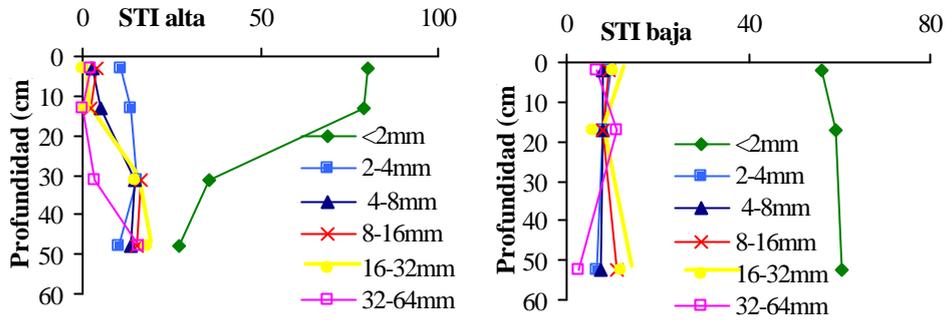
La densidad aparente media de estos suelos es de 1280 kg m⁻³, y oscila entre 1030 y 1470 kg m⁻³.

Las propiedades químicas de estos suelos presentan diferencias claras con los suelos del resto de las teselas y también varían de la parte alta a la parte baja de la ladera. El contenido en M.O. es bastante más elevado en la parte baja de la ladera (entre 1.07% y 1.59%) que en la parte alta (oscila entre 0.36% y 1.02%), como muestra la figura 6.20 El pH de los suelos asociados a la tesela STI oscila entre 7.18 y 8.01.

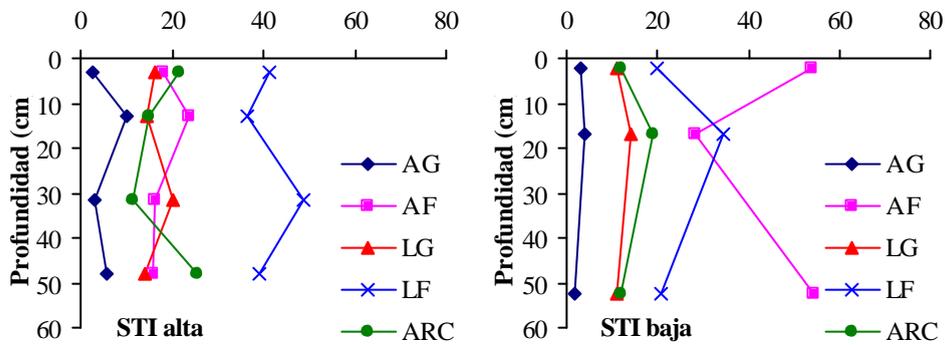
El contenido en carbonato cálcico varía entre 15.61 y 24% (excepto el primer horizonte del perfil TV4E2 que contiene un 30.12% de carbonato cálcico). Son suelos más pobres en carbonatos que los de las teselas PER y ANU, y contienen más yeso. Los suelos de la parte alta de la ladera cubierta por STI son más ricos en yeso que los de la parte baja de la ladera (figura 6.21). El yeso en la parte alta de la ladera puede constituir hasta un 30.24% en algunos horizontes.

En cuanto al contenido en sales solubles en los suelos de la parte baja de la ladera la concentración de sales solubles y la C.E. del extracto de pasta saturada es menor que en la parte alta. Se observa un ligero aumento de la concentración de muchos iones en el primer horizonte, que probablemente se explica por la evaporación del agua del suelo.

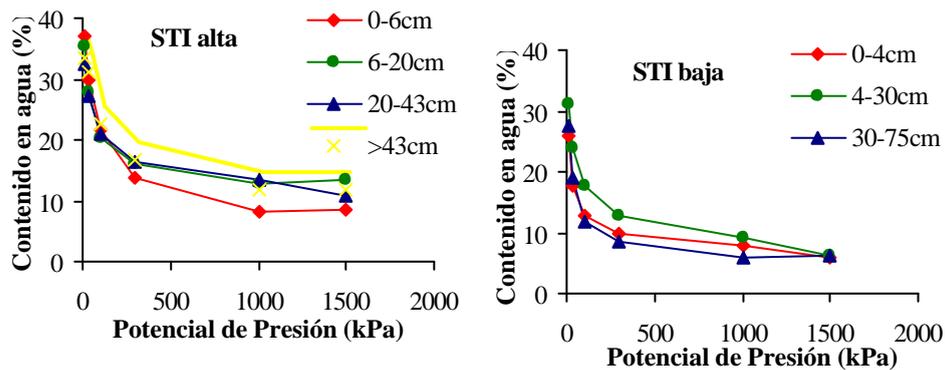
6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.14 y 6.15: Distribución granulométrica del suelo, para 2 perfiles, uno en la parte media alta de la ladera con la tesela STI (TV4E2) y otro en la parte media baja (TV4E3).



Figuras 6.16 y 6.17: Distribución granulométrica de la tierra fina para dos perfiles en la tesela STI, uno en la parte media-alta de la ladera (TV4E2) y otro en la parte media-baja (TV4E3). AG: Arena Gruesa; AF: Arena Fina; LG: Limo Grueso; LF: Limo Fino; ARC: Arcilla



Figuras 6.18 y 6.19: Contenido de humedad del suelo de la parte alta media de la ladera STI (perfil TV4E2) y de la parte media baja de la ladera STI (perfil TV4E3) a distintos potenciales.

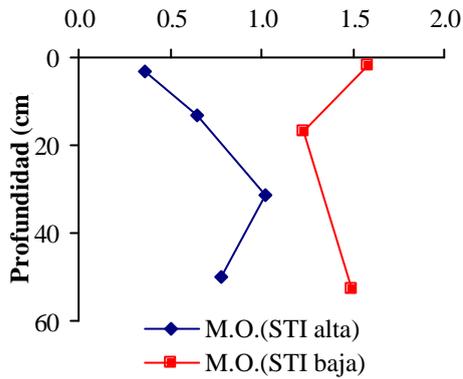


Figura 6.20: Contenido en materia orgánica en los perfiles TV4E2 (parte media alta de ladera con STI) y TV4E3 (parte media baja) TV4E2 y TV4E3.

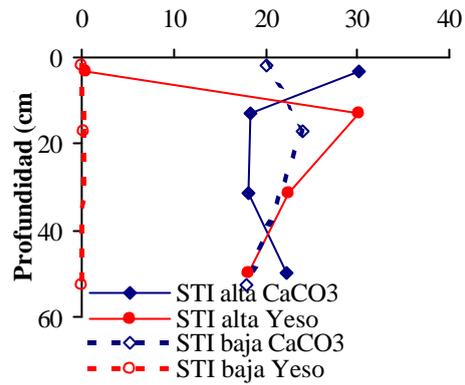
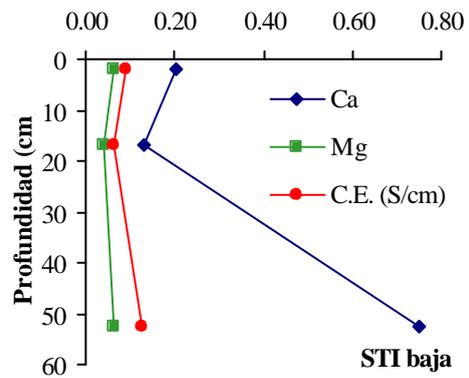
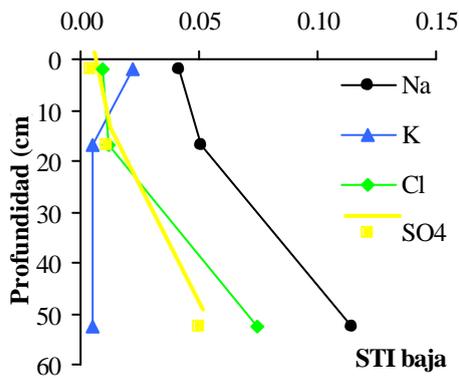
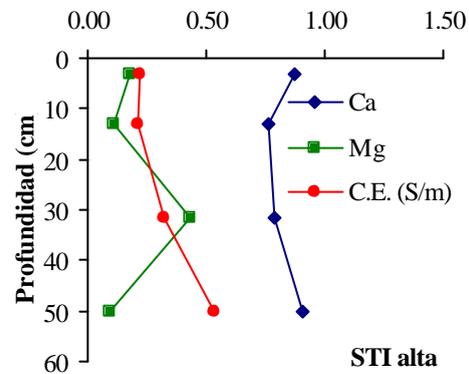
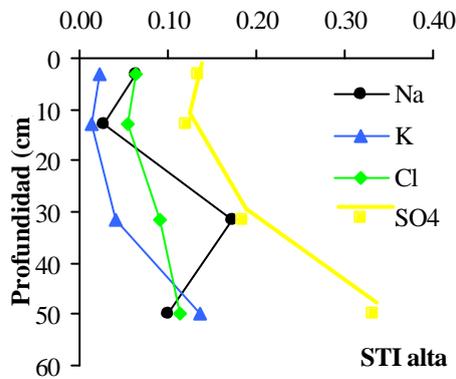


Figura 6.21: Contenido en carbonato en cálcico y yeso a través de los perfiles TV4E2 y TV4E3.



Figuras 6.22, 6.23, 6.24 y 6.25: Concentración de iones solubles y conductividad eléctrica a lo largo de dos perfiles uno de la parte media alta de una ladera en la tesela STI (TV4E2) y otro de la parte media baja (TV4E3). Las concentraciones de iones solubles (extracto de pasta saturada) están expresados en cmol kg^{-1} .

6.- Propiedades del suelo

Los valores del SARp para estos perfiles son bajos en general (inferiores a 1 excepto en algunos casos en el C o en las proximidades, donde puede ser de hasta 7, pero con CE muy alta también). Por lo tanto no son suelos muy susceptibles a la dispersión.

Las diferencias en las características del suelo entre la parte alta y baja de la ladera, como suelos más profundos menor contenido en sales, quedan reflejadas en la cubierta de la superficie, de manera que en la parte baja de la ladera la cubierta vegetal es más densa que en la parte alta, como se puede comprobar en la tabla 6.1.

	Piedras	Suelo acostr.	Hojarasca	Criptógamas	Anuales	Viva.<35cm	Viva.>35cm
STI alta	36.33	2.58	3.25	25.12	0.26	10.04	22.41
STI baja	22.04	2.00	8.04	22.50	0.25	8.13	37.04

Tabla 6.1: Coberturas en %, de piedras, suelos acostrado, hojarasca, criptógamas, plantas anuales y viváces mayores y menores de 35cm de altura. Corresponden a áreas de muestreo de 6 x 6 metros, una situada en la parte alta de la ladera y otra en la parte baja.

6.3.2.3.- Características del suelo en la tesela LQC

Estas teselas se localizan en zonas con una topografía bastante plana, sobre las que se desarrollan suelos medianamente profundos, en torno a los 50cm, y que parecen el resultado de procesos edafogénicos sobre la marga, similares a los de las teselas LIQ, pero muy evolucionados.

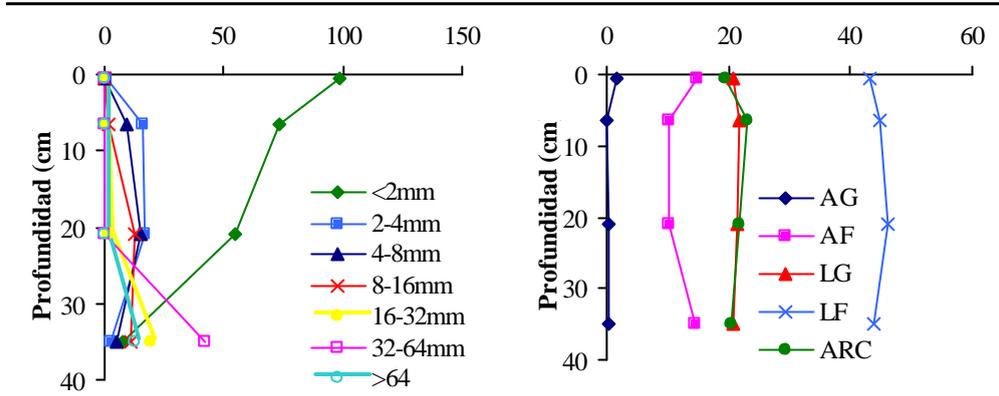
Se estudian 2 perfiles de suelo en esta tesela, TV3ME2 y TV3ME3 (sección A.6.1 de anexo). Se caracterizan porque en el primer centímetro el suelo presenta una estructura laminar y por debajo aparece un suelo con una estructura poliédrica subangular o grumosa, débil, abundante porosidad y frecuentes raíces.

La distribución granulométrica se caracteriza por una disminución del porcentaje de tierra fina con la profundidad y aumento de las fracciones gruesas, como se puede observar en la figura 6.26. En el horizonte superficial el contenido en tierra fina es próxima o superior al 90%, y va disminuyendo progresivamente en profundidad y en el horizonte C es inferior al 10%.

La distribución granulométrica de la fracción menor de 2mm se caracteriza porque la fracción más abundante es el limo fino, seguido de la arcilla (figura 6.27).

El contenido de humedad del suelo oscila entre 36.01% y 26% a -33 kPa y 14.52% y 9% a -1500 kPa, relativamente elevados, lo cual es lógico teniendo en cuenta que el contenido en arcilla y limo fino de estos suelo es bastante alto. Las capacidades de retención de agua son muy similares en todos los horizontes, como

6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.26 y 6.27 :Distribución granulométrica en el perfil TV3ME3 (tesela LQC). La figura de la derecha (figura 6.27) corresponde a la distribución granulométrica de la tierra fina AG:Arena gruesa; AF:Arena fina; LG:Limo grueso; LF:Limo fino; ARC:Arcilla.

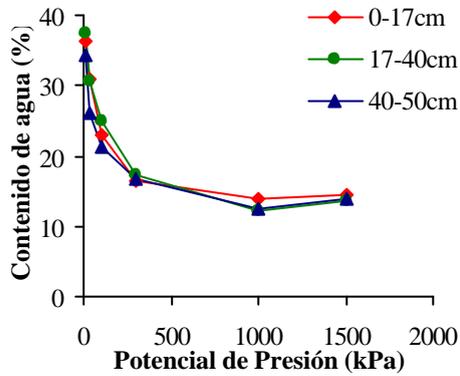


Figura 6.28: Contenido en agua del suelo para el perfil TV3ME2 (no se presenta el TV3ME3 porque no está disponible)

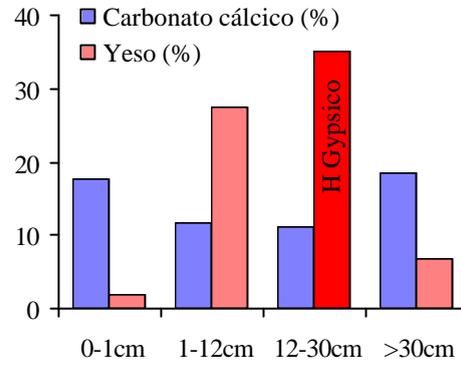


Figura 6.29: Contenido en carbonato cálcico y yeso en el perfil TV3ME3 (tesela LQC)

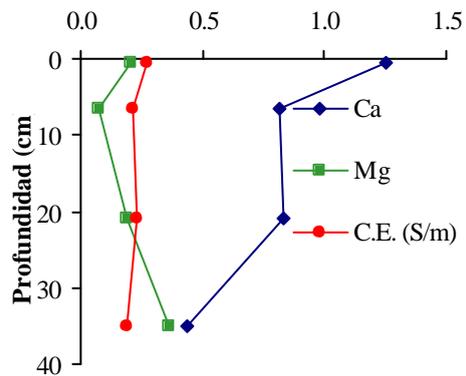
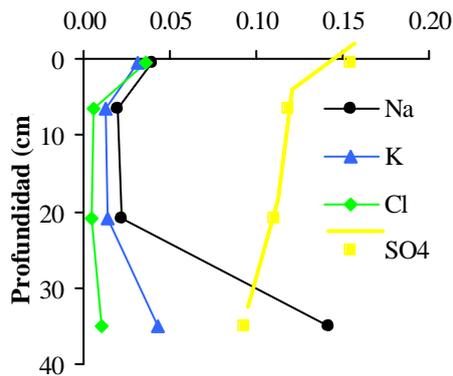


Figura 6.30 y 6.31: Concentración de iones solubles (extracto de pasta saturada) expresados en cmol kg^{-1} y conductividad eléctrica (C.E.) en el perfil TV3ME3 (LQC).

6.- Propiedades del suelo

se ve en la figura 6.27, ya que la distribución granulométrica que es bastante similar de un horizonte a otro en los dos perfiles.

La cantidad de materia orgánica oscila entre 0.29% y 1.80%, siendo mayor en superficie.

Presentan un pH ligeramente alcalino entre 7.03 y 8.01.

Entre las características químicas de estos suelos destaca la acumulación de yeso en horizontes situados alrededor de los 20cm de profundidad (entre 12-30cm en un perfil y entre 1-17 en el otro). El contenido en yeso en los primeros centímetros de suelo es muy bajo, pero luego se concentra en el segundo o tercer horizonte. El yeso se acumula en uno de estos horizontes, pudiendo constituir hasta el 36.75% del suelo. El carbonato cálcico es menos abundante en estos suelos, representa el 11.22% al 21.73%, cantidad bastante menor que en PER o ANU.

La C.E. de estos suelos oscila entre 0.0201 y 0.035 Sm^{-1} , y la concentración de iones solubles es alta como en los suelos de las teselas PER y ANU. Al igual que en los suelos de otras teselas se observa en el horizonte más superficial, que en este caso corresponde al primer centímetro, una mayor concentración de la mayoría de iones solubles, debido probablemente a la evaporación de agua del suelo y concentración de los mismos. Los valores del SARp suelen estar por debajo de 1, y en el horizonte C alrededor de 5.

Los macroporos en la superficie de estos suelos (3 primeros centímetros) representan el 17.87 % del suelo por término medio, mayor que para las teselas PER y ANU.

Los poros redondeados son los más abundantes en número, y los poros elongados son los que ocupan mayor área, como muestran la figura 6.32.

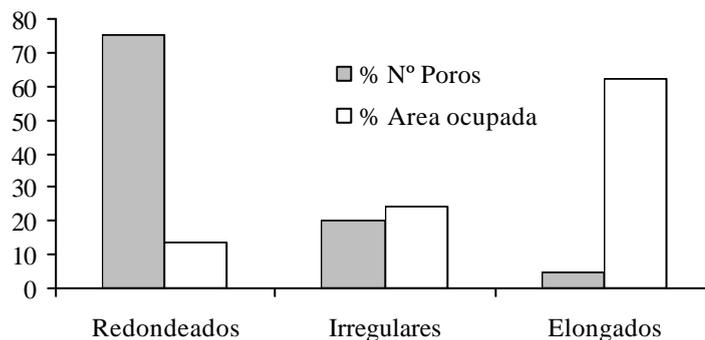
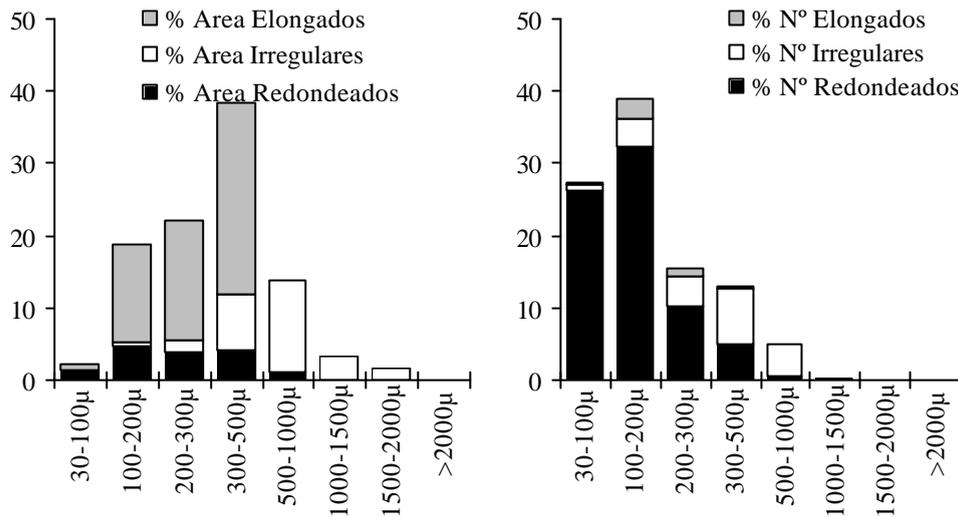


Figura 6.32: Distribución del número de poros y área ocupada por poros redondeados, irregulares y elongados. Se representa el promedio de todas las muestras de la tesela LQC estudiadas, y el promedio en los 3 primeros centímetros de la superficie del suelo.

La distribución de la porosidad por tamaños se representa en las figuras 6.33 y 6.34, donde se observa que la mayor parte del área ocupada por poros la constituyen poros elongados de tamaño comprendido entre 100 y 500 μ m. Sin embargo los poros más abundantes en número son los redondeados entre 30 y 200 μ m.



Figuras 6.33 y 6.34: Distribución por tamaños del número de poros y área ocupada por poros en la superficie del suelo (3 primeros cm) de la tesela LQC.

Los macroporos elongados en este caso corresponden a grandes poros que se observan a microscopía óptica bajo las cubiertas criptogámicas (figura 6.35) que por su forma se integran en el tipo elongado.

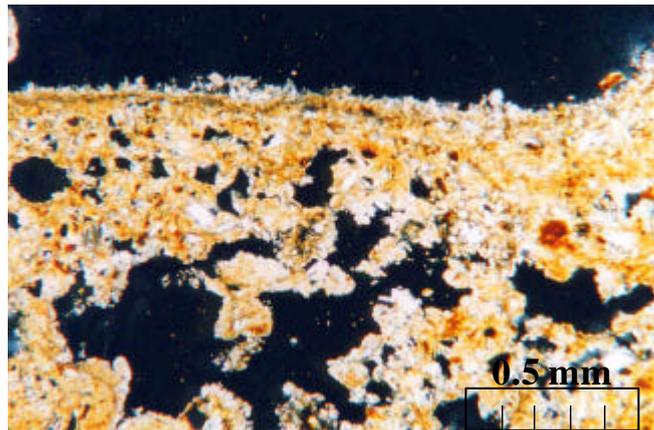


Figura 6.35: Porosidad en tesela LIQ. La parte de arriba de la imagen corresponde a la superficie del suelo. Se observan grandes poros (que por su forma se clasifican como elongados).

6.3.2.4.- Características del suelo en la tesela LQB

La tesela LQB no está representada en la cuenca estudiada, pero se estudia un perfil fuera de la cuenca. Se trata de una terraza aluvial, con una gran cantidad de piedras de tamaños variados a lo largo de todo el perfil.

La descripción de este perfil (TERRA) aparece en el anexo (sección A.6.1). Hasta los 16cm aparece una estructura poliédrica subangular, y por debajo, sucesivos depósitos de materiales arrastrados por el cauce, el cual está bastante próximo al perfil.

La cantidad de tierra fina disminuye con la profundidad del perfil, desde un 70% que hay en superficie hasta un 32% a 65cm de profundidad, pero esta disminución no es gradual sino discontinua, lo que refleja el origen aluvial de este suelo.

La textura es franco-limosa. La fracción más abundante es el limo fino, seguido de la arena fina, luego el limo grueso y la arcilla.

El contenido de humedad de este suelo oscila entre 21.49% y 28.60% a -33 kPa y entre 6.73% y 7.49% a -1500 kPa y es superior en el horizonte superficial. La densidad aparente del primer horizonte es de 1280 kg m^{-3} .

Es un perfil muy pobre en M.O., entre 0.5% y 0.7 %.

El contenido en carbonatos es inferior al del resto de suelos de la zona, contienen de un 18% a un 19%, y el yeso aparece a lo largo de todo el perfil, pero de forma discontinua.

Es un suelo muy salino, la C.E. de este suelo oscilan entre 0.685 Sm^{-1} y 2.38 Sm^{-1} , y aunque la C.E. es menor en el primer horizonte, aumenta en el siguiente horizonte para volver a disminuir en el tercero y cuarto, lo que nuevamente nos recuerda su carácter aluvial. Estas discontinuidades también se ponen de manifiesto en las concentraciones en iones solubles del extracto de pasta saturada (ver anexo).

6.3.2.5.- Características del suelo en la tesela LIQ

Los suelos de la tesela LIQ se caracterizan por ser suelos incipientes, con profundidades de unos 30cm, donde sólo los 2 primeros centímetros presentan estructura, y a partir de ahí aparece un regolito margoso en el que los fragmentos de marga son más abundantes y aumentan de tamaño con la profundidad. Los primeros milímetros están acostrados y presentan una estructura laminar, por debajo de esta y hasta una profundidad de 2 ó 3 cm el suelo tiene una estructura granular, y de los 2cm a los 20cm hay una transición hasta el C, aumentado la proporción de los fragmentos de marga con la profundidad.

En determinadas zonas de la tesela LIQ, junto a la cubierta liquénica, aparecen abundantes plantas perennes del tipo de *Euzomodendron bourgaeum*, *Helianthemum almeriense* (subclase LIQ2 en la figura 4.1), zonas que parecen una tesela intermedia entre ÆER y LIQ. Se hicieron observaciones de campo de los suelos en estas zonas, y si bien las características son muy similares al resto de los suelos estudiados en LIQ, se diferencian en que son suelos más profundos, más evolucionados, con una estructura más desarrollada, y el primer horizonte tenía un espesor de 5 a 8 cm en lugar de 2cm.

Se estudian 5 perfiles: TV1N1, TV1N2, TV1S4, TV2N1 y TV2N1.

En estos suelos la tierra fina constituye el 90% en superficie y disminuye drásticamente en profundidad, donde oscila entre el 20 y 30%; las fracciones mayores de 2mm tienen una tendencia contraria (figura 6.36).

La fracción mayoritaria de la tierra fina es el limo fino, seguido por la arcilla (figura 6.37). No hay cambios substanciales en la composición granulométrica con la profundidad, lo que pone de manifiesto la poca evolución de este suelo, que tiene una composición muy similar a la tierra fina del regolito margoso.

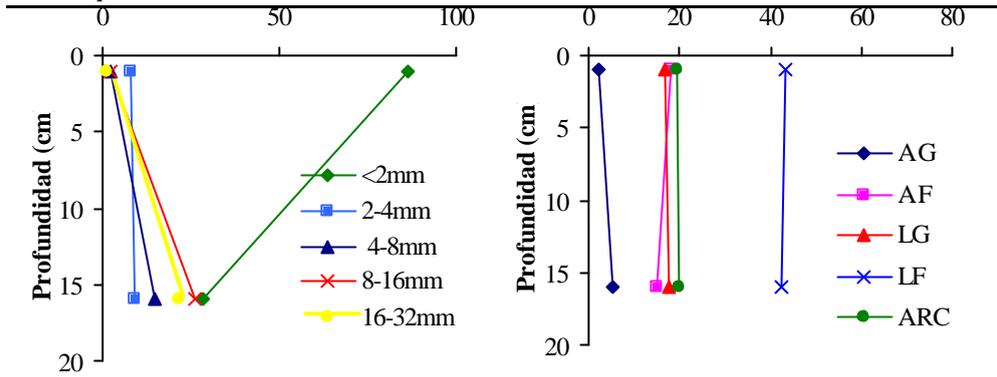
Los suelos de la tesela LIQ tienen menor capacidad para retener agua que los suelos de las teselas descritos anteriormente, a potenciales altos. A potenciales bajos no existen muchas diferencias, como se puede observar si se comparan las tablas de las capacidades de retención de agua de los suelos de las distintas teselas que aparecen en el anexo. El contenido de agua a -33 kPa varía entre 29.5% y 19.20% y a -1500 kPa entre 14.01% y 4.99%. Cuando aumenta el contenido en arcilla aumenta la capacidad de retención de agua, tanto a potenciales altos como bajos.

La densidad aparente del primer horizonte es muy baja de 980 kgm^{-3} , mientras que cuando se incluye parte del segundo horizonte (regolito) es bastante elevada de 1350 kgm^{-3} .

La cantidad de materia orgánica varía de 0.52 a 2.12%. En el horizonte superficial se concentra y aparece una cantidad próxima al 1% o por encima, y en el siguiente horizonte oscila entre 0.52 y 0.9%.

El pH varía entre 6.74 y 7.86. Respecto a las características químicas se observa un aumento en el contenido en carbonatos en superficie, mientras que el yeso presenta la tendencia contraria, disminuye en superficie.

6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.36 y 6.37 :Distribución granulométrica en el perfil TV1N2 (tesela LIQ). La figura de la derecha (Figura 6.37) corresponde a la distribución granulométrica de la tierra fina AG: Arena gruesa; AF:Arena fina; LG: Limo grueso; LF: Limo fino; ARC: Arcilla.

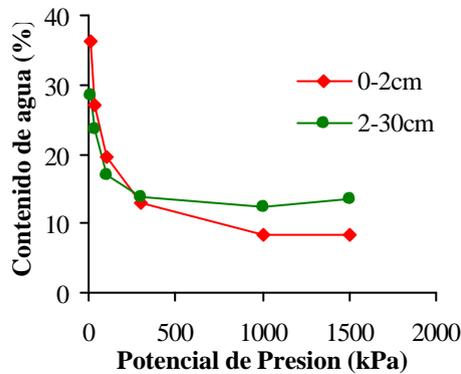


Figura 6.38: Contenido de humedad del suelo para perfil TV1N2 (LIQ) a distintos potenciales

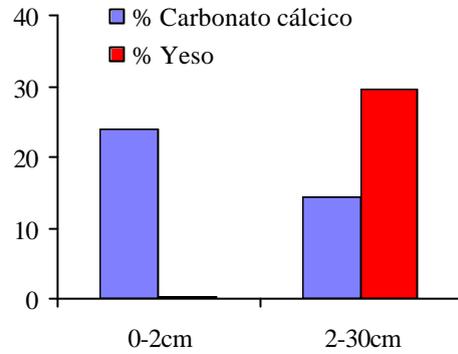


Figura 6.39: Contenido en carbonato cálcico y yeso en perfil TV1N2 (LIQ)

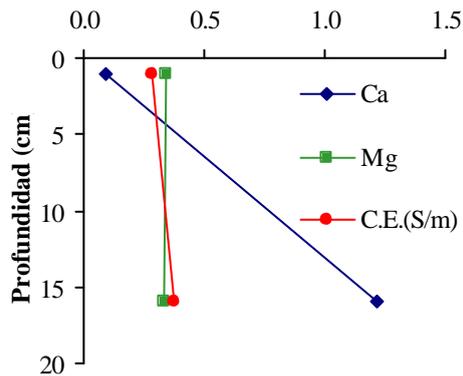
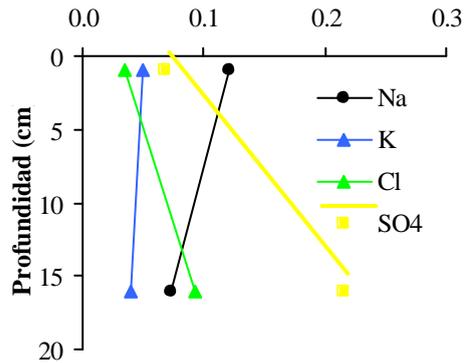


Figura 6.40 y 6.41: Concentración de iones solubles (extracto de pasta saturada) expresados en cmol kg⁻¹ y conductividad eléctrica (C.E.) a lo largo del perfil TV1N2 (tesela LIQ).

La concentración de sales solubles en el extracto de pasta saturada es muy variable, entre 0.0989 y 0.9470Sm⁻¹. En todos los perfiles estudiados la conductividad eléctrica es menor en el primer horizonte y aumenta con la profundidad. Sin embargo las concentraciones de iones en el extracto de pasta saturada no presentan una tendencia tan clara, el Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺, en unos perfiles aparecen lavados en superficie y en otros más concentrados. Por su parte el Na⁺ y K⁺, más solubles, aparecen más concentrados en superficie, mientras que los aniones cloro y sulfato aparecen lavados en superficie (ver anexo). Y las figuras 6.40 y 6.41 muestran las concentraciones de iones en el extracto de pasta saturada para el perfil TV1N2. Los valores del SARp, son bajos en el primer horizonte, por debajo de 1.

La macroporosidad en la superficie del suelo (3 primeros centímetros) es bastante mayor que la medida en todos los suelos anteriores, los macroporos constituyen por término medio 22.22% del suelo, y en algunas muestras es de hasta el 37.14%. La distribución sigue el patrón encontrado hasta el momento en todos los suelos: los poros redondeados son los mas abundantes, pero el mayor porcentaje de área la ocupan los poros elongados (figura 6.42).

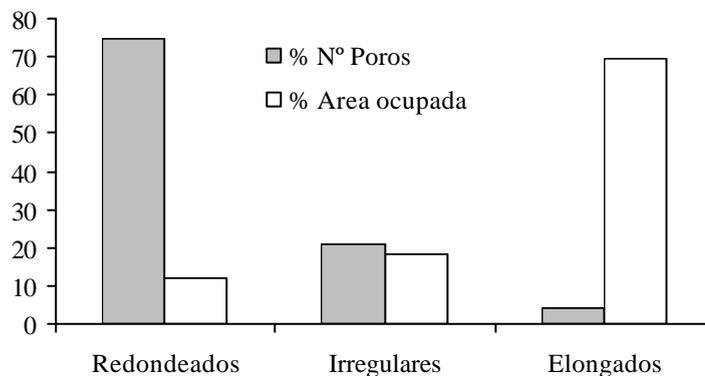
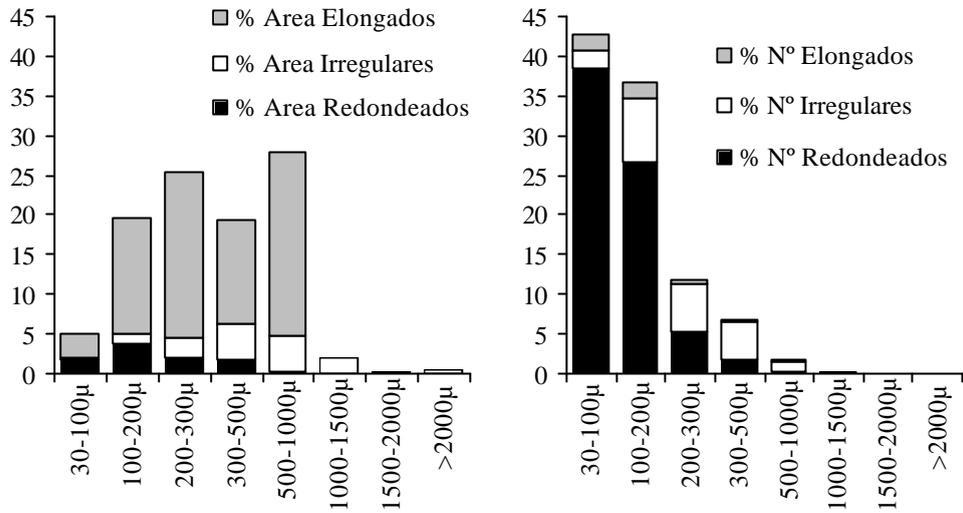


Figura 6.42: Distribución del número de poros y área ocupada por los diferentes tipos de poros en función de la forma de los poros en la superficie del suelo (3 cm) de la tesela LIQ.

La distribución por tamaños se presenta en las figuras 6.43 y 6.44 que muestran que la mayor parte del área ocupada por poros la constituyen poros elongados de tamaño comprendido entre 100 y 1000µm. Sin embargo los poros más abundantes en número son los redondeados entre 30 y 200µm.

En la superficie de este suelo aparecen poros muy grandes bajo la cubierta líquénica, que suelen tener forma elongada y que se observan muy bien cuando se estudian las láminas delgadas a microscopía óptica (figura 6.45)

6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.43 y 6.44: Distribución por tamaños del número de poros y área ocupada por poros en la superficie del suelo (3 primeros cm) de la tesela LIQ.

Los grandes poros bajo las cubiertas criptogámicas que es posible observar en láminas delgadas de la superficie de estos suelos son muy típicos en todas las teselas con líquenes en la zona de contacto entre el líquen y el suelo existen grandes huecos o poros que desempeñarán un papel importante en los regímenes de humedad de estos suelos.

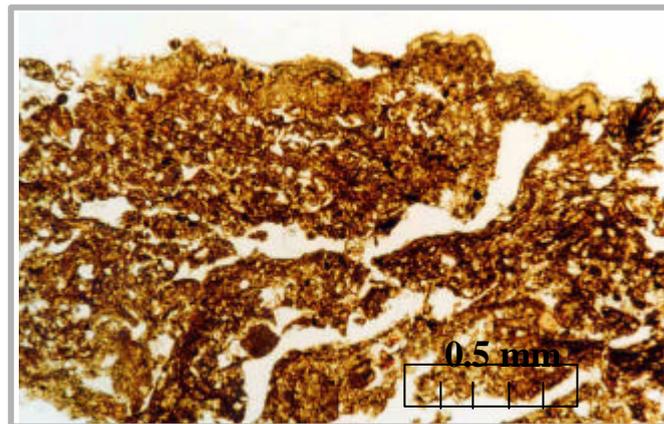


Figura 6.45: Porosidad en la superficie del suelo de LIQ. La parte de arriba de la imagen corresponde a la superficie del suelo. Se observan grandes poros elongados bajo la cubierta criptogámica.

6.3.2.6.- Características del suelo en las teselas LQD y LIM

Los suelos sobre los que encontramos estos 2 tipos de teselas presentan características físicas y químicas muy similares. Se estudian 2 perfiles (TV1S2 y TV2ML) uno de cada tipo de tesela. Las descripciones y las principales características se presentan en el anexo (sección A.6.1).

Se trata de un regolito margoso sobre el que existe una capa de limos, de mayor o menor grosor, de 1 hasta 5cm o más. Este “horizonte” limoso presenta una estructura laminar de fina a media, fuertemente desarrollada, con abundantes poros finos. Por debajo de esta capa de limos aparece el regolito margoso constituido por fragmentos de marga y material fino procedente de la meteorización de la marga.

Los fragmentos gruesos son más abundantes y más grandes con la profundidad, como muestra la figura 6.46.

La distribución granulométrica de la fracción menor de 2mm se representa en la figura 6.47, se trata de un suelo con textura franco-limosa, en el que la fracción mayoritaria es el limo fino y a continuación la arcilla.

La capacidad de retención de agua en estos suelos es bastante menor que la de suelos más desarrollados como los de las teselas PER, ANU, STI, LQC e incluso LIQ. A -33 kPa el contenido de humedad oscila entre 20.13% y 23.10%, y a -1500 kPa entre 8.1% y 9.9%. El primer horizonte tiene mayor capacidad para retener agua a potenciales altos, probablemente debido a que el contenido en arcilla y limo fino es ligeramente superior.

La densidad aparente medida en estos suelos es de 1200 y 1270 kgm⁻³ en el primer horizonte.

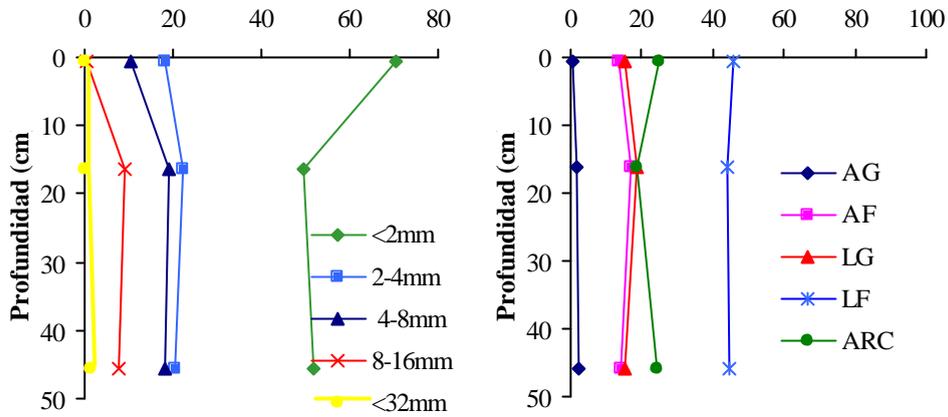
En la capa de limos superficial aparece mucha menos materia orgánica (de 0.6 a 0.3%) que en el regolito margoso, sobre el que se encuentran los limos, con un contenido en M.O. de 1.3 a 1.5%.

El pH de la pasta saturada oscila entre 7.31 y 7.92.

El contenido en carbonato cálcico está en torno al 23%, con un máximo de 24.18% y un mínimo de 22.37%, y no hay diferencias importantes con la profundidad. El yeso es menos abundante en el primer horizonte, y su contenido puede variar de 3.4% en superficie a 13.2% por debajo de la capa de limos.

Los valores del SAR_p son más altos que en otros suelos, sobre todo en la tesela LIM, entre 8 y 13, lo que indica una mayor susceptibilidad a la dispersión de los agregados y el material disperso tiende a sellar los poros pequeños, se reduce la permeabilidad (Benito et al., 1993) y aumenta la susceptibilidad a la erosión.

6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.46 y 6.47 :Distribución granulométrica en el perfil TV1S2 (LQD). La figura de la derecha (figura 6.47) corresponde a la distribución granulométrica de la tierra fina. AG: Arena gruesa; AF:Arena fina; LG: Limo grueso; LF: Limo fino; ARC: Arcilla.

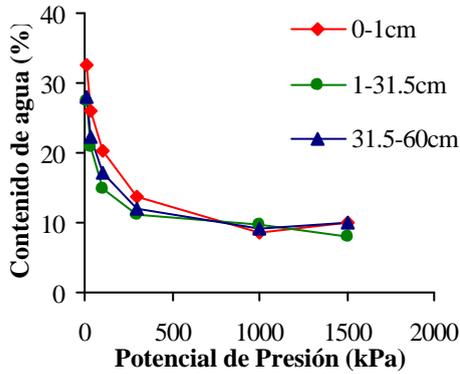


Figura 6.48: Contenido de humedad del suelo para perfil TV1S2 (LQD) a distintos potenciales

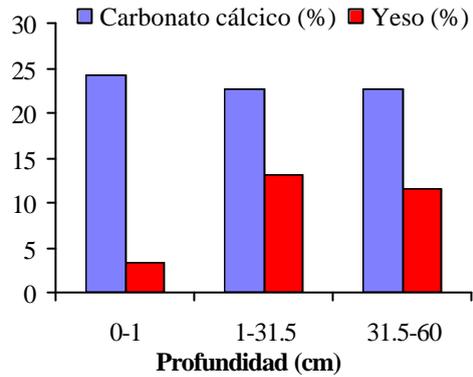


Figura 6.49: Contenido en carbonato cálcico y yeso en perfil TV1S2 (LQD)

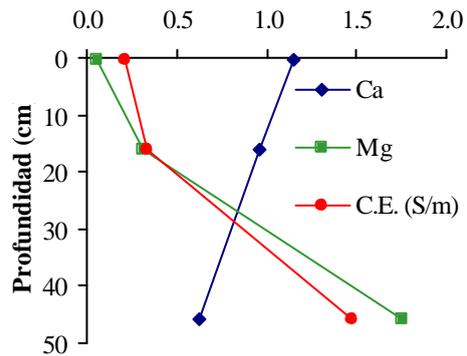
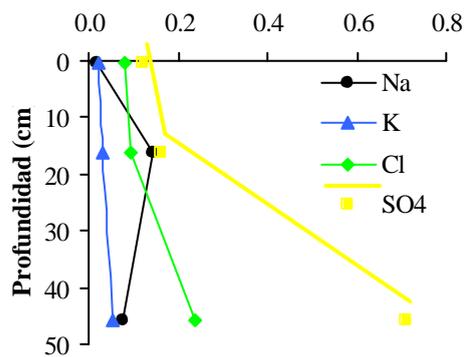


Figura 6.50 y 6.51: Concentración de iones solubles (extracto de pasta saturada) expresados en cmol kg^{-1} y conductividad eléctrica (C.E.) a lo largo del perfil TV1S2 (tesela LQD).

La porosidad de la superficie de estos suelos está en torno al 17.84% de promedio para todas las muestras estudiadas. Al igual que en el resto de teselas estudiadas el mayor porcentaje de poros, en términos de número de poros, lo constituyen los redondeados que representan el 75% del total de poros, como se ve en la figura 6.52 y el menor número corresponde a los elongados que sin embargo son los que mayor porcentaje de área ocupan (73.2%).

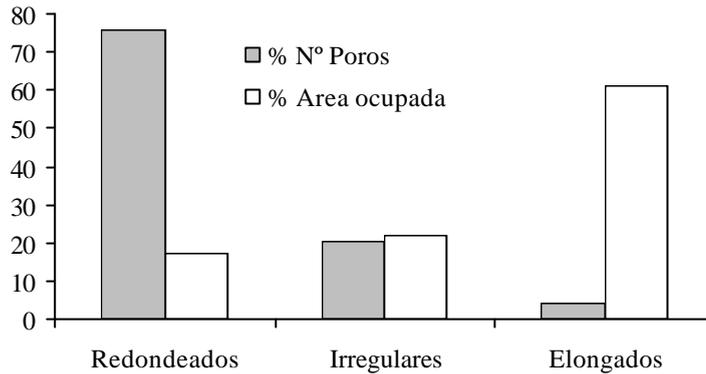
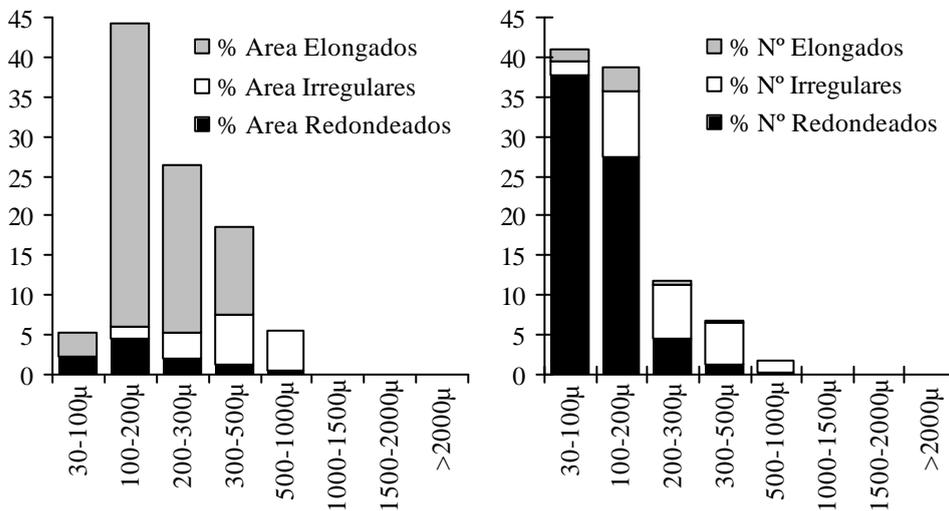


Figura 6.52: Distribución del número de poros y área ocupada por los diferentes tipos de poros en función de la forma de los poros en la superficie del suelo las teselas LIM y LQD.

La distribución por tamaños se representa en las figuras 6.53 y 6.54 que muestran redondeados más abundantes en número y área ocupada por redondeados son los de tamaño comprendido entre 30 y 200 μ m.



Figuras 6.53 y 6.54: Distribución por tamaños del número de poros y área ocupada por poros en la superficie del suelo (3 primeros cm) de las teselas LIM y LQD.

6.- Propiedades del suelo

El mayor porcentaje de área ocupada por poros corresponde a poros elongados y más concretamente a los de tamaño comprendido entre 100 y 500 μm , siendo los más representativos los mayores de 100 μm y menores de 200 μm (figura 6.54).

La mayor parte de la porosidad la constituyen los poros elongados resultantes de la estructura laminar del depósito de limos, pero además existen un gran número de poros redondeados muchos de los cuales corresponderán a vacuolas de desgasificación que son muy abundantes y reducen la permeabilidad del horizonte superficial, estas vacuolas se observan en la lámina delgada de la superficie de este suelo (figura 6.56).

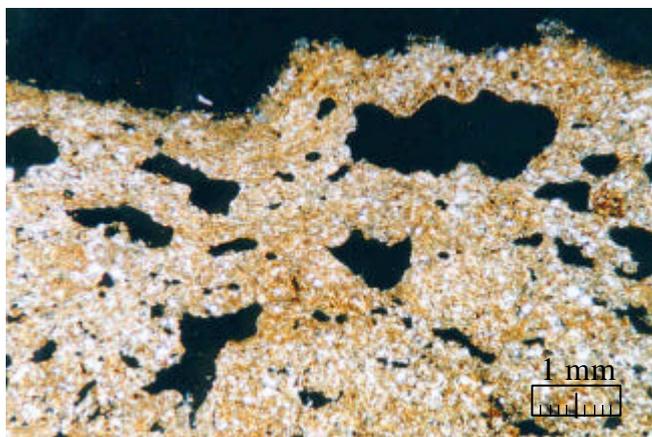


Figura 6.56: Porosidad en lámina delgada de la superficie del suelo en la tesela LQD. La parte de arriba de la imagen corresponde a la superficie del suelo.

6.3.2.7.- Características del suelo en la tesela MAR

Se estudian 3 perfiles en esta tesela (TV1S1, TV2S1 y TV2S2), cuyas descripciones y resultados de los análisis aparecen en anexo (sección A.6.1). En la tesela MAR no existe un suelo diferenciado, se trata de un regolito margoso, sin horizontes reconocibles. Constituidos por fragmentos de marga meteorizada entre los que aparece material fino de meteorización. Se observa una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga, que aumentan de tamaño con la profundidad. Se clasifican como Leptosoles Líticos a Leptosoles Eútricos (FAO, 1990).

El contenido en fragmentos de marga superiores a 2mm aumenta con la profundidad, mientras que el porcentaje de tierra fina pasa de un 30 ó 40% en superficie a un 15 ó 20% a 10 ó 20 cm. Se observa una disminución gradual del porcentaje de tierra fina y fragmentos inferiores a 8mm con la profundidad y aumento de los fragmentos de marga con tamaños por encima de 8 mm (figura

6.57). En algún caso la fracción mayoritaria en superficie puede no ser la tierra fina sino que los fragmentos de marga entre 2 y 4mm ó entre 4 y 8mm pueden superar el porcentaje de la tierra fina en superficie. En la tierra fina la fracción mayoritaria es el limo fino (entre el 40 y 60% que tiende a aumentar en profundidad) seguida por la arcilla (figura 6.58).

La capacidad de retención de agua de estos suelos es más baja que para las teselas vegetadas, y similar a la de las teselas LIM y LQD. A -33 kPa retiene entre un 19.76% y un 24.87%, y a -1500kPa entre 6.81% y 11.26%. Las curvas de retención de agua a distintos potenciales (figura 6.59) muestran que las capacidades de retención son similares en ambos horizontes, ligeramente superiores en el segundo horizonte cuyo contenido en arcilla y limo fino es mayor. Sin embargo no debemos olvidar que esta capacidad de retención de agua se refiere sólo a la tierra fina, y el porcentaje de tierra fina es bastante menor en el segundo horizonte, con lo que en realidad tendrá menor capacidad el suelo del segundo horizonte en su conjunto que el del primero

La cantidad de materia orgánica es pequeña entre 0.8 y 1.4%.

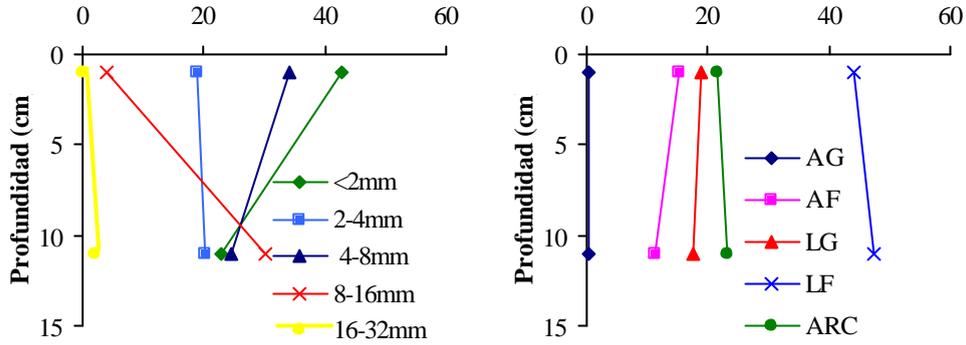
El pH oscila entre 6.7 y 7.4.

Contienen cantidades bastante elevadas de carbonato cálcico entre 21.23% y 27.98%, y un promedio alrededor del 24.1%. El yeso es menos abundante en el horizonte superficial, pero en el segundo horizonte puede contener hasta un 29.60% de yeso. En la figura 6.60 se representan los contenidos en carbonato cálcico y yeso del un perfil tipo (TV2S2).

La conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada oscila en estos suelos entre 0.223 y 0.75 Sm^{-1} . Las sales suelen ser menos abundantes en el horizonte superficial. Las figuras 6.61 y 6.62 muestran el menor contenido en iones solubles en el primer horizonte. El SARp en el horizonte superficial suele ser superior al de suelos de teselas vegetadas, y similar a los valores en las teselas con limos LIM, lo que pone de manifiesto una cierta tendencia a la dispersión y sellado superficial.

La macroporosidad medida en los 3 primeros centímetros es bastante elevada en torno a 27.9%. Como en todas las teselas estudiadas los poros más abundantes en número son los redondeados y los que mayor porcentaje de área ocupan son los poros elongados (80%), como se observa en la figura 6.63. Y la distribución del número de poros y área que ocupan, por tamaños se representa en las figuras 6.64 y 6.65 donde se observa que los poros elongados son los que mayor porcentaje de área ocupan y sobre todo los grandes entre 500 1000 μm , aunque son poco numerosos (0.5%, solo hay 4 poros pero grandes).

6.- Propiedades del suelo



Figuras 6.57 y 6.58 :Distribución granulométrica en el perfil TV2S2 (tesela MAR). La figura de la derecha (figura 6.59) corresponde a la distribución granulométrica de la tierra fina. AG: Arena gruesa; AF:Arena fina; LG: Limo grueso; LF: Limo fino; ARC: Arcilla.

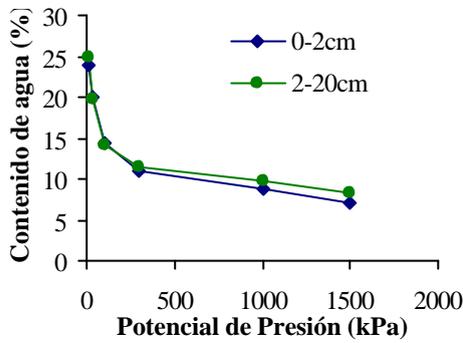


Figura 6.59: Contenido de humedad del suelo para el perfil TV2S2 (tesela MAR) a distintos potenciales

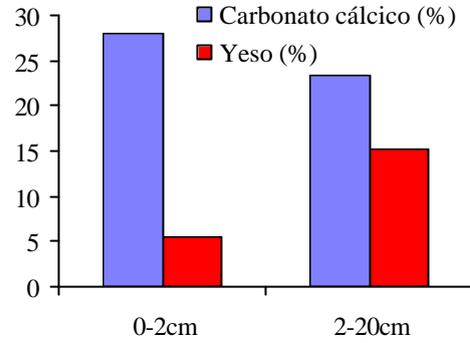


Figura 6.60: Contenido en carbonato cálcico y yeso en el perfil TV2S2 (tesela MAR)

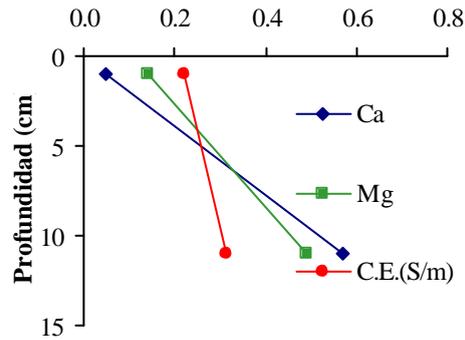
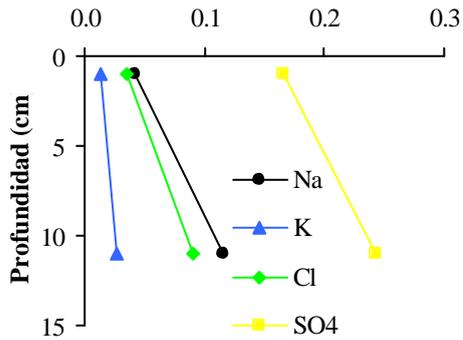


Figura 6.61 y 6.62: Concentración de iones solubles (extracto de pasta saturada) expresados en cmol kg^{-1} y conductividad eléctrica (C.E.) a lo largo del perfil TV2S2 (tesela MAR).

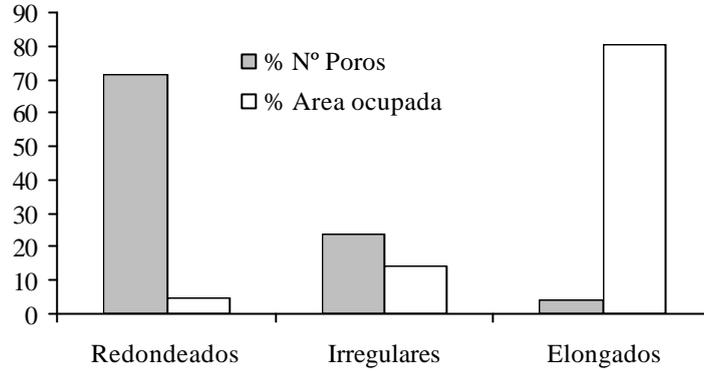
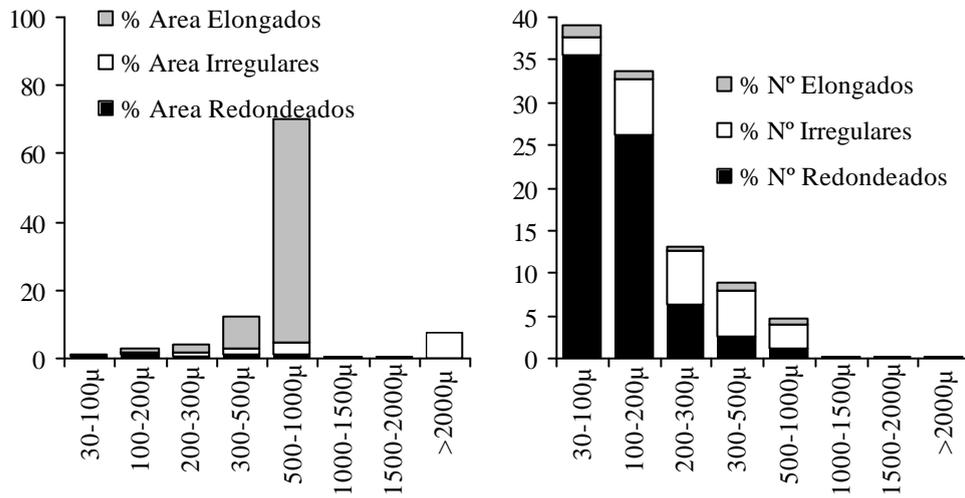


Figura 6.63: Distribución del número de poros y área ocupada por los diferentes tipos de poros en función de la forma de los poros en la superficie del suelo de la tesela MAR.



Figuras 6.64 y 6.65: Distribución por tamaños del número de poros y área ocupada por poros en la superficie del suelo (3 primeros cm) de la tesela MAR.

Los poros más abundantes en número son los redondeados entre 30 y 200µm, muchos de los cuales son vacuolas (figura 6.66)

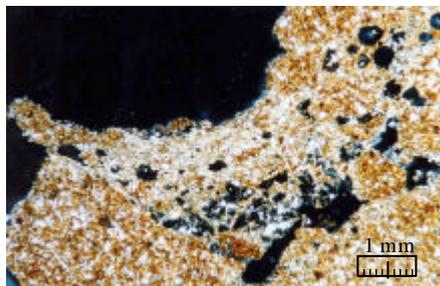


Figura 6.66: Porosidad en lámina delgada de la tesela MAR. Parta alta de imagen corresponde a la superficie del suelo.

6.3.3.- Comparación de las propiedades del suelo en las distintas teselas y relación con el tipo de cubierta de la tesela

La descripción de los suelos de cada tipo de tesela pone de manifiesto que existen claras diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos entre ellas.

Cuando se representa para todas las teselas al mismo tiempo el percentil 98 de la composición granulométrica de todos los perfiles de cada tesela, incluyendo todos los horizontes, así como la mediana de dicha distribución, el máximo y mínimo, se comprueba que la composición granulométrica difiere de un tipo de tesela a otra como ilustra la figura 6.67.

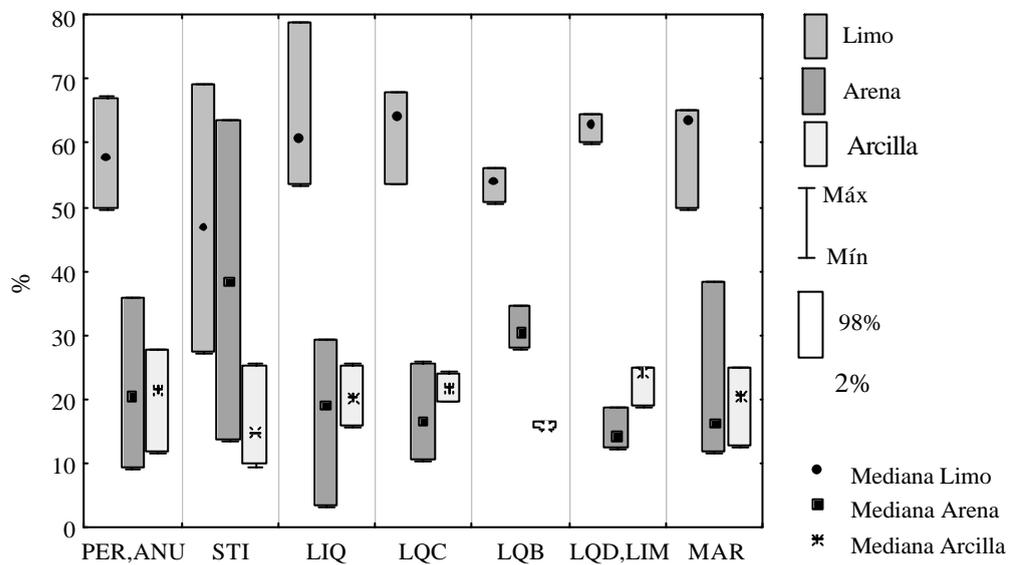


Figura 6.67: Percentil 98, mediana, máximo y mínimo de la distribución de la composición granulométrica de los suelos de cada tesela (se incluyen todos los perfiles de cada tesela y todos los horizontes de cada perfil).

Se observa que aunque en todos los casos la fracción mayoritaria es el limo, los suelos de la tesela STI son los más ricos en arena, debido a que están constituidos en parte por material procedente de la calcoarenita que cubre a la marga en algunas zonas de las laderas donde se localiza este tipo de tesela. Los suelos de las teselas PER y ANU también contienen una proporción importante de arena. Por lo tanto los mayores contenidos en arena aparecen donde la cobertura del suelo está dominada por vegetación superior, lo que se justifica por la influencia del material calcoarenítico que es más patente en los suelos más antiguos y estables.

Del mismo modo los contenidos en limo y arcilla varían de una tesela a otra y es la tesela LIM la que más limo y arcilla contiene. Las teselas LIM, MAR, LIQ junto con LQC son las que presentan mayores porcentajes de limo, que son los suelos desarrollados a partir de la marga como material parental, con pocos aportes de otro tipo de material, debido a las altas pendientes asociadas a estas teselas, se han visto favorecidos los procesos de erosión, y no la deposición de materiales procedentes de zonas aguas arriba (calcoarenitas de la cabecera).

La tesela LQB, como muestra la figura 6.67, es bastante diferente del resto en términos granulométricos, es la que menos arcilla contiene, alto contenido de arena y menos limo, es una terraza aluvial, y está constituida por depósitos sucesivos de material de distinta procedencia.

El contenido de humedad en el suelo a -33 kPa también pone de manifiesto las diferencias entre los suelos de las distintas teselas (figura 6.68), de modo que cuanto más evolucionado es el suelo mayor es su capacidad para retener agua a distintos potenciales y se observa que las teselas con suelos más desarrollados, PER y ANU, STI y LQC, se caracterizan por una mayor capacidad para retener agua, y por lo tanto son capaces de sostener cubiertas de plantas superiores o líquénicas y los suelos menos evolucionados, como los de las teselas LIQ, LIM y MAR, retienen menos agua en esa secuencia, que a su vez es de mayor a menor desarrollo del suelo y de limitación a la existencia de vegetación

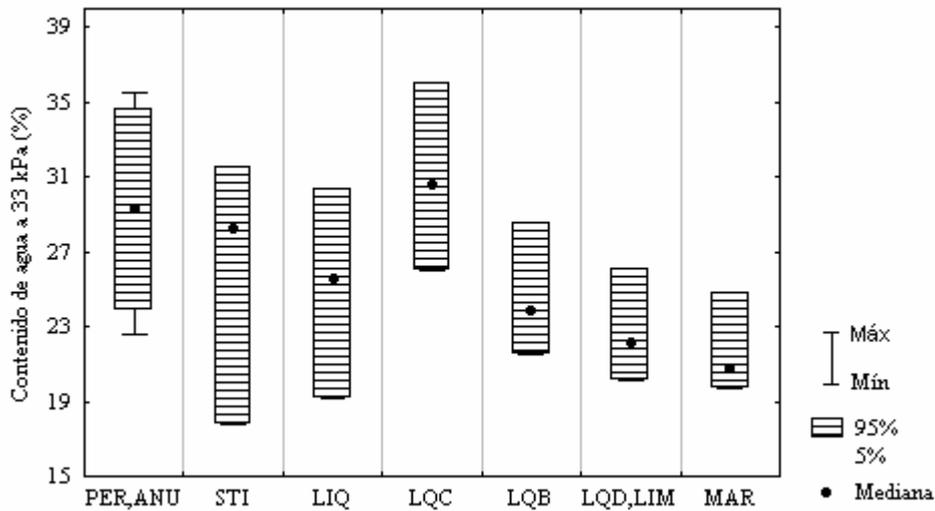


Figura 6.68: Percentil 95, mediana, máximo y mínimo de la distribución de la variable retención de agua a -33 kPa de los suelos de cada tesela, se incluyen todos los perfiles y todos los horizontes de cada perfil.

6.- Propiedades del suelo

Se observa que la vegetación superior aparece en zonas donde el suelo tiene contenidos en arena superiores, pero que tienen una capacidad para retener agua bastante mayor, gracias a la estructura de este suelo, más desarrollada.

Cuando se comparan los contenidos en carbonato cálcico y yeso de los suelos de las distintas teselas, se comprueba que los suelos con mayor contenido en carbonatos, son los suelos de las teselas PER y ANU, LIQ y MAR. Los suelos de LQC son los que menos carbonatos contienen y más yeso, llegando a presentar horizontes gypsicos. La figura 6.69 muestra los contenidos medios máximos y mínimos de los suelos de cada tesela.

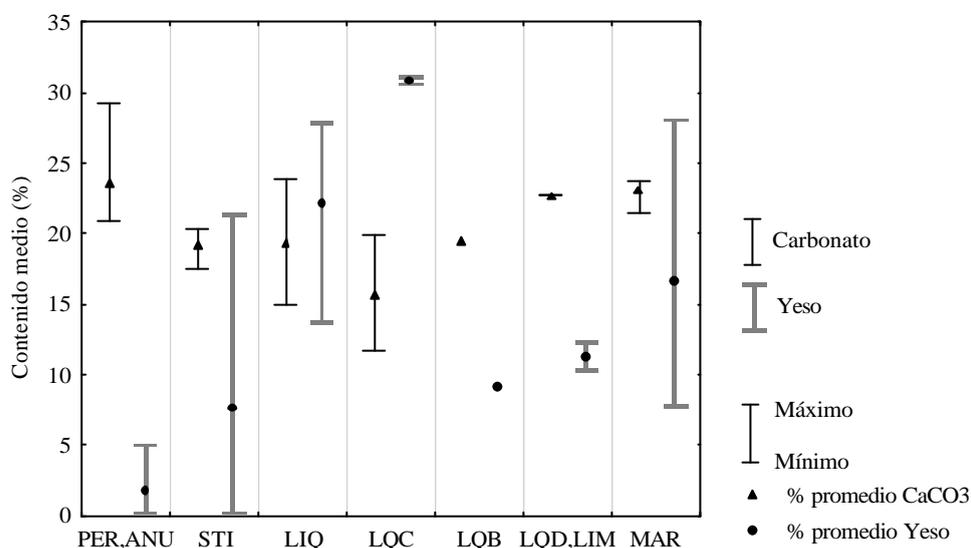


Figura 6.69: Contenido medio, máximo y mínimo de carbonatos y yeso de los suelos de cada tesela, promedio de los valores medios de cada perfil (ponderados a su vez por el espesor de los horizontes)

Se observa una tendencia a que los suelos más profundos (suelos de las teselas PER y ANU, y STI estos últimos sobre todo los de la parte baja de la ladera) se caracterizan por un contenido de carbonato cálcico que es inferior en superficie y se acumula en algún/os horizontes por encima de la marga meteorizada y el contenido en yeso es muy bajo en todo el perfil de suelo y solo en el C o muy próximo al C aparecen cantidades de yeso considerables. Por el contrario, los suelos menos profundos, y en general menos desarrollados, presentan la tendencia contraria, el contenido en carbonato cálcico es mayor en el horizonte superficial, donde el contenido en yeso es menor, mientras que en los horizontes subsuperficiales el contenido en yeso es más alto, y el contenido en carbonato cálcico inferior, es el caso de las teselas, LIQ,LQC, LQD, LIM y MAR.

Existe una tendencia general a que la C.E. aumente en profundidad, a medida que nos aproximamos a la marga meteorizada. Es corriente observar en el primer horizonte un ligero aumento de la C.E., respecto al segundo, que se explica por la concentración de sales transportadas por el agua del suelo que se evapora, pero siempre conservándose la tendencia de aumento en la proximidad de la marga meteorizada. Cuando se comparan las C.E. del extracto de pasta saturada de las teselas (figura 6.70), teniendo en cuenta todos los perfiles y horizontes de cada perfil, se observa que la mayor C.E., y el mayor contenido en sales corresponde a los suelos menos desarrollados asociados a teselas no vegetadas o con vegetación criptogámica.

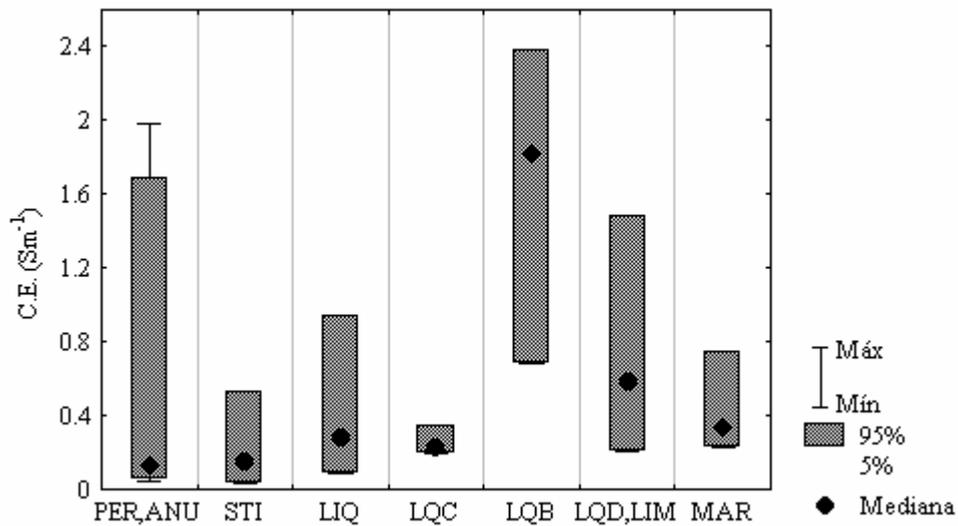


Figura 6.70: Percentil 95, mediana, máximo y mínimo de la distribución de la variable C.E. de los suelos de cada tesela, se incluyen todos los perfiles y todos los horizontes de cada perfil.

Cuando se analizan los iones el extracto de pasta saturada, se observa que los iones solubles más abundantes, son Ca^{++} y Mg^{++} en primer lugar, y en segundo lugar, Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} . En general se observa un menor contenido de iones solubles en los primeros horizontes, y una mayor concentración en el horizonte C o próximos a él. Así como una mayor concentración en el primer horizonte de muchos perfiles respecto al contenido en el segundo horizonte. Los suelos menos desarrollados se caracterizan por presentar los mayores contenidos en el extracto de pasta saturada, de iones Na^+ , Cl^- (ver anexo, A.6.1) así como K^+ y aniones sulfato, mientras que el catión Ca^{2+} es más abundante en el extracto de pasta saturada de los suelos más desarrollados, los de las teselas PER y ANU y STI.

6.- Propiedades del suelo

El SARp promedio por tesela para todo el perfil (se promedia el valor del SARp en todos los horizontes ponderando con el espesor del mismo), presenta el valor más elevado en los suelos de las tesela LQB, seguida de LIM y MAR. Los suelos de las tesela PER y ANU también presentan unos valores altos, pero sobre todo en profundidad, donde se concentran las sales, de ahí que el promedio para el conjunto del perfil sea muy elevado. Sin embargo en el horizonte superficial es menor.

Para poder comparar perfiles y por tanto teselas, mediante análisis estadísticos, se utilizan los valores medios para cada perfil de toda variable del suelo estudiada, se calcula una media por perfil, ponderada con el espesor del horizonte.

Mediante un análisis de la varianza se demuestra que las distintas teselas presentan suelos con características físicas y químicas significativamente diferentes, en la tabla 6.2, se presentan los valores medios de cada variable estudiada para los suelos de cada tipo de tesela (media para el total del perfil).

Y además se examina el efecto de cada variable mediante tests F univariantes, y se observa que excepto para el contenido en limo grueso y el pH, para el resto de las características incluidas en el análisis (tabla 6.2), los valores medios en cada tesela difieren significativamente de los del resto de las teselas.

	Esp.	A.F.	L.G.	L.F.	Arc.	M.O.	pH	C.E.	Carb.	Yeso	C.R.A.
PER	111.83	18.67	18.68	40.71	21.37	1.13	7.55	0.54	23.59	1.70	21.43
STI	75.00	35.13	15.39	30.02	15.71	1.00	7.64	0.18	19.22	7.70	18.82
LIQ	31.00	12.60	17.47	46.42	19.99	0.76	7.34	0.44	19.34	22.12	13.06
LQC	40.00	13.49	18.02	42.95	21.75	0.60	7.62	0.26	15.73	30.83	16.99
LQB	80.00	25.90	19.67	33.25	15.69	0.59	7.61	1.64	19.48	9.12	16.95
LIM	47.00	13.70	16.40	45.85	22.98	1.36	7.64	0.74	22.73	11.27	11.73
MAR	16.67	15.88	16.08	43.97	20.31	1.06	7.20	0.45	23.00	16.65	12.74
F(6,16)	8.13	6.11	1.07	4.73	3.03	3.15	1.57	6.59	2.79	8.10	5.71
p	0.000	0.002	0.421	0.006	0.036	0.031	0.219	0.001	0.047	0.000	0.002

Efecto total: Wilks' Lambda (48,48)=0.0001, Rao R (66, 37)=2.50 p=0.0015

Tabla: 6.2: Valores medios de las variables: Esp.(Espesor de suelo, cm); A.F.(Contenido en arena fina, %); L.F.(Contenido en limo fino, %); L.G.(Contenido en limo grueso, %); Arc.(Contenido en arcilla (%); M.O.(Contenido en materia orgánica %); pH, Conductividad Eléctrica (Sm^{-1}) de la pasta saturada; Carb.(Contenido en carbonatos %); Yeso (Contenido en yeso %) y C.R.A. (Diferencia entre el contenido de agua que tiene el suelo a -33 kPa y -1500 kPa). Además se presenta el resultado del análisis de la varianza y el grado de significación (p).

6.3.4.- Relación de las propiedades del suelo con la posición en el paisaje.

Dado que la topografía controla la distribución de las teselas y las propiedades del suelo varían de un tipo de tesela a otro, es de esperar que las propiedades del suelo varíen con la posición en el paisaje.

Con los valores medios (para el todo el perfil) de cada variable edáfica (media ponderada con el espesor del horizonte) y las características topográficas de cada perfil (ver métodos, 6.2), se calculan los coeficientes de correlación de Pearson, para estudiar las relaciones entre las propiedades del suelo y la topografía. La tabla 6.3 muestra el resultado de los análisis de correlación:

	ACFL	W	ALT	LSF	CURV2	CURV1	PEND
Espesor	0.44	0.66	0.12	-0.30	0.10	0.18	-0.52
Arena	0.01	0.06	0.51	0.59	0.03	0.41	0.21
Limo	0.01	-0.05	-0.47	-0.56	0.02	-0.40	-0.20
Arcilla	-0.08	-0.07	-0.54	-0.59	-0.14	-0.37	-0.21
M.O.	0.00	0.12	-0.37	0.13	0.38	-0.49	-0.01
pH	0.02	0.08	0.07	0.10	0.08	-0.21	-0.10
C.E.	-0.06	-0.19	-0.54	-0.33	-0.08	-0.29	0.00
Carbona	0.02	0.29	-0.31	-0.21	0.32	-0.31	-0.21
Yeso	-0.22	-0.54	0.13	-0.05	-0.17	0.08	0.22
C.R.A.	0.24	0.63	0.18	-0.31	-0.20	0.41	-0.55
SARp	-0.02	-0.05	-0.56	-0.29	0.12	-0.43	-0.04
CL	0.05	-0.11	-0.42	-0.29	-0.04	0.04	-0.03
NO2	0.88	0.75	0.05	-0.09	0.11	0.21	-0.33
NO3	-0.14	-0.43	-0.21	0.34	0.13	-0.65	0.56
PO4	-0.11	-0.03	-0.14	0.02	0.12	-0.13	0.13
SO4	-0.13	-0.49	-0.28	0.09	-0.01	-0.43	0.49

Tabla 6.3: Coeficientes de correlación de Pearson para algunas variables del suelo y características topográficas. ACFL: Área drenada; W: índice topográfico de humedad; ALT: Altitud; LSF: índice de transporte potencial de sedimentos; CURV2: curvatura transversal a la pendiente; CURV1: curvatura en la dirección de la pendiente; PEND: pendiente. Los coeficientes de correlación sombreados son significativos.

La altitud se relaciona de forma positiva con el contenido en arena, y negativa con el contenido en limo y arcilla. La tabla 6.3 pone de manifiesto que en la zona más alta de la cuenca (tesela STI) aparecen los suelos más ricos en arena y pobres en limo y arcilla, además son menos salinos y la susceptibilidad a la dispersión de arcillas es menor. En las zonas de mayor altitud se localizan las superficies más antiguas como ponen de manifiesto Calvo et.(1991) y los suelos de STI, PER y ANU, LQC que se localizan sobre esos niveles más antiguos, como ya

apunta Alexander et al. en 1994, están más lavados, y son menores las concentraciones de Na^+ , y menor la tendencia a la dispersión.

Además se observa la típica relación de a mayor pendiente de la tesela menor es el espesor de suelo, descrita por numerosos autores (Walker, et al., 1968) así por ejemplo las teselas como MAR o LIM con pendientes muy fuertes se caracterizan por espesores de regolito reducidos.

El atributo LSF se relaciona positivamente con el contenido de arena y negativamente con el contenido en limo y arcilla, este atributo está relacionado con el transporte de sedimentos: donde la capacidad de transporte sea mayor, más partículas finas será capaz de arrastrar y las arenas serán más abundantes.

Se observa una relación negativa entre la pendiente del terreno y la capacidad de retención de agua, de manera que los suelos de las teselas con pendientes muy fuertes, como MAR o LIM, se caracterizan por la baja capacidad para retener el agua lo cual es lógico si tenemos en cuenta que estas pendientes limitan el desarrollo del suelo.

El atributo W (ver capítulo 5) hace referencia a la capacidad de una zona, desde el punto de vista topográfico, para almacenar el agua. Está relacionado positivamente con la capacidad del suelo para retener agua y con el espesor del mismo. Por el contrario, se relaciona negativamente con la cantidad de yeso en el suelo y con la concentración de iones sulfato en el extracto de pasta saturada, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que las teselas que presenta altos valores de W, como PER y ANU, se sitúan en zonas planas y extensas áreas drenada, por lo que se ven muy favorecidos los procesos de lavado, al igual que en la parte baja de la ladera con la tesela STI, donde pese a que la pendiente es más alta, la zona de contribución (ARE) es muy grande y el suelo arenoso facilita la infiltración, y el lavado de yeso.

La curvatura en dirección a la máxima pendiente se relaciona con el contenido en materia orgánica, cuanto mayor es la concavidad (CURV1 presenta valores negativos para las zonas cóncavas) de la tesela en dirección a la máxima pendiente, mayor es el contenido en materia orgánica.

Se estudia como cambian la composición granulométrica del suelo a lo largo de transectos transversales y longitudinales que cubren la cuenca.

En el perfil longitudinal (figuras 6.71 y 6.72) se consideran 4 puntos, que se representan en función de su distancia a la parte más alta de la cabecera de la cuenca. El primer punto de la figura 6.71 y 6.72 corresponde a la parte alta de la cuenca (de 0 a 82m desde la cabecera), que es la ladera con la tesela STI. En esta ladera se estudiaron 4 perfiles. Se hace el promedio por horizontes del contenido en

arena fina y limo fino en los 4 perfiles (promedio ponderado con el espesor del horizonte correspondiente). Aunque los perfiles se distribuyen longitudinalmente (L4 de figura 6.1), se trata de la misma tesela, y la mezcla del material coluvial (marga y calcoarenita) que constituye estos suelos introduce una gran variación por lo que decidimos promediar los 4 perfiles más que considerar cada perfil como un punto del transecto longitudinal. Y los siguientes puntos de las figuras 6.71 y 6.72 corresponden a promedios por horizontes, de arena fina o limo fino, del transecto vertical estudiado a esa distancia (segundo punto de las figuras 6.71 y 6.72 corresponde al transecto TV3, promedio de arena fina o limo fino por horizonte, ponderado con espesor del horizonte, de todos los perfiles del transecto TV3; el tercer punto de las figuras corresponde al TV2 y el cuarto punto al transecto TV1. Ver figura 6.1 con localización de transectos).

En el transecto longitudinal se observa en líneas generales un descenso en el porcentaje de arena fina a lo largo del transecto S-N, desde la parte alta de la cuenca hacia la baja, mientras que el contenido en limo fino aumenta en la misma dirección (figuras 6.71 y 6.72). Estas tendencias están relacionadas con los procesos de erosión y con las características del material parental. Por un lado, las partículas más finas (limo fino) son transportadas más lejos por la erosión ocasionada por el agua, y por otro lado, la parte alta de la cuenca se ve muy influenciada por la presencia de la calcoarenita enriquecida en arena fina, esta calcoarenita cubre a la marga y aporta sedimentos a los suelos de la tesela STI, constituidos por depósitos coluviales de marga y arenisca, que a su vez constituyen la fuente de sedimentos para los suelos situados aguas abajo de ésta. El tercer punto del transecto longitudinal presenta un menor contenido en arena fina y mayor contenido en limo fino con respecto al cuarto punto que se explica porque es una zona más abrupta y más activa (barranco lateral y ladera más inclinada) y está más degradada y aumentan los finos procedentes de la marga.

Se estudian los transectos verticales (figuras 6.73 a 6.76) y se examinan los valores que toma la variable (arena fina o limo fino) por horizontes en cada uno de los perfiles del transecto vertical. Se observa que el contenido en arena fina es mayor en los pedimentos (perfiles TV1N3, TV1N4 y TV1N5 en el transecto TV1, figuras 6.73 y 6.74; y perfil TV2MP en transecto TV2, figuras 6.75 y 6.76) debido a que por sus características topográficas los procesos de erosión han estado limitados, y se mantiene parte de la arena fina procedente del enriquecimiento coluvial a partir de la calcoarenita de la parte alta de la cuenca. Los suelos de las teselas LIQ y MAR o LIM se sitúan sobre zonas sobre niveles más recientes, con pendientes mucho mayores y con mayor susceptibilidad a la erosión, que hacen

6.- Propiedades del suelo

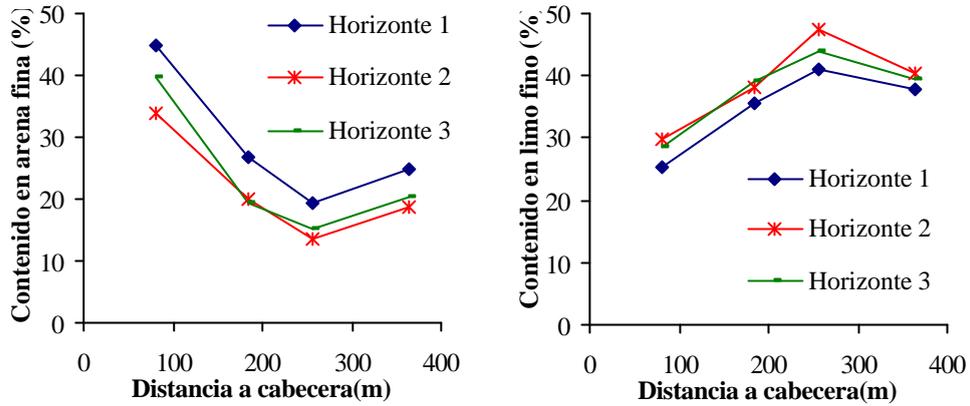
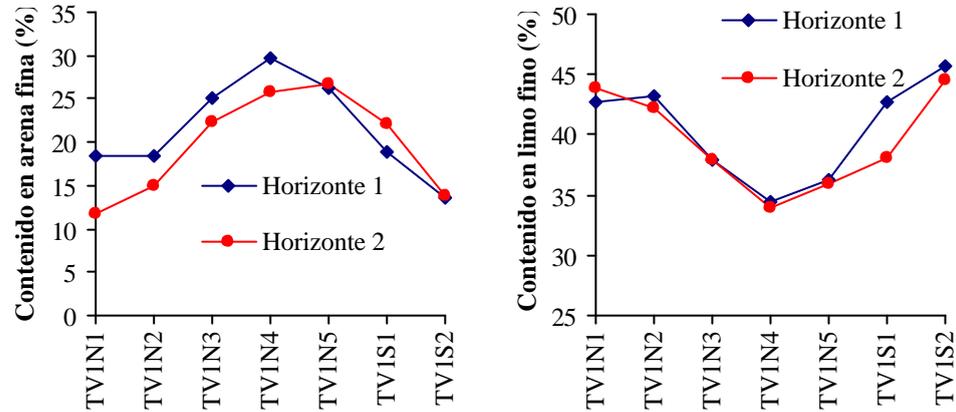


Figura 6.71 y 6.72: Contenido en arena fina y limo fino a lo largo de un transecto longitudinal a la cuenca (TLE). Cada punto corresponde al promedio (ponderado por el espesor del



horizonte) de los perfiles situados a las distancias de la cabecera indicadas.

Figura 6.73 y 6.74: Contenido de arena fina y limo fino por horizonte de cada perfil del transecto vertical 1.

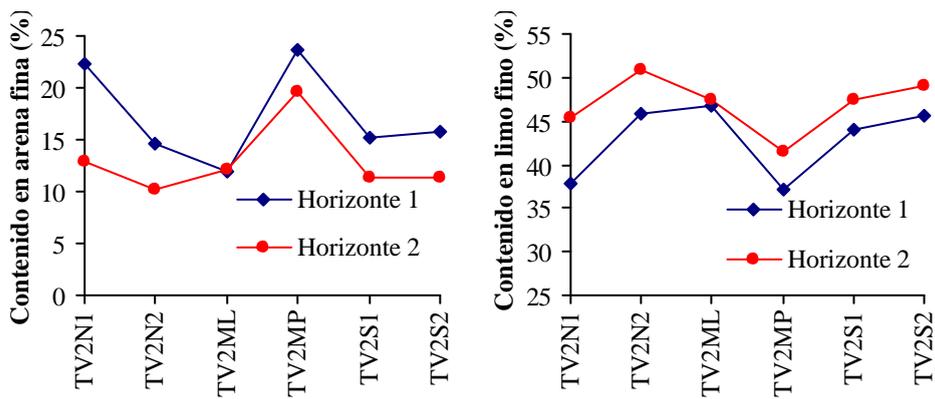


Figura 6.75 y 6.76: Contenido de arena fina y limo fino por horizonte de cada perfil del transecto vertical 2.

que se trate de suelos muy jóvenes con material procedente de la marga, todas estas teselas son muy similares en lo que se refiere a su contenido en arena fina. El limo fino muestran un patrón inverso (poniendo de manifiesto la influencia de la marga yesífera). La arcilla no presenta tendencias claras.

6.3.5.-Relaciones entre las características del suelo , la topografía y cobertura de la tesela.

El análisis de componentes principales da como resultado 5 componentes que absorben el 73% de la varianza. Las raíces características (eigenvalues) de estas componentes y las cargas de cada variable en cada componente se presentan en la tabla 6.4.

Se puede comprobar que la primera componente, que es la que más varianza absorbe, está muy influenciada y positivamente por el espesor de suelo, capacidad de retención de agua, índice W, cobertura de anuales, perennes (carga algo menor) y hojarasca y negativamente por la pendiente. Esta componente constituye un gradiente desde zonas con baja pendiente y áreas drenadas extensas (W alto) donde se desarrollan suelos profundos, con buena estructura que retienen cantidades importantes de agua y aparecen las teselas con vegetación superior y a medida que va aumentando la pendiente disminuye el espesor de suelo, se conserva peor el agua y la cubierta vegetal pasa a ser criptogámica hasta el extremo final con pendientes muy altas sin suelo y desprovistas de vegetación.

La segunda componente diferencia los niveles antiguos de la zona de estudio (Calvo et al., 1991), donde la cobertura de piedras es la variable con mayor influencia, así como el contenido en arena de este suelo (por la influencia de la calcoarenita).

La componente 3 cuyas cargas fundamentales la constituyen la cubierta de marga y la curvatura del terreno en dirección transversal a la pendiente, constituye un gradiente de potencial para la erosión.

Se ordenan los 23 puntos (donde se ha estudiado la cobertura de la tesela, las características topográficas y las características del suelo) según las tres primeras componentes obtenidas del análisis (figuras 6.77 y 6.78) y se observa como tienden a agruparse los puntos que pertenecen al mismo tipo de tesela y cada tesela (grupo de puntos) se sitúan a través de los gradientes establecidos por las componentes extraídas en función de las características de sus suelos, coberturas y topografía.

6.- Propiedades del suelo

	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5
Espesor	0.71	0.22	-0.34	-0.04	0.33
Arena	0.09	0.92	0.06	0.02	-0.04
Limo	-0.14	-0.88	-0.04	-0.06	-0.05
Arcilla	0.06	-0.78	-0.08	0.06	0.24
M.O.	0.13	0.04	0.26	0.11	0.74
C.E.e	0.01	-0.05	-0.09	-0.96	0.04
CaCO ₃	0.21	-0.17	0.24	-0.21	0.56
Yeso	-0.57	-0.27	0.04	0.03	-0.59
C.R.A.	0.78	0.21	-0.25	0.19	0.03
NA	-0.18	-0.10	0.36	-0.51	0.19
Ca	0.41	0.03	0.18	-0.31	-0.24
SO ₄	-0.45	-0.19	0.05	-0.77	0.00
SAR	0.06	0.08	-0.09	-0.93	0.10
ARE	0.43	0.05	0.08	0.08	0.09
W	0.86	0.08	0.07	0.16	0.14
ELE	-0.10	0.49	-0.24	0.58	-0.09
LSF	-0.57	0.57	0.19	0.31	0.25
PLN	0.05	0.10	0.79	-0.03	0.27
PRF	0.34	0.21	-0.44	0.18	-0.58
Pendiente	-0.85	0.19	0.11	0.09	0.15
Cob. marga	-0.26	-0.10	0.83	-0.04	-0.04
Cob. suelo acostrado	-0.12	-0.30	-0.17	-0.18	0.76
Cob. piedras	-0.17	0.77	-0.15	0.14	-0.05
Cob. líquenes blancos	-0.33	-0.24	-0.52	0.20	-0.58
Cob. otras criptógamas	-0.32	-0.08	-0.57	-0.32	-0.48
Cob. plantas anuales	0.81	-0.24	0.10	-0.03	-0.01
Cob. plantas perennes	0.53	0.54	-0.28	0.34	0.27
Cob. hojarasca	0.89	-0.13	0.01	0.06	0.15
Eigenvalues	6.12	4.26	2.86	3.66	3.26

Tabla 6.4: Cargas para cada componente de las variables edáficas (las 13 primeras), topográficas (las 7 siguientes, ver leyenda tabla 6.3) y de cobertura (las 8 restantes). Las variables edáficas corresponden al contenido medio del perfil (punto de muestreo), media de todos los horizontes ponderada con el espesor de cada horizonte. Las coberturas corresponden a la media de un área 6 x 6m sobre la tesela en ese punto.

6.4.-DISCUSION

El desarrollo del suelo en el ecosistema acarcavado del desierto de Tabernas, en general, es muy limitado. La evolución de estos suelos está limitada por la escasez de lluvias y en muchas teselas por la falta de estabilidad del material. En algunas teselas como las teselas MAR y en menor grado LIM y LIQ, las altas pendientes y alto potencial para el transporte de sedimentos (altos valores de LSF)

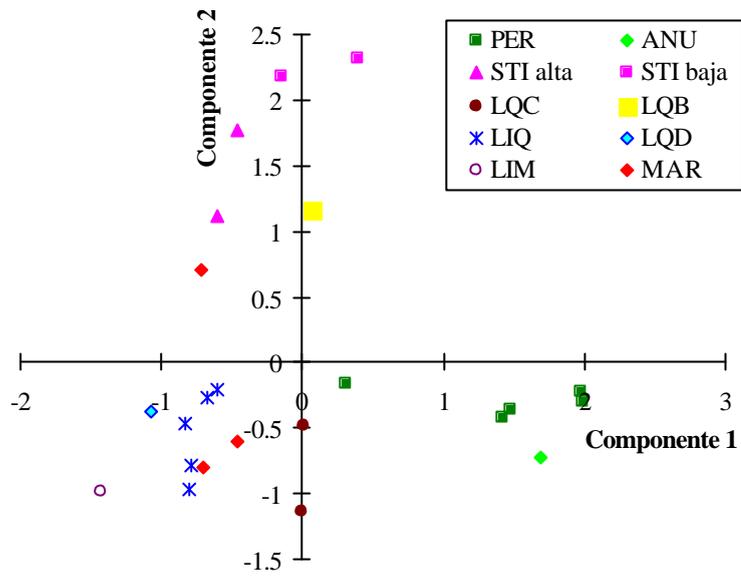


Figura 6.77: Ordenación de los puntos de muestreo (teselas) en función de las componentes 1 y 2. La componente 1 es el eje horizontal y la componente 2 el eje transversal.

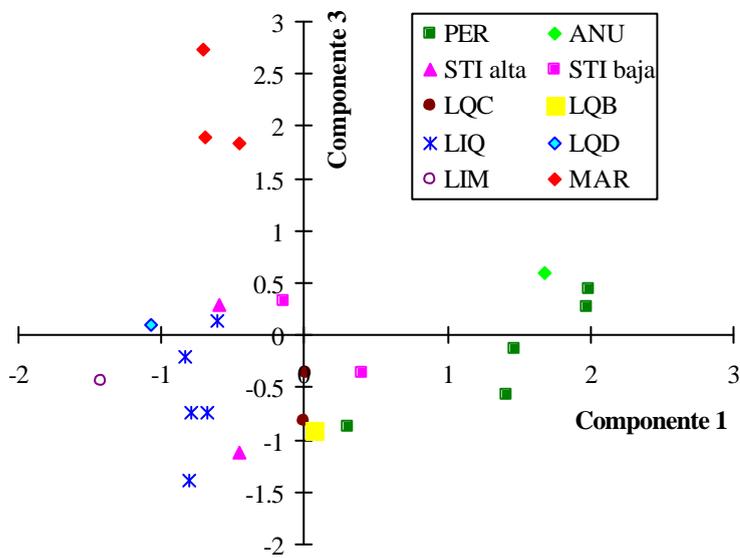


Figura 6.78: Ordenación de los puntos de muestreo (teselas) en función de las componentes 1 y 3. La componente 1 es el eje horizontal y la componente 3 el eje transversal.

las convierte en zonas muy susceptibles a la erosión, que conduce a rápida retirada de material, que solo permite la existencia de Leptosoles poco profundos.

La tesela MAR es la menos estable y las altas pendientes limitan el espesor del regolito, apareciendo suelos, que en realidad no son tales, sino que se trata de un regolito margoso donde la abundancia de material fino disminuye con la profundidad. La ausencia de desarrollo edáfico lo ponen de manifiesto las características físicas de estos regolitos, sin estructura, baja capacidad para retener agua y las características químicas que en líneas generales son similares a las del material parental (marga), con la particularidad de que los primeros centímetros de este regolito (primer y segundo centímetro) aparecen ligeramente lavados en iones solubles. Los suelos de esta unidad presentan los mayores contenidos en limo, altos contenidos en carbonatos y yeso y en sales en general. En definitiva las altas tasas de erosión (Calvo et al., 1991b; Solé et al., 1997), asociadas a estas teselas limitan por un lado la existencia de vegetación y por otro el desarrollo del suelo y la ausencia de un suelo desarrollado impide el desarrollo de la cubierta vegetal que proteja al regolito de la erosión y favorezca la génesis y evolución del suelo.

Las teselas LIM y LQD se caracterizan por unas condiciones topográficas similares a las de la tesela MAR, pero con pendientes menores y menor potencial para el transporte de sedimentos. Estas condiciones menos agresivas permiten la existencia en los primeros centímetros de un depósito de limos con un cierto desarrollo edáfico, muy primitivo, pero que capacita a este suelo para retener algo más de agua que los suelos de la tesela MAR. Las características químicas siguen siendo muy similares a las del material parental, la marga, con altos contenidos en carbonatos y yeso y cierto lavado en superficie del yeso y de la mayoría de sales. La mayor estabilidad topográfica permite que el material en estas teselas se vea menos afectado por los procesos de erosión (Solé et al., 1997), y esto permite un somero desarrollo edáfico. No obstante representan una situación hostil para cualquier tipo de vegetación, solo en algunos casos donde la superficie está más lavada en sales, el SARp es menor y las condiciones topográficas son más adecuadas, aparece una costra biótica de cianobacterias y otras algas y algunos líquenes, la tesela LQD, que a su vez favorecerán el desarrollo edáfico.

El siguiente nivel en el desarrollo edáfico en este ecosistema lo constituyen los suelos de las teselas LIQ, que presentan un suelo muy incipiente en los primeros centímetros. No se trata de un depósito de limos, sino que el propio regolito ha evolucionado, gracias a las pendientes más suaves (que en MAR o LIM y LQD) y menor susceptibilidad a la erosión, que favorecen la aparición de un suelo incipiente

en los primeros centímetros, con una estructura débil granular y una capacidad para retener agua algo mayor que para las teselas anteriores. Los contenidos en carbonatos y yeso son bastante elevados, el yeso y otras sales están lavadas en el primer horizonte. En cualquier caso las condiciones son lo suficientemente inhóspitas como para que sean los líquenes, primicolonizadores por excelencia, los únicos con éxito en la colonización de estos suelos. La cubierta liquénica parece jugar un papel muy importante en el desarrollo de este suelo incipiente, como han descrito numerosos autores, por un lado estabilizan la superficie y reducen la erosión del suelo (Blackburn, 1975, Loope y Gifford, 1972, St Clair y Johansen, 1993), y por otra parte mejoran la fertilidad del suelo, las cianobacterias de los líquenes y costras biológicas fijan nitrógeno atmosférico en cantidades significativas (Jeffries et al. 1992; Klubek y Skujins, 1980) y además contribuyen al carbono orgánico del suelo que cubren (St Clair y Johansen, 1993). Las algas de las costras liquénicas liberan cantidades significativas de fotosintatos que se acumula en el suelo debajo de la costra (Beymer y Klopatek, 1991). También se ha sugerido que las costras criptogámicas pueden aumentar los niveles de fósforo en el suelo reteniendo partículas finas del suelo (Kleiner y Harper, 1972, 1977). Pero lo más importante es que son capaces de agregar partículas de suelo mediante la producción de polisacáridos extracelulares, agregados que hemos podido observar a microscopía electrónica (figura 6.79), y que ha sido descrito por otros autores (Bailey, 1973; Lynch y Bragg, 1985).

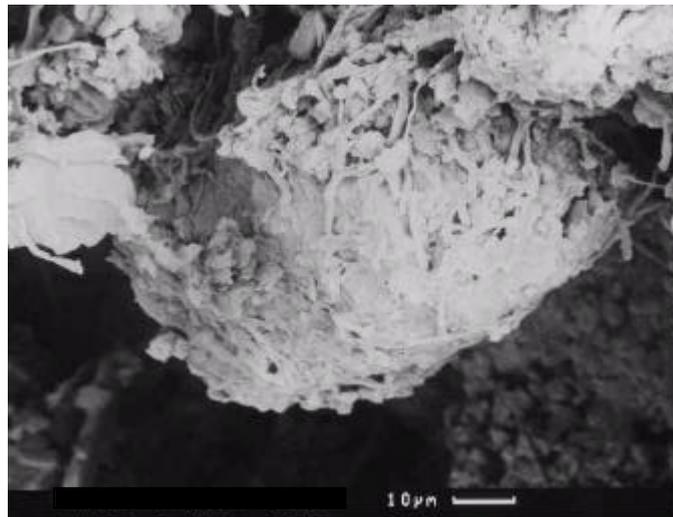


Figura 6.79: Agregado de suelo bajo cubierta liquénica. Se observa como la hifas del líquen agrega las partículas de suelo.

6.- Propiedades del suelo

En determinadas zonas de estas laderas con tesela LIQ, la cubierta criptogámica aparece acompañada de plantas perennes bastante frecuentes (subclase LIQ2). En estas zonas el suelo está más desarrollado y el primer horizonte tiene un grosor de 10 a 15cm (en lugar de 2 a 5cm que tiene en LIQ) y con una estructura más desarrollada. La cubierta criptogámica mejora las condiciones edáficas, desarrollo de la estructura edáfica, y como consecuencia la capacidad para retener agua y mayor disponibilidad de elementos esenciales y aumenta el contenido en materia orgánica, mejoras que se demuestran en numerosos trabajos (Anderson et al., 1982, Kleiner y Harper, 1972,1977), y como consecuencia las condiciones del sustrato pasan a ser lo suficientemente favorables como para que la colonización por vegetales superiores sea posible, y su vez estas plantas intervienen estabilizando el suelo, protegiendo de la erosión y favoreciendo los procesos edafogénicos. Por lo tanto el grado de evolución de los suelos de esta tesela varía de unas zonas a otras, y se pone de manifiesto por una mayor densidad de perennes sobre esta tesela.

La tesela LQB estudiada, se encuentra en una terraza aluvial, y el suelo está constituido por gran cantidad de piedras, dispuestas en capas granulométricamente diferentes, cuyo tamaño está relacionado con la energía de los eventos de escorrentía que los depositó. Una de las características principales de este suelo es el elevado contenido en sales, que se refleja en el tipo de cubierta vegetal de estas teselas: líquenes y plantas halófitas. Aunque actualmente algunos de estos pedimentos son relativamente estables, ya que el cauce ha modificado su trayectoria, y se caracterizan por pendientes relativamente suaves, y áreas de contribución de escorrentía de extensión media, que supuestamente debería favorecer el lavado de sales, sin embargo el contenido en sales sigue siendo muy alto lo que limita el desarrollo de otro tipo de cubierta vegetal. Este alto contenido en sales se explica por un lado por la importante cubierta líquénica puede limitar la infiltración (Solé et al., 1997) y el lavado de sales y por otra parte debido a la baja frecuencia de precipitaciones.

La tesela LQC se localiza en zonas de divisorias con pendientes muy suaves, ligeramente convexas, que no presenta áreas de contribución de escorrentía extensas, sino que prácticamente solo reciben el agua procedente de la precipitación y son zonas muy estables, con unas tasas de erosión muy reducidas. Estas características topográficas e hidrológicas permiten el desarrollo de un suelo más evolucionado que el de las teselas anteriores, con una capacidad para retener agua bastante mayor, así como unas características químicas muy singulares como la presencia de horizontes gypicos, que también se ven favorecidos por las bajas

pendientes, que solo recibe aporte de agua por parte de la precipitación y lo que es más importante se trata de teselas con gran capacidad de infiltración (Solé et al., 1997), lo que favorece la lixiviación de sales disueltas como el yeso hasta horizontes más profundos y su acumulación cuando precipitan. La presencia del horizonte gypstico es una prueba indirecta de que son teselas y suelos muy estables (donde los procesos de erosión y deposición son relativamente bajos), y más evolucionados que los de otras teselas con el mismo tipo de cubierta vegetal (tesela LIQ). En estos suelos así como en los de la tesela LQB se pone de manifiesto la competencia por el ión Ca, de manera que cuando es muy abundante el yeso es bastante menos abundante el carbonato.

Aunque los suelos de la tesela LQC presentan determinadas características adecuadas para la existencia de una cubierta vegetal dominada por plantas superiores, como un espesor medio, estructura desarrollada, capacidad de retención de agua relativamente elevada, sin embargo la cubierta de esta tesela está dominada por líquenes, algunas vivaces pequeñas y anuales. Esto se explica en parte si tenemos en cuenta el alto contenido en yeso de estos perfiles y la presencia de horizonte gypsticos que limitan la presencia de muchas plantas superiores, así como la existencia de contacto lítico a menos de 1m que limita la penetración de las raíces. Como en los primeros centímetros de suelo el yeso está bastante lavado, es frecuente encontrar anuales que dependen de las capas superficiales de suelo.

En las laderas más antiguas de la zona de estudio donde se localiza la tesela STI, las características topográficas de estas laderas y su antigüedad (Harvey, 1987; Calvo et al. 1991 Alexander et al. 1994) son responsables del tipo de suelos que encontramos. Estas laderas tiene unas pendientes muy elevadas, y áreas drenadas muy extensas sobre todo en las partes bajas de la misma. Están cubiertas por una densa cubierta vegetal, principalmente un matorral y hierbas perennes como *Stipa tenacissima*, y son bastante estables. La naturaleza coluvial de los suelos en estas teselas la pone de manifiesto su constitución mezcla de material calcoarenítico y marga, que revelan la acción de procesos erosivos pasados, pues ahora son bastante estables excepto en algunas zonas de la parte baja de la ladera, donde se acumula el agua de escorrentía y se forman cárcavas donde comienzan los cauces de las microcuencas que integran la zona de estudio. Este carácter coluvial explica que las características del suelo varíen mucho de un perfil a otro sobre esta tesela, sobre todo entre la parte alta y baja de la ladera. En la parte alta de la ladera la marga está prácticamente al descubierto, y los suelos presentan un mayor contenido en limo, y en sales (entre ellas el yeso) aparece un horizonte gypstico en bs dos perfiles estudiados en la parte alta de la ladera, (figura 6.21).

Mientras que en la parte baja de la ladera las pendientes algo menores han permitido que se conserve en parte el material calcoarenítico y aparecen suelos más arenosos, profundos y más lavados en sales, pues en esta parte baja de la ladera la zona de contribución (ARE) es muy grande (reciben la escorrentía de toda la parte alta de la ladera que además es bastante larga). Se observa un ligero aumento de la concentración de muchos iones en el primer horizonte de estos suelos que probablemente se explica por la evaporación del agua del suelo y consecuente aumento de la concentración en superficie.

El efecto protector del escarpe que corona esta ladera, la orientación al Norte y la menor insolación que recibe sobre todo en invierno han debido favorecer el desarrollo de una cubierta vegetal muy evolucionada (Lázaro et al., 1996) en esta tesela, que a su vez potencia la edafogénesis y la disminución de la erosión. Por lo que a pesar de localizarse sobre zonas con pendientes elevadas el espesor de estos suelos es bastante importante (aunque debido a la presencia de gran cantidad de piedras grandes que impedían continuar profundizando estos perfiles no conocemos exactamente el espesor de suelo), pese a la relación negativa que existe entre la pendiente y el espesor del suelo. Como ya comentamos en el capítulo 5 esta tesela constituye una excepción en las relaciones topografía-teselas, y ahora topografía-suelos.

Finalmente los suelos sobre las teselas PER y ANU, son los más evolucionados, pues se localizan sobre zonas con muy poca pendiente (0-10°), pedimentos y mesas, con gran capacidad de infiltración y tasas de erosión muy reducidas (Solé et al., 1997), son muy estables, además presentan amplias áreas de contribución de escorrentía (capítulo 5). La disponibilidad de agua es alta, lo que permite un lavado más eficiente de estos suelos y favorece la edafogénesis. Además las condiciones topográficas, como bajas pendientes, confieren una estabilidad a estos suelos que favorecen su desarrollo y permite la presencia una cubierta vegetal dominada por plantas superiores, que a su vez aporta materia orgánica al suelo, mejorando la estructura y la infiltración, además la cubierta vegetal limita la erosión, por la protección que constituye para el suelo y por su efecto de mejora de las propiedades físicas del suelo. Esta mejoras a su vez repercuten positivamente sobre la vegetación, pues la mejora de las condiciones hidrológicas del suelo o el aumento de materia orgánica se traduce en mayor disponibilidad de agua y nutrientes para la vegetación. Estas condiciones favorecen los procesos de lavado y lixiviación de sales, por lo que el yeso está lavado en todo el horizonte excepto en las proximidades de la marga. En algunos casos aparecen

horizontes cálcicos, hecho que se ve favorecido por las características topográficas de estas teselas y por la antigüedad de estas superficies. La presencia de estos horizontes cálcicos ponen de manifiesto la baja tasa de erosión a que están sometidas estas teselas (Wieder et al., 1985).

Sin embargo, aunque son bastante evolucionados con respecto al resto de los suelos de la zona, los procesos edafogénicos están limitados, por la escasez de lluvias, y probablemente por la existencia de costras en la mayoría de las teselas que limitan la infiltración del agua y los procesos de movilización de sales que es uno de los procesos edafogénicos predominantes

La concentración de iones solubles es más elevada en profundidad, lo que indica un lavado de sales, pero se observa una clara acumulación de sales en el horizonte más superficial, como resultado del ascenso y evaporación de agua del suelo, que transporta las sales disueltas y cuando se evapora el agua las sales se concentran en el horizonte superficial. La penetración del agua no es muy profunda (en estas teselas el frente de humectación determinado mediante simulaciones de lluvia, Solé et al., 1997, tras una lluvia de 55mm en 1 hora, no supera los 10 ó 12 cm en estas teselas), y posteriormente el agua con sales disueltas asciende capilarmente, inducida por la alta evaporación, y este ascenso capilar da lugar a una mayor concentración de sales en el horizonte superficial, como observan Zaidenberg et al.(1982) en suelos sobre margas al este de Samaria.

Se observan en algunos de los perfiles, cambios bruscos en la salinidad con la profundidad, no hay un aumento gradual, lo que se puede explicar por el carácter coluvial de estos suelos y en algún momento podrían haber tenido lugar movimientos laterales de agua y solutos dentro del suelo (Wieder, et al., 1985).

La relación de adsorción de sodio (SAR_p) está relacionado con la capacidad de dispersión que tiene el suelo y la susceptibilidad a la erosión (Imeson et al., 1982; Alexander et al., 1994). Por lo tanto, en general, la susceptibilidad a la dispersión no es demasiado elevada, sin embargo debemos tener en cuenta que estas medidas del SAR_p corresponden a una muestra de varios centímetros, y en los primeros milímetros la situación podría ser diferente, en un futuro deberá comprobarse.

Una característica general de los suelos de la mayoría de estas teselas es la existencia de una costra biótica o abiótica en los primeros milímetros de suelo con una estructura laminar, que se pone de manifiesto en fotos a microscopía óptica y en el predominio de poros elongados, así como la orientación de los mismos en los primeros milímetros de suelo. La mayor parte del área de macroporos la ocupan los poros elongados, más de la mitad del área y los poros más abundantes en número,

en torno al 70% son los poros redondeados de pequeño tamaño, buena parte de los cuales podrían tratarse de vacuolas de desgasificación originadas por el impacto de gotas de lluvias que atrapan el aire. La existencia de esta costra limita la infiltración en la mayoría de estas teselas (Mualen y Assouline, 1996; Morin et al., 1981; Helalia et al., 1988) y por lo tanto la edafogénesis.

Por otra parte, los altos contenidos en sales en estos suelos promueven cambios volumétricos importantes en la masa de suelo (Imeson et al., 1982). Además los bajos contenidos en materia orgánica y altos contenidos en sales, limitan la estabilidad de los agregados, y el repetido crecimiento y disolución de cristales de sal durante los procesos de humectación-deseccación, constituyen otro factor que afecta a la estructura, confiriendo al suelo menor resistencia a la erosión.

Las diferencias en las propiedades del suelo en las teselas, se explican por la topografía diferencial asociada a cada tesela, y como consecuencia por redistribución diferencial del agua. Como el flujo subsuperficial probablemente desempeña un papel minoritario en ambientes áridos, la escorrentía superficial puede considerarse el principal agente en la redistribución del agua, erosión y procesos de deposición (Yair, 1990). Es un requisito inicial comprender la hidrología de estas teselas y a escala de ladera el comportamiento integrado de estas unidades para entender los procesos edáficos que tienen lugar en las diferentes teselas, que se abordará en el capítulo 9.

6.5.-CONCLUSIONES

Las teselas que integran este paisaje están constituidas por suelos con características diferenciadas que condicionan el tipo de cubierta que presenta cada tesela, de manera que las teselas con suelos más evolucionados presentan una cubierta vegetal de plantas superiores, mientras que las teselas donde aflora el regolito están desprovistas de cubierta vegetal. La situación intermedia la constituye la tesela LIQ en la que el desarrollo edáfico es muy incipiente y solo la cubierta criptogámica tiene éxito en la colonización. Existen evidencias de que las cubiertas criptogámicas favorecen los procesos de agregación de suelo. Y cuando el desarrollo del suelo es mayor en zonas con la tesela LIQ, gracias al papel de la cubierta criptogámica favoreciendo la edafogénesis y limitando la erosión, entonces la vegetación superior es capaz de colonizar estas teselas.

Los suelos de la zona de estudio en general muestran un desarrollo reducido y es por un lado la escasez de lluvia la que limita los procesos edafogénicos y por otro el acostramiento en todas las teselas no vegetadas y en los espacios no

vegetados de las teselas con cubierta vegetal. Esta costra limita la infiltración y como consecuencia los procesos edafogénicos.

Las diferencias en las propiedades de suelo están relacionadas con la posición en el paisaje y en definitiva con las características topográficas asociadas a cada tesela y con la redistribución diferencial del agua. De manera que los procesos de lavado son más intensos en teselas donde topográficamente se favorece la acumulación de agua, y en estas teselas las sales más solubles como el yeso están prácticamente ausentes (solo aparece en horizontes profundos por la influencia del material parental que es una marga yesífera), mientras que los carbonatos se acumulan en zonas más profundas dando lugar en determinadas localizaciones a horizontes cálcicos. Asimismo las zonas con altas pendientes y potencial para la erosión presentan suelos jóvenes con características similares al material parental entre ellas la presencia de cantidades importantes de yeso y otras sales solubles que sólo aparecen lavadas en los primeros centímetros. Y por último destaca la presencia de horizontes gypsicos que están relegada a localizaciones en condiciones topográficas muy concretas.

CAPITULO 7

REGIMENES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO.

7.1.- INTRODUCCION

En el desierto del Negev las propiedades de la superficie del suelo constituyen el principal factor que controla la distribución de la humedad el suelo a varias escalas (Yair et al., 1980). En los ecosistemas áridos la variación en la disponibilidad de agua en el suelo puede ser una de las causas más importantes de la heterogeneidad espacial en las comunidades vegetales (Evenari et al. 1971). La disponibilidad de agua es el principal factor limitante en ambientes desérticos (Yair et al., 1989), porque constituye el principal control sobre el crecimiento de las plantas en los ambientes con estrés hídrico (Thornes, 1985). La humedad del suelo es una parte vital del ciclo hidrológico, en el que interviene proporcionando agua para el crecimiento de los ecosistemas vegetales, es un factor ambiental muy importante que limita el número y tamaño de especies de plantas perennes en las regiones áridas y semiáridas (Nash et al., 1991).

Estudios previos en la zona (Solé et al.,1997; Calvo et al.,1991b), demuestran que la generación de escorrentía no es uniforme en las diferentes superficies, sino que cada superficie presenta unos coeficientes de escorrentía y unas tasas de erosión características. Las diferencias en la distribución espacial de la escorrentía deben afectar a la variación espacial en la humedad del suelo y a la variabilidad en la distribución de comunidades vegetales (Yair et al., 1980) o de teselas. Una vez establecida la variabilidad en la distribución espacial de las teselas, en el capítulo 4, interesa analizar si la distribución espacial de las teselas está relacionada con diferentes patrones de humedad del suelo.

Muchos estudios han apuntado que entre los factores que gobiernan la distribución espacial de la humedad del suelo, en los horizontes superficiales los más importantes son: a) la topografía; b) el tipo de suelo y configuración; y c) la vegetación (Anderson y Burt, 1978; Sharma et al., 1980). Sin embargo la influencia

de estos factores, a menudo, se manifiesta de forma compleja y un único factor puede o no ser dominante. Por ello es difícil caracterizar el efecto de cada factor cuantitativamente (Zhang y Berndtsson, 1988), así en las investigaciones hidrológicas el área de estudio normalmente se subdivide en subáreas tales como laderas y valles para identificar el control topográfico de la humedad del suelo (Anderson y Burt, 1978; Anderson y Kneale, 1980; Berndtsson y Larson, 1987). Como la disponibilidad de agua es el factor limitante principal en este tipo de ecosistemas, para entender la distribución espacial de las teselas o unidades del terreno es necesario conocer la distribución espacio-temporal de la humedad del suelo. Por lo tanto será de gran interés estudiar los principales factores que controlan la distribución de la humedad en el suelo. En los tres capítulos anteriores se ha demostrado que las teselas se distribuyen espacialmente asociadas a la topografía, y que cada tesela presenta unas características de cobertura, topográficas y edáficas diferentes del resto, con lo que al estudiar la humedad del suelo en las diferentes teselas y en distintas posiciones dentro de cada tesela, se integran los principales factores que controlan la distribución espacial de la humedad del suelo.

En el Capítulo 5, las relaciones entre los atributos topográficos y la distribución espacial de las teselas, mostraron la existencia de unos patrones de distribución espacial relacionados, con la disponibilidad potencial de agua en el suelo, que a su vez estaba relacionada con los requerimientos de la tesela según el tipo de cobertura. Y en el Capítulo 6, se demostró que existe una relación muy importante entre el grado de desarrollo del suelo y el tipo de cubierta de la tesela. En este capítulo se tratará de estudiar si el contenido en agua del suelo medido en el campo, está relacionado con la cubierta de la superficie del suelo, con las características del suelo y si está de acuerdo con las predicciones topográficas, es decir si efectivamente la humedad del suelo es elevada donde se predecía topográficamente, pero sobre todo interesa comparar las diferencias en la humedad del suelo entre las teselas.

Por otra parte los procesos físicos, químicos y biológicos de un ecosistema están fuertemente influenciados por la temperatura. El valor de la temperatura del suelo en cualquier momento y la forma en que varía en el espacio y en el tiempo, son factores de importancia primaria en la determinación de las tasas y direcciones de los procesos físicos del suelo y del intercambio de energía con la atmósfera. La temperatura también gobierna los tipos y velocidades de las reacciones químicas que tienen lugar en el suelo. Finalmente, la temperatura del suelo influye en los procesos biológicos tales como germinación de semillas y crecimiento, desarrollo

radicular y actividad microbiana (Hillel, 1980). Como consecuencia, la cobertura de las teselas y las características de sus suelos se van a ver influenciados por la temperatura del suelo.

La humedad del suelo es un factor clave en determinar la respuesta de la escorrentía superficial ante una precipitación dada (Fitzjohn et al. 1998). Según Phillips (1992) la escorrentía y la humedad del suelo son variables interdependientes y sin información acerca de la variabilidad de la humedad del suelo la predicción e interpretación de la respuesta hidrológica de una cuenca es problemática. En el capítulo 9 se investiga como contribuyen las teselas o unidades del terreno a la respuesta total de a escala de microcuenca, por lo que será necesario conocer como varia la humedad del suelo de una tesela a otra y las variaciones dentro de una misma superficie.

Objetivos:

1.- Describir y comparar los regímenes de humedad y temperatura del suelo de las teselas más representativas, a diferentes escalas temporales: anual, estacional, de evento y diaria, para entender su distribución espacial.

2.- Relacionar las posibles diferencias de la humedad y temperatura del suelo entre las cubiertas de las teselas, con las características del suelo, y con atributos topográficos.

3.- Construir sencillos modelos de predicción de la humedad del suelo en las diferentes teselas para disponer de una estimación de la humedad antecedente, y poder incluir esta variable en un modelo de generación de escorrentía.

7.2.- METODOLOGIA

7.2.1.- Regímenes de humedad y temperatura del suelo.

La humedad y temperatura del suelo se miden mediante un nuevo sensor desarrollado en la E.E.Z.A. que determina la humedad y temperatura del suelo en continuo, basado en una técnica denominada Puente de Impedancia Auto Equilibrado mediante "chopping" (*SBIB-CHS, Self Balanced Impedance Bridge, Chopped Stabilized*), de bajo coste y no destructivo que permite la determinación del contenido volumétrico de la humedad del suelo (Vidal, S. 1994). La técnica se basa en la medida de la impedancia eléctrica compleja presentada por dos o más electrodos inmersos en el material de prueba y que constituye el dieléctrico de separación. La constante dieléctrica del suelo seco es baja (2 a 4) mientras que la del agua es muy alta (≈ 80), por lo que la constante dieléctrica del suelo húmedo

está fuertemente condicionada por el volumen de agua presente. La impedancia determinada mediante el autoequilibrado del puente, mide, asimismo, la constante o permitividad dieléctrica compleja del medio a la frecuencia empleada, cuyos valores real e imaginario determinan respectivamente el grado de humedad y conductividad del suelo (Vidal et al. 1996).

Esta sonda se conecta a un *datalogger* (CR10, Campbell Scientific Ltd. Loughborough, U.K.), al que previamente se le colocan unas resistencias que divide a la mitad el voltaje, que transmite la sonda, pues supera la capacidad del *datalogger*. Mediante un programa (desarrollado por F. Domingo, 1995, no publicado), se ordena al SBIB que tome una lectura de humedad y temperatura cada 15 minutos. El programa permite que cada 15 minutos la sonda reciba la energía suficiente, procedente de una batería de 12V, y comienza a tomar lecturas continuas de humedad y temperatura durante 2 minutos, para finalmente almacenar en el datalogger el promedio de las humedades o temperaturas registradas en el último minuto (el primer minuto sirve de margen para conectar las sondas). El voltaje se transforma en contenido volumétrico de agua en el suelo a través de una ecuación de calibración, específica para cada sonda.

Se colocaron (25) sondas en 3 laderas cubiertas por los tipos de teselas más representativos de la zona de estudio. La humedad se mide a 3cm de profundidad, excepto en la tesela PER donde se mide a 3cm de profundidad y a 15cm de profundidad. En el resto de las superficies sólo medimos la humedad a 3cm por motivos de disponibilidad de sondas y *dataloggers*, en cualquier caso en las superficies MAR y LIQ, no es tan importante medir la humedad a 15cm pues a esta profundidad no hay suelo, sólo un regolito margoso con grandes fragmentos de marga que aumentan de tamaño con la profundidad, como vimos en el capítulo anterior. En cada punto de muestreo se colocan 3 sondas (3 repeticiones) separadas unos 10cm entre si. Se estudian 3 laderas:

La ladera A está integrada por dos tipos de teselas: LIQ, en la parte alta de la ladera, y PER en la parte baja de la ladera. Se colocan de la siguiente forma:

- en la parte alta de la ladera, aparece la tesela LIQ y se colocan tres sondas a 3cm de profundidad.
- en la parte baja de la ladera, pedimento de la ladera, aparece la tesela PER. Se muestrea a 2 profundidades tres sondas a 3cm y otras tres a 15cm. Las sondas se sitúan en diferentes posiciones, bajo planta en claros y en posición intermedia entre claro y planta, tanto las situadas a 3cm como las situadas a 15cm.
- en posición intermedia, entre la parte alta y baja de la ladera, se coloca una sonda en una zona con abundantes plantas anuales.

La ladera B está íntegramente constituida por la tesela MAR. Se establecen 3 puntos de muestreo:

- en la parte alta de la ladera (MAR1) se colocan 3 sondas (3 repeticiones)
- en la parte media de la ladera (MAR2) se coloca una sonda.
- y en la parte baja de la ladera (MAR3) 3 sondas.

En la ladera C aparece la tesela STI. Se muestrean 3 posiciones topográficas diferentes en la ladera.

- parte alta de la ladera (STI1): 3 sondas.
- parte media de la ladera (STI2): 3 sondas.
- parte baja de la ladera (STI3): 2 sondas.

Con respecto a la temperatura del suelo sólo fue posible medir la temperatura del suelo en una de las sondas de las 3 repeticiones de cada punto de muestreo, por razones de limitación de *dataloggers*, de vez en cuando se tomaron 2 medidas de temperatura, en cada punto de muestreo, para comprobar que eran similares.

El muestreo se realizó en el periodo comprendido del 7 de Julio de 1996 al 16 de Diciembre de 1997. Durante este tiempo en alguna ocasión se perdieron algunos datos correspondientes a alguna sonda, o por algún fallo de batería, durante unos pocos días se malograron los datos de toda una ladera, pero fueron casos excepcionales, en general el sistema funcionó muy bien.

En cada punto de muestreo se hace el promedio de las humedades registradas por las 3 sondas, es decir las 3 repeticiones, y con este valor se hacen las comparaciones entre las distintas posiciones en una ladera.

Para comparar las distintas teselas se promedian las humedades medidas en los diferentes puntos de muestreo, a 3cm de profundidad, para cada tesela.

Cuando se quiere comprobar si existen diferencias significativas entre puntos de muestreo se hacen análisis de la varianza de los promedios diarios.

El estudio de las relaciones entre las humedades estacionales medias y los atributos topográficos y características del suelo se lleva a cabo mediante matrices de correlación, usando el coeficiente de correlación de Pearson.

Para comparar la humedad o temperatura del suelo con la radiación extraterrestre de onda corta horaria o con el resto de atributos topográficos, calculados para toda la zona de estudio en el capítulo 5, se georreferencian los puntos donde se sitúan las sondas de humedad y temperatura (SBIBS) y se crean máscaras para cada punto donde existe una sonda (imágenes donde el punto presenta el valor 1 y el resto de la imagen correspondiente al resto del territorio

presenta un valor 0). Cada una de estas máscaras se superpone a las imágenes de radiación o de cualquier atributo topográfico (imágenes correspondientes a todo el área de estudio) para extraer el valor del atributo topográfico topográfico en el punto donde se localiza la sonda.

7.2.2.- Predicción de la humedad del suelo.

Se genera un modelo de regresión múltiple que permite conocer la humedad media diaria del suelo a 3cm de profundidad en las 4 teselas estudiadas conociendo la distribución de las precipitaciones y la media diaria de: la radiación global sobre la zona, la temperatura del aire y la velocidad del viento.

Se desarrolla en dos partes, a partir de los datos de humedad disponibles para un año y medio se calcula:

- cómo cambia la humedad del suelo con la precipitación.
- y la pérdida de humedad después de un evento en función del número de días que van transcurriendo y de los promedios diarios de radiación global, temperatura del aire y velocidad del viento.

Se trabaja a escala diaria, a menor escala no tiene interés trabajar porque la finalidad es predecir la humedad antecedente a una lluvia para incluirla en un modelo de simulación de escorrentía y proporcionar la humedad a escala horaria no mejoraría el modelo, mientras que si supondría un volumen mucho mayor de datos que tratar. Se usa la humedad diaria media de las distintas posiciones de una tesela. Para cada tesela se generan modelos distintos.

La primera parte consiste en obtener una ecuación que nos permita calcular el aumento de la humedad del suelo con la precipitación. Este cambio viene controlado por la cantidad de agua que aporta la lluvia, así como por el agua que contenía el suelo previamente y por las características físicas del suelo, el contenido en materia orgánica del suelo o el tipo de cobertura que tenga la tesela, en nuestro caso dentro de un mismo tipo de tesela excepto los dos primeros factores el resto se mantienen más o menos constantes. Para predecir cómo aumenta la humedad del suelo en cada tipo de tesela tras un evento, se determina la ecuación que estima el aumento en la humedad del suelo en cada tesela (en milímetros) a partir de los milímetros de precipitación sobre la superficie y de su humedad antecedente. Esta ecuación se calcula a partir de los eventos de precipitación y humedad del suelo medida durante el año y medio de estudio.

La segunda parte del modelo consiste en encontrar una ecuación capaz de predecir como se seca el suelo tras un evento. Se estiman estas curvas de secado del suelo para cada tesela como una función del tiempo que va transcurriendo

desde la lluvia y como en el secado del suelo influyen variables climáticas como la insolación, la temperatura o la velocidad del viento, estas variables (medias diarias) se incluyen en el.

Las ecuaciones de secado se ajustaron mejor cuando se calculaban ecuaciones para cada estación del año. A partir de los datos reales, para cada tesela, se agrupan los promedios diarios de humedad del suelo por estación. Y a partir de las curvas de secado del suelo de diferentes lluvias dentro de una misma estación y de las variables climáticas (insolación, temperatura y velocidad del viento) se calculan las ecuaciones de secado del suelo para cada estación del año y para cada tesela.

De esta manera se puede predecir para cada tipo de tesela como va evolucionando la humedad del suelo a lo largo del tiempo, conociendo la distribución de la lluvia, el tiempo y las variables temperatura, radiación y velocidad del viento. Una lluvia supone un aumento de la humedad del suelo para cada tipo de tesela, que viene dado por las ecuaciones de la primera parte del modelo. Después del evento el suelo se va secando según las ecuaciones de la segunda parte del modelo hasta una nueva lluvia.

7.3.-RESULTADOS

7.3.1.-Humedad del suelo.

El principal objetivo de este capítulo es describir y comparar los patrones de humedad del suelo de las diferentes teselas y relacionarlos con el tipo de cobertura de esa tesela, así como con las propiedades del suelo y topográficas.

Para conocer como influye la disponibilidad de agua a lo largo del año en el tipo de cubierta de la tesela y en su distribución espacial, se estudian los regímenes de humedad del suelo durante un año y medio muy detalladamente para cada tesela y se comparan en las 4 teselas estudiadas. Dentro de cada tesela se estudia la variabilidad de la humedad del suelo en función de la posición topográfica y en el caso de la tesela PER la variabilidad en función de que se trate de un claro o bajo planta.

Con el objeto de relacionar los regímenes de humedad del suelo con los factores que los controlan como son las propiedades del suelo o la topografía es necesario resumir los datos de humedad (cada 15 minutos) para que sea más sencillo investigar las relaciones. Por ello se estudian los regímenes estacionales de la humedad del suelo en cada tesela y con los promedios de humedad estacionales se analizan estas relaciones.

7.- Humedad del suelo

Finalmente no debemos olvidar que el control primario sobre la humedad del suelo es la precipitación, de manera que es necesario estudiar cómo responde la humedad del suelo de cada tipo de tesela ante eventos de precipitación de diferentes características.

7.3.1.1.- Características generales de la humedad del suelo en las diferentes teselas. Escala anual.

En primer lugar vamos a describir en líneas generales la humedad del suelo para cada ladera y/o tipo de tesela.

La ladera A incluye las teselas PER y LIQ. La ladera A es una ladera típica orientada al N-E donde en la parte alta de la ladera se localiza la tesela LIQ, y en la parte baja aparece la tesela PER. Entre ambas, en la parte media, aparece una zona poco extensa con abundantes anuales, que corresponde a lo que llamamos tesela ANU, con una sola sonda para controlar esta posición media.

7.3.1.1.1.- Ladera A. tesela PER

La tesela PER muestra diferencias en la humedad del suelo a 3cm en función de que se mida bajo una planta o en un claro (los claros en esta superficie están constituidos por suelo desnudo acostrado y algunas plantas anuales, la más abundante *Stipa capensis*). La humedad del suelo siempre se mantiene más elevada bajo planta que en los claros, como se observa en la figura 7.1, con la excepción de algunas precipitaciones de pequeño volumen que provocan un aumento de la humedad del suelo en los claros y bajo planta puede no aumentar la humedad del suelo o que el aumento sea considerablemente menor que en el claro, debido a que la mayor parte de la precipitación es interceptada por la planta y no llega agua al suelo y en estos casos la humedad del suelo en los claros es más elevada durante algunos días que bajo la planta.

Las diferencias entre claros y plantas también se ponen de manifiesto cuando se comparan los promedios, máximos y mínimos anuales de la humedad del suelo. La tabla 7.1 muestra que el promedio, máximo y mínimo anuales de la humedad del suelo a 3cm de profundidad son menores en claros que bajo planta.

También se calcula el número de días del año en que la humedad volumétrica del suelo se situaba entre 7.37% y 36.84%, que corresponden al volumen de agua retenida por el suelo en las proximidades de la sonda a potenciales de -0.33 y -15bares respectivamente, es decir cuando hay lo que denominan “agua disponible” o “agua útil” (Martin de Santa Olalla y de Juan, 1993). En los claros, a 3cm de profundidad, durante el primer año de muestreo hay agua disponible para las plantas menos días, que bajo planta.

	Posición	Promedio	Coef. Var.	Máx.	Mín.	-33kPa>H>-1500kPa	H<-1500kPa
3 cm	Claro	11.61	57.62	35.64	0.94	257	108
	Bajo planta	13.23	52.07	35.24	2.33	279	86
15 cm	Claro	13.42	52.37	33.87	1.38	268	97
	Bajo planta	16.42	41.89	37.37	5.37	294	71

Tabla 7.1. Muestra para la tesela PER los valores promedios, coeficientes de variación, máximos y mínimos anuales de la humedad del suelo a 3 y 15 cm, en porcentaje volumétrico, correspondientes al periodo 8/7/96 hasta 7/7/97, primer año del total del periodo. $-33\text{kPa} > H > -1500\text{kPa}$ es el número de días del año con humedad entre el volumen de agua que retiene este suelo cuando se somete a un potencial de -33kPa y el volumen de agua retenido a un potencial de -1500kPa . $H < -1500\text{kPa}$ es el número de días del año con humedad volumétrica menor al volumen de agua que retiene este suelo cuando se somete a un potencial de -1500kPa .

Existen diferencias entre la humedad del suelo a 3cm y a 15cm. Tanto en los claros como bajo planta, la humedad a 15cm es superior a la registrada a 3cm, hecho que se observa tanto cuando la humedad del suelo es elevada, en épocas lluviosas, como cuando es muy baja, como se puede comprobar en la figura 7.2.

En los claros la humedad del suelo a 15cm, en algunas ocasiones, sobre todo en verano, es inferior a la humedad del suelo a 3cm bajo planta, este hecho da idea de lo importante que es el efecto de la planta.

En los claros a 15cm los promedios, máximos y mínimos anuales son inferiores a los medidos bajo planta a dicha profundidad y el promedio anual a 15cm en los claros es prácticamente igual al promedio anual bajo planta a 3cm, como se puede comprobar en la tabla 7.1.

El número de día del año con humedad entre 8.85% y 36.71% que corresponden respectivamente a los volúmenes de agua retenida por el suelo a 15cm a potenciales de -1500 y -33kPa es mayor bajo planta a 15cm.

No hay ningún día en el año donde el promedio diario sea superior a la capacidad de campo, en ninguna de las posiciones ni a ninguna de las dos profundidades. Esto hace pensar que la saturación, cuando ocurre, dura poco tiempo.

La figura 7.2 permite observar como el suelo a 3cm de profundidad se seca más rápidamente que a 15 cm, en claros y bajo planta, sin embargo en periodos de sequía el suelo a 15cm puede llegar a contener menos humedad en los claros que el suelo bajo planta a 3cm.

7.- Humedad del suelo

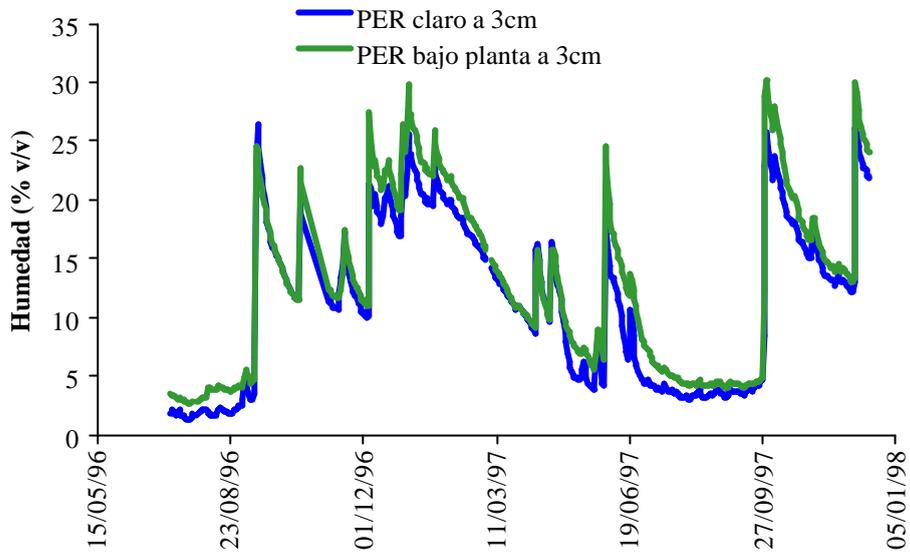


Figura 7.1: Regímenes de la humedad del suelo en diferentes posiciones (bajo la planta y claro), a 3cm de profundidad en la tesela PER , para todo el periodo de estudio.

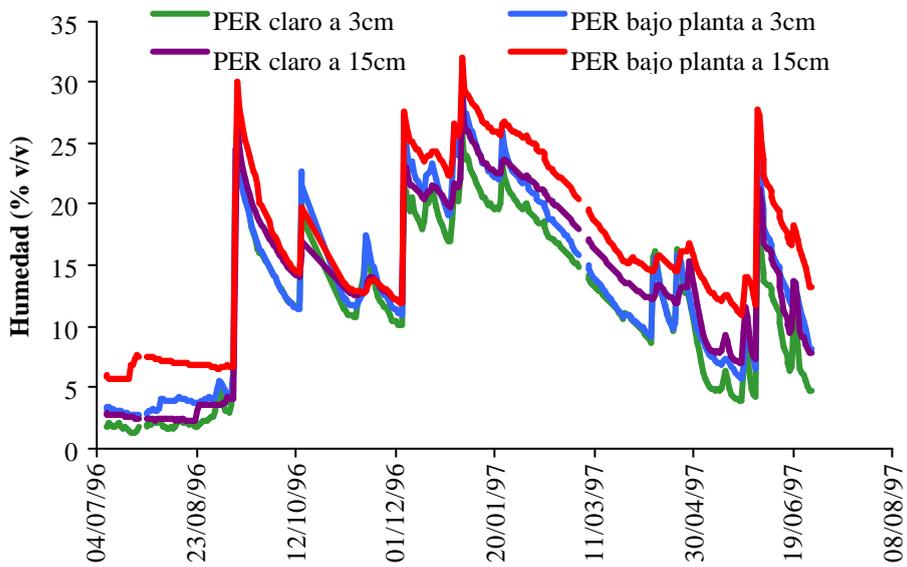


Figura 7.2: Regímenes de la humedad del suelo en diferentes posiciones (bajo la planta y claro) y profundidades (a 3cm y a 15cm) en la tesela PER , para el primer año de estudio.

Para demostrar estadísticamente si existen diferencias significativas entre la humedad en claros o bajo la planta y a dos profundidades se hace un análisis de la varianza de la humedad media diaria para el año y medio de muestreo y el resultado es que la humedad es significativamente diferente en los 4 puntos de muestreo, con $F(3,2008)=17.72$ y $p<0.0000$. Cuando se comparan dos a dos las diferentes posiciones haciendo un test de la mínima diferencia significativa se obtiene que existen diferencias significativas entre la humedad bajo planta y en claro a 3cm de profundidad y a 15cm de profundidad. Asimismo la humedad bajo planta a 3cm es significativamente diferente de la humedad en dicha posición pero a 15cm de profundidad, e igual ocurre en los claros. Sin embargo no son significativamente diferentes la humedad bajo planta a 3cm de profundidad frente a la humedad de claros a 15 cm de profundidad como muestra la tabla 7.2.

	PER claro 3cm	PER planta 3cm	PER claro 15cm	PER planta 15cm
PER claro 3cm		0.0009	0.0105	0.0000
PER planta 3cm	0.0009		0.4385	0.0001
PER claro 15cm	0.0105	0.4385		0.0000
PER planta 15cm	0.0000	0.0001	0.0000	

Tabla 7.2: Probabilidades para test de la mínima diferencia significativa entre las 4 posiciones muestreadas en la tesela PER

La protección que constituye la capa de suelo de 15cm, a las pérdidas por evaporación, explicaría los mayores contenidos en agua en el suelo a 15cm. Además la distribución granulométrica del suelo a 15 cm de profundidad en los pedimentos favorece el mayor contenido de agua en el suelo a esta profundidad más que a 3cm, dado que es mayor el porcentaje de arcilla (19.12% de arcilla a 15cm y 11.4% a 3cm), y menor el porcentaje de arenas (25.88% de arena a 15cm y 32.05% de arena a 3cm), sin embargo la porosidad es bastante similar, incluso menor a 15cm (53.34% a 3cm y 52.93% a 15cm) y el contenido en materia orgánica es menor a 15cm (0.97%) que en superficie (2.6%), en ambos casos se han promediado los contenidos en claro y bajo planta.

7.3.1.1.2.- Ladera A. tesela LIQ.

Cuando la humedad del suelo es baja, en la tesela LIQ la humedad a 3cm de profundidad suele ser superior a la humedad observada en la tesela PER, sin embargo, tras las precipitaciones el suelo en LIQ tiende a secarse antes que el suelo de PER tanto de los claros como bajo planta.

Cuando se compara el promedio de humedad diaria de las 3 sondas situadas en la tesela LIQ a 3cm de profundidad, con la humedad diaria a 3cm en las diferentes posiciones en la tesela PER (bajo planta y claro) se observa que el suelo

7.- Humedad del suelo

de la tesela LIQ tiene tendencia a secarse más rápidamente, pero sin embargo en las épocas de estío la humedad en LIQ se mantiene por encima de la humedad a 3cm de PER (figura 7.3).

El promedio anual registrado para el primer año de muestreo fue 15.07% (máximo 36.24% y mínimo 3.96%) valores que ponen de manifiesto las diferencias ya señaladas con respecto a la tesela PER, como se puede observar en tabla 7.3. Los valores de humedad anuales en cada superficie corresponden al promedio (para todas las sondas situadas en cada superficie) de las medias diarias de humedad de cada sonda. Y con los promedios diarios de humedad se calcula el número de días que supera la humedad retenida por el suelo correspondiente a cada superficie al someterlo a un potencial de 1500 kPa. A partir de los valores de humedad cada 15 minutos se calcula el valor máximo y mínimo de los registrados para el total de sondas en cada superficie.

En LIQ la humedad del suelo se mantiene bastante elevada durante todo el año. En el primer año de muestreo, se observa que en 296 días del año, el suelo presentaba una humedad volumétrica por encima de 8.068% que corresponde al volumen de agua retenido en el suelo a un potencial de -1500 kPa, y el resto de los días del año la humedad era inferior. Durante 279 días la humedad del suelo estuvo comprendida entre 8.068% y 26.30%, existía “agua útil” para las plantas y durante 17 días la humedad estuvo por encima de la capacidad de campo (26.30%), lo que implica que durante esos días hubo drenaje y lavado.

	Promedio	Coef. Var.	Máx.	Mín.	-33kPa>H>1500kPa	H<-1500kPa
PER	12.42	54.37	35.64	0.94	264	101
LIQ	15.08	45.19	36.24	3.96	279	69
MAR	6.90	69.25	25.47	0.55	124	241
STIPA	11.96	58.88	30.63	1.82	225	140

Tabla 7.3: Valores promedios, coeficientes de variación, máximos y mínimos anuales, de la humedad del suelo a 3cm, en porcentaje volumétrico, correspondientes al primer año del total del periodo muestreado. -33kPa>H>-1500kPa es el número de días del año con humedad entre el volumen de agua que retiene este suelo cuando se somete a un potencial de -33 kPa y el volumen de agua retenido a un potencial de -1500 kPa: H<-1500kPa es el número de días del año con humedad menor al volumen de agua retenido a un potencial de -1500 kPa.

Para comprender los patrones de humedad del suelo observados en LIQ hay que tener en cuenta varios factores. Por un lado la tesela LIQ se localiza en zonas donde debido a la orientación, a la pendiente y a los efectos de las sombras, la radiación solar extraterrestre de onda corta sobre LIQ es menor que sobre las teselas PER (de hecho el promedio diario total puede ser hasta menos de la mitad

en otoño o invierno, lo cual favorece la conservación del agua). Por otro lado en cuanto a las características del suelo, aunque el suelo de las teselas LIQ está constituido por partículas más finas, contiene más arcilla y limo que el suelo de las teselas PER y el volumen total de poros es mayor en LIQ, pero sin embargo la estructura del suelo está mucho menos desarrollada, la agregación es incipiente en LIQ, por lo que no va a favorecer la retención de agua, esto se pone de manifiesto cuando se observan los valores de volumen de agua retenida a -33 kPa (C.R.-33kPa) y a -1500 kPa (C.R.-1500kPa) presentados en la tabla 7.4.

	Arena(%)	Limo(%)	Arcilla(%)	Poros(%)	M.O.(%)	CR -33kPa	CR -1500kPa
PER	29.62	54.56	15.82	53.70	3.39	36.71	8.85
LIQ	20.80	58.90	20.30	63.14	1.18	26.30	8.07
MAR	17.95	62.55	19.50	54.72	0.98	24.57	8.37
STIPA	45.24	40.59	14.17	54.39	0.93	31.07	8.01

Tabla 7.4: Valores promedio de composición granulométrica del suelo, volumen total de poros, contenido en materia orgánica (promedio entre claro y planta en PER) y contenido volumétrico de agua en el suelo a -33 kPa (CR -33kPa) y a -1500 kPa (CR -1500kPa), para los perfiles donde se muestrea la humedad de cada tesela.

7.3.1.1.3.- La ladera B. tesela MAR.

Dentro de la tesela MAR los valores de humedad muestran diferencias según se trate de la parte alta o baja de la ladera. En la parte alta de la ladera la humedad del suelo aparece durante todo el periodo muestreado por encima de la humedad registrada en la parte baja de la ladera, aproximadamente entre un 1 y 2% superior (a veces hasta 4 ó 5%), como pone de manifiesto la figura 7.4, con la excepción de los picos de humedad, es decir cuando el suelo está saturado los contenidos en agua en el suelo son muy similares en la parte alta y baja de ladera, así como cuando comienza la curva de secado, es decir los primeros días tras el evento.

Un análisis de la varianza muestra que las medias diarias de humedad en la parte alta de la ladera son significativamente diferentes de las de la parte baja de la ladera ($F(1,944)=16.97$ $p=0.0000$)

La humedad media anual es de 7.49% en la parte alta de la ladera y 6.31% en la parte baja de la ladera sur.

El máximo detectado en la parte alta de la ladera para todo el periodo muestreado es 26.37%, y el mínimo 0.76%.; en la parte baja de la ladera el máximo fue 24.60%, y el mínimo 0.2%.

7.- Humedad del suelo

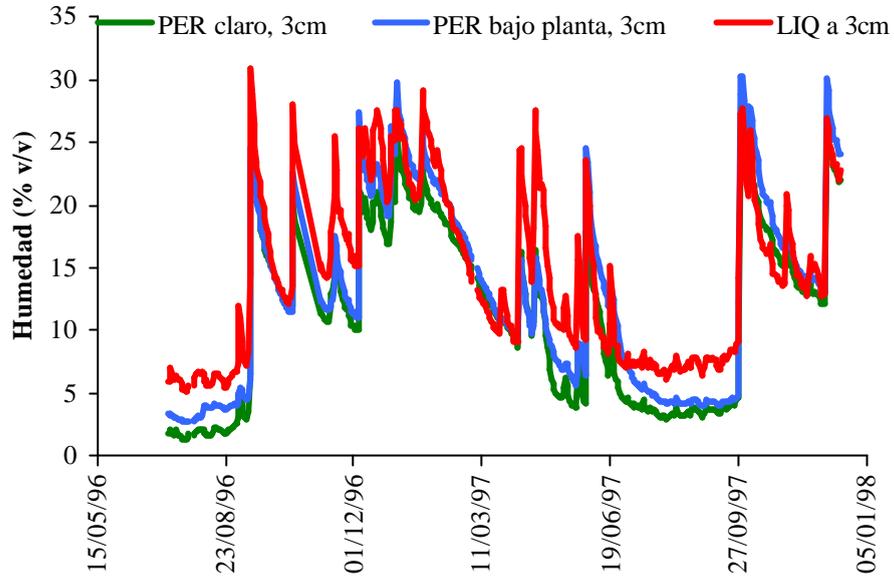


Figura 7.3: Regímenes de la humedad del suelo a 3cm de profundidad en diferentes posiciones (bajo la planta y claro) en la tesela PER y en la tesela LIQ, para todo el periodo de estudio.

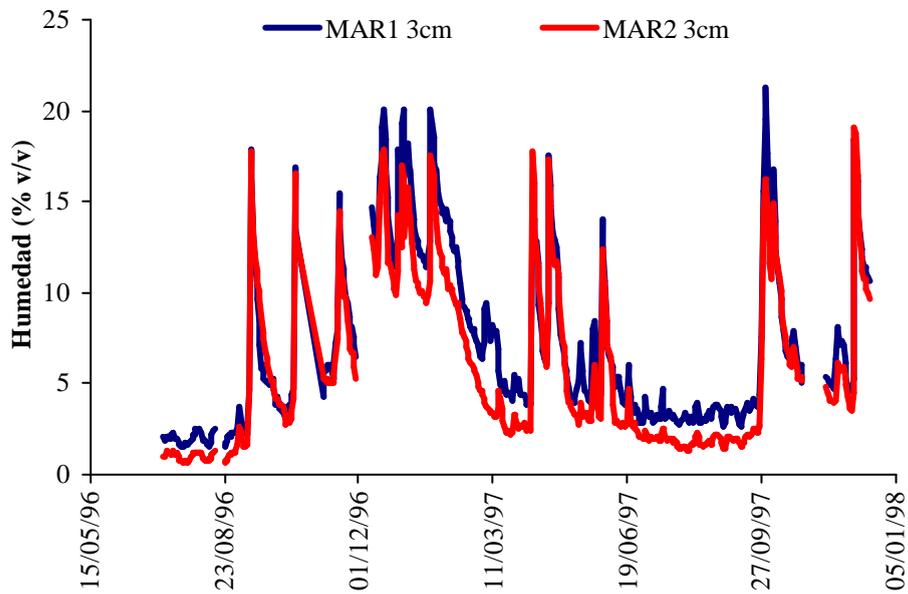


Figura 7.4: Regímenes de la humedad del suelo a 3cm de profundidad en diferentes posiciones topográficas de la ladera B con la tesela MAR, para todo el periodo de estudio. MAR1 corresponde a la parte alta de la ladera y MAR2 a la parte baja de la ladera.

Y para la ladera en general, es decir considerando a la vez ambas posiciones topográficas (promedio de todas las sondas), los valores de humedad media anual, máximo y mínimo se presentan en la tabla 7.3 así como el número de días en que la humedad del suelo fue superior al volumen de agua retenido cuando se somete el suelo a un potencial de -1500kPa (8.37%) e inferior al volumen retenido cuando se somete a un potencial de -33 kPa (24.57%) y el número de días con humedad superior al volumen de agua retenido por ese suelo cuando se somete a un potencial de -1500kPa . Se observa que los valores promedio, máximos y mínimo son bastante inferiores a los del resto de las teselas y el número de días con “agua disponible” para las plantas es menos de la mitad que para las otras teselas. Ningún día la humedad media diaria estaba por encima de 24.57%.

El régimen de la humedad del suelo en este tipo de tesela es bastante diferente de los correspondientes a las teselas PER y LIQ, como pone de manifiesto la figura 7.6, donde se observa como la humedad del suelo a 3cm en MAR se mantiene siempre inferior a las de PER y LIQ, tanto los picos de saturación como las curvas de secado. La diferencia es más acentuada cuando el suelo está mojado, que cuando está seco, en este último caso aunque la humedad del suelo es menor que para el resto de las teselas, solo lo es en un 1 ó 2%, aunque para porcentajes tan bajos de humedad puede significar que la humedad en MAR sea la mitad o inferior que en las otras teselas.

Las características del suelo no son muy diferentes de las de los líquenes en cuanto a la composición granulométrica, pero la estructura es diferente. El suelo de MAR no es un suelo estructurado, sino un regolito margoso con capacidad para retener agua muy limitada, mientras en LIQ, existe una estructura incipiente, lo que hace que la capacidad de retención de agua sea algo mayor, aunque la verdadera diferencia la constituye la ausencia total de cobertura vegetal en MAR, que provoca que la evaporación sea mucho mayor que en LIQ, donde la cubierta criptogámica va a desempeñar un papel fundamental en la conservación de la humedad del suelo.

7.3.1.1.4.- Ladera C. tesela STI

Existen claras diferencias en la humedad del suelo en la ladera C en función de la posición topográfica. La figura 7.5 muestra como la humedad en la parte alta de la ladera (STI1) se mantiene más elevada que en la parte media (STI2) y que en la parte baja de la ladera (STI3) cuando la humedad del suelo es baja, sin embargo cuando llueve y la humedad es elevada, hay pocas diferencias entre las tres posiciones topográficas. La curva de secado es más rápida (mayor pendiente) en la parte media y baja de la ladera, el suelo se seca más rápidamente,

7.- Humedad del suelo

pues la insolación en estas zonas es mayor.

Las diferencias entre las tres posiciones topográficas también se ponen de manifiesto cuando se comparan los promedios, máximos y mínimos anuales así como el número de días en el año con agua disponible para las plantas, lo que se aprecia en la tabla 7.5.

Posición	Promedio	Coef. Var.	Máx.	Mín.	-33kPa>H>-1500 kPa	H<-1500kPa
STI 1	13.33	48.31	33.15	3.7	235	130
STI 2	11.38	65.97	29.92	1.31	205	160
STI 3	11.13	66.49	33.1	0.9	225	140

Tabla 7.5: Valores promedios, coeficientes de variación, máximos y mínimos anuales, de la humedad del suelo a 3cm, en porcentaje volumétrico, correspondientes al primer año del total estudiado, para distintas posiciones topográficas de la ladera C, parte alta (Stipa1), media (Stipa2) y baja (Stipa3). -33kPa>H>-1500kPa corresponde al número de días del año con humedad entre el volumen de agua que retiene el suelo cuando a un potencial de -33 kPa y el volumen de agua retenido a un potencial de -1500kPa. H<-1500kPa es el número de días del año con humedad menor al volumen de agua retenido a un potencial de -1500kPa.

STI1 y STI3 no presentaron ningún día una humedad media diaria por encima del volumen de agua retenido a -33 kPa, mientras en que STI2 durante 33 días del primer año de muestreo, su humedad media diaria fue superior a dicho valor.

Un análisis de la varianza demuestra que la humedad es significativamente diferente en las tres posiciones ($F(2,1377)=10.21$ $p=0.0000$): la humedad en STI2 y STI3 no son significativamente diferentes entre si ($F(1,918)=0.076$ $p=0.78$), mientras que STI1 si es significativamente diferente de STI2 ($F(1, 918)= 18.44$ $p=0.0000$) y STI1 es significativamente diferente de STI3 ($F(1,918)=14.44$ $p=0.0002$).

Las diferencias en la humedad del suelo entre la parte alta (STI1) y la parte media y baja de la ladera STI2 y STI3 se explican si nos fijamos en la composición granulométrica del suelo en cada punto de muestreo de la humedad. El suelo en la parte baja y media de la ladera se caracteriza por el alto contenido relativo en arena, y como consecuencia menor capacidad para retener agua. En la tabla 7.6 se comprueba que la capacidad para retener agua es siempre más baja en STI2, pero en STI3, es más baja para potenciales bajos.

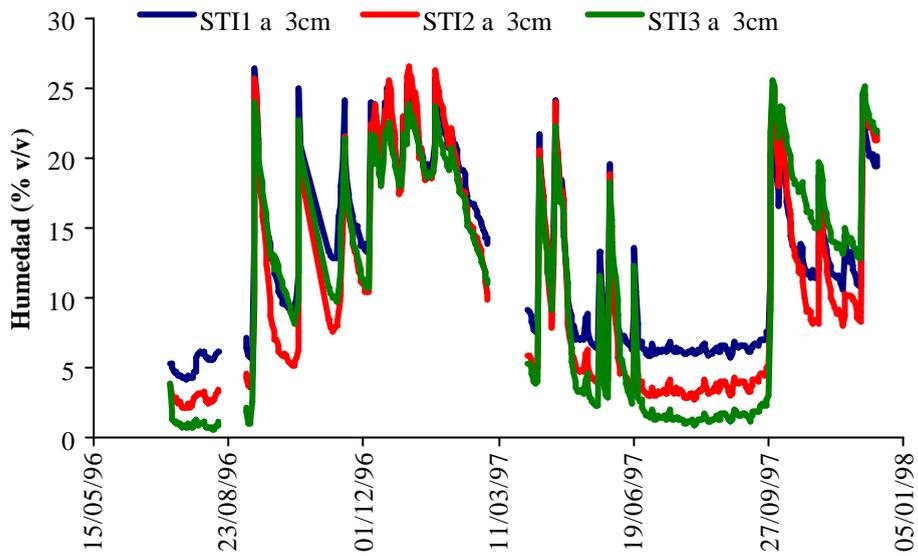


Figura 7.5: Regímenes de la humedad del suelo (media diaria) a 3cm de profundidad en diferentes posiciones topográficas de a ladera C con la tesela STI para todo el periodo de estudio. STI1 corresponde a la parte alta de la ladera, STI2 a la parte media y STI3 a la parte baja de la ladera.

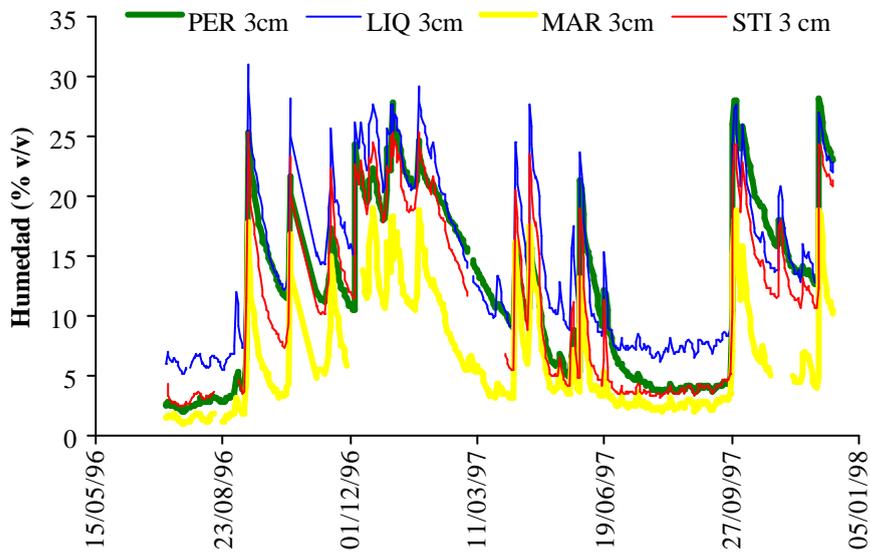


Figura 7.6: Regímenes de la humedad del suelo (media diaria) a 3cm de profundidad en diferentes teselas. Para cada tesela se calcula el promedio del total de sondas situadas sobre la misma.

7.- Humedad del suelo

Posición	Arena(%)	Limo(%)	Arcilla(%)	Poros(%)	M.O.(%)	C.R -33 kPa	C.R -1500kPa
STI 1	20.92	57.42	21.66	59.2	0.36	31.88	9.14
STI 2	57.09	30.88	12.03	52.33	1.58	22.27	7.42
STI 3	39.44	46.97	13.59	50.57	1.17	39.07	7.45

Tabla 7.6: Valores promedio de composición granulométrica del suelo, volumen total de poros, contenido en materia orgánica y el contenido volumétrico de humedad a potenciales de -33kPa (C.R -33kPa) y a -1500 kPa (C.R -1500kPa), para los perfiles donde se muestrea la humedad de cada tesela.

Las características del suelo en las distintas posiciones topográficas de STI explican los patrones observados en el figura 7.5, que muestra que STI3 cuando llueve y la humedad del suelo es elevada, presenta contenidos de agua en el suelo muy próximos a los de STI1, mientras que en verano, cuando la humedad del suelo es muy baja (potenciales bajos), STI3 presenta una humedad muy baja, inferior a STI1 y STI2, pues el suelo de STI3 tiene menor capacidad para retener agua a potenciales bajos. Otro factor que interviene es la insolación que es mayor en la parte baja de la ladera que en la parte alta, lo que favorece que se seque el suelo más rápidamente en esta posición.

La figura 7.6 muestra los regímenes de humedad del suelo en las 4 teselas estudiadas. Para cada unidad se promedian el total de sondas sobre la misma y se calculan los promedios diarios que son los representados en la figura 7.6 para todo el periodo de estudio.

Se comprueba que la tesela MAR presenta los menores contenidos en humedad a lo largo de todo el año. STI, se diferencia perfectamente de las demás teselas y es más similar a en cuanto a los contenidos en humedad del suelo a PER. La tabla 7.4 pone de manifiesto las diferencias de STI con el resto de superficies cuando se consideran los valores anuales.

Mediante un análisis de la varianza se comprueba que las 4 superficies son significativamente diferentes entre si ($F(3,1935)=127.73$ $p=0.0000$). Cuando se comparan dos a dos las superficies todos los pares son significativamente diferentes entre si.

7.3.1.2.- Características de la humedad del suelo de las diferentes teselas a escala estacional

El periodo de muestreo comprende un año y medio, nos vamos a referir a las estaciones del primer año, para los valores medios estacionales que se van a presentar. Para el medio año restante las tendencias son muy similares.

Para todas las teselas los valores más bajos en la humedad del suelo se dan en verano, los más elevados en invierno, seguidos de cerca por los de otoño, y a continuación los de primavera, patrón muy adecuado a la distribución de la

precipitación de este año en particular como se puede comprobar en la tabla A.7.3, que no es muy diferente de la distribución de la precipitación por estaciones en los seis años estudiados como se comprobará en el capítulo 9.

7.3.1.2.1.- Ladera A, tesela PER

Cuando se calculan los promedios de la humedad del suelo para cada estación, que se representan en la figura 7.7, se pueden apreciar las diferencias en la humedad promedio a 3cm, según se mida en un claro o bajo planta, tal y como habíamos descrito en el apartado 7.3.1.1.1 En todas las estaciones del año la humedad es más elevada bajo planta. En cuanto a las diferencias entre las dos profundidades 3 y 15cm, el promedio de la humedad del suelo por estación es superior a 15cm cuando se comparan por separado claros y bajo planta. La humedad a 15cm bajo planta es superior a la humedad a 3cm independientemente de que se considere claro o planta pero no hay diferencias significativas entre la humedad a 15cm de los claros y la humedad a 3cm bajo planta.

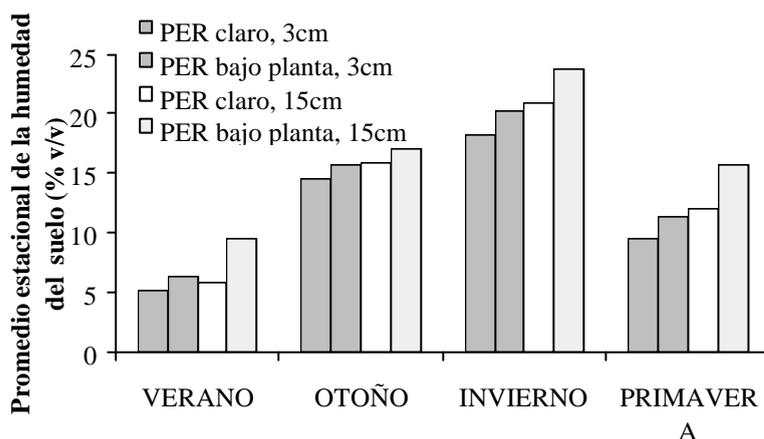


Figura 7.7: Humedad media en cada estación del primer año de muestreo, en claros y bajo planta a 3 y 15cm de profundidad, en la tesela PER.

En cuanto al “agua útil” para las plantas en cada estación, la tabla 7.7 muestra que, tanto a 3 como a 15cm de profundidad, en claros y bajo plantas, todo el otoño y el invierno existe en el suelo “agua disponible” para las plantas (la humedad del suelo está entre el volumen retenido a -33 kPa y -1500 kPa), la mayor parte del verano, la humedad del suelo está por debajo de 7.37%, que es el agua retenida por el suelo en la zona próxima a donde se sitúa la sonda, cuando se somete a la tensión de -1500 kPa, por último, gran parte de la primavera el suelo contiene “agua útil” para las plantas (a 15cm bajo planta toda la primavera).

7.- Humedad del suelo

PER	Claro 3cm		Mata 3cm		Claro 15cm		Mata 15cm	
	Días(1)	Días(2)	Días(1)	Días(2)	Días(1)	Días(2)	Días(1)	Días(2)
VERANO	15	79	25	69	18	76	23	71
OTOÑO	90	0	90	0	90	0	90	0
INVIERNO	89	0	89	0	89	0	89	0
PRIMAVERA	63	29	75	17	71	21	92	0

Tabla 7.7: Muestra para la tesela PER: Días(1) el número de días con humedad volumétrica comprendida entre el volumen de agua que retiene este suelo, a la profundidad correspondiente, cuando se somete a un potencial de 33 kPa y el retenido cuando se somete a un potencial de -1500 kPa y Días(2) el número de días con humedad volumétrica superior al volumen retenido a un potencial de -1500 kPa. Se refieren al periodo 8/7/96 hasta 7/7/97, primer año del total del periodo muestreado.

7.3.1.2.2.- Ladera A. tesela LIQ

En esta tesela la humedad del suelo es más elevada en invierno y en otoño, como era de esperar, ya que en este periodo se concentra la mayoría de la lluvia. Sin embargo la humedad del suelo es bastante elevada en verano en esta tesela, el promedio de verano en el primer año era de 9.32%, y en el segundo verano estudiado de 7.45%, en general bastante elevado comparado con el promedio de verano para el resto de las teselas, como se puede comprobar en tabla 7.8.

TESELA		Promedio(%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
PER	VERANO	5.79	29.88	0.94
	OTOÑO	15.10	34.85	9.69
	INVIERNO	19.26	35.24	11.12
	PRIMAVERA	10.39	34.70	3.28
LIQ	VERANO	9.32	36.24	3.96
	OTOÑO	18.46	32.05	11.37
	INVIERNO	20.19	32.55	9.25
	PRIMAVERA	13.72	31.16	7.12
MAR	VERANO	3.10	24.66	0.55
	OTOÑO	8.06	22.16	2.41
	INVIERNO	10.43	21.22	2.70
	PRIMAVERA	6.23	22.28	2.33
STI	VERANO	6.43	30.34	1.82
	OTOÑO	14.32	26.92	6.85
	INVIERNO	19.21	26.98	11.35
	PRIMAVERA	9.23	24.93	3.47

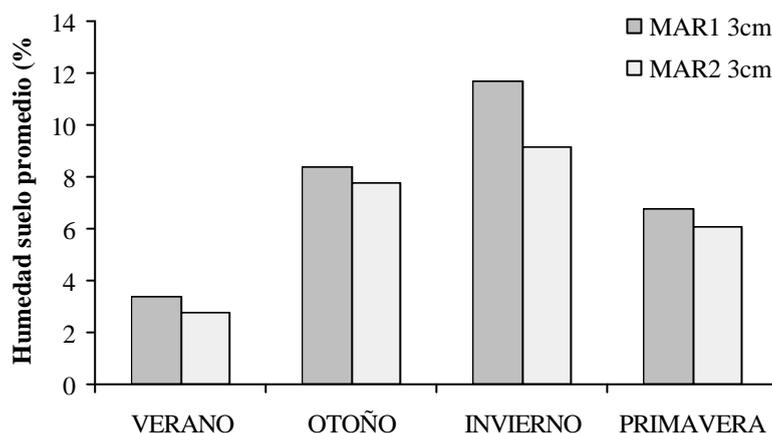
Tabla 7.8: Promedios, máximos y mínimos de la humedad del suelo a 3cm en cada estación, para las teselas estudiadas.

Los mínimos por estación son más elevados en LIQ en verano y primavera que para el resto de las teselas, sin embargo en otoño e invierno los mínimos son similares a los de las otras teselas.

Durante todo el otoño, invierno y primavera del primer año de estudio, la humedad del suelo a 3cm en LIQ se mantuvo entre 8.086% (volumen de agua retenida por este suelo a -1500 kPa) y 26.30% (volumen de agua retenida por el suelo cuando se somete a una tensión de -33 kPa). La mayor parte del verano (71 días inferior a 8.068%, y 23 días superior a 8.068%) la humedad del suelo fue inferior al volumen de agua retenido a -1500 kPa. Esto pone de manifiesto que hay “agua disponible” para las plantas durante la mayor parte del año.

7.3.1.2.3.- Ladera B, tesela MAR.

Las diferencias de humedad en función de la posición topográfica de la ladera, que se describieron en el apartado 7.3.1.1.3 también se ponen de manifiesto cuando se estudia el régimen estacional de humedad del suelo, tanto para los valores promedio como se puede observar en la figura 7.8, como para los valores



mínimos.

Figura 7.8: Promedios estacionales de la humedad del suelo a 3cm de profundidad para la parte alta y baja de la ladera B, distintas posiciones topográficas de la tesela MAR.

Las diferencias con el resto de las teselas son evidentes, para todas las estaciones del año, la humedad del suelo promedio por estación a 3cm de profundidad es inferior en MAR. Evidencia que es confirmada por el número de días con agua disponible para las plantas, de manera que el primer año estudiado, la humedad del suelo era inferior al volumen de agua retenido a un potencial de -1500 kPa, más de la mitad de días en otoño, más de un tercio del invierno, más de las tres cuartas parte de la primavera y por supuesto prácticamente todo el verano, por lo tanto el número de días de cada estación con agua útil para las plantas es mucho más limitado que para el resto de las superficies.

7.- Humedad del suelo

7.3.1.2.4.- Ladera C. tesela STI

La figura 7.9 pone de manifiesto las diferencias en la humedad del suelo (promedio estacional) en esta ladera según se trate de la parte alta (STI1), media (STI2) o baja (STI3) de la misma, siendo la parte alta de la ladera la que conserva mejor la humedad en todas las estaciones del año (tabla 7.9). La parte baja en otoño e invierno presenta una humedad promedio mayor, lo cual está justificado por la mayor cubierta vegetal y la mayor capacidad de retención de agua de este suelo, mientras que en verano y primavera, cuando el efecto de la insolación es mayor (pues en otoño e invierno la radiación solar directa de onda corta es baja en toda la ladera) la humedad en la parte baja de ladera es inferior, porque recibe más insolación. En la parte alta de la ladera los claros son más abundantes que en las partes media y baja, y estos claros están dominados por una cubierta criptogámica que como en LIQ pueden favorecer la conservación de la humedad del suelo.

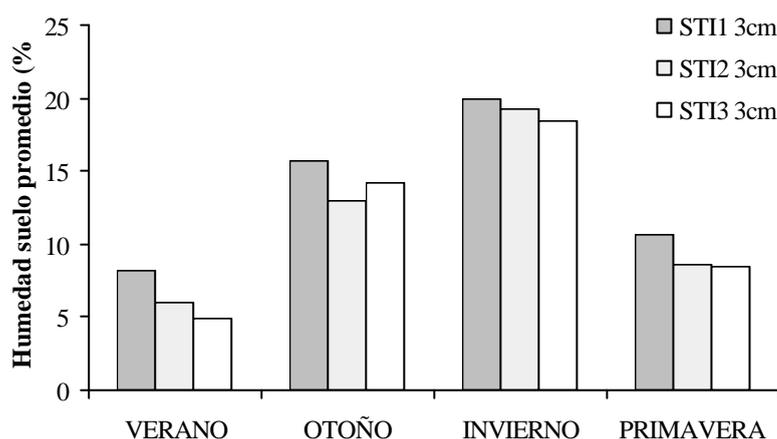


Figura 7.9: Promedios estacionales de la humedad del suelo a 3cm de profundidad para la parte alta y baja de la ladera C, distintas posiciones topográficas de la tesela STI.

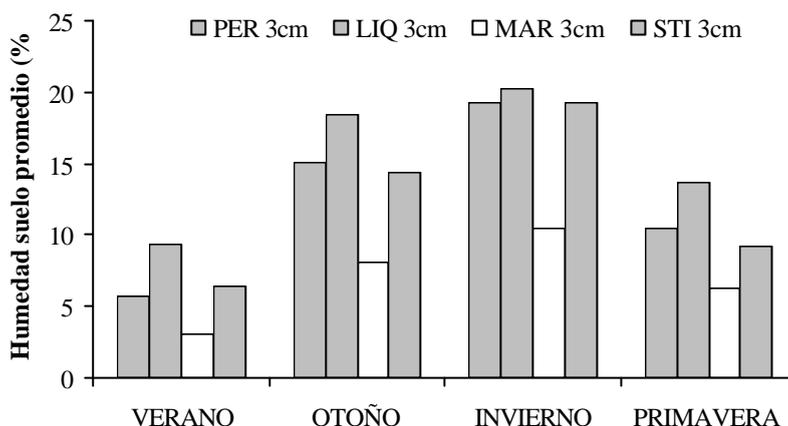
	STI1			STI2			STI3		
	Promedio	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.
VERANO	8.20	33.15	3.70	5.98	29.92	1.31	4.91	32.80	1.00
OTOÑO	15.75	31.01	8.08	12.94	27.01	4.21	14.27	25.29	7.06
INVIERNO	19.92	27.32	13.54	19.32	28.14	9.47	18.39	25.49	10.86
PRIMAVERA	10.59	26.12	5.69	8.64	25.69	2.81	8.43	24.15	1.50

Tabla 7.9: Promedios, máximos y mínimos de la humedad del suelo a 3cm (% volumétrico) por estación, en la parte alta (STI1), media (STI2) y baja (STI3) de la ladera C.

Excepto algún día, durante todo el invierno y el otoño existe “agua disponible” para las plantas en la tesela STI, y casi la mitad de la primavera, mientras que la mayor parte del verano la humedad del suelo es inferior al volumen

de agua retenido a un potencial de -1500 kPa. En la parte alta de la ladera (STI1), la humedad del suelo fue superior a la retenida a -1500 kPa durante más tiempo, en primavera durante 17 días más que para STI2 y STI3.

Cuando se comparan la humedad estacional promedio en cada tesela (para cada estación se promedian las distintas posiciones en PER o las distintas posiciones topográficas de MAR y STI) se ponen de manifiesto las diferencias entre las teselas en la humedad del suelo a 3cm de profundidad, comentadas en el



apartado 7.3.1.1, como se puede ver en la figura 7.10.

Figura 7.10: Promedios estacionales de la humedad del suelo a 3cm de profundidad para las distintas teselas.

7.3.1.2.5.- Relaciones humedad del suelo, topografía y propiedades del suelo.

Para estudiar las relaciones entre la humedad del suelo, los atributos topográficos que caracterizan a los puntos donde se mide la humedad, y con las propiedades del suelo relacionadas con el contenido en humedad del suelo (tabla A.7.1 en anexo), se calculan los coeficientes de correlación de Pearson. En la tabla A.7.2 se puede observar que aparecen pocas relaciones significativas, tan solo son significativas ($p < 0.05$) las relaciones de la porosidad (volumen total de poros) que está positivamente relacionada con la humedad del suelo y CURV2 la curvatura de las curvas de nivel que es un atributo topográfico muy relacionado con la acumulación de agua en el paisaje. Los atributos W y distancia al cauce también presentan coeficientes de correlación elevados. Cabría esperar unas correlaciones mayores; que no se observan porque se están calculando los coeficientes de correlación para todos los tipos de teselas al mismo tiempo, que tienen coberturas bióticas y abióticas muy diferentes y la cobertura de la superficie va a desempeñar un papel muy importante. La cubierta liquénica parece jugar un papel fundamental

7.- Humedad del suelo

en la conservación de la humedad, de manera que aunque las características topográficas y algunas propiedades del suelo no favorezcan la presencia de agua en el suelo, sin embargo se ve favorecida por esta cubierta.

Si se estudiase para cada tipo de tesela por separado, la relación entre las características topográficas y la humedad del suelo, el resultado probablemente sería diferente y existirían más correlaciones entre la humedad del suelo y los atributos topográficos, el problema es que para cada tipo de tesela sólo se dispone de tres posiciones topográficas diferentes, con lo que no tiene sentido calcular los coeficientes de correlación para solo tres puntos. No obstante la tabla A.7.1, pone de manifiesto que dentro de un mismo tipo de tesela, una variable topográfica muy importante en las diferencias de humedad es la radiación incidente (representada en nuestro caso por la radiación extraterrestre de onda corta), de manera que cuanto menor es ésta más alto es el contenido de humedad, como muestra la figura 7.11 (para la radiación en otoño, para el resto de la estaciones se mantienen las mismas tendencias, ver la tabla A.7.1). Sin embargo otros atributos muy relacionados con el contenido en agua en el suelo, como el área de contribución (ARE) o W presentan valores más elevados donde la humedad es más baja, esto podría explicarse porque en estas zonas la insolación es mayor y el contenido en arcilla y la porosidad son menores respecto a la parte alta de la ladera donde W o ARE son menores, pero mayor la porosidad, el contenido en arcilla y la humedad (salvo en MAR1).

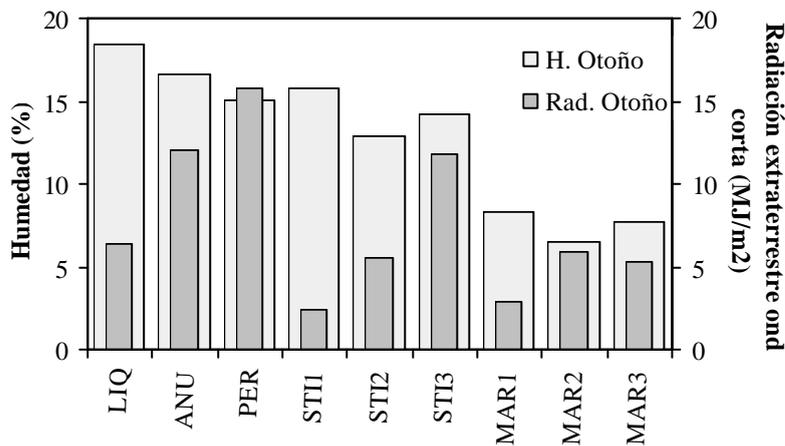


Figura 7.11: Humedad del suelo promedio de otoño de 1996 a 3cm de profundidad y promedio de radiación extraterrestre de onda corta para cada tesela en las distintas posiciones topográficas.

7.3.1.3.- Características de la humedad del suelo a escala de evento de precipitación.

7.3.1.3.1.- Cambios en la humedad del suelo con la precipitación.

Durante el periodo de medición de la humedad del suelo se registraron 62 eventos de precipitación, que produjeron 418.83mm (durante el último otoño se perdieron parte de los datos de precipitación por problemas técnicos, y solo contamos con los volúmenes totales de las lluvias de ese periodo por encima de 3mm). La mayor parte de la lluvia tuvo lugar en invierno y otoño, seguidos por la primavera y por último el verano con solo un evento de precipitación importante.

En la tabla A.7.3 se presentan las precipitaciones durante todo el periodo de muestreo y los cambios en la humedad que provocaron. Se comprueba que para todas las superficies, las precipitaciones por debajo de 1mm, no afectan a la humedad del suelo a 3cm de profundidad y mucho menos a 15cm. A partir de 1mm, la precipitación de menor volumen que provocó un aumento en la humedad del suelo corresponde a 1.45mm, sin embargo se produjeron precipitaciones por encima de 1.45mm de hasta 2.90mm, que no aumentaron la humedad del suelo, según se desprende de los datos de la tabla A.7.3. Todos los eventos por encima de 3mm produjeron cambios en la humedad del suelo a 3cm. Por debajo de 3mm, depende de la humedad antecedente y de la intensidad de la precipitación, de forma que si la humedad antecedente es alta y la intensidad de la precipitación no es demasiado baja aumenta la humedad del suelo, mientras que cuando la humedad antecedente es pequeña o bien la intensidad de la lluvia muy baja (lo que significa que cae muy repartida en el tiempo y mientras tanto actúa la evapotranspiración) no aumenta la humedad del suelo a 3cm.

7.3.1.3.1.1.- Ladera A, tesela PER

En PER para que aumente la humedad del suelo a 15cm de profundidad es necesario una lluvia de un volumen considerable, a partir de 9mm se observa que aumenta la humedad del suelo a 15cm. Además se dieron eventos en los que se superó esta cantidad, hasta 14.21mm, que no provocaron el aumento de la humedad del suelo a 15cm, aumento que depende de la humedad antecedente y de la intensidad de la precipitación. Si la humedad antecedente es baja, con precipitaciones de 9 a 15mm no aumenta la humedad del suelo. Sin embargo una lluvia pequeña como el evento de el día 29/12/96, de 8.99mm, con una humedad antecedente elevada, y una intensidad relativamente alta, $I_{5\text{minutos}}$ promedio 1.45mm/h ($I_{5\text{minutos}}$ máxima 12.6mm/h), provocó el aumento en la humedad del suelo a 3 y 15cm. A partir de 15mm de lluvia siempre aumenta la humedad del suelo a 15cm.

Se estudia con detalle como aumenta la humedad del suelo con la lluvia y se observa que en la tesela PER, el momento en que comienza a aumentar la humedad del suelo y la forma en que aumenta, como consecuencia de la precipitación, difiere en función de que midamos la humedad del suelo bajo planta o en los claros. En general, cuando comienza el evento y tras caer los primeros milímetros (unos 2.6mm como mínimo aproximado, aunque en algunos casos han de caer hasta 5mm), se empiezan a observar cambios en la humedad del suelo en los claros a 3cm, la humedad del suelo aumenta suavemente. Seguidamente aumenta la humedad bajo la planta a 3cm, que lo hace más drásticamente; pero para que se empiece a observar este aumento es necesario que haya llovido unos 5.5 ó 6mm como mínimo hasta 7 u 8mm en otros casos, cantidades próximas a los milímetros necesarios para que se sature la copa de una planta del tipo de las de la superficie PER. Es lógico que esto ocurra en la posición bajo planta, la planta intercepta una buena parte de la lluvia, sobre todo al principio de la precipitación. Domingo et al. (1998) miden y modelizan la interceptación de la precipitación en tres especies *Anthyllis cytisoides*, *Retama sphaerocarpa* y *Stipa tenacissima*. En *Anthyllis cytisoides*, con arquitectura similar a las plantas que encontramos en PER, el 40% de la lluvia se convirtió en trascolación, y el 20% en escorrentía cortical y 40% se pierde por interceptación. El agua tarda más tiempo en alcanzar el suelo, pero una vez se satura su copa, por trascolación y escorrentía cortical, cae súbitamente una gran cantidad de agua provocando el aumento de la humedad más bruscamente. La arquitectura de la planta juega un papel de embudo, constituyendo un área de captación de agua de lluvia bastante grande que luego por escorrentía cortical se concentra en un área más pequeña alrededor del tronco (González-Hidalgo y Bellot, 1997), teniendo en cuenta que en nuestro caso la sonda está muy próxima al tallo. La partición de la lluvia en trascolación, escorrentía cortical e interceptación que tiene lugar cuando llueve sobre la planta, explican por un lado el retardo en el aumento de la humedad del suelo bajo planta y la mayor pendiente de la curva de aumento de la humedad.

En todo caso las cantidades de precipitación que provocan los cambios de humedad expuestos en el párrafo anterior son muy variables de un evento a otro pues esto va a depender de la intensidad de la lluvia y por supuesto de la humedad antecedente, y bajo planta varía aún más pues se suma el efecto de interceptación de la planta que a su vez depende de la estructura y tamaño de la planta.

Una vez han caído un mínimo de 8 ó 9mm de lluvia comienza a aumentar la humedad a 15cm, primero en los claros y luego bajo planta.

Las figuras 7.12 y 7.13 muestran ejemplos de precipitaciones con distintas características y humedad antecedente donde se pueden observar las diferencias en el aumento de humedad entre claro y bajo planta.

En algunos casos la precipitación es pequeña y solo cambia la humedad a 3cm pero no a 15cm, como se puede observar en la figura 7.14. En este evento de primavera se puede observar como en el momento de la precipitación no aumenta la humedad a 15cm, sin embargo varias horas después (36 a 48 horas) de acabar la lluvia se observa un ligero aumento de la humedad a 15cm. Esto se ha observado en varios eventos. Este ligero aumento de la humedad a 15cm corresponde al frente de humectación, muy lento, el agua de la capa superficial va pasando muy lentamente a las capas más profundas y al mismo tiempo disminuye la humedad en superficie por la difusión y por evaporación.

No en todos los eventos es posible observar las diferencias en el aumento de la humedad del suelo entre claros y bajo la planta, debido a que a veces la lluvia es muy intensa y los cambios se producen más rápidamente, con lo que a nuestra escala de medida de la humedad que es cada 15 minutos no es posible detectar la secuencia, el aumento se detecta al mismo tiempo en todas las posiciones como es el caso de los eventos de las figuras 7.15 y 7.16. Ocurre en eventos donde la humedad antecedente es muy elevada, de forma que un nuevo aporte de agua al suelo se traduce en un aumento rápido de la humedad del suelo (figura 7.15), así como en eventos de gran intensidad (figura 7.16), en los que gran cantidad de agua alcanza el suelo en poco tiempo, y el aumento de la humedad se va a producir muy rápidamente en todas las posiciones y no podemos detectar las diferencias entre posiciones o profundidades.

7.3.1.3.1.2.- Ladera A, tesela LIQ

En la parte baja aparece la tesela PER y en la parte alta la tesela LIQ. Si comparamos los cambios en la humedad del suelo provocados por la precipitación a 3cm de profundidad en ambas teselas se observa que aumenta la humedad en la tesela con líquenes, posteriormente se inicia el aumento de la humedad en la PER, primero en los claros y luego bajo la planta, donde el retardo se explica por el papel que la intercepción ejerce en este tipo de superficies (figura 7.17). En realidad lo que ocurre es que en LIQ, aunque el agua alcanza el suelo al mismo tiempo que en los claros de la superficie PER, sin embargo en las superficies con líquenes (LIQ) en la zona de contacto del liquen con el suelo existen importantes huecos

7.- Humedad del suelo

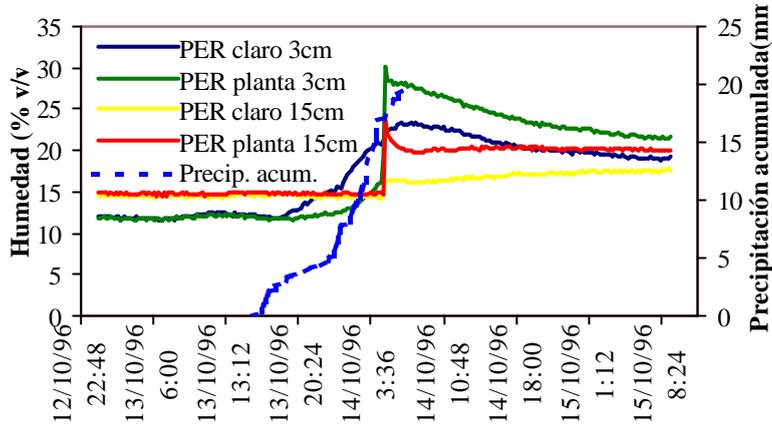


Figura 7.12: Aumento de la humedad del suelo con la precipitación en distintas posiciones y profundidades en la tesela PER cuando la humedad antecedente es medianamente alta.

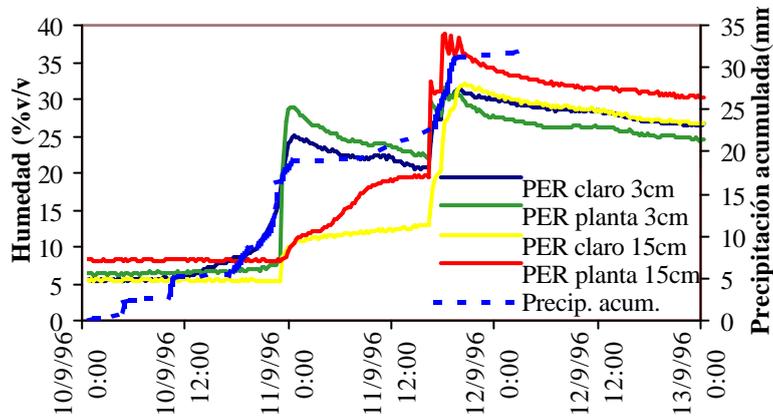


Figura 7.13: Aumento de la humedad del suelo con la precipitación en distintas posiciones y profundidades en la tesela PER cuando la humedad antecedente es baja.

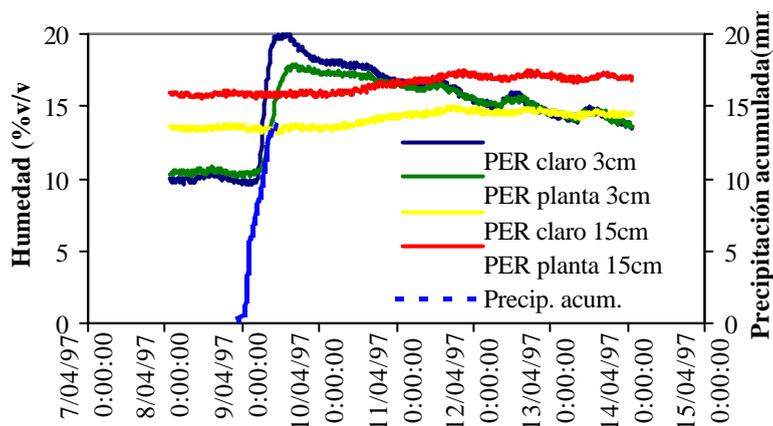


Figura 7.14: Aumento de la humedad del suelo con la precipitación en distintas posiciones y profundidades en la tesela PER ante una precipitación intensa y de pequeño volumen

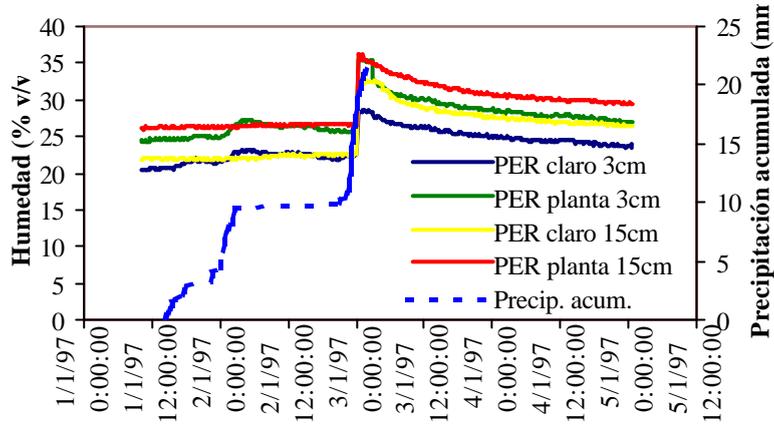


Figura 7.15: Aumento de la humedad del suelo con la precipitación en distintas posiciones y profundidades en la tesela PER cuando la humedad antecedente es muy elevada.

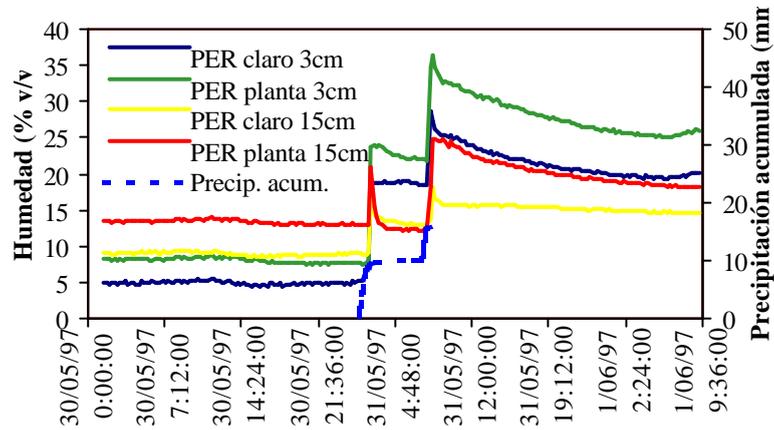


Figura 7.16: Aumento de la humedad del suelo con la precipitación en distintas posiciones y profundidades en la tesela PER ante una lluvia de intensidad elevada.

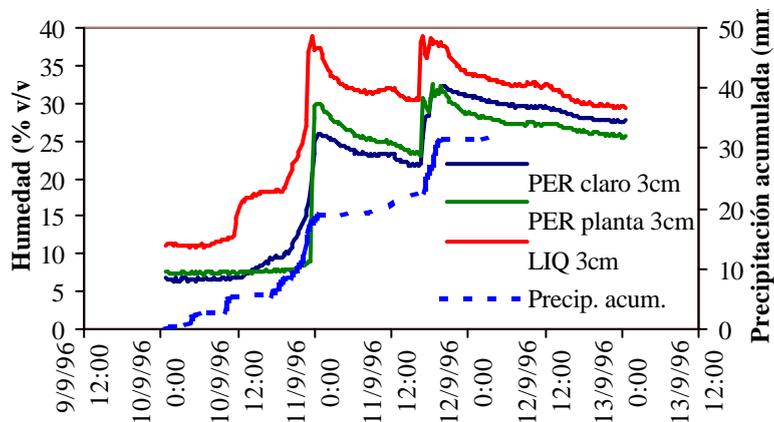


Figura 7.17: Aumento de la humedad del suelo a 3 cm de profundidad en las distintas teselas de la ladera A, distinguiendo las dos posiciones en PER .

7.- Humedad del suelo

como veíamos en el capítulo 6 (figura 6.35) que transmiten el agua más rápidamente en el primer y segundo centímetro, de ahí que observamos el aumento de la humedad en LIQ más rápidamente que en los claros de PER con una estructura más compactada y donde el agua tardará más en transmitirse hasta el tercer centímetro donde aparece la sonda. A veces se registra el aumento de humedad en LIQ y en claros de PER al mismo tiempo, pero la pendiente de aumento en LIQ es mucho más rápida (figura 7.20).

Cuando la humedad antecedente es muy elevada o la intensidad de la precipitación muy alta los aumentos en la humedad del suelo en las diferentes posiciones de la ladera A se registran al mismo tiempo, posiblemente por lo que ya hemos comentado de la imposibilidad de detectarlo a esta escala temporal de muestreo, deben ser cambios muy rápidos.

7.3.1.3.1.3.- Ladera B, tesela MAR

Cuando se estudian los eventos registrados durante el periodo de muestreo, no se observan diferencias entre la parte alta (MAR1) y baja (MAR3) de la ladera en cuanto a que la humedad aumente más rápidamente en una u otra posición como podemos observar en la figura 7.18.

7.3.1.3.1.4.- Ladera C, tesela STI

En la tesela STI suele aumentar la humedad primero en la parte alta de la ladera (figura 7.19), lo que se explica porque se trata de una zona donde la cubierta vegetal de *Stipa tenacissima* es menos densa que en la parte más baja de la ladera, y los claros que son muy abundantes en esta parte de la ladera, presentan una cubierta criptogámica. La porosidad en STI1 en el horizonte superficial de STI1 es más elevada que en el resto de la ladera, como se puede observar en la tabla del anexo A.7.1.

Cuando la humedad antecedente es muy alta o la lluvia muy intensa el aumento de la humedad del suelo se registra al mismo tiempo en todas las posiciones, probablemente porque los cambios son muy rápidos y no es posible detectarlos a esta escala temporal, como hemos ya comentado para las otras laderas.

7.3.1.3.1.5.- Comparación del aumento de la humedad del suelo por la lluvia en las distintas teselas.

La respuesta a la precipitación en términos de aumento de la humedad del suelo es más rápida en las teselas con cubierta criptogámica importante como LIQ y STI1 (la parte alta de la ladera donde los líquenes son muy abundantes), donde la humedad comienza a aumentar antes y si lo hace al mismo tiempo que en otras teselas el aumento es más rápido. Luego aumenta en la parte baja de la ladera STI

y los claros de la tesela PER y luego comienza a aumentar en MAR y finalmente en PER bajo la planta, como se observa en la figura 7.20. Esta secuencia, que se ha observado en los eventos donde el aumento de humedad no es muy rápido, pero no siempre se puede observar a la escala temporal de estudio (medidas a intervalos de 15 minutos) debido a la alta humedad antecedente o a una intensidad de lluvia muy elevada.

Para explicar la secuencia observada se han de tener en cuenta una serie de características y procesos que se desencadenan en superficie de estos suelos.

En MAR por la ausencia de cubierta vegetal, cabría esperar que el aumento de la humedad del suelo ocurriera antes que en el resto de las teselas, suponiendo una distribución uniforme de la precipitación. Sin embargo no es así. Como ya se estudió en el capítulo 6 la tesela MAR no presenta un suelo propiamente dicho, sino un regolito margoso, constituido por fragmentos de marga y partículas finas, con este tipo de estructura la capilaridad va a ser menor que en la superficie LIQ, que presenta un suelo con una agregación incipiente, pero estructurado, una porosidad muy elevada y grandes espacios en la zona de contacto entre el líquen y el suelo y la velocidad de infiltración es mayor, al menos al principio, como demuestran Solé et al. (1997).

Por otro lado va a intervenir el encostramiento de la superficie del suelo. En zonas áridas los suelos desnudos expuestos a la lluvia están sujetos a procesos físicos y químicos que cambian sus propiedades en las proximidades de la superficie del suelo. Se forma una “costra” que hace disminuir la tasa de infiltración, reduce la disponibilidad de agua en la zona radicular y aumenta la escorrentía y la erosión del suelo (Mualen y Assouline, 1996). La formación de costras es el principal proceso responsable de la reducción de la conductividad hidráulica de la superficie en varios ordenes de magnitud (Morin et al., 1981; Helalia et al., 1988). En la superficie del suelo de la tesela MAR, parcialmente acostrada antes de la precipitación, al poco tiempo de comenzar la lluvia (3.5 minutos, según Solé et al., 1997, con simulaciones de 55mm/h), se cierran las grietas y se sella la superficie disminuyendo la infiltración y se genera rápidamente la escorrentía.

Con simulaciones de lluvia encuentra que en la superficie MAR a los 3.05 minutos de comenzar la simulación (intensidad 55mm/h) comienza la escorrentía, mientras que en los líquenes la escorrentía comienza después. Cuando comienza a llover el talo líquénico se hidrata rápidamente y la transmisión de la humedad en los tres primeros centímetros se ve potenciado por la gran porosidad que tiene este suelo.

7.- Humedad del suelo

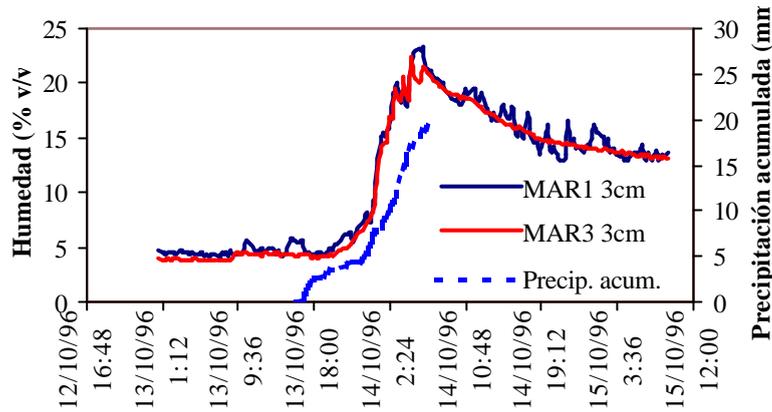


Figura 7.18: Aumento de la humedad del suelo a 3 cm de profundidad ante la lluvia en distintas posiciones topográficas de la ladera B, tesela MAR.

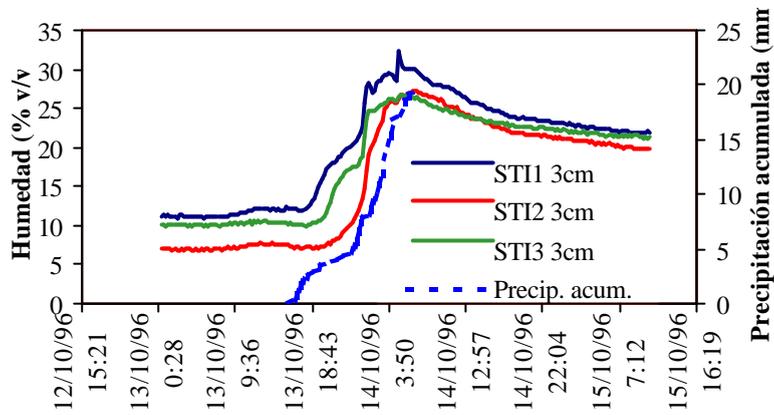


Figura 7.19: Aumento de la humedad del suelo a 3 cm de profundidad ante la lluvia en distintas posiciones topográficas de la ladera C, tesela STI.

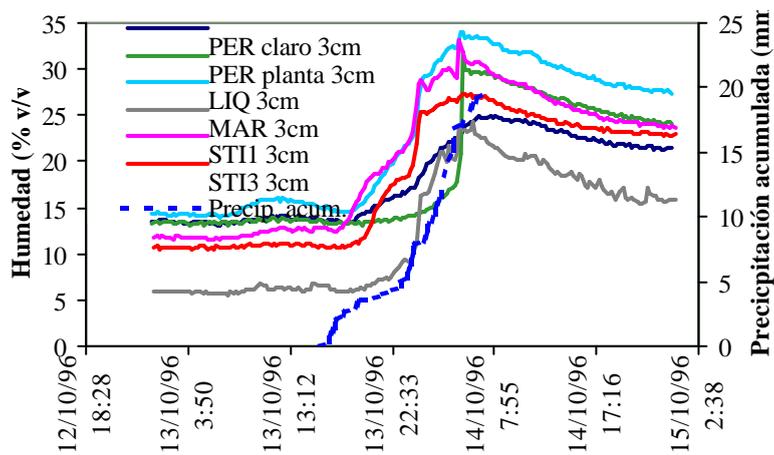


Figura 7.20: Aumento de la humedad del suelo a 3 cm en distintas teselas y posiciones.

En la tesela STI intervienen dos factores por un lado el suelo es más arenoso, en la parte media y baja, lo que determina que la velocidad de infiltración sea alta y en segundo lugar en la parte alta de la ladera, donde el contenido en arena es menor, el matorral es menos denso, dando paso a la presencia de grandes claros con una importante cubierta criptogámica, y un suelo con una porosidad muy alta lo que favorece el rápido aumento de la humedad del suelo.

En PER el retardo en el aumento de la humedad bajo planta frente a los claros se explica por la intercepción como ya se ha expuesto.

En cualquier caso en las teselas donde la superficie del suelo tiene tendencia al acostamiento (que en nuestra zona de estudio son todas las teselas no vegetadas y en las vegetadas los claros entre la vegetación) el patrón de grietas superficiales puede variar mucho de un evento a otro lo que puede afectar a la respuesta ante la precipitación. Pequeños cambios en las características de la superficie del suelo controlan la respuesta de la humedad del suelo en cada tesela frente a la lluvia.

Por otro lado al estudiar las respuestas de la humedad del suelo en las teselas frente a la lluvia hemos vistos que las características de la precipitación y la humedad antecedente controlan la respuesta. En un ecosistema como éste caracterizado por una gran variabilidad temporal en la intensidad de la precipitación dentro de un evento, es de esperar que cambios en las características de la precipitación afecten al patrón de respuesta de estas teselas.

7.3.1.3.2.- Curvas de secado del suelo en las distintas teselas del suelo tras la precipitación.

7.3.1.3.2.1.- Ladera A, tesela PER.

En la tesela PER el suelo a 3cm de profundidad se seca antes en los claros que bajo planta, como se observa en la figura 7.21, donde además, también se puede observar que se seca más rápido el suelo a 3cm que a 15cm, siempre que se comparan estas dos profundidades en una misma posición, sin embargo a veces se seca antes el suelo en claros a 15cm que bajo planta a 3cm, sobre todo en verano que a 15cm en claros la humedad puede ser menor que a 3cm bajo planta.

7.3.1.3.2.2.- Ladera A, tesela LIQ

Se seca rápidamente después del evento, sin embargo cuando la humedad del suelo es baja el secado se ralentiza en comparación con el resto de las teselas.

7.3.1.3.2.3.- Ladera B, tesela MAR

En MAR se seca antes el suelo de la parte baja de la ladera que la parte alta (figura 7.22) lo que podría atribuirse a que ésta última recibe menos radiación

7.- Humedad del suelo

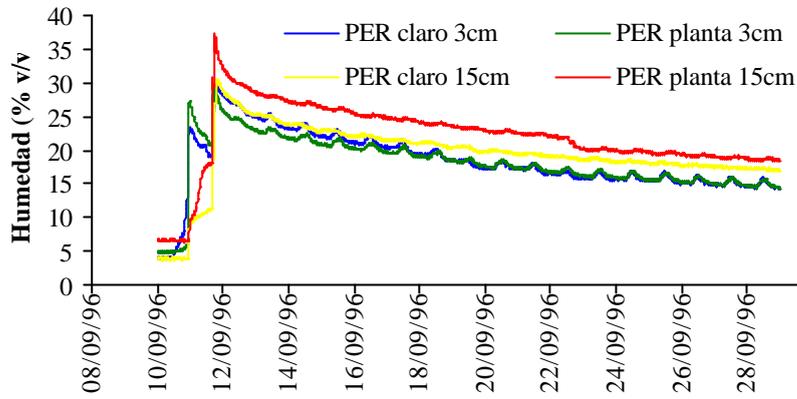


Figura 7.21: Curva de secado del suelo en distintas posiciones y profundidades de PER.

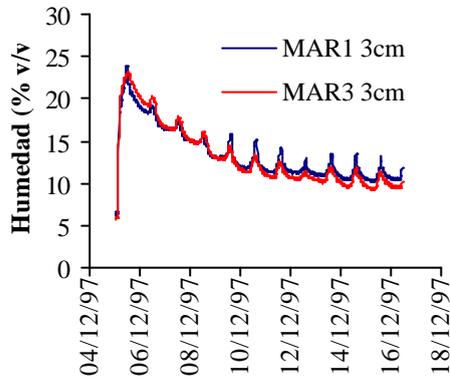


Figura 7.22: Curva de secado en distintas posiciones topográficas de la ladera B

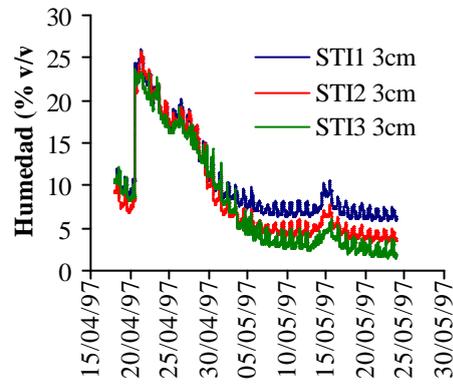


Figura 7.23: Curva de secado en distintas posiciones topográficas de la ladera C

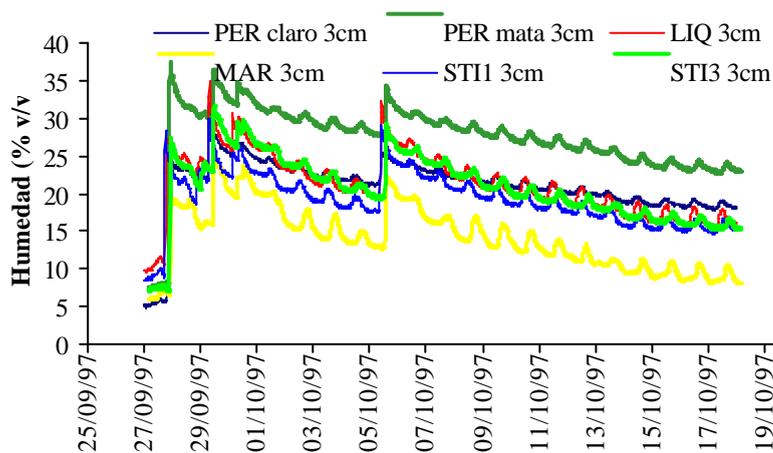


Figura 7.24: Curva de secado del suelo en las distintas posiciones, profundidades y teselas.

como queda reflejado en los promedios estacionales de radiación extraterrestre de onda corta que aparecen en la tabla A.7.1.

7.3.1.3.2.4.- Ladera C, tesela STI

En la tesela STI el secado es más rápido en la parte baja y media de la ladera (figura 7.23), pese a que en esta parte la cubierta vegetal es más densa que en la parte alta, y se explica porque en la parte media (STI2) y baja (STI3), el contenido en arena es mucho más elevado que en la parte alta y la capacidad de estos suelos para retener agua es menor al menos para potenciales bajos. Además STI2 y STI3 reciben más insolación durante todo el año como se pone de manifiesto en la tabla del anexo A.7.1 donde se presentan los promedios estacionales de radiación extraterrestre de onda corta sobre la parte alta media y baja de la ladera C.

7.3.1.3.2.5.- Comparación del secado del suelo de las distintas teselas

Cuando se comparan las diferentes teselas (figura 7.24), se comprueba que la parte alta de la ladera A, donde se localiza la tesela LIQ, se seca más rápidamente que la parte baja de la ladera donde se sitúa PER, sin embargo cuando la disponibilidad de agua en el suelo es muy baja LIQ conserva mejor la humedad de suelo. Por otro lado aunque para potenciales altos el suelo subyacente a los líquenes tiene menor capacidad para retener agua, sin embargo a potenciales bajos es capaz de retener más agua, según se desprende de los datos de pFs, cantidades comparables al suelo de la tesela PER.

El suelo de la tesela STI, se seca más rápidamente que el de PER, pues como ya habíamos indicado el contenido en arena en esta ladera es más elevado y la capacidad para retener agua es menor.

El suelo de la tesela MAR presenta la curva de secado más rápida, y los máximos que alcanzan son bastante inferiores a los del resto de las teselas, lo que se explica por la ausencia de un suelo verdadero estructurado. Además es una tesela totalmente descubierta de cobertura vegetal con lo que la evaporación de agua del suelo no se ve limitada en este sentido.

En todas las figuras anteriores se observa un “rizado” diario a 3cm de profundidad, a 15cm es poco evidente o no existe. Consiste en ciclos diarios en la humedad del suelo, sorprendentes porque son contrarios a los detectados por otros autores (Jackson et al.,1973) que encontraron que la superficie del suelo se seca durante el día y se rehumedece por la noche. Sin embargo nosotros hemos encontrado un patrón contrario, cada día la humedad a 3cm aumenta con la

7.- Humedad del suelo

insolación, alcanzando el máximo poco después de medio día y a partir de ahí disminuye durante la tarde noche (figura 7.25). Este comportamiento cíclico presenta un patrón diferente en cada tipo de superficie, y dentro de un mismo tipo de superficie, el ciclo varía a lo largo del año, siendo menos acentuados los cambios diarios en la humedad del suelo en invierno, sobre todo cuando el suelo presenta un elevado porcentaje de humedad. Por otra parte los cambios diarios en la humedad del suelo son más acentuados en unas superficies que en otras, así en las superficies con líquenes son bastante pronunciados, y también en las superficies completamente desnudas (MAR). Se observan diferencias entre las diferentes posiciones topográficas dentro de un mismo tipo de superficie, es decir entre la parte alta baja o media de la ladera, muy relacionados con los ciclos de insolación diaria.

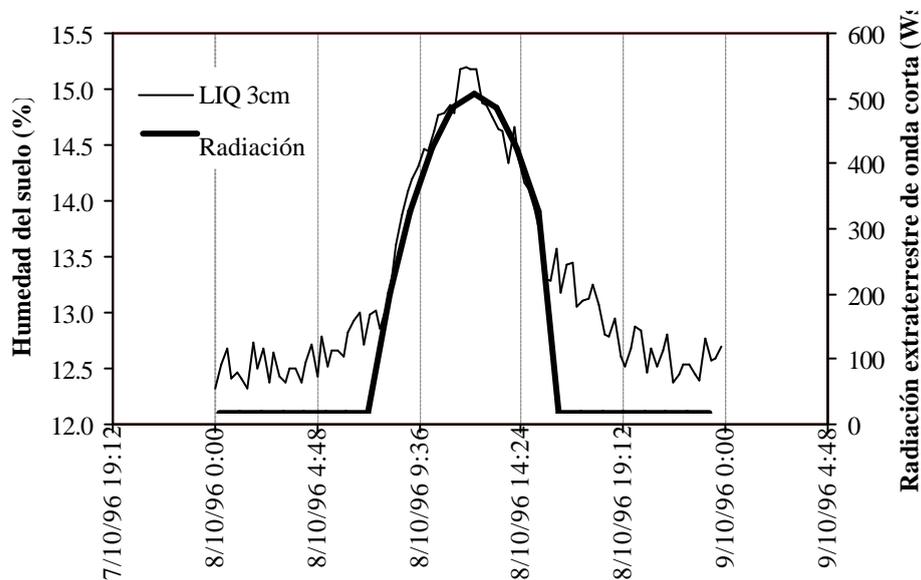


Figura 7.25: Oscilación diaria de la humedad del suelo a 3cm de profundidad en la tesela LIQ. Se presenta la radiación extraterrestre de onda corta que incide sobre la posición en que se encuentra la sonda, ese día.

Actualmente estamos investigando este fenómeno, y la hipótesis sobre la que estamos trabajando es que la costra superficial podría ser la responsable de estos ciclos. A medida que aumenta la insolación sobre la superficie del suelo, el agua se irá evaporando, pero en la superficie el agua encuentra un obstáculo a su difusión que es la costra del suelo, que al humedecerse por el agua que asciende se puede sellar y limitar la salida de agua y podría ser la causa del incremento de humedad a 3cm, que observamos.

7.3.2.-Temperatura del suelo.

7.3.2.1.- Características generales de la temperatura del suelo en las diferentes teselas.

Se observan regímenes de temperatura del suelo diferenciados para las distintas teselas estudiadas.

7.3.2.1.1.- Ladera A, tesela PER

En PER a 15cm de profundidad, en una posición intermedia entre claro y planta se midió la temperatura durante el año y medio de muestreo. En el resto de posiciones solo fue posible medir la temperatura quince días en invierno y dos meses en verano por falta *dataloggers*. Y se encuentran diferencias en la temperatura del suelo entre las distintas posiciones (claro y bajo planta) y entre las distintas profundidades.

A 3cm de profundidad la temperatura del suelo es más elevada en claro que bajo planta, en verano, lo cual es lógico por el efecto que ejerce la planta proporcionando sombra al suelo situado bajo la misma, recibe menos insolación, que se traduce en un menor calentamiento del suelo, (figura 7.26). La temperatura es mayor a 3cm que a 15cm, cuando se comparan claros y bajo planta por separado. Sin embargo la temperatura bajo planta a 3cm es muy similar a la temperatura en claro a 15cm, lo que ya veíamos que también ocurría con la humedad en verano, lo que pone de manifiesto que el efecto de sombra que ejerce la planta es muy importante limitando el aumento de la temperatura del suelo y las pérdidas de agua del suelo por evaporación.

En invierno los máximos son menores bajo planta y los valores mínimos son mayores que en claros, por el papel amortiguador de la planta (figura 7.27). Al contrario de lo que ocurre en verano, en invierno, la temperatura a 15cm es mayor que la temperatura a 3cm, se conserva mejor el calor en profundidad. Prácticamente no hay diferencias entre la temperatura a 15cm bajo planta y en claro, es ligeramente más elevada bajo planta que en los claros.

La tabla 7.10 muestra las diferencias en las temperaturas del suelo máximas y mínimas en las distintas posiciones y profundidades de PER para los periodos estudiados en verano y otoño-invierno.

En PER a 15 cm de profundidad la temperatura del suelo media diaria máxima registrada desde 7 de Julio de 1996 al 16 Diciembre de 1997 fue de 33.16°C y la mínima de 6.37°C. La temperatura máxima medida durante el año y medio de muestreo a 15cm en PER es de 36.14°C y la mínima de 5.28°C.

7.- Humedad del suelo

	VERANO (23 Junio-17 Agosto)				INVIERNO (Diciembre)			
	Tª dia. máx.	Tª dia. mín.	Máx.	Mín.	Tª dia. máx.	Tª dia. mín.	Máx.	Mín.
PERCL 3cm	39.88	21.54	56.86	16.7	10.6	6.36	13.91	3.4
PERMA 3cm	33.59	33.59	47.23	17.67	10.16	6.53	12.66	3.85
PERCL 15cm	30.98	27.47	33.76	24.56	10.65	8.51	11.26	7.73
PERMA 15cm	29.61	25.52	31.71	23.09	10.7	8.61	11.27	7.91

Tabla 7.10: Temperaturas del suelo en PER, medias diarias máximos y mínimos bajo planta y en claro a dos profundidades para los dos periodos de tiempo medidos. También se presentan los máximos y mínimos registrados en cada posición durante ambos periodos.

7.3.2.1.2.- Ladera A. tesela LIQ

Cuando se observa el régimen anual (figura 7.32) se comprueba el aumento de la temperatura del suelo en verano y la disminución a medida que nos acercamos al invierno. Las temperaturas mínimas se dan en Diciembre y Enero, el promedio mínimo diario de temperatura fue de 3.90°C, y la temperatura mínima registrada durante el año y medio de muestreo de 1.17°C. Las temperaturas máximas se dan en los meses de Julio y Agosto, con una temperatura media diaria máxima de 38.38°C y la temperatura máxima medida fueron 54.2°C, que es bastante alta considerando los 3cm de profundidad.

7.3.2.1.3.- Ladera B. tesela MAR

El régimen anual de temperatura del suelo en esta tesela es similar al registrado en el resto de teselas, (figura 7.28). La temperatura del suelo máxima registrada en MAR para el año y medio de estudio fue de 57.09°C y la mínima 2.25°C. No hay diferencias significativas en la temperatura media diaria del suelo entre la parte alta y baja de la ladera (análisis de la varianza F (1, 944)=56.509 ns).

7.3.2.1.4.- Ladera C. tesela STI

En esta tesela la temperatura del suelo máxima medida es de 62.01°C a 3cm de profundidad, y la mínima 0.19°C. Se encuentran diferencias significativas entre la parte alta y la parte media y baja de la ladera. El análisis de la varianza de las temperaturas medias (F(2,1360)=4.47, p=0.01) demuestra que existen diferencias significativas en las temperaturas medias de las tres posiciones. La temperatura del suelo media diaria en la parte alta de la ladera es ligeramente superior que en el resto de la ladera, lo cual no está relacionado con la insolación, que es menor en la parte alta. Se explica porque los máximos y mínimos de temperatura están más atenuados, lo cual provoca medias ligeramente superiores, esta atenuación se atribuye a la cubierta criptogámica que amortigua las oscilaciones.

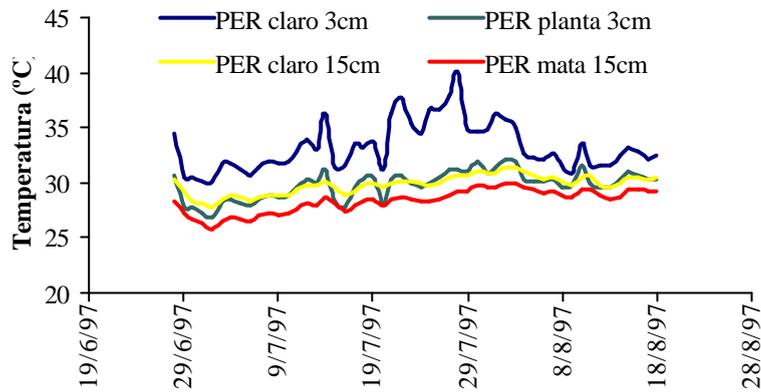


Figura 7.26: Temperatura media diaria del suelo en distintas posiciones y profundidades de la tesela PER, durante unos días de verano.

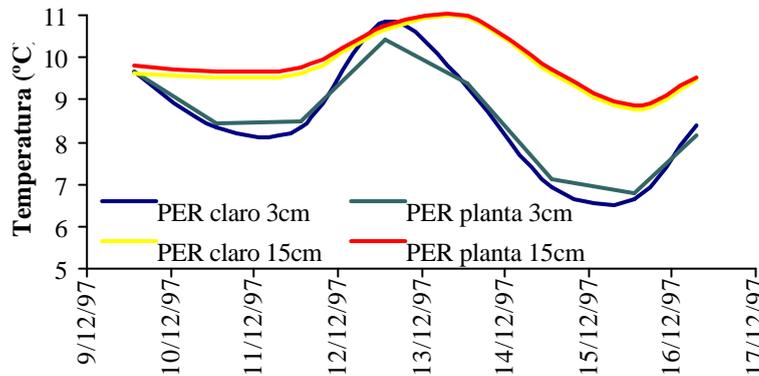


Figura 7.27: Temperatura media diaria del suelo en distintas posiciones y profundidades de la tesela PER, durante unos días de invierno.

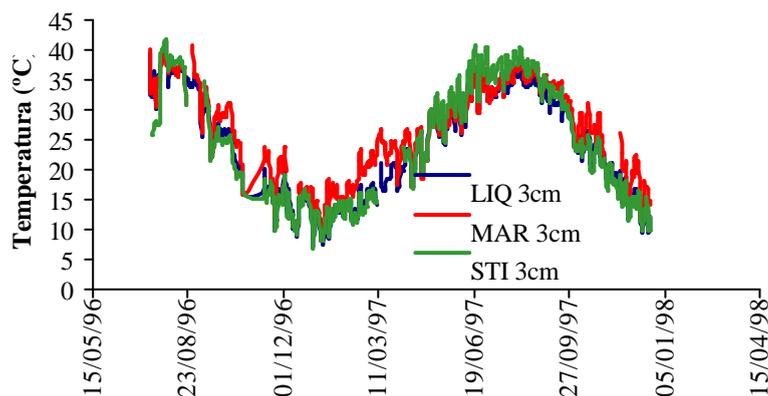


Figura 7.28: Temperatura media diaria del suelo en las teselas LIQ, MAR y STI a 3cm de profundidad. Para MAR y STI se hace un promedio de las medias diarias de T^a en la parte alta, media y baja de la respectiva ladera.

7.3.2.2.- Comparación de la temperatura del suelo en las diferentes teselas en cada estación.

En otoño la tesela MAR presenta los valores más elevados en la temperatura del suelo, es una tesela completamente desprovista de cubierta vegetal y donde el contenido en agua es menor que en el resto de las superficies, lo que favorece que se caliente más. LIQ y STI presentan temperaturas del suelo similares, coincidiendo con lo que ocurre con la humedad del suelo, como hemos estudiado previamente. La tesela PER a 3cm presenta temperaturas del suelo ligeramente inferiores a LIQ. A 15cm de profundidad, en PER, la temperatura media entre las distintas posiciones (claro, bajo planta y en posición intermedia) está amortiguada por la profundidad, no aumenta tanto la temperatura con las horas de máxima insolación, y se enfría menos que el suelo a 3cm (figura 7.29).

En invierno las diferencias en la temperatura del suelo entre las distintas superficies son similares a las observadas en otoño (figura 7.30).

La primera mitad de la primavera los patrones de la temperatura del suelo coinciden con los descritos para otoño e invierno, pero a partir de la segunda mitad de la primavera, la insolación aumenta sobre la tesela STI, el sol está más alto y la cantidad de radiación directa de onda corta que puede llegar a esta tesela orientada al Norte, es mayor, aumenta la temperatura media diaria del suelo en esta ladera, al mismo tiempo que disminuye la humedad (ver figura 7.31).

En verano la temperatura del suelo media diaria a 3cm de profundidad es más elevada en los claros de la tesela PER que en LIQ (en invierno era más baja en los claros) lo que pone de manifiesto el papel amortiguador de la cubierta de líquénica (figura 7.32). La tesela MAR la primera parte del verano muestra temperaturas del suelo inferiores a STI, pero en la segunda mitad de Agosto se igualan las temperaturas medias del suelo a 3cm de profundidad de ambas teselas, para en Septiembre ser la tesela MAR la que muestra temperaturas del suelo más elevadas, pues a partir de este momento, el sol vuelve a estar más bajo y la radiación solar directa que alcanza la superficie STI es menor.

7.3.2.3.- Ciclos diarios de temperatura del suelo en las diferentes teselas.

Cuando se observa el comportamiento de la temperatura del suelo cualquier día del año se comprueba que existe un patrón diario dependiente de la radiación solar. La radiación solar calienta la superficie del suelo durante el día y ésta se enfría a lo largo de la noche. La variación diaria de la temperatura sigue un modelo sinusoidal. La amplitud no es constante, sino que existe un efecto de amortiguamiento en función de la profundidad (Porta et al.,1994).

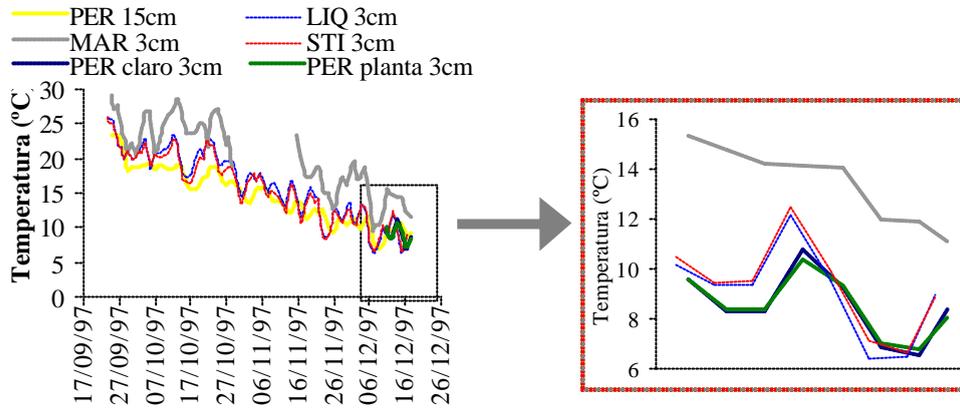


Figura 7.29: Temperatura del suelo media diaria en PER, LIQ, MAR y STI a 3cm y 15cm en otoño. Para MAR y STI promedio de las medias diarias de T^a en las distintas posiciones

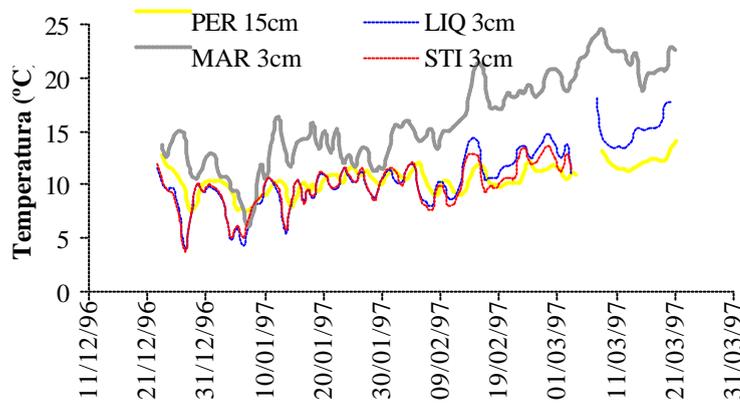


Figura 7.30: Temperatura del suelo media diaria en LIQ, MAR, STI y PER, en invierno.

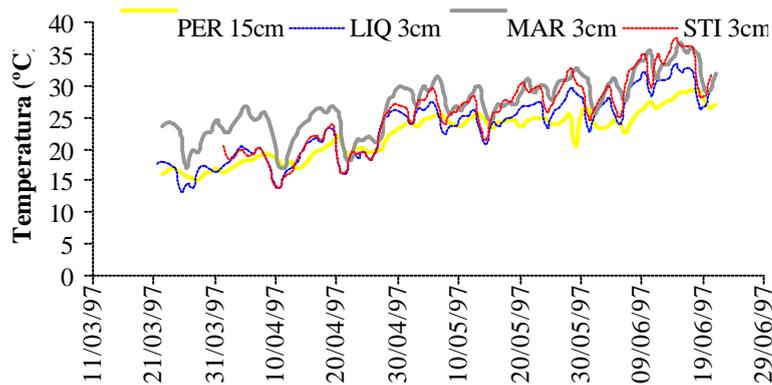


Figura 7.31: Temperatura media diaria en LIQ, MAR STI y PER en primavera.

7.- Humedad del suelo

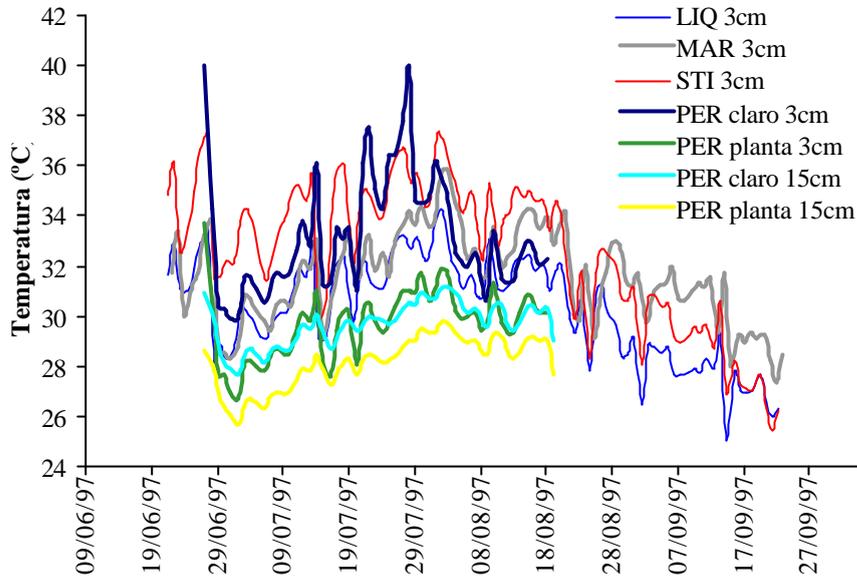


Figura 7.32: Temperatura media diaria de las teselas PER (bajo la planta y en claros), LIQ, MAR y STI a 3cm de profundidad en verano, y a 15cm de profundidad para PER. Para las MAR y STI se hace un promedio de las medias diarias de T^a en la parte alta, media y baja de la respectiva ladera.

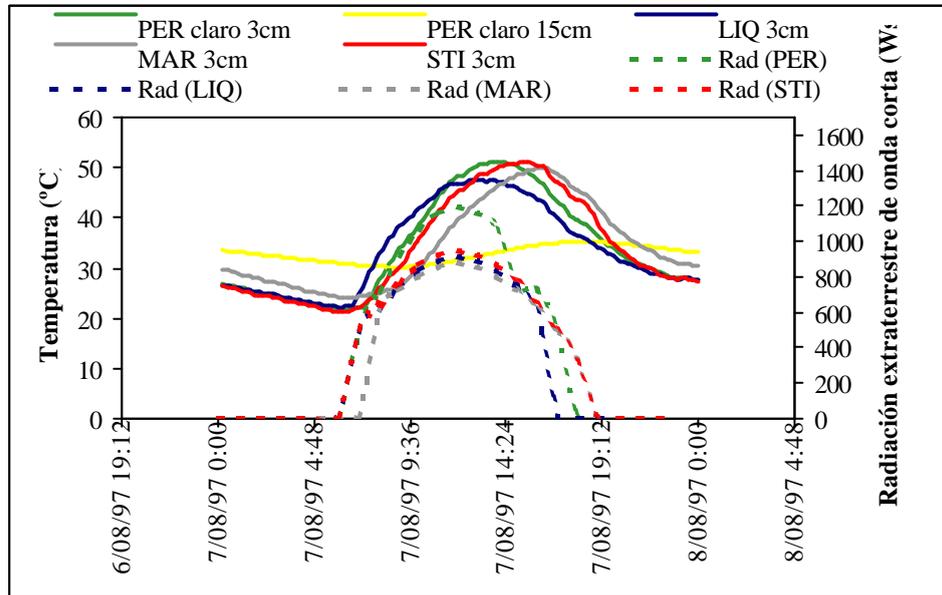


Figura 7.33: Ciclo diario de temperatura del suelo para una sonda de cada tesela, a 3cm de profundidad (en PER también a 15cm), para el día 7/8/97. En cada punto donde está situada cada sonda se calcula la radiación extraterrestre de onda corta sobre dicho punto ese día.

La figura 7.33, muestra los ciclos diarios de temperatura del suelo a 3cm de profundidad, en 4 sondas, una en cada tipo de tesela, y se observa que existe un retardo entre el máximo de radiación solar de onda corta extraterrestre y la temperatura máxima que alcanza el suelo, en todas las teselas. Este retardo se debe a que la temperatura del suelo se está midiendo a 3cm de profundidad y es necesario un tiempo para calentar la superficie del suelo y que el flujo de calor difunda hasta esta profundidad. A 15cm de profundidad el desfase entre el máximo de la temperatura del suelo y la radiación solar máxima es mayor que a 3cm de profundidad, en todas las estaciones del año, debido a que se tienen que calentar 15cm de suelo y es necesario una mayor inversión de tiempo, además la temperatura aumenta menos a 15cm de profundidad. Estos ciclos y los retardos varían de una estación a otra para un mismo punto en una misma tesela y de un tipo de tesela a otra, al igual que varía la insolación. En verano, por ejemplo el desfase de la radiación solar máxima y la temperatura máxima suele ser menor que en otras estaciones pues el suelo se calientan más rápidamente ya que la insolación es mucho mayor en este momento del año.

7.3.3.-Predicción de la humedad del suelo en las distintas teselas.

Para predecir el aumento de la humedad del suelo en cada tesela a partir de la cantidad de la cantidad de precipitación y de la humedad antecedente en el suelo de esa tesela se investiga la relación entre el volumen de precipitación que cae sobre la tesela y el cambio en la humedad del suelo que provoca y se observa que existe una relación logarítmica (figura 7.34).

Se pone de manifiesto que al principio pequeños cambios en el volumen de precipitación producen importantes cambios en la humedad del suelo, pero una vez el suelo presenta una humedad elevada los cambios son cada vez más pequeños hasta alcanzarse un valor por encima del cual la humedad del suelo no aumenta aunque se siga aportando agua, es el punto en el que el suelo está saturado. Esta relación presenta una pendiente diferente para cada tipo de superficie, lo que se puede observar en la figura 7.34. Para la marga la pendiente es menor que en PER, y se producen menores cambios en la humedad del suelo lo cual es lógico si se tiene en cuenta que este regolito es el que tiene menor capacidad de retención de agua.

Para lluvias muy pequeñas (inferiores a 5mm) el modelo se ajusta peor, pues la intensidad de la precipitación, que no afectaba cuando las lluvias son de mayor volumen, si es importante para estas lluvias. Por ello para estas precipitaciones en el modelo de regresión que calcula el aumento de humedad del suelo con la precipitación se incluye la intensidad de la lluvia. Lo que ocurre es que

7.- Humedad del suelo

si una precipitación es muy pequeña (<5mm) y la intensidad muy baja, cae en un intervalo de tiempo muy grande, se va evaporando y pueden no detectarse cambios, mientras que si cae en un intervalo de tiempo menor si puede provocar un aumento en la humedad del suelo. Por eso se incluye esta variable para esas precipitaciones.

En cuanto a como cambia la humedad del suelo con la precipitación en función de la humedad antecedente existe una relación lineal negativa, de manera que cuanto menor es la humedad antecedente, mayor es el cambio en la humedad del suelo que se produce tras la precipitación, y la pendiente es diferente para cada superficie (figura 7.35).

A partir de datos de humedad y precipitación correspondientes al primer año y mediante un modelo de regresión múltiple con 3 variables del tipo:

$$DHumedad\ suelo = b0 + b1 * \log(Precipitación) - b2 * Humedad\ antecedente$$

Las ecuaciones para cada superficie y la significación del ajuste se presentan en el anexo, sección A.7.4.

La segunda parte de modelo consiste en estimar como se va secando el suelo de cada superficie con el paso de los días, tras la lluvia. El volumen de agua que va perdiendo el suelo con el transcurso del tiempo.

Se desarrolla un modelo de regresión múltiple, paso a paso, con la forma:

$$\tilde{N}Humedad\ suelo = b0 + b1 * \log(t) + b2 * (R) + b3 (T) + b4 * (V)$$

t: nº de días desde el evento (días)

R: Radiación global media diaria sobre la superficie (W/m²)

T: Temperatura del aire media diaria (°C)

V: Velocidad del viento media diaria (m/s)

En la sección A.7.5 aparecen las ecuaciones para cada superficie en cada estación, y su grado de significación.

A partir de ambas series de ecuaciones podemos predecir la humedad media diaria siempre que conozcamos la distribución de la precipitación a lo largo del año, y los valores medios diarios de insolación, temperatura y velocidad del viento.

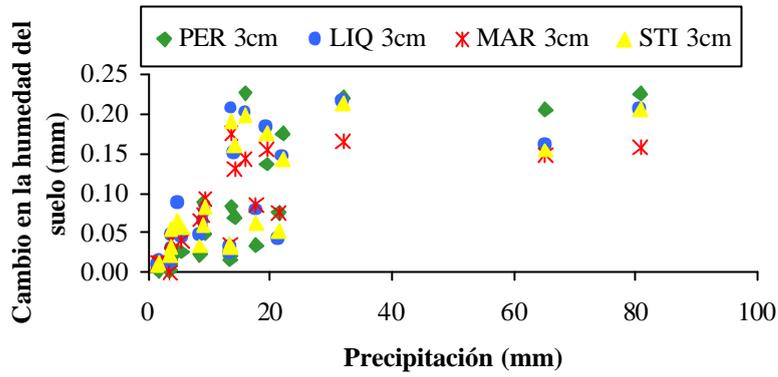


Figura 7.34: Aumento en la humedad del suelo media en las distintas posiciones, a 3cm de profundidad, de cada tesela, a medida que aumenta el volumen de precipitación.

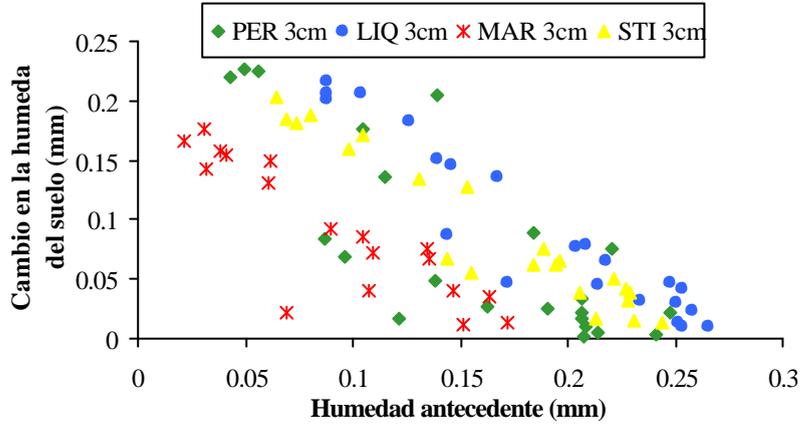


Figura 7.35: Disminución en la humedad del suelo media en las distintas posiciones, a 3cm de profundidad, de cada tesela, a medida que aumenta la humedad antecedente.

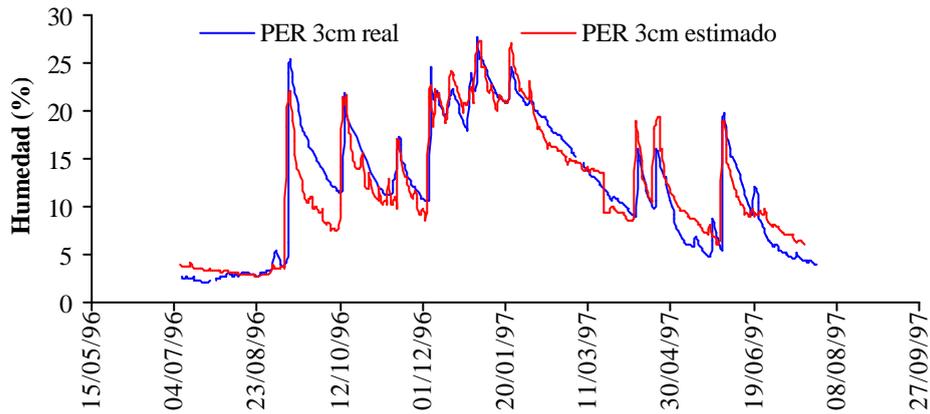


Figura 7.36: Humedad media diaria, a 3cm profundidad, en la tesela PER real y estimada.

7.- Humedad del suelo

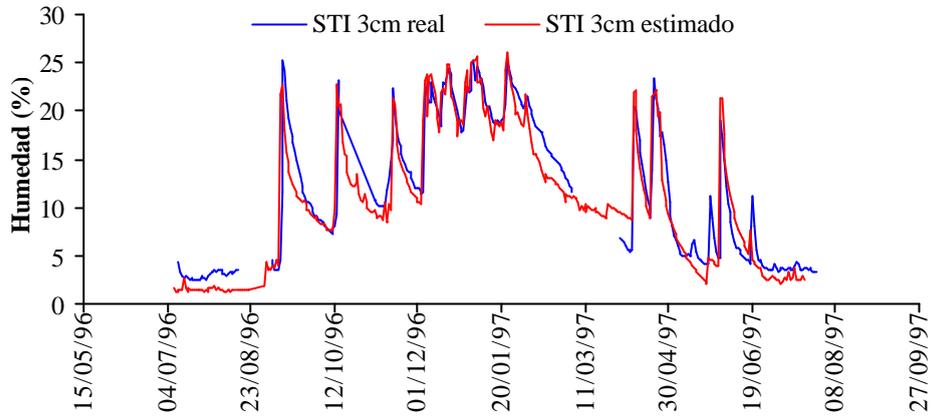


Figura 7.37: Humedad media diaria del suelo real y estimada, a 3cm profundidad, en la tesela STI.

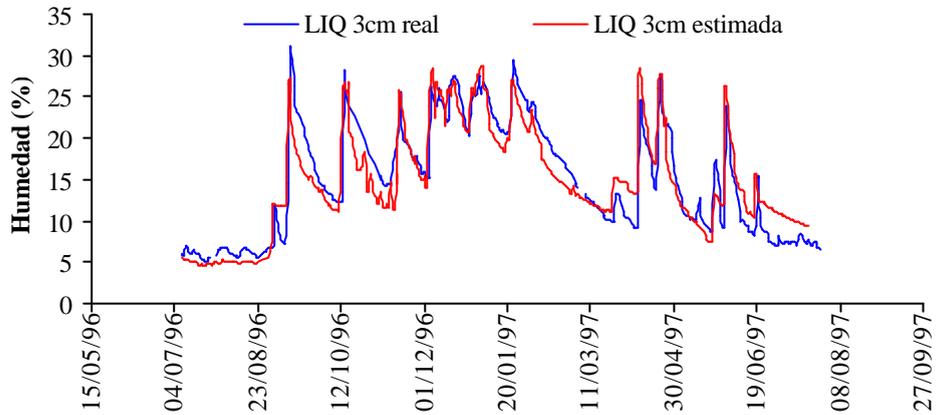


Figura 7.38: Humedad media diaria del suelo real y estimada, a 3cm profundidad, en la tesela LIQ.

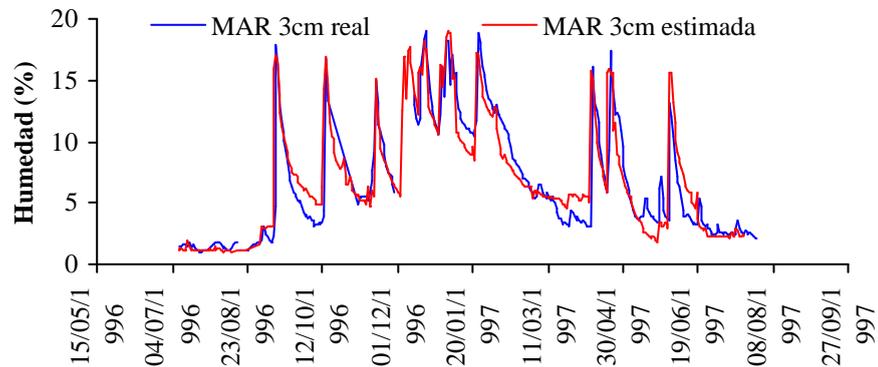


Figura 7.39: Humedad media diaria del suelo real y estimada, a 3cm profundidad, en la tesela MAR.

Las figuras 7.36 a 7.39 muestran que el modelo se ajusta bastante bien al año y medio de muestreo para las diferentes teselas. De manera que este modelo nos va a permitir calcular la humedad antecedente en cada superficie para integrar esta variable en el modelo de simulación de la generación de escorrentía que se presentará en el capítulo 9.

7.4.- DISCUSION

El principal objetivo de este capítulo era analizar los regímenes de humedad del suelo en las teselas más representativas (en términos de área que ocupan) y su relación con la distribución espacial de las mismas, cobertura, características topográficas y del suelo, para comprender como influye la disponibilidad de agua en el suelo, en la organización del mosaico de unidades del terreno que constituyen este paisaje.

Los regímenes de humedad descritos a las diferentes escalas temporales ponen de manifiesto que existen diferencias importantes en la disponibilidad de agua entre los diferentes tipos de teselas. En función del tipo de cobertura que presenta una tesela, se espera que la disponibilidad de agua en el suelo sea mayor en aquellas teselas con una cobertura vegetal “densa” de perennes y anuales, es decir PER y STI, seguidamente en LIQ que presenta una cubierta criptogámica y por último MAR desprovista de vegetación. Además las características del suelo estudiadas en el capítulo anterior corroboran esta secuencia en cuanto a la capacidad para almacenar agua. Además topográficamente también se favorecen la disponibilidad de agua en la secuencia expuesta. Cuando se mide la humedad del suelo en cada superficie, se mantienen en líneas generales los patrones esperados. Sin embargo existen excepciones como es el caso de la tesela LIQ, que presenta contenidos de agua en el suelo por encima de lo esperado, sobre todo en épocas de baja humedad.

La tesela LIQ se localiza en laderas donde no se favorece topográficamente el almacenamiento de agua en el suelo, por una parte porque no presentan zonas de contribución extensas y por otra parte presentan una pendiente bastante elevada (ver capítulo 5). Además las características del suelo no favorecen la retención de agua, aunque el contenido en arcilla y limo es bastante elevado y la porosidad alta (tabla A.7.1), sin embargo es un suelo con una estructura muy débil y con capacidad para retener agua relativamente baja, sobre todo a potenciales altos, mientras que la capacidad de retener agua para potenciales bajos es similar a la del resto de los suelos de la zona. Estas características hacen que este suelo se seque muy rápidamente, más que el suelo de las teselas PER y

STI. Pero sin embargo LIQ es la tesela que presenta los mayores promedios estacionales y anuales de humedad del suelo, además es la que tiene “agua útil” para la vegetación durante más días en un año, y en verano es la tesela con agua disponible durante más tiempo; aunque se seca más rápido el suelo de esta tesela, se seca menos.

La existencia de la cubierta criptogámica en esta tesela favorece la conservación del agua. Los líquenes constituyen una capa bastante continua que aísla al suelo de la radiación solar disminuyendo la evaporación. Brotherson y Rushforth (1983) encontraron que sellan la superficie del suelo y reducen la evaporación. Desde los años 20s algunos autores han propuesto que las cubiertas mucilaginosas de las algas verde-azules, que son los principales componentes de las costras criptogámicas en los ambientes áridos, forman una capa en la superficie del suelo que impide la infiltración del agua y también la evaporación del agua del suelo bajo esta capa de algas (Brotherson y Rushforth, 1983). Booth en 1941 (en Brotherson et al., 1983) demostró esta hipótesis y comprobó que había más humedad en el horizonte más superficial (en los 2.5 cm primeros concretamente) donde la cubierta criptogámica era predominante frente a suelos adyacentes sin esta cubierta (8.9% frente a 1.3% respectivamente). Brotherson y Rushforth en 1983 proponen que las costras microfíticas (líquenes, musgos y algas) en el norte de Arizona tienden a sellar la superficie del suelo y además de aumentar la profundidad de penetración del agua, reducen la evaporación, reduciendo el estrés hídrico en los ecosistemas desérticos, favorecen la conservación del agua y previenen la erosión del suelo. Por el contrario en 1988 Harper y Marble encontraron que zonas más acostradas perdían significativamente más agua de los 7-5cm superficiales de suelo que zonas con mezcla de costras y calvas, sin embargo sus estudios eran sobre costras de cianobacterias y líquenes oscuros. Ellos concluyeron que estas costras oscuras absorbían más radiación solar y alcanzaban mayores temperaturas, lo que podía conducir a una mayor evaporación. Pero en nuestro caso la tesela LIQ está constituida casi mayoritariamente por líquenes blancos, por lo que se trata de una superficie con un albedo muy elevado, reflejará una parte importante de la radiación, con lo que se reduce la evaporación.

Por otra parte West (1990), observa dos especies de cianofíceas en el desierto de Atacama que cementan las partículas de suelo y forman una maraña que almacena agua líquida. Nosotros hemos observado con microscopía electrónica fenómenos de agregación de partículas de suelo que podrían favorecer el almacenamiento de agua, como se comenta en el capítulo 6, en la figura 6.79

Otro argumento a favor de que las cubiertas liquénicas favorecen la conservación del agua en el suelo lo ofrece Galum (1963) que encuentra que más del 60% de los líquenes del Negev presentan varios tipos de capas amorfas superficiales que propone previenen la evaporación. En algunos casos, como en *Diploschistes steppicus* y *Caloplaca interveniens* no se distinguen estas capas especiales, en estas especies los espacios intercelulares del córtex superior están rellenos con muchos cristales finos de oxalato cálcico, formando junto con las células del córtex, una capa superficial continua. Al microscopio electrónico se observan este tipo de entramado de células del córtex y cristales en líquenes de la tesela LIQ (figura 7.40). Gallum asume que este cortex reduce la evaporación y comenta que los talos con colores luminosos absorben menos rayos solares que los oscuros, lo cual supone una ventaja importante en las regiones con alta insolación.

Por lo tanto el suelo de LIQ tiene una menor capacidad de retener agua a potenciales altos, mientras que para potenciales bajos la capacidad para retener agua se hacen muy similares en LIQ y PER, de manera que a potenciales bajos, cuando el contenido en agua en el suelo es bajo, debido al papel que ejerce la cubierta liquénica, la humedad en la superficie LIQ se mantiene por encima de la humedad en PER.

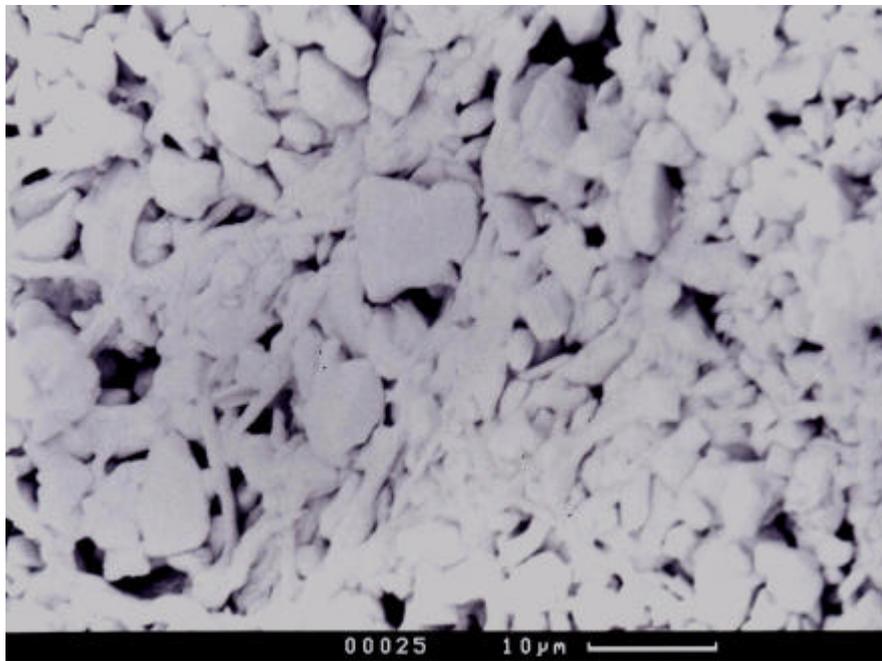


Figura 7.40: Cortex de *Diploschistes diacapsis*. Observar entramado de hifas y cristales de oxalato.

La presencia de la costra criptogámica en la tesela LIQ favorece el contenido de agua en el suelo, además probablemente mejora otras características del suelo, lo que propicia la colonización de estas laderas por plantas superiores. Existen evidencias en otras zonas de que las cubiertas microfíticas potencian la producción vegetal (Mücher et al., 1988) atribuida al aumento de la humedad del suelo y al aumento de la germinación de semillas. Las costras criptogámicas estabilizan la superficie del suelo en regiones áridas y semiáridas y contribuyen a la fertilidad del suelo a través de la fijación de nitrógeno, retención de finos y aumento de la materia orgánica del suelo. La germinación y el consiguiente desarrollo de las semillas de plantas vasculares parecen verse afectados por la presencia de estas costras (Johansen, 1993). Estas costras influyen en la disponibilidad de elementos esenciales diferentes del N. Además, el P disponible, el K intercambiable y el contenido en materia orgánica aumentan rápidamente con la cubierta criptogámica (Harper y Pendleton, 1993). En definitiva esta cubierta líquénica interviene en la formación del suelo, añaden materia orgánica y nutrientes al suelo y mejoran la estructura de los agregados, con lo que aumentan el desarrollo de este suelo (West, 1990). La cubierta líquénica sobre la superficie LIQ induce el desarrollo de suelo y una vez éste desarrollo es mínimamente adecuado, las plantas vasculares del tipo de *Euzomodendrum bourgeanum* y *Helianthemum almeriense* se instalan dando lugar a laderas con abundante líquenes y arbustos de este tipo (LIQ2 en figura 4.1). En estas laderas la observación de un perfil en el suelo permite comprobar que el suelo presenta un mayor desarrollo, una estructura más desarrollada, el contenido en materia es mayor 1.55% frente al 1.17% de promedio en horizonte superficial de LIQ. El aumento de la humedad del suelo que proporciona la cubierta líquénica sobre todo en épocas de sequía debe favorecer el desarrollo de estas plantas vasculares.

La tesela PER es la que presenta mayor disponibilidad de agua a lo largo del año, exceptuando LIQ, lo cual está de acuerdo con el tipo de cubierta vegetal que sostiene, un matorral disperso con anuales en los claros. El suelo bajo esta cubierta, presenta una estructura moderadamente desarrollada, con los mayores contenidos en materia orgánica y la mayor capacidad para retener agua. Topográficamente está favorecida la presencia de agua en el suelo, pues se trata de una superficie que se sitúa en la parte baja de las laderas, con áreas de contribución muy extensas y pendientes suaves. Esta mayor capacidad para conservar el agua se pone de manifiesto cuando se observan los patrones de humedad del suelo en esta tesela y se comparan con los del resto de las teselas.

En la tesela PER la humedad del suelo varía según se mida bajo planta o en

los claros. Bajo planta la humedad del suelo se mantiene más elevada que en los claros, lo cual se ha puesto de manifiesto a escala anual y estacional. El suelo en los claros se seca más rápidamente que bajo planta y el número de días del año y de cada estación por separado que existe agua “disponible para las plantas” es mayor bajo planta que en los claros. El régimen de humedad bajo la planta, se ve favorecido por las mayores tasas de infiltración debidas a la mayor acumulación de hojarasca y mayores niveles de materia orgánica que promueven una estructura más desarrollada del suelo y mayor capacidad para retener agua como señalan Francis et al. (1986). Se ha comprobado que existe un contenido en materia orgánica mucho más elevado bajo planta que en los claros: el contenido en materia orgánica bajo la planta a 3cm de profundidad es 3.5%, mucho más elevado que en el claro, 1.72%. A 15cm de profundidad también es mayor el contenido en materia orgánica bajo planta (1.17%) que en los claros (0.76%). Por otra parte la escorrentía no se distribuye uniformemente en el espacio; los arbustos individuales actúan como sumideros de la escorrentía producida en los claros degradados, creando un patrón en mosaico con una respuesta hidrológica contrastada, como se ha comprobado en otras zonas semiáridas del sureste de España (Cerdá, 1995; Bergkamp et al., 1996). Además, la arquitectura de la planta puede jugar un papel de embudo, dirigiendo la precipitación hacia el suelo a lo largo de los tallos por escorrentía cortical. El efecto embudo supone un área de captación de agua de lluvia bastante grande que luego por escorrentía cortical se concentra en un área más pequeña alrededor del tronco (González-Hidalgo y Bellot, 1997). Como las sondas se colocaron próximas al tronco de la planta, a unos dos centímetros, el efecto embudo puede ser importante. En definitiva, bajo la planta, aumenta la infiltración y disminuye la escorrentía (Carson y Kirby, 1972). En los resultados presentados, esto se pone de manifiesto con lluvias grandes, en las que los picos que se alcanzan bajo planta son superiores a los picos de los claros.

También se demuestra que la humedad del suelo se mantiene más elevada a 15cm de profundidad que a 3cm, tanto bajo la planta como en los claros, a escala estacional y anual. Se seca más rápidamente el suelo a 3cm de profundidad que a 15cm, el agua del suelo se evapora menos cuanto mayor sea la profundidad. A 15cm de profundidad también se ponen de manifiesto las mismas diferencias descritas a 3cm entre claros y bajo planta que podrían justificarse relacionándolo con lo que ocurre en superficie, pues si la mejora en determinadas propiedades del suelo favorece la infiltración en los primeros centímetros de suelo, esto significa que llegará más agua a 15cm de profundidad bajo planta que en los claros. Las propiedades del suelo también a 15cm podrían verse afectadas por la presencia de

7.- Humedad del suelo

la planta, así el contenido en materia orgánica a 15cm de profundidad es ligeramente superior bajo planta que en los claros. Además el suelo bajo planta a 15cm se seca más lentamente que en los claros a 15cm

La variabilidad espacial en la humedad del suelo en la tesela PER no sólo se pone de manifiesto en los mayores contenidos en humedad bajo planta sino también en como responde cada posición y profundidad ante una precipitación. A 3cm de profundidad, las posiciones claro y planta se diferencian en el momento y forma de aumento de la humedad del suelo. La humedad aumenta primeramente en los claros y lo hace lenta y progresivamente, este aumento se detecta cuando han caído unos pocos milímetros. Sin embargo para que se observe cambio en la humedad bajo planta es necesario que el volumen precipitado sea mayor, al menos 5.5 ó 6mm. Lo cual se explica porque al principio de la precipitación la planta intercepta la mayor parte de la lluvia, pero una vez la copa de la planta se satura aumenta la precipitación efectiva (trasculación y escorrentía cortical) y de súbito una gran cantidad de agua alcanza un área reducida de suelo (recordemos el efecto embudo que ejerce la arquitectura de la planta), lo que hace que aumente drásticamente la humedad del suelo a 3cm en esa zona de influencia de la precipitación efectiva.

Esto también explica que determinados eventos, de volumen reducido, que provocan cambios substanciales en la humedad del suelo en otras teselas como LIQ o STI, sin embargo en PER (promedio de posiciones claro y planta) el aumento en la humedad del suelo es menor, debido a las pérdidas de parte de la precipitación por intercepción.

La diferencias en la humedad del suelo entre las dos profundidades también se ponen de manifiesto cuando se observa el aumento de la humedad del suelo cuando llueve. Por un lado son necesarios eventos de mayor volumen para que se produzca un aumento en la humedad del suelo a 15cm y para un mismo volumen de precipitación el aumento de la humedad a 15cm, generalmente es menor, excepto en el caso de eventos muy grandes que saturan el suelo a ambas profundidades, y aún en este caso el aumento seguiría siendo ligeramente menor, pues la humedad a 15cm suele ser superior a la humedad a 3cm, con lo que el aumento de la humedad será menor.

La tesela STI presenta unos regímenes de humedad diferentes en función de la posición en la ladera que se mida. Esta ladera presenta gran variabilidad en las propiedades del suelo, que a su vez es la causa de que encontremos regímenes de humedad diferentes. En líneas generales el patrón de humedad en esta superficie se caracterizan por un lado porque los máximos de humedad del suelo son menores en

esta tesela y el suelo se seca más rápidamente que en PER. Esto se explica por las características del suelo, se trata de un suelo con alto contenido en arena y una menor capacidad de retención de agua, se satura antes y se seca mas rápidamente. En esta tesela la disponibilidad de agua para la vegetación está más limitada en el tiempo, la segunda mitad de la primavera y el verano, el suelo presenta una humedad baja, inferior al volumen de agua retenido a un potencial de -1500 kPa, sin embargo como la insolación que recibe esta ladera el resto del año es menor, se contrarresta en cierto modo la menor capacidad de este suelo para retener agua, y se favorece la existencia de un matorral bastante denso en esta ladera.

La tesela MAR, es la que muestra el régimen de humedad del suelo más árido. Los contenidos de humedad en el suelo de esta tesela, se mantienen más bajos que en el resto de las teselas durante todo el año, los máximos de humedad que alcanza son menores, que en el resto de teselas y es la que más rápidamente se seca. La ausencia de cubierta vegetal hace que el suelo de MAR se caliente más, pese a no ser la que más insolación recibe, de ahí que se registren las temperaturas más elevadas y la menor humedad. Pero tanto o más importante que su desnudez es la ausencia de un suelo evolucionado en este tipo de tesela, que presenta un regolito margoso, sin estructura, con una capacidad muy limitada para retener el agua. Por otro lado las características topográficas de la tesela MAR no favorecen altos contenidos en agua en este suelo, pues las áreas de contribución son poco extensas y las pendientes muy elevadas. El régimen de humedad del suelo de esta tesela a su vez retroalimenta la ausencia de cubierta vegetal, es tan limitada la disponibilidad de agua que la colonización vegetal está impedida.

La heterogeneidad en la respuesta de los suelos de las diferentes teselas, en términos de aumento de la humedad, ante la precipitación se explica por las características de la superficie del suelo. Aunque en esta respuesta influye la humedad antecedente y la intensidad de la lluvia, es fundamental el control que ejercen el tipo de cubierta o los procesos de acostamiento y dentro de un mismo tipo de tesela la posición respecto a la planta o el patrón de grietas de la superficie.

En general, los regímenes de humedad del suelo, están controlados en gran medida por el tipo de cobertura que presenta la superficie del suelo y por las características del suelo. El control topográfico sobre la humedad del suelo no es fácil de establecer cuando se consideran todas las superficies al mismo tiempo, pues interfiere la influencia del tipo de cobertura de la tesela y las características del suelo. Para estudiar las relaciones de la humedad del suelo con la topografía es necesario estudiarlas por separado, dentro de cada tipo de tesela.

7.- Humedad del suelo

Para las laderas B y C la humedad en la parte alta es más elevada que en la parte baja y en la ladera A parte del año (cuando la humedad en el suelo es baja) también en la parte alta la humedad es más elevada que en la parte baja. Esta distribución de la humedad del suelo, contraria a lo que suele ocurrir en zonas húmedas, se explica por la menor insolación que reciben estas partes más altas pero sobre todo por el tipo de cobertura de la superficie del suelo, apoyando estudios en otras zonas áridas que demuestran que la aridez aumenta en la parte baja de la ladera y el control en la distribución de la humedad del suelo lo atribuyen a las propiedades de la superficie concretamente de la tasa roca/ suelo de esa superficie (Yair y Lavee, 1985; Kadmon et al., 1989; Yair, 1990).

Los regímenes de humedad del suelo en las distintas teselas ponen de manifiesto que los procesos de lavado están limitados en este ecosistema por la baja frecuencia de lluvias. Solo en la tesela LIQ durante 17 días del año la humedad media diaria del suelo superó la retención de agua a -0.33 bares dando lugar a procesos de drenaje y lavado.

Los regímenes de temperatura del suelo están en consonancia con los patrones de humedad observados, de tal manera que la tesela MAR que es la que presenta los menores contenidos de humedad es la que mayor temperatura presenta, mientras que PER y LIQ presentan temperaturas menores y mayores contenidos en humedad.

En la tesela PER las diferencias observadas en la humedad del suelo entre claros y bajo planta van acompañadas de diferentes temperaturas del suelo. Así en los claros las temperaturas son más extremas que bajo planta. De la misma forma las diferencias en función de la profundidad, también se manifiestan en la temperatura del suelo, de manera los cambios en la temperatura del suelo se amortiguan con la profundidad.

En todas las teselas y a lo largo de todo el año se observa que existe un cierto desfase entre el máximo de insolación y el máximo de temperatura, que es el tiempo necesario para que se caliente el suelo, que es mayor con la profundidad, pues se ha de calentar un mayor volumen de suelo, y en invierno.

Por último es posible predecir a partir de la distribución de la precipitación en el tiempo y la radiación global, temperatura y velocidad del viento, los regímenes de humedad media diaria en cada tesela. No obstante, esta predicción se ha hecho con un número limitado de datos (solo un año y medio) sería conveniente mejorar esta predicción abarcando más tiempo para integrar mayor variabilidad de precipitaciones y cambios de humedad del suelo.

7.5.- CONCLUSIONES

La disponibilidad de agua en el suelo varía de un tipo de tesela a otro. Y esta variabilidad está controlada fundamentalmente por el tipo de cobertura y las características del suelo y a su vez los regímenes de humedad del suelo determinan el tipo de cubierta vegetal que puede sostener ese suelo, controlando la organización espacial del mosaico de unidades que integran este paisaje.

Las teselas con desprovistas de cubierta vegetal presentan los regímenes de humedad más áridos por la ausencia de un suelo desarrollado en estas unidades, que en su lugar, presentan un regolito margoso con muy baja capacidad para retener el agua que junto con la falta protección sobre la superficie provoca estos áridos regímenes de humedad que limitan la colonización vegetal.

La cubierta criptogámica favorece la conservación de agua en el suelo, por lo que en la unidad LIQ, aunque las características del suelo no propician la retención de agua, sin embargo la disponibilidad de agua es relativamente alta. Este tipo de cubierta además induce una mejor estructura del suelo y mayores contenidos en materia orgánica. En definitiva favorece el almacenamiento de agua y nutrientes en el suelo lo que será aprovechado por las plantas superiores que colonizan las zonas de estas superficies donde el suelo está más desarrollado.

Los patrones de humedad del suelo en la tesela PER varían en función de la profundidad y de la posición respecto a la planta, de tal manera que bajo la planta la disponibilidad de agua en el suelo es mayor que en los claros debido por un lado a la protección frente a la radiación solar que constituye la planta pero sobre todo a que la influencia de ésta mejora las características del suelo y su régimen hídrico. La humedad del suelo es mayor a 15cm de profundidad que a 3cm, aunque en los claros a 15cm de profundidad la disponibilidad de agua, cuando la humedad del suelo es baja, es muy similar a la del suelo a 3cm de profundidad bajo la planta.

Los regímenes de humedad en el área de estudio están relacionados con las propiedades del suelo y con las características topográficas, pero es difícil determinar en que medida contribuye cada uno de estos factores tal y como hemos enfocado este estudio debido sobre todo a que el tipo de cobertura de la tesela ejerce un control muy importante que enmascara al resto.

La baja frecuencia de precipitaciones limita los procesos de lavado de este suelo y la edafogénesis, lo cual se pone de manifiesto cuando se estudian los regímenes de humedad de estos suelos.

Las unidades del terreno estudiadas además de presentar regímenes de humedad diferentes responden de diferente forma, en términos de cambios en la humedad del suelo, frente a la precipitación. Esta respuesta está influenciada por la

7.- Humedad del suelo

humedad antecedente, la intensidad de la precipitación y sobre todo por las características de la superficie como cobertura, acostramiento, patrón de grietas.

Los regímenes de temperatura del suelo están en consonancia con los patrones de humedad observados y se observan diferencias en la temperatura del suelo en función del tipo de cobertura, de la profundidad y de la posición respecto a la planta, muy similares a las de la humedad del suelo.

La temperatura muestra un comportamiento diario cíclico ajustado al de insolación y en todas las teselas y a lo largo de todo el año se observa que existe un cierto desfase entre el máximo de insolación y el máximo de temperatura, que corresponde al tiempo necesario para que se caliente el suelo, que es mayor con la profundidad, pues se ha de calentar un mayor volumen de suelo, y en invierno.

Aunque es posible predecir la humedad media diaria del suelo en cada tesela a una determinada profundidad a partir este estudio, consideramos que conveniente ampliar el tiempo de observación de los regímenes de humedad para incluir la suficiente variabilidad de precipitaciones, tan grande en zonas áridas, como para que estas predicciones sean definitivas.

CAPITULO 8

PROCESOS DE METEORIZACION DE LA MARGA

8.1.- INTRODUCCION.

La génesis del suelo y sus características dependen de los procesos de meteorización y de las tasas con que se desencadenan. (Porta et al., 1994). En paisajes de cárcavas los procesos de meteorización del regolito pueden desencadenarse con la simple humectación que puede ser suficiente para disgregar el material y dispersar los minerales de arcilla (Howard, 1994). La alta proporción de roca expuesta, así como las propiedades estructurales y litológicas de los materiales implicados justifican la efectividad de los procesos de meteorización en este tipo de paisajes (Goudie, 1989).

El papel de la meteorización es fundamental en el modelado de los paisajes áridos. La meteorización prepara la roca madre para la posterior actuación de los procesos erosivos, proporcionando los recursos para la evolución de las geoformas. Las principales variables que afectan a la tasa de meteorización en zonas áridas son la insolación, la humedad y la sal, especialmente los dos últimos (Goudie, 1989).

En el desierto de Tabernas parecen actuar simultáneamente los cambios en la humedad y hidratación y cristalización de sales favoreciendo la meteorización de la roca. Este capítulo pretende confirmar esta hipótesis.

El objetivo es estudiar los procesos de meteorización del material parental para comprender los procesos edafogénicos y las tasas de erosión que se registran en la zona de estudio.

Para ello se estudiarán experimentalmente los cambios volumétricos y microestructurales generados por los ciclos de humectación-deseccación, que provocan la meteorización de la marga, con el objeto de facilitar la comprensión de los procesos de formación del suelo y la erosionabilidad de estos materiales.

8.2.-METODOS

8.2.1.- Meteorización experimental en laboratorio.

Se extrajeron 11 fragmentos de roca madre inalterada de 20 x 10 x 5 cm y se introdujeron en cajas de aluminio (figura 8.1). En la cara inferior de la caja se coloca una tela permeable al agua que impide la pérdida del material que se va desintegrando. Tres de las muestras se utilizan como control (no se someten a ningún tratamiento). Seis se someten a ciclos de humectación-desección. Para ello se colocan sobre un baño de arena saturado con agua destilada, y por capilaridad el agua va saturando todo el bloque, y una vez completamente saturado se secan en la estufa a 40°C hasta que se estabiliza su peso. Una muestra se mantiene continuamente saturada y otra siempre a 40°C.

De las seis muestras sometidas a ciclos de humectación-desección dos de ellas se someten a 5 ciclos, otras dos a 10 ciclos y otras dos a 20 ciclos. En cada ciclo se humedecen hasta saturación y se secan a 40°C en una estufa, pesándose cuidadosamente antes y después de cada semi-ciclo. Una vez completados los ciclos se retiran con pincel las sales que afloran a la superficie y el material desintegrado se pesa y cada bloque se divide en dos partes, una se destinará a analizar el contenido en sales solubles y la otra para análisis micromorfológicos.

Para analizar las sales solubles se toman muestras a diferentes profundidades: de 0 a 1mm; de 1 a 10mm y de 20 a 40mm. Se hace una disolución 1:5 sólido-agua y se mide en el extracto Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ mediante absorción atómica y los aniones Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-} por cromatografía iónica.

8.2.2.- Meteorización en parcelas de campo

En 1994, delimitamos 2 parcelas de roca madre no alterada, de 50 x 50cm perfectamente aisladas para evitar la entrada de agua por escorrentía. En el borde inferior de las mismas se colocaron sendos canales conectados a sus respectivos depósitos, de esta forma recogemos el agua y sedimentos después de cada evento. Una de las dos parcelas servirá como control. (figura 8.2)

Mensualmente se va al campo para recoger, ayudándonos de un pincel, el material desintegrado que aparece sobre una de las parcelas, y se pesa. Asimismo después de cada evento se recogen el agua y los sedimentos de ambas parcelas y se fotografían. El seguimiento de estas parcelas tuvo lugar desde Junio de 1994 hasta Diciembre de 1997.

8.3.-RESULTADOS.

8.3.1.- Meteorización de la marga en laboratorio.

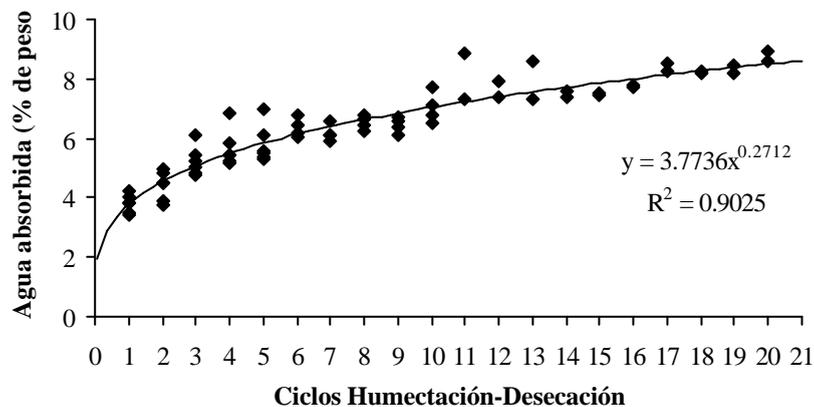
Los experimentos de laboratorio ponen de manifiesto que la secuencia evolutiva de pesos secos y húmedos en las series de ciclos humectación-desección presenta las siguientes características:

- los pesos secos disminuyen al aumentar el número de ciclos; lo que indica que ha habido disolución de sales solubles en las fases de humectación.

- los pesos húmedos aumentan al aumentar el número de ciclos; a consecuencia del punto anterior, aumenta el volumen de poros en cada ciclo, por lo que la absorción de agua aumenta.

- las amplitudes entre peso seco y peso húmedo de cada ciclo van aumentando a medida que aumenta el número de ciclos. Indica un progresivo aumento del volumen poral inicial.

Las diferencias entre peso seco y húmedo pueden considerarse como los volúmenes de agua absorbidos por las muestras (valor posiblemente próximo a la capacidad máxima de absorción de agua). La figura 8.3 indica que el mayor



aumento de volumen se produce en los primeros ciclos (los más "meteorizantes").

Figura 8.3: Aumento del % de peso del bloque, por la absorción de agua tras cada ciclo.

Tras cada serie de ciclos se pesan las sales exudadas en la superficie del bloque y se observa un aumento en la cantidad de sales exudadas y material descamado en la superficie del bloque a medida que aumenta el número de ciclos de humectación-desección. Con 5 ciclos la cantidad de sales y partículas descamadas está en torno a 0.5 gramos, al cabo de 10 ciclos próximo a 3 gramos y

8.- Meteorización

al cabo de 20 ciclos en torno a 10 gramos. Las exudaciones en superficie son especialmente importantes en el bloque que se mantiene siempre saturado, 16.5 gramos. Los análisis de cationes totales solubles muestran en todos los bloques sometidos a ciclos de humectación-desección, una migración de cationes solubles hacia la superficie, donde la concentración de cationes solubles es más elevada que en la parte media del bloque, donde a su vez es mayor que en la parte baja, como se observa en la tabla 8.1.

muestra		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	S cat	S anio
5 ciclos	1a	4	4.33	8.78	0.51	0.91	9.92	2.75	17.63	13.58
	1b	7.2	2.50	3.57	0.41	4.89	6.50	1.40	13.68	13.74
	1c	2.8	2.17	1.48	0.41	0.00	6.83	0.25	6.86	7.07
	2a	10.1	9.67	7.39	0.51	6.96	17.68	1.60	27.67	26.23
	2b	8.7	3.00	4.17	0.41	5.75	9.49	0.25	16.28	15.49
	2c	5.1	4.17	2.52	0.36	4.43	6.04	2.00	12.15	12.47
10 ciclos	3a	6.2	8.17	13.91	1.03	8.31	20.81	2.69	29.31	31.81
	3b	9.1	4.00	3.04	0.51	7.93	7.61	1.15	16.66	16.69
	3c	8.4	3.33	2.17	0.41	7.69	5.67	1.52	14.32	14.88
	4a	7.6	4.50	7.48	0.67	6.00	12.32	2.49	20.24	20.81
	4b	14.5	4.00	3.57	0.46	14.71	7.29	1.25	22.53	23.24
	4c	10.5	5.67	1.83	0.41	5.87	12.00	1.30	18.40	19.17
20 ciclos	5a	4	6.33	13.91	0.51	7.29	16.60	0.87	24.76	24.77
	5b	5.3	3.00	3.13	0.46	0.00	10.56	1.37	11.89	11.94
	5c	1.2	1.50	1.39	0.31	0.00	3.17	1.37	4.40	4.54
	7a	12.5	9.50	11.91	0.97	10.15	24.06	0.75	34.89	34.95
	7b	5.5	6.17	2.26	0.87	0.02	13.97	1.02	14.80	15.02
	7c	1.1	1.67	1.13	0.36	0.00	3.08	1.30	4.26	4.38
control	6a	8.8	2.83	4.96	0.36	2.94	10.53	1.90	16.95	15.37
	6b	6.7	3.17	6.17	0.41	1.67	10.33	1.10	16.45	13.09
	6c	6.9	3.67	7.48	0.62	1.90	13.82	1.07	18.66	17.79
	9a	3.4	3.67	4.26	0.36	1.49	8.68	1.65	11.69	11.82
	9b	5.4	3.83	4.96	0.36	0.00	11.76	1.20	14.55	12.96
	9c	3.9	3.50	4.78	0.41	0.00	10.69	1.60	12.59	12.29
	11a	7.2	3.17	4.43	0.36	1.03	10.98	1.67	15.16	13.68
	11b	9.2	4.50	6.78	0.41	2.02	12.47	1.85	20.89	21.52
	11c	1.9	4.33	5.39	0.36	1.03	6.26	1.92	11.98	10.89
siempre 40°	8a	8.5	2.83	6.09	0.51	2.17	11.92	0.12	17.93	14.22
	8b	4.7	3.00	6.17	0.46	1.22	10.22	1.10	14.34	12.54
	8c	6.3	3.17	5.48	0.46	1.35	12.82	1.40	15.41	15.57
siempre sat.	10a	0.2	1.00	1.39	0.21	0.00	0.00	2.90	2.80	2.90
	10b	4	1.67	1.04	0.36	0.00	4.79	1.32	7.07	6.12
	10c	4	4.17	2.70	0.51	0.00	11.46	1.27	11.38	12.73

Tabla 8.1: Concentración de cationes y aniones en solución 1:5 en meq/L



Figura 8.1: Bloques de roca inalterada en cajas al inicio del experimento



Figura 8.2: Parcelas de meteorización de campo.



Figura 8.4: Bloques de marga controles no sometidos a ningún ciclo de humectación-dsecación (a derecha) y a la izquierda bloques sometidos a 20 ciclos de humectación desecación.

8.- Meteorización

PARCELA CONTROL (INICIO)



PARCELA CONTROL (FINAL)



PARCELA 1 (INICIO)



PARCELA 1 (FINAL)



Figura 8.5: Parcelas control (no sometida a retirada de material) al inicio y final del experimento. En ambos casos se observa la alteración que experimenta la parcela.

El agua satura el bloque de roca y va disolviendo sales, a medida que se evapora el agua (la parte de arriba es una superficie libre en contacto con el aire) se quedan, sobre la superficie del bloque, las sales que llevaba disueltas el agua y de ahí el aumento de concentración de iones solubles hacia arriba.

El bloque siempre saturado muestra una migración en sentido contrario. En medio saturado ocurren dos procesos, por un lado el agua se está evaporando por la superficie de arriba del bloque, lo que da lugar al transporte de sales con este agua y las exudaciones en su superficie, pero por otra parte en el medio saturado, las sales disueltas tienden a dirigirse hacia la base donde está el baño de arena saturado de agua, hacia donde el gradiente salino es menor.

Finalmente, la alteración de los fragmentos de roca y la porosidad aumenta con el número de ciclos como se puede observar en la figura 8.4

Mediante análisis de imagen con el Quantimet 570, como se describe en el capítulo 6, se mide la porosidad de un perfil de regolito, desde la marga fresca hasta la superficie donde aparece el regolito bastante alterado, y el resultado es que la macroporosidad de la marga fresca, no alterada está en torno 1.95%, en el horizonte intermedio, entre 10-15cm la macroporosidad representa el 17.35% y en superficie donde aparece el regolito muy meteorizado es de 27.9%.

8.3.2.- Meteorización de la marga en parcelas de campo.

Después de tres años y medio de seguimiento de las parcelas, la alteración de la superficie de las parcelas es evidente (figura 8.5).

Los resultados de las parcelas experimentales muestran que en la parcela control (sin descamación), la tasa promedio de remoción es de $1.79\text{Kg/m}^2/\text{año}$ (0.68mm/año), y en la parcela activa (con remoción de sedimentos superficiales, lo que sería equiparable a lo que sucede en el fondo de los cauces) la tasa promedio de remoción (calculadas en base a la densidad aparente de la roca no meteorizada) fue de $12.45\text{Kg/m}^2/\text{año}$ (4.71 mm/año). Cuando la eliminación de partículas es más agresiva, y se retiran todas las partículas sueltas, independientemente que sean o no arrastradas con la brocha, la tasa de remoción es de $20.74\text{Kg/m}^2/\text{año}$ (7.89mm/año).

Cuando llueve, la mayor parte de los sedimentos se depositan en el canal Gerlach y sólo una pequeña parte es arrastrada hasta el depósito. Las exportaciones que se recogen en el depósito son fundamentalmente solutos, que constituyen entre el 95 y 99% del total exportado al depósito, pues sedimentos

8.- Meteorización

mayores de $0.45\mu\text{m}$ son escamas o partículas de mayor tamaño que se depositan en el fondo del Gerlach. La figura 8.6 muestra el aumento de la exportación de sedimentos (en su mayoría disueltos) a medida que aumenta la escorrentía.

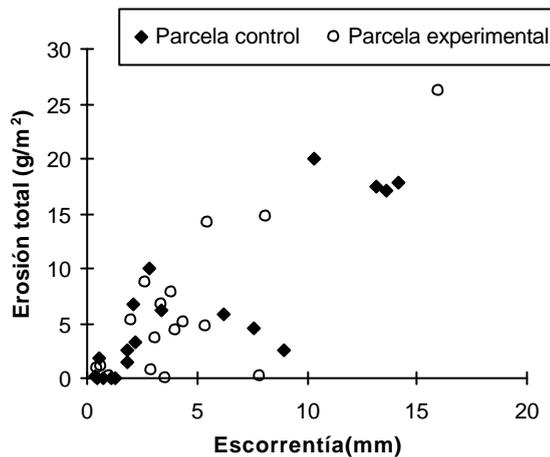


Figura 8.6: Aumento de la exportación de sedimentos (solutos en su mayoría) a medida que aumenta la escorrentía.

8.4.- DISCUSION

Los resultados de los experimentos de meteorización, tanto en laboratorio como en el campo ponen de manifiesto la importancia de la humedad disponible, para que se lleven a cabo ciclos de humectación-desección que alteran considerablemente el material. La distribución de las precipitaciones, como se estudiará con detalle en el próximo capítulo, favorece estos procesos, pues si bien es muy limitado el número de eventos grandes, por el contrario son muy frecuentes los eventos pequeños, suficientes para humedecer al menos la superficie de las rocas que afloran en los cauces y de los regolitos margosos, para seguidamente secarse y se altera. El número de días con lluvia es bastante alto, entre 32 y 69 para la estación meteorológica de Tabernas durante 25 años, por lo que los ciclos de humectación-desección serían bastante frecuentes, pero solo afectan al material más expuesto.

Sin embargo en la zona de estudio las tasas de infiltración son bajas en gran parte de las superficies de estos *badlands* y además son muy escasas las precipitaciones de gran magnitud que infiltren el agua en profundidad, por lo que la meteorización del material subsuperficial no será muy activa ni la edafogénesis.

La roca madre de la zona de estudio, como vimos en el capítulo 3, es un material con un alto contenido en sales como muestran los análisis químicos de los perfiles sobre la superficie MAR, y de los horizontes C de todos los perfiles. Cuando la marga se satura, se disuelven parte de estas sales, y la solución circula por el sistema de poros y grietas de la marga a medida que se va secando. Cuando el agua se evapora, recristalizan las sales disueltas y el crecimiento de estos cristales, presiona las paredes de los poros alterando o meteorizando la roca. Las sales se hidratan y deshidratan en respuesta a cambios de humedad y temperatura, y los cambios de fase provocan cambios en el volumen en los cristales de sal (para carbonato sódico y sulfato sódico el aumento de volumen puede ser superior al 300%) que ejercen presión contra las paredes de los poros (Goudie, 1989; Smith, 1994). En el experimento llevado a cabo en el laboratorio se pone de manifiesto la disolución de las sales por saturación del bloque, y posterior migración hacia la superficie expuesta al aire, a medida que el agua de la marga saturada se va evaporando, de ahí la gradación en el contenido de cationes solubles que aumenta hacia la superficie de todos los bloques sometidos a ciclos de saturación-desecación, y no para los controles, o el que está permanentemente seco o mojado.

La alteración ocasionada por los ciclos humectación-desecación es bastante rápida y los primeros ciclos son los más activos.

La rapidez de la alteración también se pone de manifiesto cuando se estudian las parcelas de campo, y se comprueba la importante alteración en poco tiempo que sufren ambas parcelas, tanto la parcela en la que no se retira el material, como la que se somete a descamación.

Así pues, los procesos de meteorización del material parental son relativamente rápidos en superficie, por lo que la erosión no estará limitada por la disponibilidad de material, como ya indican otros autores que han trabajado en *badlands* (Campbell, 1989). Sin embargo a mayor profundidad y debido a la baja permeabilidad de buena parte de las superficies de los *badlands* de Tabernas (Solé et al., 1997), y a la escasez de precipitaciones que infiltren el agua en profundidad, los procesos de meteorización están limitados, debido a la baja disponibilidad de agua que promueva estos procesos, lo que explica las bajas tasas pedogenéticas.

8.5.- CONCLUSIONES

- Los procesos de meteorización están dominados por los cambios volumétricos y estructurales inducidos por ciclos de humectación-desecación y la tasa a la que se desencadena la meteorización es bastante rápida.

8.- Meteorización

- Los procesos de meteorización se desencadenan con bastante rapidez cuando el material está expuesto, proporcionando material meteorizado disponible para la acción de procesos erosivos.

- La meteorización en profundidad estará limitada por la baja permeabilidad de muchas de las superficies y por la escasez de precipitaciones de gran magnitud y por lo tanto la edafogénesis estará limitada.

CAPITULO 9

RESPUESTA HIDROLOGICA Y EROSIVA DE LAS TESELAS Y RESPUESTA INTEGRADA A ESCALA DE MICROCUENCA

Impresionado con la transitoriedad de los objetos, la mutación continua y la transformación de las cosas, Buddha formuló una filosofía de cambio. Expresó sustancias, almas, mónadas, cosas a fuerzas, movimientos, secuencias y procesos y adoptó una concepción dinámica de la realidad. S. Radhakrishnan.

9.1.- INTRODUCCION

En 1989 Campbell define los “*badlands*” como paisajes complejos cuyas formas reflejan una gran variedad de ajustes superficiales y subsuperficiales a procesos externos e internos. Los procesos erosivos son los principales responsables de la evolución a corto plazo de este tipo de paisajes. La evolución de un paisaje es el resultado combinado de la evolución de laderas, pedimentos y cauces individuales que lo caracterizan (Scheidegger et al. 1968). Como en el desierto de Tabernas las geoformas están asociadas a unos tipos de teselas definidos, se estudia el comportamiento hidrológico y erosivo de dichas teselas, los flujos de agua y sedimentos entre las mismas para comprender sus efectos sobre la evolución de este paisaje

Las diferencias de las propiedades del suelo con la posición están íntimamente relacionadas con la redistribución del agua y partículas erosionadas a lo largo de la ladera. Como la escorrentía subsuperficial probablemente desempeña un papel minoritario en zonas áridas (Yair y Lavee, 1985; Pilgrim, 1987), la escorrentía superficial se considera el principal agente de redistribución del agua y de los procesos de erosión y deposición. La comprensión de la hidrología a escala de ladera es un requisito inicial para comprender los procesos edafogénicos a lo largo de laderas en ecosistemas áridos (Yair, 1990).

Estudios recientes en hidrología de ladera muestran que la generación de escorrentía no es uniforme en el espacio y muy a menudo solo una pequeña

proporción del área de una cuenca contribuye a la escorrentía que se dirige a los cauces. Mientras que en zonas húmedas la variabilidad espacial en la generación de escorrentía se atribuye principalmente a diferencias espaciales en la humedad del suelo, en las zonas áridas y semiáridas está controlada principalmente por las propiedades físicas y químicas del material superficial (Yair y Laave, 1985). Así, en los "badlands" de Alberta, Canada, y en el Zin valley de Israel se comprueba que las capacidades de infiltración varían tremendamente en distancias de pocos centímetros (Bryan et al.1978; Yair y Danin, 1980; Hodges y Bryan, 1982).

En diferentes zonas áridas y semiáridas, en Israel, (Morin and Benjamin, 1977 ; Yair et al, 1980b), Mali (Hoogmoed y Stroosnijder, 1984) y en Tunez (Berndtsson y Larson, 1987) se demuestra que aparte de las características de la lluvia, las condiciones de la superficie del suelo, tales como acostamiento del suelo, pavimento de piedras, cobertura vegetal o situación geomorfológica juegan un papel principal en la producción de escorrentía. Yair et al., (1980) en estudios llevados a cabo en el Zin Valley en Israel, concluyen que los modelos de iniciación de escorrentía y los procesos activos están fuertemente influenciados por las propiedades de la superficie del suelo y del material subsuperficial, que a su vez están ligados a distintas orientaciones.

Numerosos autores han descrito el papel tan importante que tiene la superficie del suelo en la generación de escorrentía y en la erosión. Entre ellos, Pilgrim (1987) señala que en las zonas áridas, debido a la escasez de la vegetación, la superficie del suelo suele ser el primer punto de contacto con la lluvia, por lo que el tipo de suelo y las propiedades superficiales juegan un papel principal en la producción de escorrentía.

En zonas semiáridas, la topografía puede tener una menor influencia en la producción de escorrentía (Dunne and Leopold, 1978) comparado con las condiciones superficiales, tales como cobertura vegetal (Wilcox et al., 1990) y el acostamiento superficial (Morin and Benyamin, 1977). En nuestra zona de estudio al estar la topografía asociada a la distribución espacial de las teselas, es difícil separar la influencia de una y otras en la generación de escorrentía y producción de sedimentos. Casenave y Valentine en 1992 encontraron en una zona semiárida del Este de Africa, que las condiciones de la superficie del suelo ejercían un papel dominante en la producción de escorrentía. Describieron varios tipos de costras diferentes que podían aparecer y que inducían diferentes tipos de comportamiento hidrológico.

Las características de la superficie del suelo reflejan la estructura del suelo. A través de este vínculo los procesos de escorrentía y erosión están

influenciados por la estructura del suelo. La erosión del suelo modifica la naturaleza de la superficie y esto constituye un proceso de retroalimentación a través del cual dichas modificaciones afectan subsecuentemente a la escorrentía y erosión (Hairsine et al. 1992).

Bryan et al.(1978) encuentran en los *badlands* de Dinosaur provincial Park de Alberta (Canada), que las propiedades del material superficial, más que la propia lluvia, controlan los patrones de escorrentía superficial y así, al menos en parte, los procesos y tasas de erosión.

Estudios previos en los *badlands* de Tabernas (Alexander y Calvo, 1990; Calvo et al., 1991b) revelaron comportamientos hidrológicos diferentes en las superficies situadas en laderas orientadas al Norte frente a otras superficies de laderas orientadas al Sur.

El estudio de la respuesta de las diferentes superficies de los *badlands* a precipitaciones simuladas, llevado a cabo por Calvo et al. (1991b) en *badlands* sobre distintas litologías, en el SE de España pone de manifiesto la complejidad de la respuesta de dichas superficies ante los eventos de precipitación, que atribuyen a la alta variabilidad espacial y probablemente temporal de las propiedades del regolito que se reflejan en la morfología de la superficie del suelo.

Solé et al en 1997, mediante simulaciones de lluvia en las superficies de los *badlands* de Tabernas, confirmaron los resultados obtenidos por otros autores (Yair et al., 1980; Campbell, 1982; Calvo et al., 1991) en cuanto a la complejidad de la respuesta de las mismas ante la lluvia. Consideran que la principal fuente de sedimentos en los *badlands* de Tabernas, de acuerdo con sus estudios, provendría de casi todas las laderas desnudas orientadas al Sur y Sureste. Mientras que las laderas orientadas al N y N-E con menores gradientes y mayor cubierta criptogámica y de plantas vasculares, contribuyen muy poco a la producción de sedimentos.

Por lo tanto numerosos estudios en ecosistemas distintos constatan que la variabilidad espacial en la generación de escorrentía y sedimentos está controlada por diferencias en la morfología de la superficie del suelo, y más concretamente se demuestran los diferentes comportamientos hidrológicos de las distintas superficies en los *badlands* de Tabernas. Teniendo en cuenta que la evolución de este paisaje depende de los procesos erosivos, es importante conocer como responden las distintas teselas ante precipitaciones naturales, en términos de escorrentía y exportación de sedimentos y cómo contribuyen a la respuesta total a escala de cuenca.

El estudio de la contribución de las teselas a la respuesta global de la cuenca, puede ayudarnos a predecir las respuestas de áreas más extensas del desierto de Tabernas en función de la distribución espacial de las unidades del terreno o teselas que las integran.

Así pues los principales objetivos de este capítulo son:

- 1.- Conocer el comportamiento hidrológico y erosivo de las diferentes teselas ante precipitaciones naturales, a escala de parcela.
- 2.- Comprender la respuesta hidrológica y erosiva a escala de microcuencas integradas por las teselas.
- 3.- Generar un modelo sencillo que simule la contribución de cada tesela a la respuesta de toda la cuenca.

9.2.- METODOLOGIA

9.2.1.- Características de la precipitación.

Desde Mayo de 1991 se dispone de una cuenca instrumentada en la zona de estudio. En esta cuenca existe una estación meteorológica con un pluviógrafo. Además hay un pluviómetro situado en la parte alta de la cuenca y otro cerca del aforo de la misma. A partir de la información recogida por el pluviógrafo se pueden calcular intensidades de la lluvia a intervalos de tiempo fijo (ventana) (Moreno y Lázaro, 1996, no publicado). Las intensidades de la lluvia se calcularon para intervalos de 5 minutos (ventana) cada 2 minutos (paso) porque como la intensidad es muy variable en esta zona, es importante tener una caracterización detallada de los eventos de precipitación. A partir de estas intensidades $I_{5 \text{ minutos}}$ siempre expresadas en mm/h, se calcula la $I_{5 \text{ minutos}}$ promedio y máxima para cada evento de precipitación.

9.2.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas. Escala de parcela.

9.2.2.1.- Escorrentía

- Parcelas de Escorrentía: Durante el periodo de Mayo de 1994 a Junio de 1997, se estudia la escorrentía total, después de cada lluvia, en parcelas de 0.24m^2 sobre las teselas estudiadas previamente por Solé et al. (1997) en las que encuentra comportamientos hidrológicos y erosivos contrastados. La figura 9.1 muestra una foto de una de estas parcelas. Las teselas y sus correspondientes parcelas son:

- PER: Parcelas 1, 10 y 11.
- LIQ: Parcela 9 (LIQ en ladera orientada al N.E.) y Parcela 4 (LIQ en ladera orientada al S.W.).
- LIQC : Parcelas 2 y 3.
- LIQD: Parcela 7 (LIQD en ladera orientada al S.W.) y Parcela 12 (LIQD en ladera orientada al N.E.).
- LIM: Parcela 5, 6 y 7.
- MAR: Parcela 8.

Se trata de parcelas cerradas que desaguan en garrafas de 25 litros.

9.2.2.2.- Sedimentos

- Parcelas: Se mide la exportación total de sedimentos tras cada evento de precipitación en las parcelas de campo (sección 9.2.2.1). Tras cada lluvia se toma una muestra de 1 litro de agua y sedimentos exportados que posteriormente se analiza en el laboratorio. Se determina el total de sedimentos exportados, para lo cual se deja decantar el agua, lo que se facilita precipitando las arcillas con Cl_2Mg , se secan los sedimentos y se pesan.

Un evento de precipitación para estas parcelas se considera el volumen total de lluvia que cae desde el comienzo de la lluvia hasta que se va al campo a tomar las muestras. Normalmente al día siguiente de la lluvia se va al campo, excepto que vuelva a llover, en cuyo caso se deja hasta que cese la lluvia.

-Clavos de erosión: Sobre cada tipo de las anteriores teselas (excepto para PER que es bastante estable, según trabajos previos de Calvo et al., 1991b y Solé et al., 1997) se colocan parcelas abiertas de 2 x 2m con 6 clavos de erosión en cada parcela y se miden cada 3 meses al principio, pero como no se detectaban cambios a esa escala temporal se decide medir cada 6 meses y después de eventos muy importantes (Haigh, 1977). Además se colocan clavos de erosión en 2 laderas una orientada al N-E (que integra los tipos de teselas LIQ y ANU) y otra orientada al S-W (tesela MAR) Se disponen en forma de cuadrícula de clavos de 11 hileras y 8 columnas en la ladera orientada al N-E (total de 88 clavos) y 9 filas por 9 columnas en la ladera orientada al S-W (81 clavos). Los clavos están separados un metro entre si.

Se lleva a cabo el seguimiento de los cambios de longitud en los clavos de erosión durante 3 años y medio, desde Julio de 1994 a Noviembre de 1997.

9.2.3.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las teselas. Escala de microcuena.

En la zona de estudio disponemos de una cuenca instrumentada denominada 1, que se trata de una cuenca representativa de la zona de estudio con 1.88ha y de tres microcuencas encajadas en la anterior, denominadas 2, 3 y 4, de 225m², 62m², 5775m² respectivamente. Las cuencas 2 y 3 drenan cárcavas elementales, completamente desprovistas de vegetación, y orientadas al oeste. La cuenca 4 desagua la parte alta de la cuenca 1, y está cubierta con plantas perennes y anuales.

Disponemos de cuatro aforadores tipo H, para medir la esorrentía a la salida de las cuencas 1,2,3 y 4, que miden 60cm, 24cm, 24cm y 30cm de altura respectivamente. Se trata de un dispositivo de sección rectangular y terminado por un estrangulamiento con paredes verticales. El fondo del canal termina en forma de trapecio isosceles, con la punta aguas abajo (Vidal et al., 1996) (figura 9.2). Se usan ecuaciones de calibración (Brakensiek et al., 1979) para convertir la altura medida en caudal. La altura de la lámina de agua escurrida se mide en un lugar preciso de las paredes convergentes del aforador.



Figura 9.1: Parcela de esorrentía



Figura 9.2: Aforador tipo H

Los aforadores se equiparon con: una sonda capacitiva para la medida continua del nivel de agua y un sistema de bombas controladas por microprocesador, que permite muestrear las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma, concretamente: 11 bombas y 10 botellas para muestrear el agua y los sedimentos. Las bombas muestrean el agua de escorrentía y las partículas suspendidas menores de 1mm (a la entrada de la bomba existe una malla de 1mm que impide la captación de partículas mayores de 1mm, para evitar que se bloqueen el motor, aunque no siempre se consigue). La carga de fondo (partículas de mayor tamaño, arena gruesa grava o fragmentos de mayor tamaño), se depositan en el canal de aproximación del aforador o se recogen en un gran depósito situado en la desembocadura del aforador. Para asegurar el control y automatismo de la adquisición y transmisión de los datos, se ha desarrollado, en la E.E.Z.A., un sistema basado en una red digital por radio a baja velocidad que integra la información generada en la estación de campo (Vidal et al., 1996).

Se distinguen 2 fracciones entre los sedimentos exportados:

- Los “finos” que incluye los sedimentos en suspensión (arcilla, limo, arena fina y sedimentos disueltos) que se muestrean automáticamente en el aforador mediante bombas.

- Los “gruesos”, la llamada carga de fondo (arena gruesa, grava y fragmentos mayores) que se deposita en el canal de aproximación del aforador y en un depósito que existe a la salida del aforador.

El aforador actualmente está programado para que llene los botes 1, 2, 3, 4 y 5 cuando el nivel alcanza respectivamente 0.5, 5, 10, 20 y 30cm de la rama ascendente del hidrograma, independientemente del momento en que se alcance este valor. Los botes 6, 7, 8, 9 y 10 se llenan sucesivamente durante la o las ramas descendentes cuando la altura disminuye por debajo de un valor igual al 50% del anterior valor máximo. Se ha programado para que permanezcan en funcionamiento durante 20 segundos lo que permite muestrear unos 400ml del agua de escorrentía, (Vidal et al.,1996).

Los sedimentos se analizan en el laboratorio: sedimentos en suspensión (entre 1mm y 0.45 μ m) y sedimentos disueltos (partículas inferiores a 0.45 μ m) mediante filtración. Se obtiene la concentración de sedimentos en cada muestra.

Se comprueba el caudal que pasa por el aforador en el momento en que se toma la muestra y la concentración de la muestra se pondera con el caudal correspondiente al momento en que se toma la muestra. Finalmente se promedia el conjunto de concentraciones, ponderadas con el caudal, de todas las muestras tomadas en el evento de escorrentía y se consigue una media aproximada de la

concentración total de sedimentos en suspensión y disueltos en el agua de escorrentía para dicho evento. Toda vez que conocemos la escorrentía total podemos conocer el total exportado en cada evento y a partir de este valor y dividiendo por el área de la cuenca la tasa de erosión en g/m^2 y la tasa de rebajamiento por año.

9.2.4.- Desarrollo de un modelo de escorrentía que simule la contribución de cada tesela a la respuesta total de la cuenca.

Se construye un modelo sencillo que simula el comportamiento hidrológico a escala de microcuenca a partir de los comportamientos hidrológicos de las teselas que integran la microcuenca 1.

En zonas áridas y semiáridas, la baja frecuencia de tormentas, las limitadas cantidades de lluvia, los suelos poco profundos y la baja densidad de la cubierta vegetal son factores que limitan contribuciones significativas de la escorrentía a los cauces por flujo profundo, escorrentía superficial por saturación y flujo subsuperficial poco profundo. Como las capacidades de infiltración suelen ser menores que las intensidades de la mayoría de las precipitaciones, el mecanismo predominante de escorrentía es la escorrentía superficial Hortoniana (Horton, 1933) donde la tasa de lluvia excede la tasa potencial de infiltración (Yair y Lavee, 1985; Pillgrim, 1987). Por lo tanto en el modelo asumimos que la escorrentía se genera cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración.

Todas las celdas de 1m^2 que componen la zona de estudio que pertenecen al mismo tipo de tesela tienen el mismo suelo, tipo de cubierta, características topográficas muy similares y el mismo comportamiento hidrológico y erosivo. Estos grupos de celdas pueden agruparse formando unidades hidrológicas de respuesta (Beven, 1989). Se construye un modelo de simulación de escorrentía a escala de evento y se asigna a cada tipo de tesela la velocidad de infiltración obtenida por Solé et al, (1997) mediante simulaciones de lluvia sobre las teselas.

Para modelizar, el proceso de lluvia-escorrentía se divide en una componente de exceso de lluvia y en una componente de concentración de la escorrentía. La primera estima la infiltración y calcula la lluvia que excede la tasa de infiltración y la segunda calcula el hidrograma de salida a partir del exceso de lluvia usando una técnica de distribución (Sharma et al., 1996).

El modelo parte del mapa de teselas para la microcuenca 1 y un mapa de dirección del flujo, que se obtiene a partir del modelo digital de elevaciones de la cuenca (usando un algoritmo de dirección de flujo que determina desde cada celda, a cual de sus 8 celdas vecinas más cercanas según la inclinación ladera abajo, debe

cederle el agua). Requiere la intensidad de la lluvia al intervalo de tiempo que se decida ejecutar el modelo, la humedad antecedente en cada superficie, la humedad máxima en el suelo y un mapa con el punto de aforo de la cuenca.

La intensidad de la lluvia se conoce gracias al pluviógrafo de la estación meteorológica de la cuenca instrumentada y se calculan las intensidades a los intervalos deseados, que en este caso es de 2 minutos.

La humedad antecedente se obtiene a partir de medidas de campo o a partir del modelo de predicción de la humedad media diaria del suelo en cada superficie del capítulo 7. Con respecto a la humedad máxima del suelo en cada superficie se usa el máximo de humedad registrado en el año y medio de estudio.

Se supone que las celdas de una misma tesela presentan un comportamiento hidrológico similar, pues tienen el mismo tipo de suelo, la misma cobertura vegetal, litología y características topográficas (como se ha ido demostrando a lo largo de los capítulos anteriores) y se asigna la misma velocidad de infiltración a todos los pixeles de un mismo tipo de superficie. Se usa la ecuación Horton (1933) para calcular la velocidad de infiltración. Los parámetros de esta ecuación, se estimaron mediante las simulaciones de lluvia llevadas a cabo por Solé et al., 1997, y para la tesela STI, los obtenidos por Calvo et al., 1991b.

Ecuación de Horton (1933):

$$f_t = f_c + (f_o - f_c) e^{-\alpha t}$$

f_t : Tasa de infiltración a tiempo t (mm/h)

f_c : Tasa de infiltración constante (mm/h)

f_o : Tasa de infiltración inicial. (mm/h)

α : Constante empírica, tasa de decaimiento exponencial.

t : tiempo (h).

Por un lado se calcula la infiltración para cada pixel, ante una cantidad dada de lluvia, y cuando la intensidad de la lluvia supera a la velocidad de infiltración, se produce escorrentía en ese pixel, la diferencia entre ambas tasas se convierte en escorrentía, que mediante una técnica de distribución la escorrentía en función de la topografía se va transportando el exceso de la lluvia a otras celdas donde puede infiltrarse o exportarse nuevamente y acumularse en los cauces y dirigirse hasta el punto de aforo de la cuenca cuyas lecturas de caudal nos dará el hidrograma.

El modelo se ejecuta a intervalos de 2 minutos. En primer lugar calcula en cada una de las teselas la velocidad de infiltración (se usan 2 ecuaciones para cada

superficie la obtenida en las simulaciones de lluvia sobre suelo seco y sobre suelo saturado, que son bastante similares en algunas teselas). Al principio del evento se usa la velocidad de infiltración sobre suelo seco, y se va calculando como va aumentando la humedad del suelo a medida que se va infiltrando el agua de lluvia. Una vez el suelo alcanza el máximo de humedad se usa la segunda velocidad de infiltración cuyos parámetros se obtuvieron con simulaciones sobre suelo saturado.

Se pueden obtener mapas de escorrentía y humedad del suelo en toda la cuenca cada dos minutos.

En la sección A.9.1. del anexo se presenta el diseño del modelo y las ecuaciones de Horton para cada una de las teselas, sobre suelo seco y saturado. Este modelo se programa en el lenguaje de modelización dinámica de PCRaster (van Deursen, 1996).

El modelo se implementa en el sistema de información geográfica, PCRaster (van Deursen, 1996). Y para comprobar su validez se compara con hidrogramas reales de la microcuenca *I*, donde se lleva a cabo la simulación.

9.3.- RESULTADOS

9.3.1.- Características de la precipitación.

Antes de estudiar el comportamiento hidrológico de las teselas y microcuencas es importante estudiar los regímenes de precipitación en el área de estudio (*El Cautivo*).

La cuenca está instrumentada desde Mayo de 1991, así pues, disponemos de datos de precipitación desde entonces hasta la fecha. Definimos el año hidrológico entre el 1 de Octubre y el 30 de Septiembre, comenzando en el supuesto momento de mínima reserva hídrica del suelo, tras los meses de verano de intensa evaporación, siguiendo el mismo criterio que otros autores como Piñol et al. (1991). Se presentan los resultados del análisis de las características de la precipitación para el periodo comprendido desde el año hidrológico 1991-92 al 1996-97.

La precipitación media por año hidrológico fue de 250.65 mm/año con una elevada variación interanual (desviación estándar 97.97). La máxima precipitación tuvo lugar en el año hidrológico 1991-1992 con 416.72 mm/año, y la mínima de 151.04mm/año (casi dos tercios menos que el año más lluvioso) en 1994/95. Los resultados son similares cuando se considera año natural en lugar de año hidrológico.

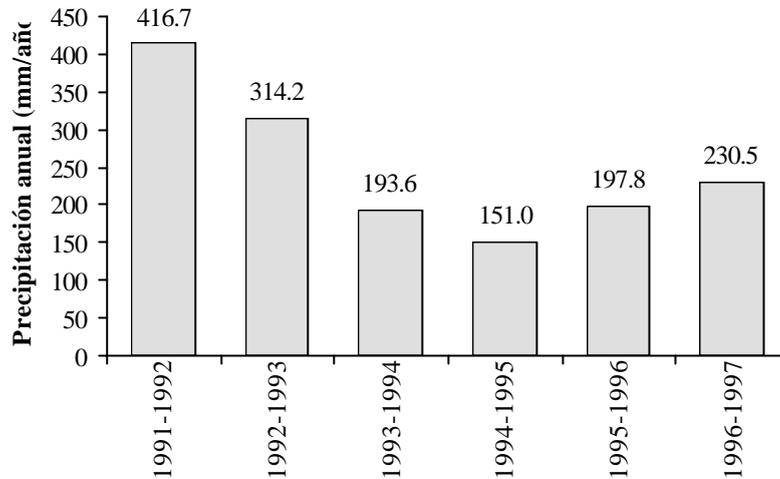


Figura 9.3: Precipitación total anual desde 1991 a 1996. En Agosto de 1997 se estropea el sistema de adquisición de datos, desde ese momento hasta el 30 de Septiembre hubo un solo evento entre el 27 de Septiembre y el 5 de Octubre, pero solo se dispone del total en esos días, nos parece más correcto que pase a formar parte del año hidrológico 97-98.

La precipitación presenta un pico en invierno, cuando tiene lugar entre el 31 y 55% del total de precipitación anual, el resto de la precipitación se distribuye entre primavera y otoño, dado que el verano suele ser muy seco, concentrándose como máximo el 12.8% del total de la precipitación anual. Algunos años el otoño presenta una precipitación más abundante que la primavera. La tabla 9.1 muestra los totales de precipitación por estación para los 6 años de estudio.

Año	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Total
1992	224.70	121.92	32.00	116.05	494.67
1993	139.70	60.46	0.00	49.37	249.53
1994	109.99	18.56	1.45	78.22	208.22
1995	60.35	8.99	15.98	24.65	109.98
1996	90.80	66.09	37.41	98.02	292.32
1997	70.18	61.77	n.d.	n.d.	n.d.

Tabla 9.1: Precipitación total en mm por estaciones para los años de 1992 a 1997. La última columna se refiere al total anual (por año natural).

La precipitación promedio en invierno durante el periodo estudiado es de 125 mm, con un máximo de 224mm en el año hidrológico 1992 de los cuales 121mm cayeron en un solo evento (el mayor evento, en cuanto a volumen, registrado en la cuenca en el periodo de estudio, el 7/11/92), además tuvo lugar otro evento de 45mm que prácticamente constituyen el total de lluvia ese año. La mínima fueron 60mm en el invierno de 1995. Se observa que para el resto de las estaciones del año los máximos de precipitación corresponden prácticamente todos

(excepto el máximo de verano que tuvo lugar en 1996) al año hidrológico 1992 y los mínimos a 1995, excepto el mínimo de precipitación en verano que fueron 0 mm en 1993.

Periodo	Estación	Precip.prom.(mm)	Desv. est.	Máx.	Mín.
1992/1996	Invierno	125.11	62.71	224.70	60.35
	Primavera	55.20	44.93	121.92	8.99
	Verano	17.37	17.12	37.41	0.00
	Otoño	73.26	36.75	116.05	24.65

Tabla 9.2: Promedios, desviaciones estandar, máximos y mínimos de la precipitación por estación en los años 1992 a 1996.

Los promedios mensuales (tabla 9.3) ponen de manifiesto que Febrero es el mes más lluvioso, con una precipitación promedio de 54mm, seguido de Enero, si bien es muy variable de un año para otro; algunos años el mes de mayor precipitación fue Enero, registrándose hasta 145mm, y otros años fue el de mínima precipitación con 0mm. El mes de Julio es, prácticamente en todo el periodo, el que presenta la mínima precipitación mensual, con un promedio de 0.53mm, un máximo de 1.45mm y un mínimo de 0mm.

Mes	Promedio	Desv est	Máx.	Min.
Octubre	21.74	13.25	38.15	1.45
Noviembre	31.87	29.63	88.14	2.90
Diciembre	17.79	28.22	72.50	0.00
Enero	46.05	54.44	145.48	0.00
Febrero	53.91	45.70	122.88	4.64
Marzo	17.38	14.79	35.40	1.45
Abril	17.07	12.74	34.80	0.29
Mayo	21.16	19.95	47.72	0.58
Junio	16.27	31.45	79.29	0.00
Julio	0.53	0.65	1.45	0.00
Agosto	1.57	3.34	7.54	0.00
Septiembre	11.03	15.15	35.67	0.00

Tabla 9.3: Precipitación mensual media, desviación estandar, máxima y mínima para el periodo de estudio, de 1992 a 1997.

Los eventos más frecuentes son los eventos pequeños, de hecho el 53% del total de los eventos son menores o iguales a 1mm, el 86% son menores o iguales a 10mm y solo un 2% son mayores de 50mm (figura 9.4). En definitiva no son muy frecuentes las lluvias de gran magnitud.

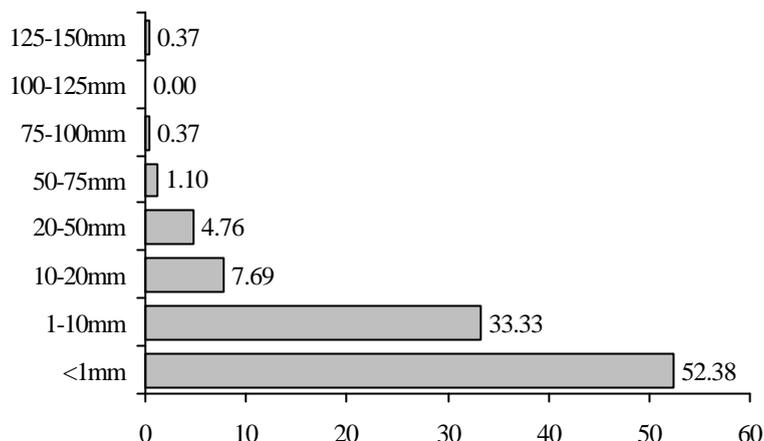


Figura 9.4: Distribución de frecuencias del número de eventos con volumen de precipitación comprendido entre los intervalos que aparecen en la figura.

La distribución de eventos por año hidrológico se representa en la figura 9.5. Se observa que los años con mayor precipitación total (años hidrológico 1991-1992 y 1992-1993), se dieron menos lluvias pequeñas (< de 1mm), menos del 50% del total de eventos fueron eventos pequeños. Mientras que los años con menor precipitación anual, (1994-1995 y 1993-1994), presentaron un mayor porcentaje de lluvias pequeñas, entre el 60 y 70% de los eventos fueron menores de 1mm.

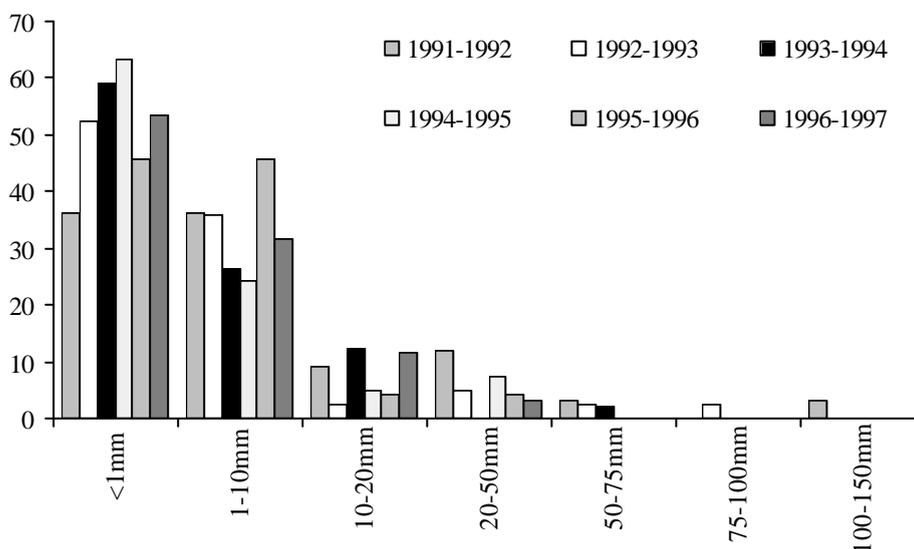


Figura 9.5: Distribución de frecuencias del número de eventos con volumen de precipitación comprendido entre los intervalos que aparecen en la figura, para cada año hidrológico del periodo de estudio.

La figura 9.6 muestra como se distribuye el volumen total de la precipitación anual en eventos de más de 10mm o inferiores a 10mm para cada año hidrológico, cantidad que se considera el volumen de precipitación necesaria para la generación de escorrentía.

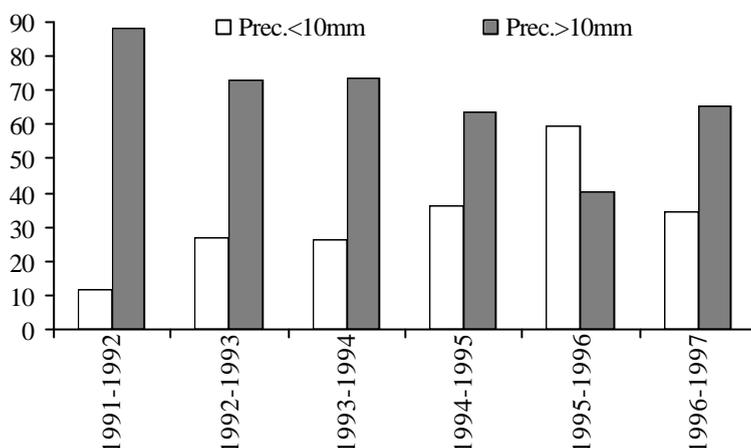


Figura 9.6: Distribución de precipitación total en porcentaje que precipita en forma de evento inferior a 10mm y el que precipita en forma de evento de más de 10mm.

La figura 9.6 muestra que el año 1995-1996 presenta un patrón diferente al resto de los años hidrológicos estudiados, pues el 60% de la precipitación total tiene lugar en forma de eventos pequeños, inferiores a 10mm.

El número de días de precipitación al año para el periodo estudiado oscila entre 32 y 69 días con precipitación por año hidrológico (Tabla 9.4).

Año hidrológico	Nº días precipitación
1991-1992	32
1992-1993	41
1993-1994	43
1994-1995	43
1995-1996	57
1996-1997	69

Tabla 9.4: Número de días con precipitación en los años hidrológicos estudiados.

Con respecto a la intensidad de la precipitación se estudia a intervalos de 5 minutos (I_5) para todos los eventos excepto los eventos de menos de 1mm de precipitación total, pues se comete mucho error al calcular estas intensidades. En cualquier caso estas lluvias si bien son abundantes, no desencadenan ni procesos de escorrentía ni de erosión que son los que nos interesan.

El promedio de las intensidades I_{5min} registradas a lo largo de todo el año hidrológico, oscila entre 0.5 y 2mm/h, como se muestra la figura 9.7. La I_5 promedio de cada evento suele oscilar entre 1 y 3mm/h, de manera que el evento puede presentar etapas de intensidad muy alta, pero el resto del tiempo la intensidad puede no ser muy elevada, dando una intensidad promedio del evento similar para eventos muy distintos, por lo que no es una variable muy adecuada para relacionarla con la generación de escorrentía, preferimos estudiar la I_{5min} máxima.

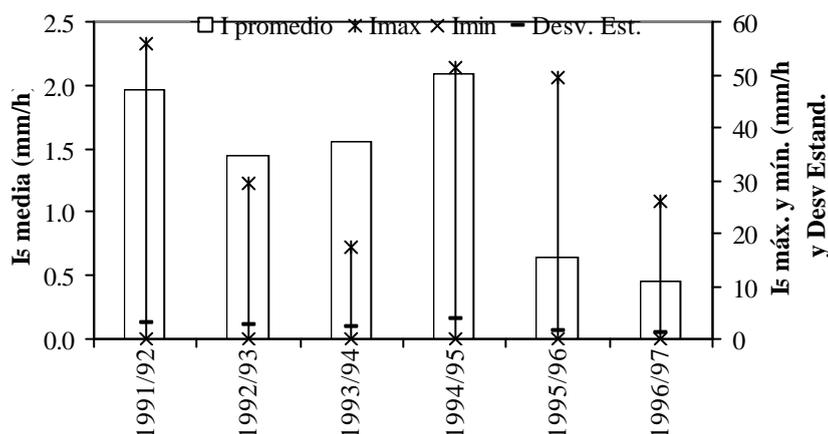


Figura 9.7: I_5 media para cada año hidrológico en el eje Y izquierdo. En el eje Y derecho se representa la desviación estándar de esos valores medios y la I_5 máxima y mínima.

La I_5 máxima registrada para todo el periodo estudiado es de 55.9mm/h en el año 91/92 que a su vez fue el más lluvioso, y con lluvias más intensas.

Cuando se estudia la I_5 máxima por estación y año hidrológico, no se puede concluir que los eventos de máxima intensidad se den preferentemente en una estación del año.

Los eventos más frecuentes son los que presentan una I_5 media del evento entre 0 y 2mm/h (el 75% de los eventos presenta una I_5 media entre 0 y 2mm/h) y solo un 2.5% de los eventos de todo el periodo estudiado presentaron una I_5 media superior a 5mm/h. En cuanto a la I_5 máxima, como se observa en la figura 9.8, la mayoría de eventos se sitúan entre 2 y 10mm/h. Solo el 16% de los eventos presentaron una I_5 máxima superior a 15mm/h.

En resumen la mayoría de los eventos presentan una intensidad media del evento baja y las diferencias en la intensidad máxima son más evidentes que entre intensidades medias del evento, por lo que utilizaremos la I_5 máxima como variable para caracterizar la precipitación, más que la I_5 promedio del evento.

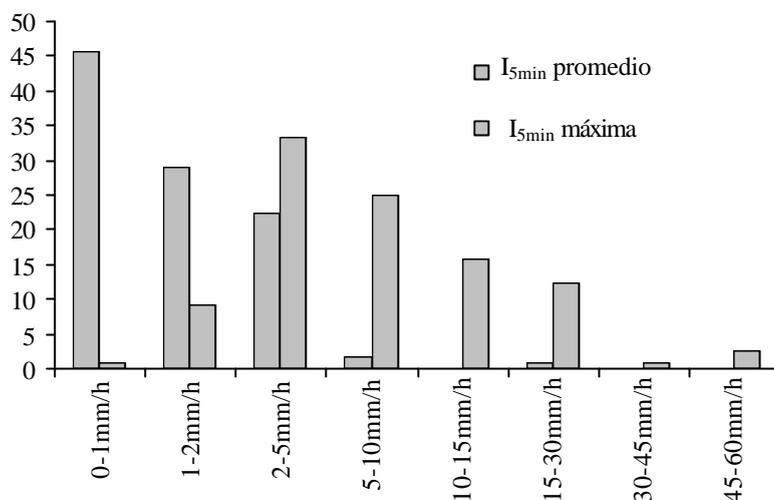


Figura 9.8: Distribución de frecuencias de las I_5 medias y máximas por evento, para el periodo de 1992 a 1997.

9.3.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas a escala de parcela.

9.3.2.1.- Escorrentía.

9.3.2.1.1 Parcelas de Escorrentía

Las parcelas de escorrentía nos permiten estudiar la respuesta hidrológica de las teselas ante eventos de precipitación reales. Su interés reside en que en las lluvias reales las intensidades son muy variables, así como la cantidad de lluvia, la duración y distribución espacial de la precipitación (Bryan y Campbell, 1986), lo cual afectará a las respuestas de las teselas. Además la mayoría de los estudios llevados a cabo en *badlands* para estudiar los comportamientos hidrológicos de las superficies del suelo se hacen mediante simulaciones de lluvia (Bryan et al., 1978; Bryan y Campbell, 1980; Hodges y Bryan, 1982; Abraham et al., 1988; Calvo et al., 1991), por lo que es interesante conocer como responden las teselas ante precipitaciones reales.

En el periodo desde Mayo de 1994 a Junio de 1997 se registraron 31 eventos de precipitación en los que se midió la escorrentía de las parcelas de campo. Para comprobar si las respuestas hidrológicas de las teselas son significativamente diferentes, se usan para cada tesela los coeficientes de escorrentía de cada evento y el resultado del análisis de la varianza, $F(5,321)=5.55$

para $p=0.000064$, demuestra que los valores medios (tabla 9.5) de estos coeficientes son significativamente diferentes en las teselas estudiadas.

Teselas	Valores medios de C.E.s
PER	7.97
LIQ	19.53
LQC	10.14
LQD	15.83
LIM	12.11
MAR	17.75

Tabla 9.5: Valores medios de los coeficientes de escorrentía para cada tesela

En el Anexo (Tablas de A.9.1 a A.9.6) se presentan para cada parcela los eventos que produjeron escorrentía en al menos una parcela y los valores de la escorrentía, coeficiente de escorrentía y sedimentos exportados para cada evento, así como la cantidad total de precipitación, la intensidad media de la precipitación y la máxima en mm/h. En ambos casos nos referimos a la I_5 minutos.

Estas tablas muestran que las teselas con menos escorrentía eran las vegetadas con plantas vasculares (PER) o las divisorias con líquenes (LQC). Las teselas con mayor escorrentía son LIQ y MAR. Finalmente los valores de escorrentía intermedios se presentan en LIM y LQD. Estos resultados son muy similares a los obtenidos mediante simulación de lluvia por Calvo et al. (1991b) y Solé et al. (1997). La figura 9.9 muestra la distribución de los coeficientes de escorrentía en cada una de las teselas estudiadas.

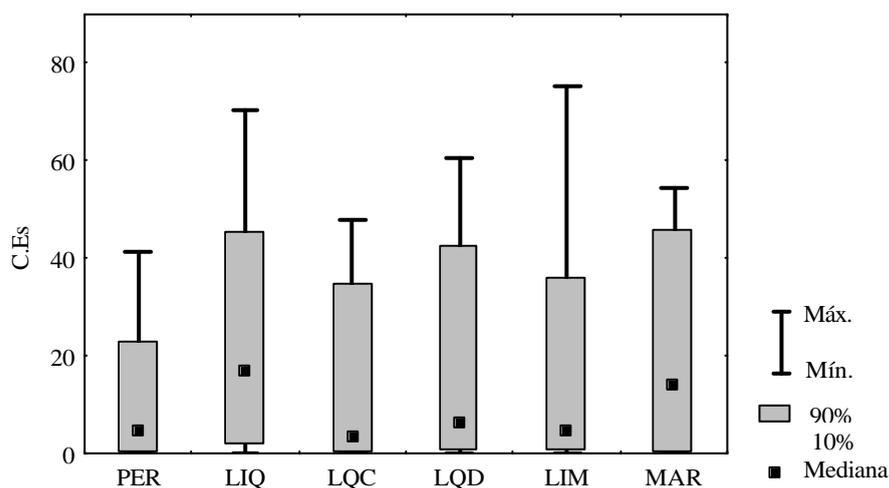


Figura 9.9: Distribución de los coeficientes de escorrentía registrados a lo largo de todo el periodo de estudio en las diferentes teselas.

La tesela PER es la que presenta los menores coeficientes de escorrentía, es la tesela con mayor capacidad de infiltración. La tesela LQC, es una superficie bastante plana y con un suelo moderadamente desarrollado, sigue a PER en cuanto a capacidad de infiltración y baja escorrentía. LIM y LQD presentan unos coeficientes de escorrentía intermedios, la capacidad de infiltración es media. Las teselas MAR y LIQ presentan los coeficientes de escorrentía más elevados.

Cuando se estudia para cada tesela la relación entre la escorrentía y la precipitación, observamos que existe una relación lineal positiva entre ambas variables. La pendiente de la recta varía de una tesela a otra siendo más elevada en el siguiente orden: MAR, LIQ, LIM, LQD, LQC y PER. Solo se presenta la figura correspondiente a la tesela MAR (figura 9.10), pero el resto son similares. Las ecuaciones de regresión entre la escorrentía y la precipitación para cada tesela se presentan en la sección A.9.2 del anexo.

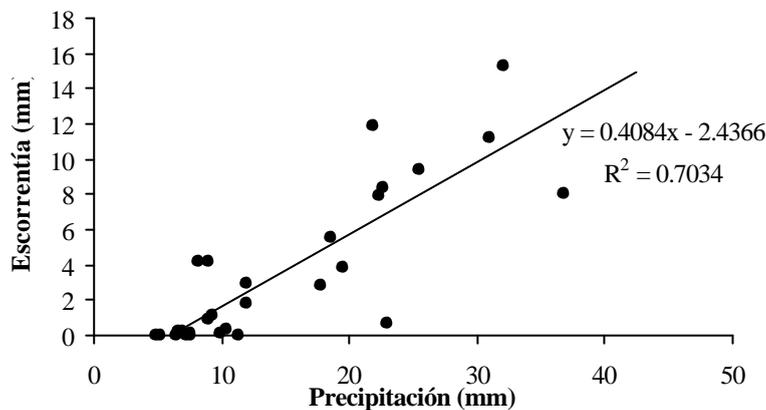


Figura 9.10: Precipitación vs escorrentía en la tesela MAR. Se representan los datos correspondientes a la parcela situada sobre este tipo de tesela (P8).

Aunque esta regresión es significativa ((F1,27)=62.1 $p < 0.0000$ $R^2 = 0.7$), sin embargo en la figura 9.10 se observan puntos que desvían mucho de esta recta y esto ocurre siempre que se trata de establecer relaciones entre variables como escorrentía, volumen e intensidad de la precipitación y erosión. Esta falta de linealidad en las relaciones entre estas variables en zonas semiáridas y áridas se pone de manifiesto en muchos de los sitios estudiados, con datos de varios años de seguimiento y se explica por la variabilidad de la precipitación y por las características de la superficie (Yair, 1998 comentario personal). Dentro de un evento de precipitación la lluvia varía enormemente en intervalos de tiempo muy cortos, pasa de momentos en que es muy intensa a momentos en que deja de llover y esta variabilidad afecta a la respuesta de las superficies del suelo, que por otro lado presentan una gran heterogeneidad en cuanto al patrón de grietas o rugosidad.

La intensidad de la lluvia y la escorrentía muestran una relación lineal y positiva, cuanto más intensa es la precipitación mayor es la escorrentía, se observa para cada tesela, aunque sólo se presenta la figura correspondiente a MAR (figura 9.11). Aunque la regresión es significativa ($F(1,26)=7.97$; $p<0.009$), se observa, igualmente, como determinados puntos se desvían bastante de la linealidad.

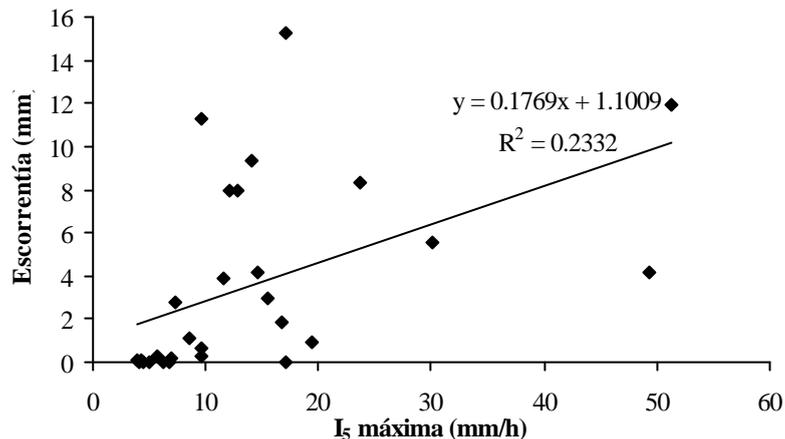


Figura 9.11: Relación entre la I₅ máxima del evento y la escorrentía para la tesela MAR.

No se encuentra una relación clara entre la escorrentía y la humedad antecedente, para las diferentes teselas.

9.3.2.2.- Erosión.

9.3.2.2.1.- Parcelas de escorrentía y erosión

Las diferencias en cuanto a las tasas de erosión, son también muy similares a las observadas en las simulaciones de lluvia llevadas a cabo por Calvo et al., 1991b y Solé et al., 1997, como pone de manifiesto la figura 9.12. y las tablas del anexo, de A.9.1 a A.9.6, donde se puede observar que la tesela que presenta mayores tasas de erosión es la tesela MAR (entre 0.4 y 338.4g/m², con un valor medio del total de eventos registrados de 51.3 g/m²), seguida por la tesela LIM (entre 0 y 412.3 g/m² y tasa de erosión promedio 35.29 g/m²), que constituían el grupo de alta erosión según Solé et al., 1997; LQD con tasas de erosión intermedia alta (entre 0.1 y 148.1 g/m² y una tasa de erosión media de 21.41 g/m²); LIQ con erosión intermedia baja (0.03 a 296.9 g/m², tasa de erosión media 14.44 g/m²), y por último con baja erosión aparecen LQC (0 y 54.6 g/m², y la tasa de erosión media para el total de eventos 2.97 g/m²) y PER con unas tasas de erosión entre 0 y 28.2g/m², y una tasa de erosión promedio de 1.40 g/m².

Se observa que existe una gran variabilidad en las tasas de erosión registradas en cada tipo de tesela, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que el rango de precipitaciones que se recogen es muy amplio.

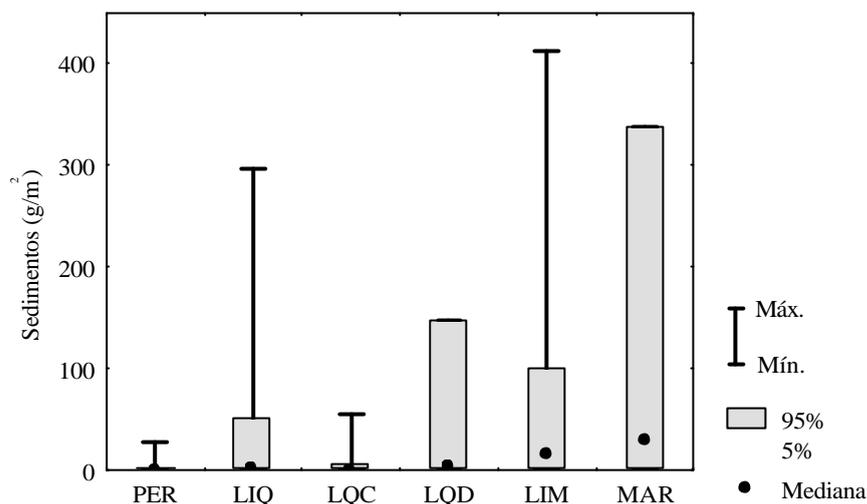


Figura 9.12: Distribución de las tasas de erosión a lo largo de todo el periodo de estudio para las diferentes teselas.

La figura 9.13 muestra las tasa de erosión mm/año, para las diferentes teselas, en los años hidrológicos 94-95 y 95-96.

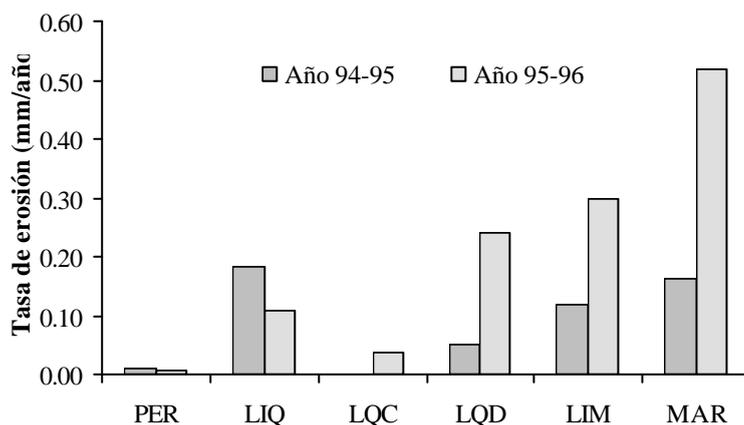


Figura 9.13 Tasas de rebajamiento para las diferentes teselas (en cada superficie se promedian las tasas anuales para las distintas parcelas situadas sobre dicha superficie), para los años hidrológicos 94-95 y 95-96.

Se observa que año 95-96 fue más activo que el año precedente, lo que se explica cuando se comparan las precipitaciones ambos años, en el año 1995-96 llovió más, unos 50mm más que en el 94-95.

La tasa de erosión tiende a aumentar con la escorrentía total como muestra la figura 9.14, para las teselas no vegetadas (para el resto de teselas también se observa, aunque no se representa). De nuevo (al igual que ocurría en las relaciones entre el volumen o la intensidad de la precipitación con la escorrentía) existen muchos puntos que se desvían de la linealidad. Se pone de manifiesto la influencia de la intensidad de la lluvia, en eventos con tasas de escorrentía parecidas, se exportan más sedimentos cuando la intensidad de la lluvia es mayor. Se pueden observar algunos puntos donde la escorrentía fue media o baja y sin embargo se exportaron los máximos de sedimentos debido a que la lluvia fue intensa.

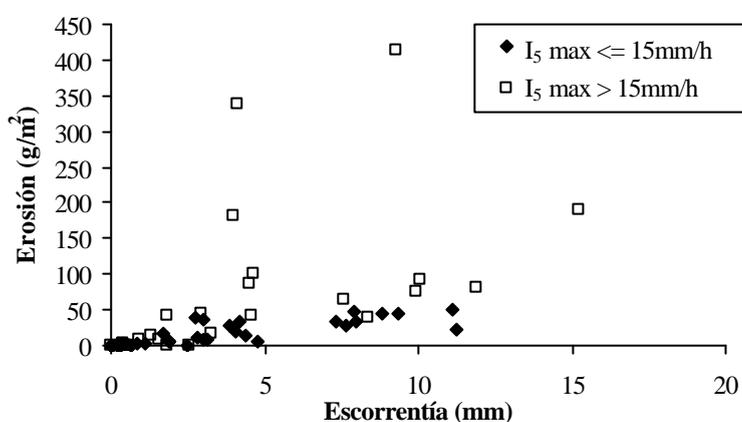


Figura 9.14: Relación escorrentía total y total de sedimentos exportados por evento para las teselas no vegetadas (MAR y LIM). Se representan los eventos con intensidad de la lluvia máxima (I_5 a intervalos de 5 minutos) superior a 15mm/h, y los eventos con la intensidad máxima inferior o igual a 15mm/h.

9.3.2.2.2.- Clavos de erosión

Se estudian durante 3 años y medio los cambios de longitud que experimentaron los clavos de las parcelas abiertas situadas sobre las teselas estudiadas. Y se comprueba que en todas las teselas existe deposición excepto en las divisorias, como se observa en la tabla 9.6 donde se presentan unas tasas de erosión (media de los 6 clavos) de -1.3mm/año (valores negativos se refieren a erosión y positivos a deposición). Esta deposición se explica por 2 razones: a) en primer lugar porque las teselas donde se esperaría erosión, como MAR, o LIM, como hemos visto en las parcelas, fue necesario colocar las parcelas de clavos en zonas accesibles para poder realizar las medidas sin ocasionar perturbaciones en la

parcela, lo que supuso colocarlas en las partes bajas de la ladera, en zonas donde es probable que haya deposición (esto no afecta a las parcelas de escorrentía que son parcelas cerradas y desconectadas del resto de la ladera, con lo que se mide en realidad la capacidad para erosionarse o producir escorrentía que tiene la superficie dentro de la parcela), y b) en segundo lugar existe una gran variabilidad espacial en la erosión en la superficie del suelo (Yair et al., 1980) en este tipo de paisajes, que se pone de manifiesto cuando se comparan dentro de una misma tesela las tasas medidas por cada clavo, por ejemplo en el caso de la ladera MAR, un clavo midió unas tasas de una erosión de -2.10mm/año, mientras que otro clavo de esa misma parcela registró una deposición de 3.35mm/año. Por ello Campbell (1981) sugiere la necesidad de monitorizar los procesos de erosión con datos volumétricos más que puntos únicos de medida y de investigaciones con una duración suficiente para detectar las tendencias del comportamiento de las teselas.

TESELA	Deposición-Erosión (mm/año)
PER	0.6103
LIQ	0.3862
LQC	-0.0299
LQD	1.8229
LIM	1.1654
MAR	1.4960
CDAD	-1.2928

Tabla 9.6: Tasas de erosión-deposición registradas mediante clavos de erosión en cada superficie, desde Noviembre de 1997 hasta Julio de 1994. Cada tasa corresponde al promedio de los 6 clavos de erosión situados en esa superficie. Los valores negativos significan erosión y los valores positivos deposición.(CDAD: Divisoria de marga desnuda).

Para recoger la variabilidad espacial en la erosión se colocaron clavos de erosión en una ladera orientada al N-E y en otra orientada al S-W.

En la ladera orientada al S-W existe una gran variabilidad en las tasas de erosión. En determinados puntos, se han medido tasas de erosión de hasta 8.7cm, mientras que en otras partes de la ladera la erosión es mínima, y en otras se deposita material. Las mayores tasas de erosión se midieron en los surcos en la ladera y prácticamente se produjeron en un solo evento de precipitación, 27/9/97 al 5/10/97. En dicho evento, en la mayoría de los puntos de la ladera monitorizados con los clavos se produjo erosión. En el anexo se presenta una tabla con las tasas de erosión medidas en la ladera S-W, tabla A.9.7 con tasas erosión totales por año para todo el periodo de medida, desde Diciembre de 1995 a Diciembre de 1997, en cada punto de medida y la tabla A.9.8. presenta las tasa de erosión para los últimos

6 meses, cuando tuvieron lugar los importantes eventos de precipitación de Sep-Oct de 1997. La figura 9.15 muestra la espectacular pérdida de material que ocasionó esta lluvia en los surcos, teniendo en cuenta que donde queda colgada la arandela era la base del surco antes del evento.

La tabla A.9.8 muestra como durante ese evento excepto en algún punto, prácticamente en toda la ladera hay erosión, y en algún punto del surco (*rill*) más importante que existe en esa ladera, la tasa de erosión es de hasta 89mm.

En la ladera orientada al N-E las tasas de erosión son considerablemente menores. También existe variabilidad espacial en las tasas de erosión al igual que en ladera sur. En el anexo se presenta una tabla (tabla A.9.9) con las tasas de erosión (mm/año) para la ladera Norte. En algún punto más degradado de esta ladera se han medido tasas de erosión de hasta 3.4 mm/año. Las lluvias del 27/9/97 al 5/10/97 provocaron erosión en la mayoría de los puntos que se miden en esa ladera, como muestra la tabla A.9.10 del anexo.



Figura 9.15: Pérdida de material en un surco para el evento Sep-Oct. 1997

9.3.3.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las superficies. Escala de microcuenca.

Existen numerosos problemas cuando se pretende muestrear caudales y carga de sedimentos mediante estaciones automáticas y especialmente sobre litologías que dan lugar a flujos hipercontrados, como es nuestro caso. Problemas muy parecidos ha descrito Meunier, 1988, en Francia en una zona de margas en los Alpes del Sur, cerca de Digne. Otros autores como Bryan y Campbell, en 1986, en la cuenca Rimco, tuvieron dificultades para registrar caudales. Honsaker et al., en 1984, se encontraron con inconvenientes con la instrumentación, como descargas de baterías en periodos de tormenta.

En nuestro caso, a veces, se producen fallos en la adquisición y transmisión de los datos. Debido a la carga de sedimentos que suele llevar el agua se producen embarramientos en el canal de aproximación del aforador y en el propio aforador, que hacen que haya problemas en la medida del caudal sobre todo tras un pico importante de caudal que puede provocar que se depositen varios centímetros de sedimento y se embarren las tuberías y bombas del sistema. Esto provoca que en el hidrograma de algunos eventos aparezca una cola de caudal que continúa muchas horas después de acabar la lluvia, y no se sabe exactamente cuando acaba la escorrentía. En estos casos, para poder aprovechar los datos se calcula la ecuación que relaciona la disminución del caudal con el tiempo desde el momento en que tiene lugar el último pico de precipitación hasta el final de la lluvia y se aplica esta ecuación a la cola del evento con objeto de cortarla y generar un final aproximado del evento de escorrentía. Otras veces no es posible la toma de muestras de sedimentos debido al embarramiento de la bomba que impide la succión de la muestra. Y en otros casos, sobre todo en las microcuencas 2 y 3, el embarramiento ocurre ya al principio del evento de escorrentía por lo se ha de desechar todo el evento. En consecuencia, en estas subcuencas hay muy pocos datos disponibles y es difícil estimar tasas de erosión por año.

9.3.3.1.- Escorrentía.

9.3.3.1.1.- Microcuenca 3

La microcuenca 3 tiene un área de unos 62m², y está constituida enteramente por la tesela MAR, regolito margoso, completamente desprovisto de vegetación.

Los problemas de muestreo expuestos aquí están muy acentuados por lo que disponemos de muy pocos eventos.

El máximo caudal registrado en esta cuenca es de 0.72 L/s.

Los Coeficientes de Escorrentía, de los 20 eventos que fue posible registrar, oscilan entre el 10.7 y el 73.23%.

Para la microcuenca 3 los eventos fiables se presentan en la tabla 9.7.

FECHA EVENTO	Precipitación (mm)	I ₅ prom. (mm/h)	I ₅ máx. (mm/h)	Escorrentía (mm)	Coef. Escorr. (%)	Ha est. (%)	T. ev. (d)
20/02/92	52.27	1.89	55.90	17.88	34.21	13.1	20.53
13/06/92	40.61	2.07	13.39	4.38	10.77	2.36	36.62
21/06/92	30.84	1.19	19.86	5.98	19.40	9.36	7.02
5/05/93	32.27	0.81	3.33	9.35	28.99	5.55	90.51
31/10/93	13.94	2.50	17.37	3.97	28.45	1.86	269.15
28/02/94	18.85	1.54	14.80	2.91	15.45	13.15	11.40
4/11/94	22.63	2.65	23.75	12.69	56.06	6.62	18.93
28/02/95	24.95	3.38	13.37	6.48	25.97	3.51	116.28
23/01/96	15.67	1.35	12.79	10.51	67.08	12.61	5.45
1/02/96	20.60	0.91	14.12	15.09	73.23	14.18	7.62
9/04/96	9.01	2.00	35.02	2.89	32.06	12.55	67.96
6/05/96	8.21	24.65	49.29	4.26	51.83	6.24	26.80
11/09/96	32.13	0.73	17.09	14.09	43.84	2.25	126.59
31/05/97	21.46	2.58	30.03	6.19	28.82	3.65	39.68

Tabla 9.7: Variables hidrológicas para la microcuenca 3: precipitación, intensidad promedio y máxima del evento (I₅ minutos), escorrentía total, coeficiente de escorrentía, humedad antecedente a la lluvia (media diaria) estimada en la tesela MAR a 3cm y tiempo transcurrido entre ese evento y el anterior de los eventos que fue posible muestrear durante el periodo de estudio. La estimación de la humedad antecedente del suelo se hace mediante el modelo de predicción del capítulo 7.

9.3.3.1.2.- Microcuenca 2

La microcuenca 2 que drena en el aforador2, tiene un área de 225 m² y está formada por la tesela MAR (49.78%), LIM (29.33%) y en la parte más alta aparece una tesela de anuales, ANU, que forma parte de un pequeño pedimento colgado de material cuaternario que aparece por encima de la microcuenca 2 y una pequeña parte de éste drena al aforador 2 y representa el 16.44% del total de la microcuenca 2. El 4.44% restante está recubierta por una costra liquénica, tesela LIQ.

Dado que la mayor parte de la microcuenca está integrada por las teselas MAR y LIM, la escorrentía se produce en forma de flujo hiperconcentrado hasta colada de lodo (Oostwoud y Ergenziger, 1998), que embarra el sistema de muestreo impidiendo que se registre el caudal adecuadamente, por lo que solo disponemos de los 8 eventos que se presentan en la tabla 9.8.

FECHA EVENTO	Precipitación (mm)	I ₅ prom. (mm/h)	I ₅ máx. (mm/h)	Escorrentía (mm)	Coef. Escorr. (%)	Ha est. (%)	T. ev. (d)
21/06/92	30.84	1.19	19.86	5.22	16.91	9.36	7.02
01/02/93	18.86	0.89	13.44	3.01	15.98	5.79	83.76
31/10/93	13.94	2.50	17.37	3.33	23.90	1.86	269.15
03/11/93	6.09	0.63	3.84	0.27	4.41	13.85	3.07
24/11/93	10.44	1.15	5.06	1.29	12.39	5.44	23.84
16/02/94	65.57	3.13	10.05	40.11	61.17	3.04	40.30
28/02/94	18.85	1.54	14.80	4.78	25.34	13.15	11.40
01/03/95	16.55	3.92	21.4825	3.50	21.13	16.72	0.06

Tabla 9.8: Variables hidrológicas para la microcuenca 2: precipitación, intensidad promedio y máxima del evento (I₅ minutos), escorrentía total, coeficiente de escorrentía, humedad antecedente a la lluvia (media diaria) estimada de la tesela MAR a 3cm (que es la mayoritaria) y tiempo transcurrido entre ese evento y el anterior. La estimación de la humedad antecedente del suelo se hace mediante el modelo de predicción del capítulo 7.

El caudal máximo registrado en esta microcuenca fue 6.03 L/s.

Los coeficiente de escorrentía varían entre 4.4 al 61.17% (para los eventos disponibles). Son elevados, pero menos que en la subcuenca 3, como se puede comprobar en las tablas 9.7 y 9.8, pues no está enteramente constituida por la tesela MAR, sino que otras teselas como ANU o LIM, que producen menos escorrentía y sedimentos constituyen casi la mitad de la microcuenca .

9.3.3.1.3.- Microcuenca 4

Esta microcuenca constituye casi un tercio de la microcuenca 1 y a diferencia de la 2 y la 3 está vegetada, integrada mayoritariamente por las teselas: STI (57.3%), PER (21.3%), LQC (13.14%), ANU (4.88%) y pequeñas manchas de LIQ (0.26%), LQD (0.21), LIM (1.73%) y MAR (1.18%) cerca del aforo.

La tesela STI se localiza sobre una extensa ladera que cubre la parte alta y media de la microcuenca 4, ladera que termina en una amplia *mesa* constituida por las teselas PER y ANU, de manera que la posible escorrentía que se produce en la ladera con STI, cuando alcanza la mesa es infiltrada en su mayoría, pues las teselas que integran la *mesa* presentan una gran capacidad de infiltración. Las tasas de infiltración son mucho mayores.

El caudal máximo registrado es 1.87L/s. El Coeficiente de Escorrentía es inferior al 5%, a diferencia de los casos anteriores.

En esta microcuenca no existen los problemas de embarramiento, el bajo número de eventos registrados, se debe a que por un lado el aforador se colocó en verano de 1993, y por otro lado ha habido algunos problemas de transmisión y baterías.

FECHA EVENTO	Precipitación (mm)	I5 prom. (mm/h)	I5 máx. (mm/h)	Escorrentía (mm)	Coef. Escorr. (%)	Ha est. (%)	T. ev. (d)
31/10/93	13.94	2.50	17.37	0.37	2.65	2.25	269.15
06/01/94	11.02	2.77	9.04	n.d.	n.d.	7.99	67.23
16/02/94	65.57	3.13	10.05	n.d.	n.d.	15.25	40.30
28/02/94	18.85	1.54	14.80	n.d.	n.d.	19.49	11.40
15/10/94	21.87	7.61	51.31	0.24	1.11	10.61	229.20
04/11/94	22.63	2.65	23.75	0.01	0.03	11.02	18.93
28/02/95	24.95	3.38	13.37	0.00	0.00	4.72	116.28
01/03/95	16.55	3.92	20.37	0.05	0.29	22.28	0.06
17/01/96	11.90	1.24	16.76	n.d.	n.d.	14.7	322.79
23/01/96	15.67	1.35	12.79	n.d.	n.d.	19.67	5.45
01/02/96	41.50	0.91	14.12	0.02	0.05	20.03	7.62
09/04/96	9.01	2.00	35.02	0.07	0.81	18	67.96
06/05/96	8.21	24.65	49.29	0.34	4.13	9.65	26.80
11/09/96	32.13	0.73	17.09	0.07	0.21	4.49	126.59
14/10/96	19.48	1.55	11.62	n.d.	n.d.	9.33	33.64
05/12/96	22.23	0.93	11.47	n.d.	n.d.	11.49	50.93
29/12/96	8.99	1.72	14.62	n.d.	n.d.	18.04	24.25
02/01/97	21.47	2.46	9.65	n.d.	n.d.	22.19	2.82
22/01/97	17.74	0.64	7.34	n.d.	n.d.	19.25	19.47
31/05/97	18.50	2.58	30.03	0.08	0.42	4.75	39.68

Tabla 9.9: Variables hidrológicas para la microcuena 4: precipitación, intensidad promedio y máxima del evento (I5 minutos), escorrentía total, coeficiente de escorrentía, humedad antecedente a la lluvia (media diaria) estimada de la superficie STI a 3cm (que es la mayoritaria) y tiempo transcurrido entre ese evento y el anterior. La estimación de la humedad antecedente del suelo se hace mediante el modelo de predicción del capítulo 7.

9.3.3.1.4.- Microcuena 1

La microcuena 1 está integrada por diferentes tipos de teselas. La distribución del área ocupada por cada tipo de tesela se representa en el figura 9.16

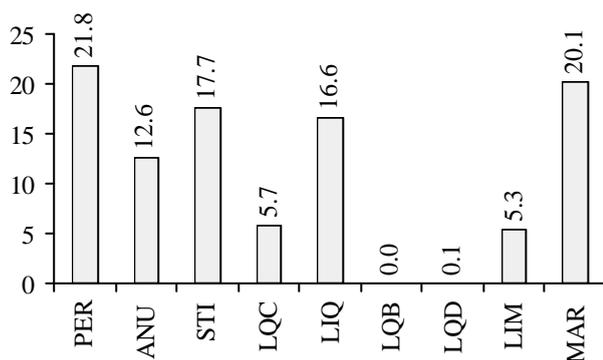


Figura 9.16: Diagrama de distribución del área ocupada por cada tipo de tesela en la microcuena 1.

9.- Respuesta hidrológica

Se han registrado 26 eventos de escorrentía desde 1992 hasta Septiembre de 1997, cuyas principales características se presentan en la tabla 9.10

FECHA EVENTO	Precipitación (mm)	I ₅ prom. (mm/h)	I ₅ máx. (mm/h)	Escorrentía (mm)	Coef. Escorr. (%)	Ha est. (%)	T. ev. (d)
28/01/92*	141.25	4.01	15.93	10.32	7.31	11.25	76.16
19/2/92	52.27	1.89	55.90	3.60	6.90	20.08	20.53
31/3/92	14.24	2.68	16.85	0.02	0.17	15.44	39.74
3/5/92	31.92	1.42	8.33	0.47	1.48	6.56	33.14
7/5/92	10.90	n.d.	n.d.	0.001	0.01	20.55	3.70
13/6/92	40.61	2.07	13.39	0.54	1.33	6.57	39.95
21/6/92	30.84	1.19	19.86	1.39	4.51	15.28	7.02
18/10/92	9.29	2.64	20.36	0.005	0.05	18.62	118.78
7/11/92	87.56	1.94	29.44	13.30	15.19	10.70	19.37
1/2/93	18.86	0.89	13.44	0.18	0.95	9.98	83.76
2/2/93	70.26	1.90	11.76	3.58	5.10	21.73	0.39
5/5/93	33.72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9.43	90.51
31/10/93	13.94	2.50	17.37	0.30	2.16	4.41	269.15
6/1/94	11.02	2.77	9.04	0.02	0.21	8.04	67.23
16/2/94	65.57	3.13	10.05	2.33	3.55	10.84	40.30
28/2/94	18.85	1.54	14.80	0.16	0.85	19.48	11.40
15/10/94	21.87	7.61	51.31	2.09	9.57	10.78	229.20
4/11/94	22.63	2.65	23.75	1.15	5.10	11.23	18.93
28/2/95	24.95	3.38	13.37	0.27	1.09	4.67	116.28
1/3/95	16.55	3.92	20.37	n.d.	n.d.	21.48	0.06
17/1/96	11.90	1.24	16.76	0.01	0.11	13.23	322.79
23/1/96	15.67	1.35	12.79	0.42	2.66	17.89	5.45
1/2/96	20.60	0.91	14.12	1.03	5.01	19.17	7.62
9/4/96	9.01	2.00	35.02	0.37	4.07	17.37	67.96
6/05/96*	8.21	24.65	49.29	0.75	9.11	10.89	26.80
11/9/96	32.13	0.73	17.09	n.d.	n.d.	4.78	126.59
14/10/96	19.48	1.55	11.62	0.35	1.81	9.99	33.64
5/12/96	22.23	0.93	11.47	n.d.	n.d.	10.65	50.93
29/12/96	8.99	1.72	14.62	0.06	0.63	16.86	24.25
2/1/97	21.47	2.46	9.65	n.d.	n.d.	20.81	2.82
22/1/97	17.74	0.64	7.34	n.d.	n.d.	17.95	19.47
31/5/97	18.50	2.58	30.03	2.13	11.50	5.75	39.68

Tabla 9.10: Variables hidrológicas para la microcuenca 1: precipitación, intensidad promedio y máxima del evento (I₅ minutos), escorrentía total, coeficiente de escorrentía, humedad antecedente estimada (media diaria), media de todas las superficies y tiempo transcurrido entre ese evento y el anterior. *: en el evento de 28/1/92 se perdió el enlace con la estación durante 3 horas, gracias a los datos de campo se pudo reconstruir la precipitación total, pero no la intensidad, ni la escorrentía, por tanto la escorrentía probablemente sea algo superior a la presentada, por lo que no se usará en los análisis posteriores. También se perdió parte del evento 6/05/96.

Los caudales detectados oscilan entre 0.04 y 90.7 L/s.

Cada evento de precipitación (siempre que supere el umbral necesario para generar escorrentía) da lugar a un hidrograma característico con rasgos íntimamente relacionados con las características de la lluvia, precipitación total e intensidad de la precipitación, como se observa en la figura 9.17, donde se comprueba que picos en la intensidad de la lluvia dan lugar a picos en el caudal con un pequeño retardo.

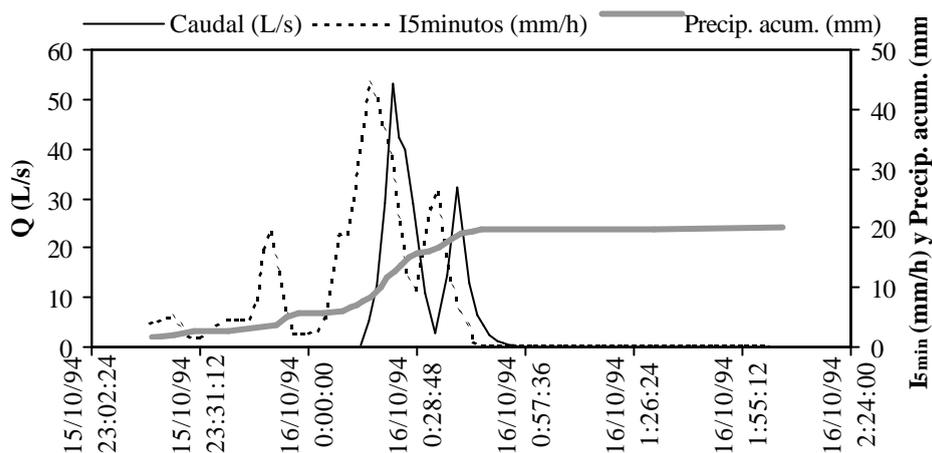


Figura 9.17: Hidrograma, precipitación acumulada (mm) e intensidad de la precipitación (I_{5min}) en mm/h.

Los coeficientes de escorrentía oscilan entre 0.01 y 15.19% (tabla 9.10)

La duración del evento de escorrentía en la microcuenca 1 puede ser tan corta como 3 minutos y tan larga como 39 horas, en este último caso hay intervalos de tiempo en que prácticamente deja de llover.

A medida que aumenta el volumen de precipitación aumenta la escorrentía y el coeficiente de escorrentía, y la tasa de aumento es diferente para cada una de las microcuencas instrumentadas, figura 9.18, de manera que el aumento más rápido (la mayor pendiente) se presenta en la microcuenca 3, pues está constituida íntegramente por la tesela MAR, que es la superficie con menor capacidad de infiltración. Le sigue la microcuenca 2 que se caracteriza por altos coeficientes de escorrentía, aunque algo menores que la microcuenca 3, pues aunque la mitad de la microcuenca está integrada por la tesela MAR (alta escorrentía), la otra mitad del área la constituye la tesela LIM (que presenta escorrentía intermedia) y la tesela ANU con poco potencial para la escorrentía.

La microcuenca 1, que incluye a las otras tres cuencas, se caracteriza por una pendiente intermedia que representa la respuesta integrada de las diferentes

teselas. La microcuenca 4, casi íntegramente constituida por teselas vegetadas presenta las menores tasas de escorrentía y el menor aumento de dicha variable con la precipitación.

Cuando se compara la escorrentía con la intensidad de la lluvia, se comprueba que cuanto mayor es la intensidad máxima de la precipitación, tiende a producirse más escorrentía (figura 9.19).

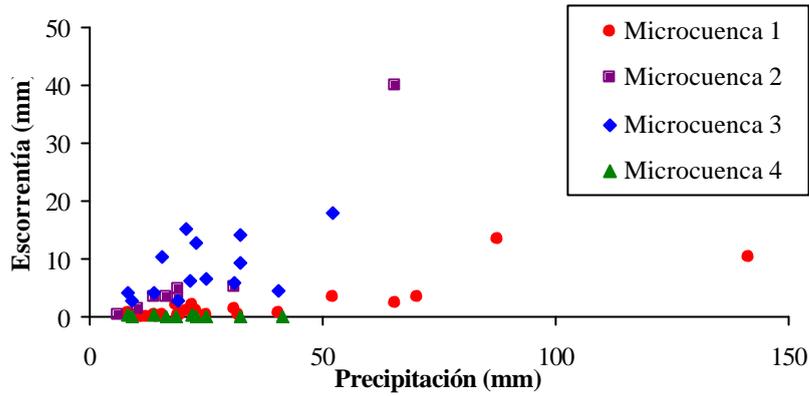
En la microcuenca 1 existe una relación lineal positiva entre la precipitación (mm) y la escorrentía y hemos encontrado dos respuestas diferentes (figura 9.20) determinadas por la intensidad de la lluvia, la cual condiciona la pendiente de la recta de regresión entre ambas variables:

- Un grupo de eventos de precipitación (eventos intensos, con I_5 máxima $>15\text{mm}$) presentan una pendiente mayor para esta recta de regresión sin que el volumen total de precipitación sea muy elevado.

- La recta de regresión para el otro grupo de eventos tiene una pendiente menor, y este grupo se caracteriza por precipitación total alta y una I_5 máxima no tan elevada (I_5 máxima $\leq 15\text{mm/h}$).

No obstante aunque las figuras 9.18, 9.19 y 9.20 ponen de manifiesto las relaciones lineales entre el volumen de precipitación o la intensidad de la precipitación con la escorrentía y estadísticamente se ajustan a rectas de regresión de forma significativa, sin embargo en estas figuras se pueden observar que algunos puntos se desvían mucho de la recta de regresión para la correspondiente microcuenca. Esta falta de linealidad se ha descrito en otras zonas áridas (Yair, 1998 comentario personal) y se atribuye a las características de la precipitación de estas zonas, donde una tormenta consiste en varias lluvias separadas de corta duración de algunos milímetros (Yair, 1990), lo cual origina una rápida escorrentía y discontinuidades en la escorrentía (Yair y Lavee, 1985) y a características de la superficie del suelo como el sellado de la superficie, y como se desencadena en función de las características de la lluvia.

Bryan y Campbell en 1986 concluyen, a partir de sus estudios en los *badlands* de Red Deer River en Canada, que la cantidad e intensidad de la precipitación, así como la humedad antecedente, la duración de la precipitación y la distribución espacial de la lluvia son determinantes en la producción de escorrentía sobre las superficies de *badlands*. Nuestros resultados demuestran que la respuesta de la cuenca en términos de producción de escorrentía está muy relacionada con la cantidad total de precipitación y con la intensidad de la precipitación, pero no se encuentra una dependencia significativa de la humedad antecedente.



encuentra una dependencia significativa de la humedad antecedente.
 Figura 9.18: Relación Precipitación y Escorrentía para cada microcuenca.

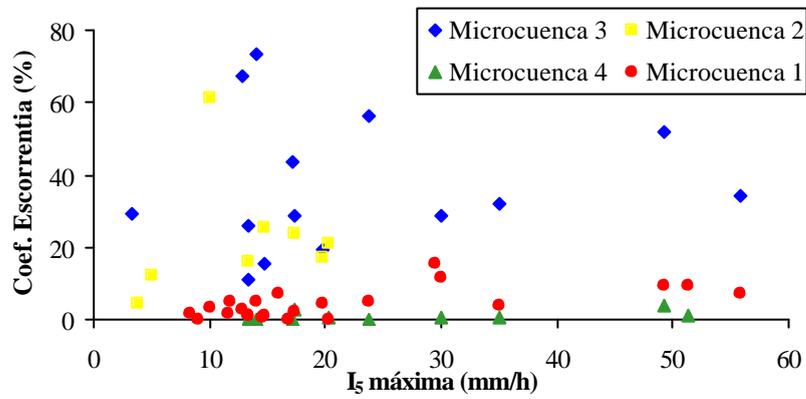


Figura 9.19: Relación I_{5min} máxima - Coeficiente de Escorrentía en cada cuenca.

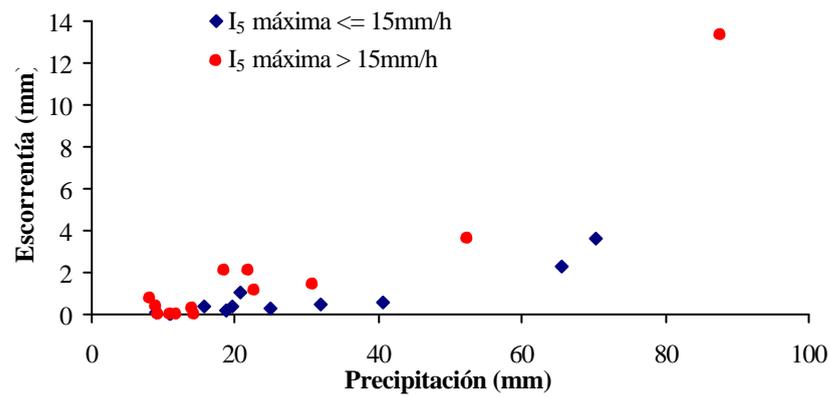


Figura 9.20: Precipitación vs coeficiente de escorrentía para los eventos de la microcuenca 1. Se representan los eventos de precipitación con intensidad máxima (I_5 máxima del evento) inferior o igual a 15mm/h y eventos con intensidad máxima superior o igual a 15mm/h.

Llama la atención que cuando se compara la escorrentía de la cuenca, ya sea en forma de tasa de escorrentía o coeficiente de escorrentía, con la humedad antecedente estimada mediante el modelo de predicción de la humedad del suelo del capítulo 7, se comprueba que no existe una relación clara. No parece que la humedad antecedente afecte mucho a la escorrentía total, sino más bien parece ser la cantidad total de la precipitación y la intensidad de la lluvia las que controlan la respuesta de la cuenca en términos de escorrentía.

Si se intenta estimar la escorrentía de la microcuenca *I*, a partir de los eventos disponibles, mediante un modelo de regresión lineal múltiple, desarrollado por pasos, introduciendo las siguientes variables: precipitación total, I_5 máxima del evento y humedad antecedente. El resultado es que solo es significativo incluir en el modelo la precipitación total y la I_5 máxima del evento:

$$E. = -2.0777 + 0.1047 * P + 0.0294 * I_{5máx}$$

$$F(2, 22) = 23.86; p < 0.0000; R^2 = 0.68$$

El umbral de precipitación necesario para que se produzca escorrentía a la salida de la cuenca *I* oscila entre 8 y 13mm, dependiendo de la intensidad de la lluvia y de la humedad antecedente.

La tormenta de menos volumen registrada que generó escorrentía en todas las cuencas es de 8.21mm correspondiente al evento del 65-96 que fue muy intenso, tabla 9.10. Si observamos las características de los eventos superiores a 5mm, que no produjeron escorrentía en la tabla 9.11, los eventos en negrita son los que por la cantidad de precipitación podrían haber desencadenado la generación de escorrentía, sin embargo en todos estos casos la intensidad media y/o máxima (I_5 minutos) es baja. En los eventos 29/9/94 y 28/4/96 la I_5 máxima es bastante elevada, pero la I_5 media es baja, y en ambos casos la humedad antecedente estimada es baja.

La generación de escorrentía se suele producir antes en la microcuenca *I*, con un área de contribución mucho mayor y más cauces. En algunos eventos se genera la escorrentía unos minutos antes en las microcuencas 3 ó 2, e incluso en una ocasión en la microcuenca 4 antes que en el resto, lo cual podría atribuirse a diferencias en la distribución espacial de la precipitación. Precipitaciones pequeñas, a veces son capaces de generar escorrentía en la microcuenca 2 o en la microcuenca 3, sin que se detecte escorrentía a escala de la microcuenca *I*, como ocurrió con los eventos 3/11/93 (de 6.04mm el menor detectado) y 24/11/93.

Si fijamos el umbral de precipitación para la generación de escorrentía en torno a 9 mm, el 83% del total de los eventos que se han dado en la cuenca en todo el periodo de estudio no superan este umbral.

EVENTO	Precip. (mm)	H.ant. (%)	I ₅ prom. (mm/h)	I ₅ máx. (mm/h)	EVENTO	Precip. (mm)	H.ant. (%)	I ₅ prom. (mm/h)	I ₅ máx. (mm/h)
18/02/92	8.12	20.08	0.77	6.70	23/08/95	6.96	3.88	5.15	9.65
02/03/92	13.64	21.31	0.89	6.82	07/12/95	6.67	5.98	1.11	6.88
02/05/92	5.82	6.56	1.76	4.42	15/12/95	9.86	11.56	0.37	3.84
08/10/92	6.39	5.65	1.09	13.45	09/01/96	6.67	9.71	0.90	4.20
16/10/92	7.86	11.51	2.85	27.56	22/01/96	6.67	17.98	1.35	12.79
27/12/92	6.09	13.23	0.81	6.53	14/02/96	6.67	17.71	0.29	4.65
13/03/93	6.67	17.57	0.70	3.49	08/03/96	5.51	13.60	0.32	3.16
25/03/93	7.55	15.16	1.20	9.34	09/03/96	8.99	13.60	0.32	3.16
24/04/93	6.99	5.88	1.84	13.77	05/04/96	8.99	13.34	1.82	4.87
09/05/93	6.38	18.76	1.58	6.85	28/04/96	9.01	8.10	0.65	19.35
15/04/94	10.73	13.10	1.58	5.42	16/11/96	9.28	13.87	1.06	8.56
29/09/94	11.92	5.27	1.52	15.40	08/12/96	12.76	18.05	0.77	10.48
09/10/94	7.54	10.26	0.62	4.44	15/12/96	5.51	17.82	0.65	3.93
07/03/95	10.44	19.55	1.19	5.61	18/12/96	13.05	21.85	0.56	9.56
11/03/95	5.22	19.87	2.30	6.21	09/04/97	13.63	6.65	1.54	6.39
20/06/95	7.54	5.15	1.14	4.91	21/04/97	14.21	9.59	0.65	11.14
26/06/95	7.28	10.08	4.23	17.02					

Tabla 9.11: Características de eventos que no generaron escorrentía en la microcuenca I. Se presenta la Precipitación (mm), Humedad antecedente del suelo(%) que corresponde a la media en las diferentes superficies de la humedad media diaria estimada el día previo a la lluvia, y la I₅ media y máxima del evento. En negrita las precipitaciones que por su volumen se podría esperar generación de escorrentía.

De los 283 eventos de precipitación que han tenido lugar en la cuenca en los años hidrológicos de 91-92 a 96-97, solo 34 eventos produjeron escorrentía en alguna de las cuencas, es decir sólo el 12%. Teniendo en cuenta que son pocos los eventos y que sólo un 12% de los registrados provocaron respuesta de la cuenca nos podemos hacer una idea de la limitación a los cambios que tiene este paisaje por la escasez de lluvias.

9.3.3.2.- Erosión.

Los problemas de embarramiento afectan aún más a la toma de muestras de sedimentos que a la medida de la escorrentía, debido a que el barro en muchas ocasiones bloquea las bombas que succionan a las muestras de sedimentos. Por otro lado al principio de la instrumentación de las estaciones, había problemas en el diseño del programa que controlaba la toma de muestras, de manera que a veces las muestras no se distribuían adecuadamente a lo largo del evento escorrentía. Para medir la carga de fondo se colocó un depósito a la salida del aforador, sin embargo la mayoría de sedimentos se depositaban en el canal de aproximación del aforador y de los sedimentos que pasaban al depósito, buena parte, al contacto con el agua

del depósito se disgregaban en partículas más pequeñas que se mezclaban con los sedimentos en suspensión. Pero afortunadamente, en este sentido, la mayoría quedaban en el canal de aproximación lo cual suele interferir la medida del caudal.

9.3.3.2.1.- Microcuenca 3

Es muy difícil hablar de tasas de erosión tanto para la microcuenca 3 como para la microcuenca 2 por el embarramiento, tanto mayor cuanto más erosivo es el evento, lo que hace que precisamente los eventos de mayor magnitud, los más interesantes en términos erosivos, son los que producen un mayor embarramiento del sistema y la consecuente pérdida de datos.

La máxima exportación de sedimentos registrada en un evento fue de 2.89kg/m² de los cuales 1.13 kg/m² se exportaron en forma de sedimentos en suspensión o disueltos y el resto como gruesos, valor poco representativo, pues no se han podido medir los eventos más activos.

En el anexo se presentan las tablas con los eventos registrados, para cada microcuenca. Para la microcuenca 3 (tabla A.9.11) se observa que sólo en 5 eventos de escorrentía se pudieron medir los sedimentos que se exportan en suspensión y carga de fondo; por ello es muy difícil relacionar la exportación de sedimentos con la cantidad total de lluvia o con su intensidad, aunque se observa una cierta tendencia a que aumente la erosión con la escorrentía y con la intensidad de la precipitación.

No es posible hablar de tasas de rebajamiento o de exportación de sedimentos por año hidrológico debido a los pocos datos disponibles.

9.3.3.2.2.- Microcuenca 2

En esta microcuenca las tasas totales de erosión que fueron posible medir son también muy pocas y en general son menores que para la microcuenca 3, lo que es lógico si se tiene en cuenta que parte de esta microcuenca la integra teselas vegetadas o menos susceptibles a erosionarse como LIM. La máxima tasa total de erosión que se ha podido medir es de 0.31Kg/m².

La tabla A.9.12 que aparece en el anexo presenta las tasas de erosión registradas en la microcuenca 2.

9.3.3.2.3.- Microcuenca 4

La erosión está bastante más limitada en esta microcuenca. Las tasas de erosión no superan 0.06 Kg/m², respuesta acorde con una microcuenca constituida casi en su totalidad por teselas vegetadas. La tabla A.9.13 del anexo muestra que la microcuenca 4 es bastante menos activa en término erosivos que las microcuencas 2 y 3.

9.3.3.2.4.- Microcuenca 1

En la tabla A.9.14 del anexo se presenta la exportación de sedimentos en la microcuenca 1. Las tasas de erosión registradas, en el periodo de estudio, en la microcuenca 1 oscilan entre 0.0001 y 0.37 Kg/m². Para la mayoría de eventos la mayor parte de sedimentos finos se exportan en suspensión y solo una pequeña parte en disolución, por regla general menos de un 5% del total de sedimentos finos se exportan en forma disuelta, excepto en algún evento donde los elementos disueltos pueden constituir entre el 10 y 19% como máximo del total de finos.

En la mayoría de los eventos registrados (el 70% de los eventos), la mayor parte de los sedimentos se exportan suspendidos o disueltos, es decir son arena fina, limos y arcillas o sales. Sin embargo se han dado algunos eventos en los que casi todo el material exportado es grueso, ocurrió el 16/10/94 o el 1/2/93. El evento de escorrentía del 16/10/94 fue provocado por una lluvia muy intensa, que proporciona energía suficiente para arrastrar material grueso. Sin embargo el del 1/2/93 fue provocado por una lluvia con una intensidad media y máxima más bien bajas, y la escorrentía no fue elevada.

Esto hace pensar que aunque generalmente cuanto más intensa es la lluvia mayor es la generación de escorrentía y sedimentos, sin embargo esta relación no se ajusta a la linealidad porque existen eventos en los que se desencadena una exportación masiva de sedimentos que no concuerda con las características del evento, posiblemente porque se dieron anteriormente otros eventos con unas características concretas que prepararon el material, es decir producen los sedimentos y los movilizan en parte pero no tienen la energía suficiente para transportarlos fuera de la microcuenca y en el siguiente evento se transportan.

Las figuras 9.21 y 9.22 muestran que existe una tendencia a que la erosión aumente cuanto mayor es la escorrentía y la intensidad de la lluvia, en la microcuenca 1, sin embargo esta relación no siempre se ajusta a la linealidad.

El aumento de la erosión con la escorrentía se pone de manifiesto más claramente cuando se estudia la relación entre el caudal al que se toma una muestra y la concentración de sólidos suspendidos en dicha muestra, y aún se ve mejor esta relación cuando comparamos por un lado las ramas ascendentes de los hidrogramas y por otro las ramas descendentes (figura 9.23).

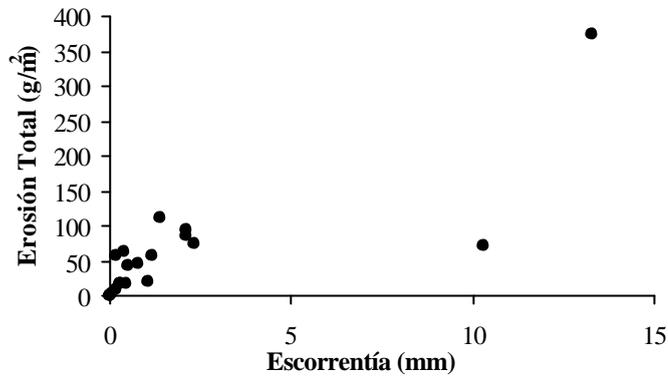


Figura 9.21: Relación tasa de escorrentía y erosión en la microcuenca 1

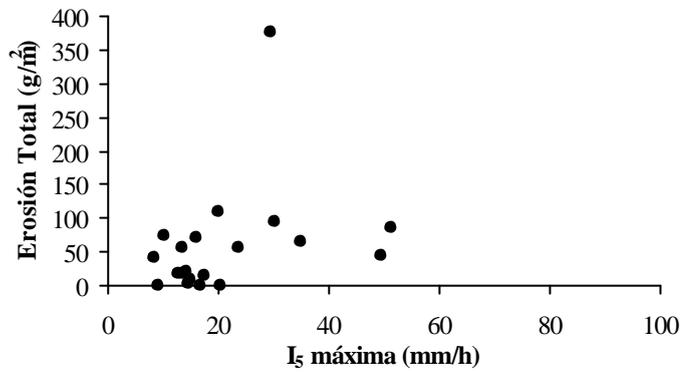


Figura 9.22: Relación intensidad de la precipitación y erosión en la microcuenca 1

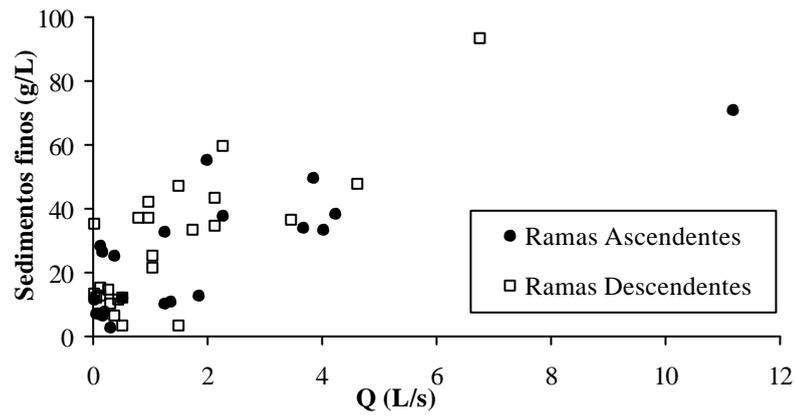


Figura 9.23: Relación caudal concentración de sedimentos finos (suspendidos y disueltos) muestreados a dicho caudal en la microcuenca 1.

Las ecuaciones que relacionan el caudal con la concentración de sedimentos son significativamente diferentes para subidas y bajadas del hidrograma, lo que se demuestra realizando un test de Warlaw (Warlaw, 1987), del que resulta $F_{obs} = 5.12$ que es mayor que $F_{esp}(2,42) = 3.21$ para $p = 0.05$. Ecuaciones:

Ramas Ascendentes hidrogramas:

$$C = 3.3399 + 1.0387Q \quad (R^2: 0.61 \quad F(1,18) = 28.58 \quad p < 0.0000; \quad N = 20)$$

Ramas Descendentes de hidrogramas:

$$C = 3.2335 + 1.5912Q \quad (R^2: 0.65 \quad F(1,24) = 44.48 \quad p < 0.0000; \quad N = 26)$$

con C : concentración de sedimentos en muestra en g/L

Q : Caudal en L/s.

Se observa que la tasa de aumento es ligeramente superior en las ramas descendentes, lo que se podría explicar porque en las ramas ascendentes se prepara el material y las descendentes dispondrán de más sedimentos para transportar en suspensión. La figura 9.24 presenta el hidrograma y sedimentograma (sólo sedimentos finos) para un evento en la microcuenca 1 (28/2/95) y muestra como la concentración de sedimentos varía a lo largo del evento en función del caudal y los picos de caudal coinciden con picos de mayor exportación de sedimentos.

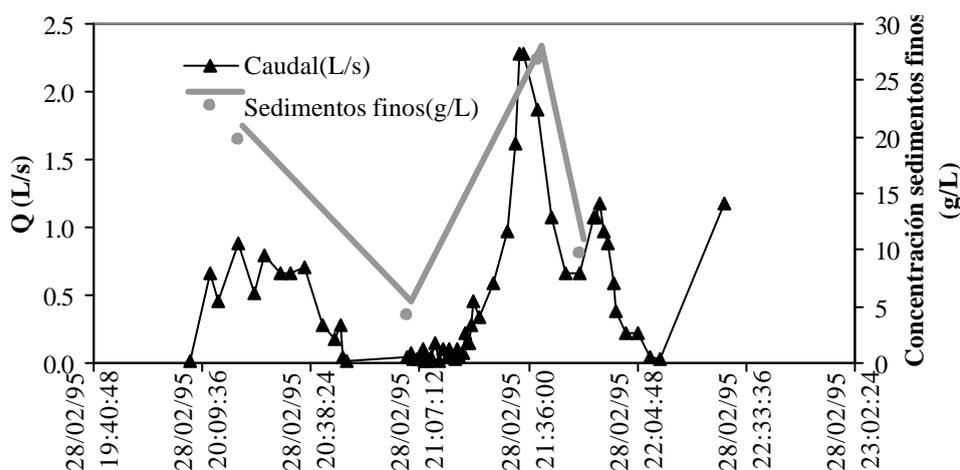
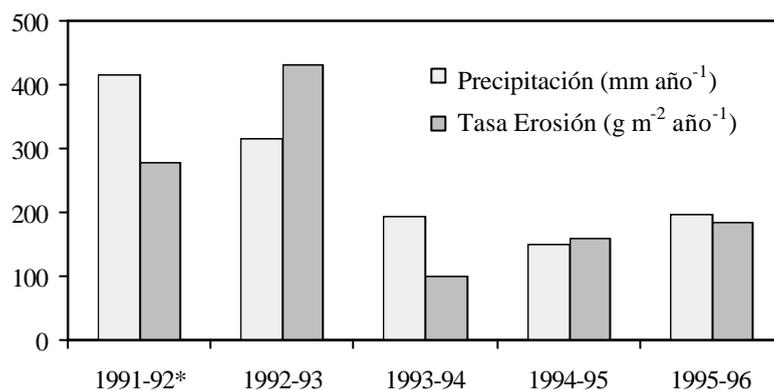


Figura 9.24: Hidrograma y sedimentograma correspondiente al evento 28/2/95 en la microcuenca 1.

Para la microcuenca 1 se pueden calcular las tasas de erosión anuales, excepto para el año hidrológico 96-97, año en el que se perdieron datos de varios eventos y no es posible calcular tasas anuales, y en el 91/92 se perdieron 2 eventos importantes (13/11/91 de 31.1mm y en el evento del 19/2/92 para los que no se conocen el total de finos exportados), por lo que la tasa de erosión debe ser mayor

a la presentada. La figura 9.25 muestra como las mayores tasas de erosión corresponden a los años más lluviosos (91/92 y 92/93) y con intensidades I_s media anual y máxima bastante elevadas. Además, en estos años hubo una mayor proporción de lluvias de gran magnitud que el resto del periodo y una menor proporción de lluvias pequeñas ($<10\text{ mm}$) que el resto de años, como pone de manifiesto la figura 9.5.

Figura 9.25: Distribución de precipitación anual y tasas de erosión anuales por año



hidrológico.

Cuando se compara la erosión en las cuatro microcuencas las diferencias que encontramos coinciden con las de la escorrentía, de manera que la microcuenca 3, constituida íntegramente por la tesela MAR, es la que presenta mayor erosión, seguida de la microcuenca 2, microcuenca 1 y finalmente microcuenca 4, como muestra la figura 9.26.

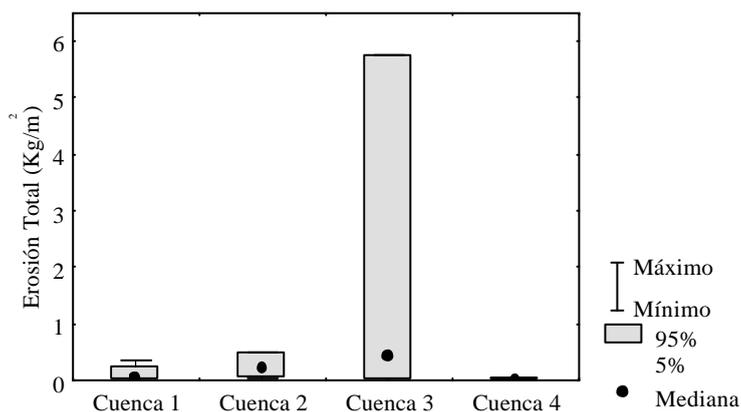


Figura 9.26: Distribución de las tasas de erosión en las diferentes microcuencas (para los datos disponibles).

9.3.4.- Generación de escorrentía y evolución de la humedad del suelo en las diferentes teselas ante un evento de precipitación (Lluvia del 31/5/97).

El 31/5/97, tuvo lugar un evento de 15.95mm, bastante intenso, (I_5 máxima 30mm/h e I_5 media 2.58mm/h). El evento constaba de 2 partes, hay un primer pico de lluvia, unas horas en que deja de llover y posteriormente un segundo pico de precipitación. La humedad antecedente del suelo a 3cm era baja en las teselas: en PER a 3cm, 3.51% en claros y 5.92% bajo mata, a 15cm, 7.19% en claros y 11.31% bajo mata; en LIQ a 3cm 8.77%; en MAR a 3cm 3.25% y en STI a 3cm 6.90%.

La figura 9.27 muestra la respuesta de las microcuencas en términos de escorrentía, y la evolución de la humedad el suelo en las distintas teselas durante el evento.

Doce minutos después del inicio de la lluvia cuando han caído unos 2.03 mm se detecta un ligero aumento de la humedad del suelo a 3cm sobre todo en los claros. Sigue lloviendo y después de 27 minutos, cuando ya había llovido más de 5mm, se registra que en todas las teselas aumenta la humedad del suelo a 3cm, excepto bajo mata donde prácticamente no ha aumentado nada, y a 15cm de profundidad no se detectan cambios en la humedad del suelo. En el capítulo 7 se vio que la humedad del suelo aumenta antes a 3cm de profundidad que a 15cm. Y a 3cm primero aumenta suavemente en los claros y un poco más tarde aumenta bajo mata más drásticamente (por la intercepción de la precipitación por la planta y efecto embudo, ver sección 7.4)

A los 35 minutos aproximadamente de comenzar la lluvia, cuando ya ha llovido 7.25mm comienza la escorrentía en la microcuenca 1, la de mayor área y mayor densidad de cauces. La superficie del suelo ya debe estar saturada y a 3cm ya se registra un aumento importante de la humedad del suelo, más del doble de la humedad inicial y a 15cm comienza a detectarse un ligero aumento de la humedad en torno a un 1 ó 2% tanto en claros como bajo mata. La intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración de las teselas desnudas como MAR o LIM, que se caracterizan por bajas capacidades de infiltración, y comienza a registrarse escorrentía en el aforador 1 y en la microcuenca 3, sin embargo la microcuenca 4, que está constituida mayoritariamente por superficies con mayor capacidad de infiltración, no se produce escorrentía. La figura 9.27 pone de manifiesto que la superficie MAR presenta unas tasas de infiltración menores que el resto y por eso el aumento en la humedad del suelo a 3cm es más lento.

Continúa lloviendo y va aumentando la escorrentía, llegándose a alcanzar un caudal en la microcuenca 1 de 14.95 L/s y en la microcuenca 3 de 0.13 L/s. Tras alcanzarse este pico de escorrentía en ambas microcuencas comienza a disminuir la escorrentía pese a que continúa lloviendo (menos intensamente). La humedad del suelo a 3cm y a 15cm sigue aumentando, mientras comienza la rama descendente del hidrograma, hasta alcanzarse el primer pico de humedad en el suelo. En la tesela PER a 3cm de profundidad se alcanza una humedad de 17.2% en los claros, 22.3% bajo mata, y a 15cm en claros un 15% y bajo mata 19.3%. En la tesela LIQ el aumento de la humedad del suelo es mayor de 27.3%, en MAR 10% y en STI 20.5%. Continúa una lluvia muy suave y la escorrentía va disminuyendo hasta dejar de escurrir a las 2.36 horas en la microcuenca 3 y a las 2.57 horas en la microcuenca 1. A las 2.51 horas de la madrugada dejó de llover y comienza a disminuir la humedad del suelo, pero muy lentamente solo un 1 ó 2%.

La segunda parte del evento comienza 3 horas y media después y con solo 2.03mm de lluvia comienza de nuevo la escorrentía en las microcuencas 1 y 3 y se genera por primera vez escorrentía en la microcuenca 4. Esta última probablemente no proceda de las superficies vegetadas como PER, ANU o STI por sus relativamente altas capacidades de infiltración y su distribución espacial, será más bien una cárcava que existe en la parte baja de la microcuenca 4, constituida por LIM, LQD y MAR. En el primer pico de lluvia no originan escorrentía, pero en el segundo pico de la lluvia pese a que la intensidad es similar, al estar el suelo muy húmedo, la superficie debe estar prácticamente saturada y sellada, por lo que un aporte muy pequeño de precipitación desencadena la escorrentía.

Unos pocos milímetros son suficientes para provocar un nuevo pico en la humedad del suelo. La tesela PER a 3cm, en claros, alcanza una humedad de 26.97%, bajo mata de 34.7%, y a 15 cm aumenta un poco después, (típico retardo del aumento de la humedad en profundidad respecto a la superficie) hasta alcanzar una humedad del 16.6% en claros y 23.18% bajo mata. En la tesela LIQ alcanza 28.4%, en MAR 17.5% y en STI 22.46%. La escorrentía aumenta al mismo tiempo que aumenta la humedad del suelo, y alcanza un pico de 18.01 L/s en la microcuenca 1, 0.08L/s en la microcuenca 3 y 0.5L/s en la microcuenca 4, picos de caudal que coinciden con un pico previo en la intensidad de la lluvia (figura 9.28). Posteriormente disminuye la intensidad de la precipitación y disminuye la escorrentía, deja de llover y se inicia el secado del suelo.

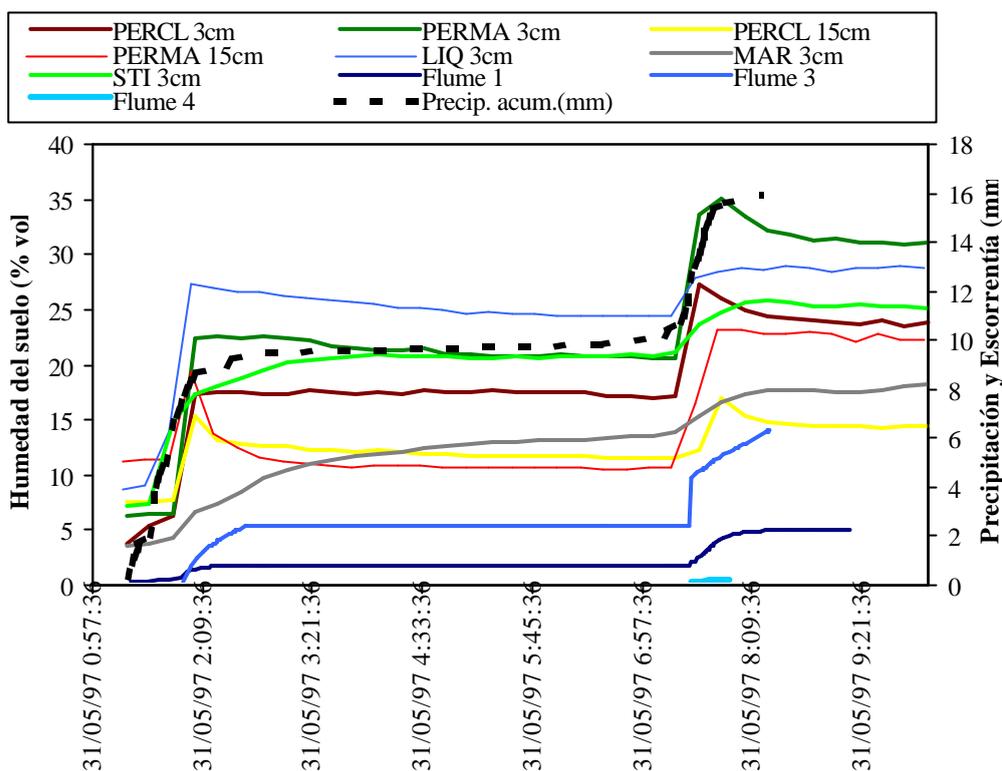


Figura 9.27: Hidrogramas de Aforadores 1,3 y 4, precipitación acumulada y cambios en la humedad del suelo a 3cm en las diferentes superficies para el evento del 31/5/97.

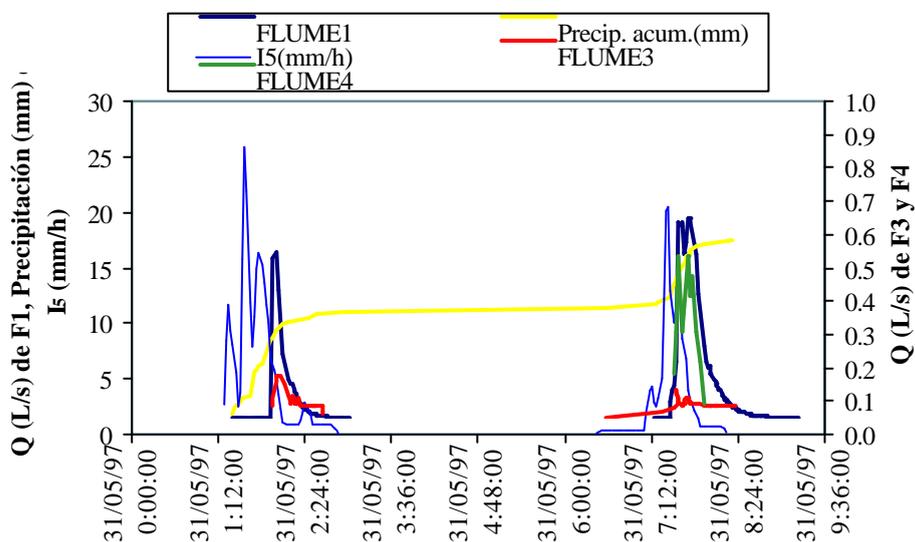


Figura 9.28: Hidrogramas de microfrecuencias 1,3 y 4 , precipitación acumulada e intensidad del la lluvia (I_5 minutos) a lo largo del evento de 31/05/97.

9.3.5.- Modelo de simulación de la escorrentía superficial a escala de microcuenca a partir de los comportamientos hidrológicos de las teselas que la integran.

La figura 9.29 muestra el funcionamiento del modelo. Y en el anexo (sección A.9.1) se presenta el diseño del modelo y las ecuaciones incluidas.

Se implementa para 10 eventos en la microcuenca 1. La tabla 9.12 muestra la escorrentía estimada y real para cada uno de los eventos simulados.

Evento	Escorrentía real (mm)	Escorrentía estimada (mm)
19/02/92	3.63	3.54
13/06/92	0.54	0.39
21/06/92	1.39	1.43
7/11/92	13.31	7.53
1/02/93	0.18	0.20
31/10/93	0.30	0.35
16/02/94	2.33	1.54
28/02/94	0.16	0.16
16/10/94	2.09	2.06
1/02/96	1.03	0.76

Tabla 9.12: Escorrentía real y simulada para 10 eventos en la microcuenca 1

El modelo se ajusta bastante bien para los eventos de precipitación sencillos con hidrogramas con uno o dos picos. Sin embargo para eventos muy largos como 7/11/92, con múltiples picos de caudal la estimación se ajusta peor a la realidad. La figura 9.30 y 9.31 muestran el hidrograma real y simulado para dos eventos el 16/10/94 y 19/2/92, donde la simulación se ajusta bastante bien a la realidad.

Nuestro objetivo más que simular con exactitud las salidas de la cuenca, es conocer como contribuye cada tesela a las salidas de la cuenca y los flujos de escorrentía entre las teselas. Cada 2 minutos, el modelo crea un mapa de escorrentía en cada m^2 de la cuenca, así como un mapa de la humedad del suelo. Estudiando estos mapas a lo largo del evento es posible estudiar las teselas que contribuyen de forma significativa a la escorrentía total de la cuenca y los flujos de agua entre las teselas.

Se estudia como evoluciona la generación de escorrentía a lo largo de un evento (16/10/94), en los momentos del hidrograma señalados en la figura 9.30. La figura 9.32 presenta los mapas de caudal (en L/s) registrados en cada m^2 de la cuenca (cuanto más claro es el color en los mapas mayor es el caudal que pasa por el punto) en los momentos del hidrograma señalados en la figura 9.30.

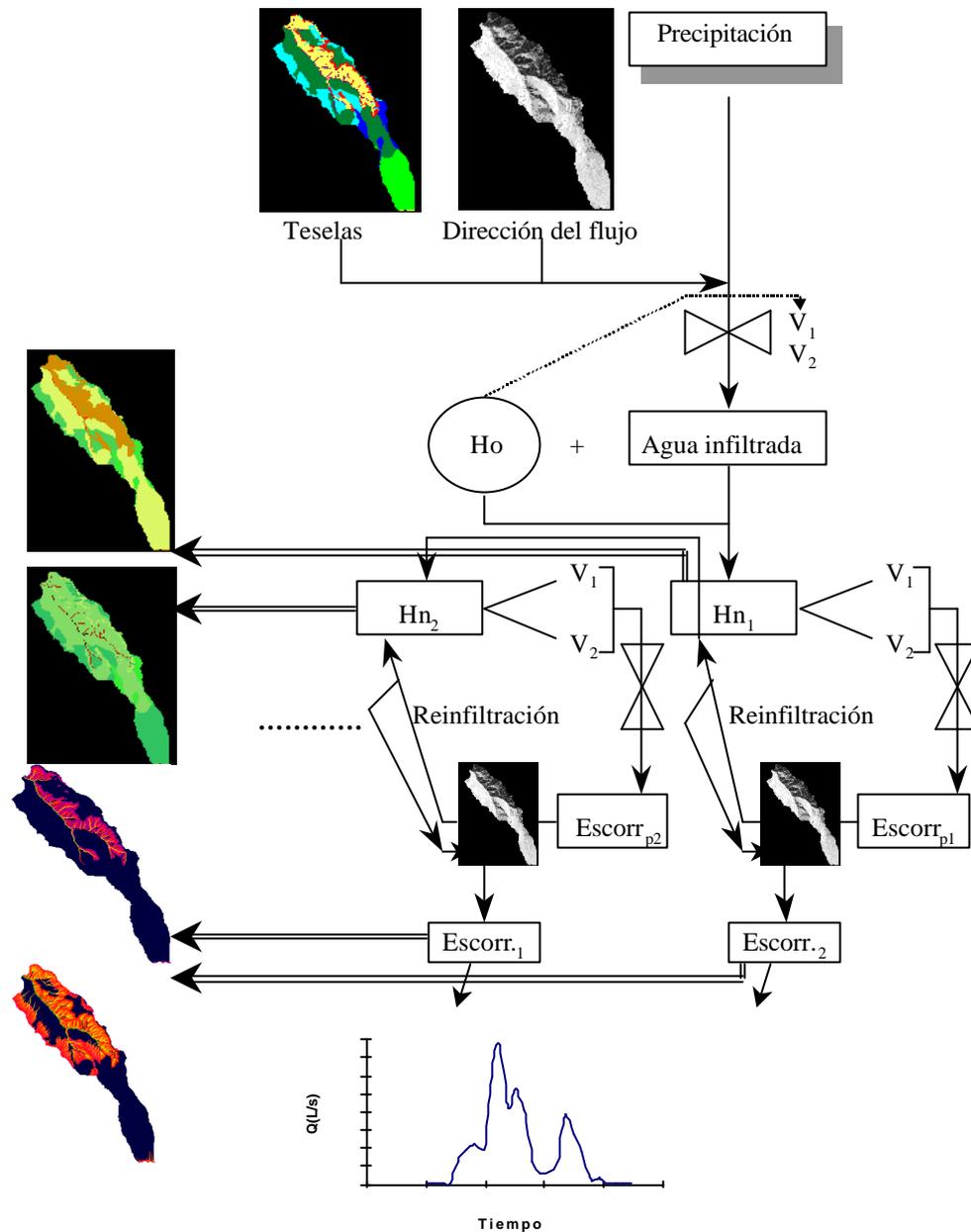


Figura 9.29: Diagrama de funcionamiento del modelo. V_1 : Tasa de infiltración con suelo seco; H_0 : Humedad inicial del suelo; H_{n1} : Humedad en el primer intervalo de tiempo; V_2 : Tasa de infiltración con suelo saturado; Escorr_{p1}: Escorrentía potencial en intervalo de tiempo 1 (antes de reinfiltrarse la escorrentía); Escorr₁: Escorrentía real en cada punto en intervalo de tiempo 1. [H_{n2} , Escorr_{p2}, Escorr₂] corresponde a las mismas variables para el intervalo de tiempo 2. Diferencia entre la intensidad de la precipitación y la tasa de infiltración.

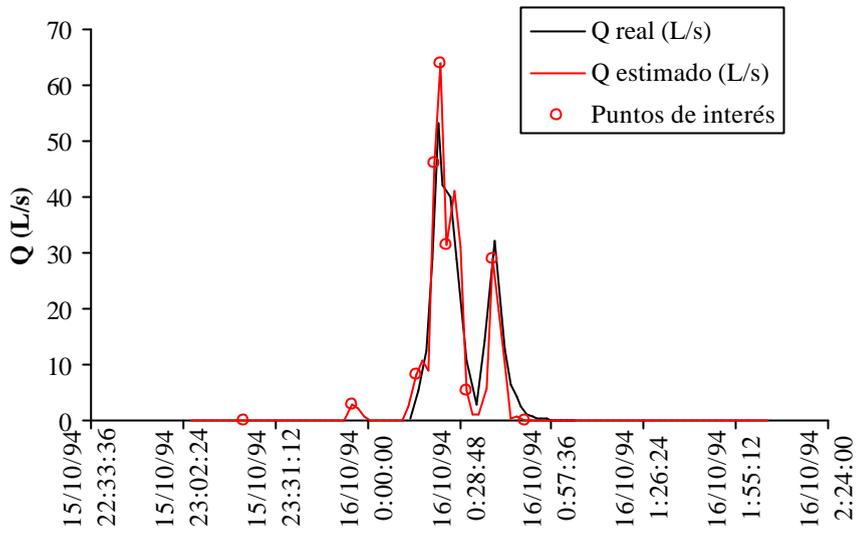


Figura 9.30: Hidrograma real y simulado en la microcuenca 1 para el evento 16/10/94.

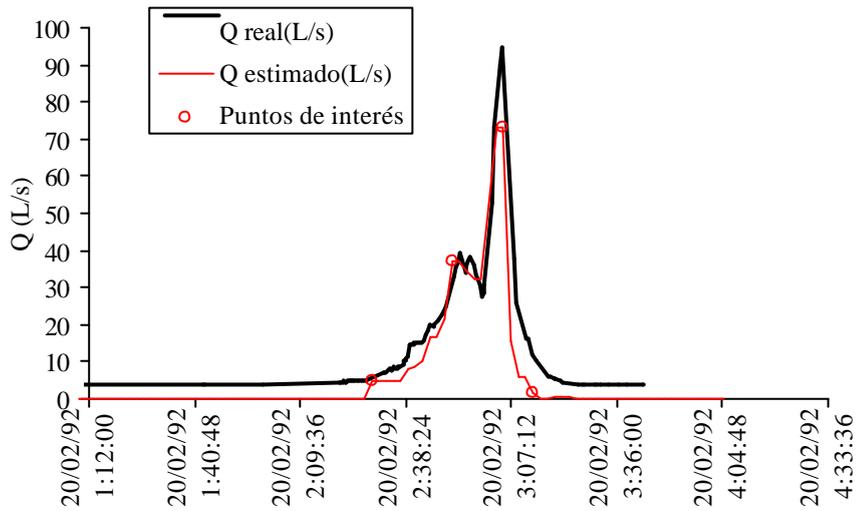


Figura 9.31: Hidrograma real y simulado en la microcuenca 1 para el evento 19/2/92.

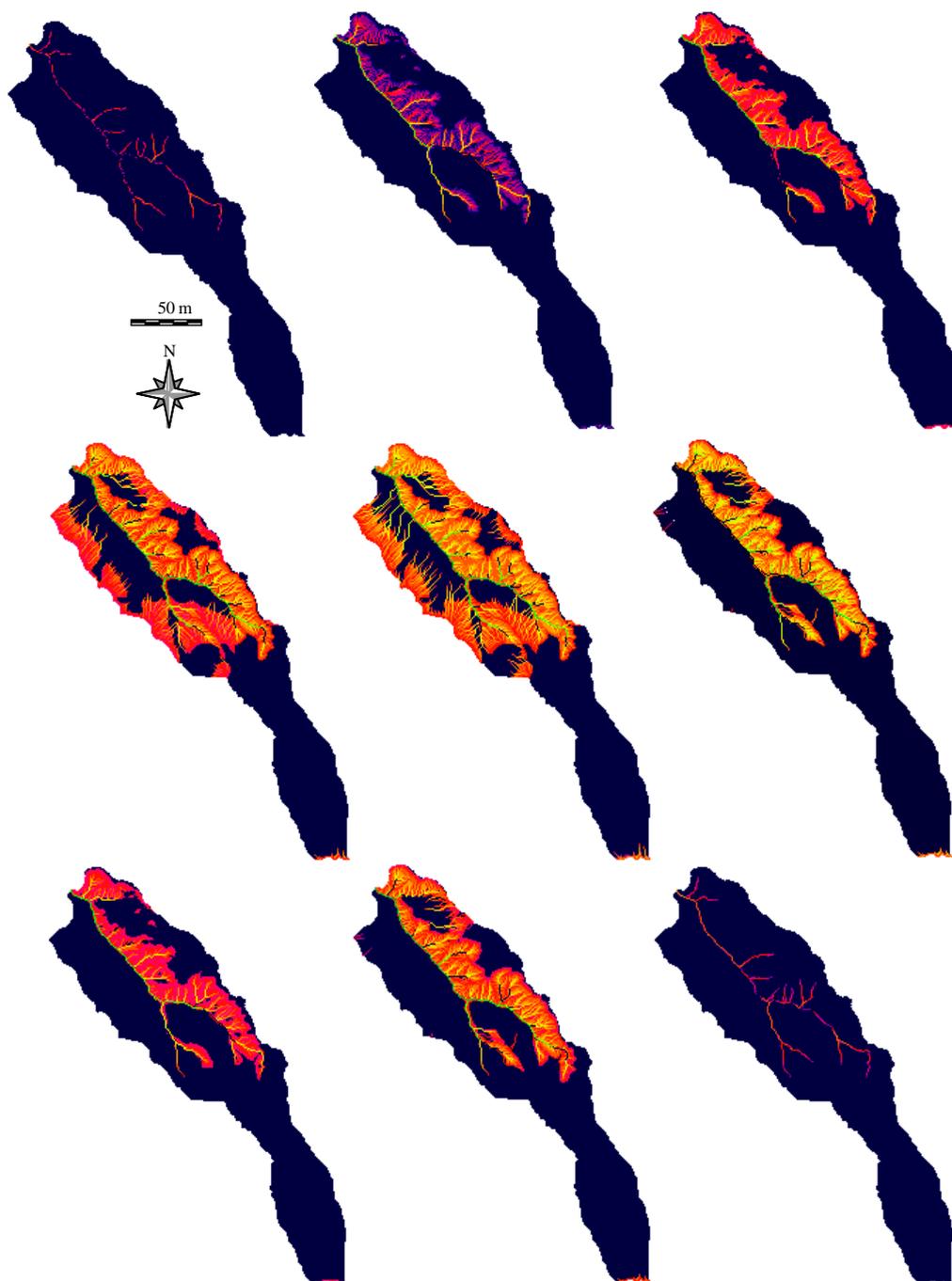


Figura 9.32: Mapas de escorrentía (mm/s) en la microcuenca 1 para el evento 16/10/94. Los mapas corresponden a los momentos del hidrograma representados en la figura 9.30. El mapa arriba a la izquierda corresponde al primer punto señalado en el hidrograma, la secuencia continúa por filas de izquierda a derecha. Todos los mapas con la misma paleta de colores. Caudales oscilan entre 0 y 63.8 mm/s.

< [blue] [red] [yellow] [green] >

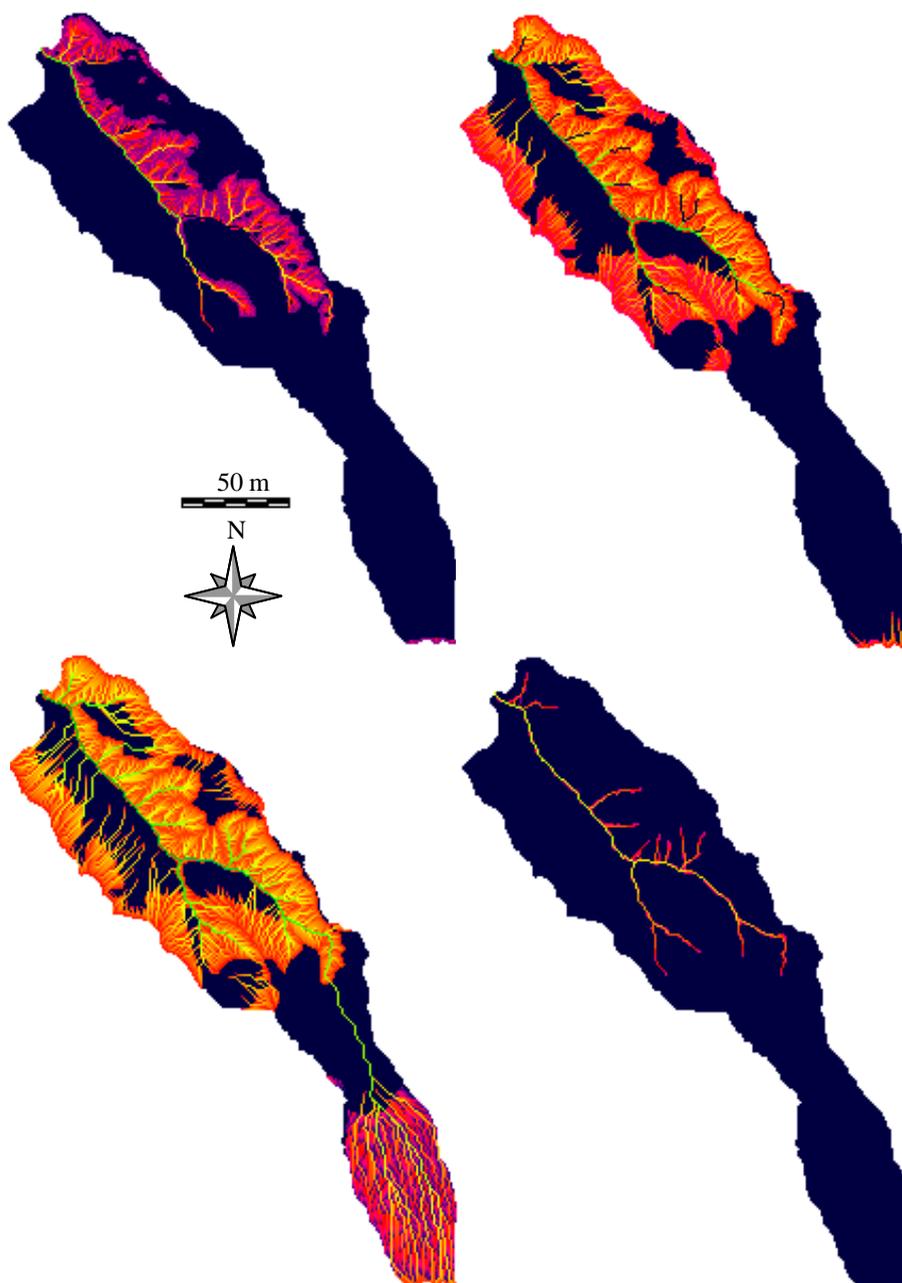


Figura 9.33: Mapas de escorrentía (mm/s) en la microcuenca 1 para el evento 19/2/92. Los mapas corresponden a los momentos del hidrograma representados en la figura 9.31, El mapa de arriba a la izquierda corresponde al primer punto señalado en el hidrograma, y la secuencia continúa por filas de izquierda a derecha. Para todos los mapas se usa la misma escala de colores, en la que los valores más claros corresponden a caudales mayores. Caudales que oscilan entre 0 y 73.2 mm/s. Escala



La figura 9.33 muestra la escorrentía (mapas de escorrentía en cada m² de la cuenca) en los puntos de interés del hidrograma del evento 19/2/92, puntos señalados en la figura 9.31.

Según el modelo no toda el área contribuye a la escorrentía total de la cuenca, existen algunas teselas como PER y ANU donde normalmente no se genera escorrentía. Las principales zonas de contribución a la escorrentía la constituyen las teselas MAR y LIM. En la tesela LIQ sólo se genera escorrentía en determinados momentos del evento y no en todos los eventos. En la tesela STI no suele generarse escorrentía excepto en algunos eventos muy intensos, como el 19/2/92 y solo en algún momento de los mismos. Además la escorrentía que se genera en la tesela STI y buena parte de la generada en LIQ se infiltra en la tesela PER aguas abajo de la ladera STI y PER en muchas zonas también aparece aguas abajo de la tesela LIQ. Solo en algunas zonas de convergencia de agua la escorrentía procedente de una zona bastante extensa de LIQ puede exceder la capacidad de infiltración de PER y se dirige hacia los cauces siguiendo flujos preferentes (mapas cuarto y quinto de figura 9.32 y mapas segundo y tercero de figura 9.33). Se pone de manifiesto un proceso de autorregulación típico de estos paisajes en mosaico de tal manera que la escorrentía generada en unas zonas es infiltrada en otras.

9.4.- DISCUSION

9.4.1.- Comportamiento hidrológico y erosivo de las teselas a escala de parcela.

9.4.1.1.- Escorrentía

A pequeña escala, los resultados obtenidos con parcelas de escorrentía demuestran un comportamiento hidrológico diferencial de las teselas, con unas características muy similares a las obtenidas previamente por Calvo et al. (1991b) y Solé et al. (1997) mediante simulaciones de lluvia. Las teselas con cubierta vegetal constituida por vasculares (PER o ANU), presentan la mayor capacidad de infiltración, escorrentía muy reducida y tasas de erosión muy bajas. Estas teselas están asociadas a las geoformas 1 y 6 (capítulo 5), pedimentos con poca pendiente y bastante estables, con suelos profundos y estructurados, caracterizados por su alta capacidad para retener agua y unos patrones de humedad que favorecen el desarrollo de este tipo de cubierta.

La tesela LQC ocupa la segunda posición en cuanto a la capacidad de infiltración, se localiza en zonas planas y con suelos moderadamente desarrollados.

Las teselas LIM y LQD presentan un potencial medio-alto para producir escorrentía, la cubierta de limos acostrados o cubierta liquénica degradada o incipiente (LQD) y la posición topográfica a la que aparecen asociadas (zonas con una pendiente bastante fuertes) favorecen la generación de escorrentía.

Los coeficientes de escorrentía más elevados se asocian a 2 tipos de teselas muy diferentes entre si: MAR y LIQ. En MAR eran de esperar altas tasas de escorrentía y erosión, pues se trata de una tesela desprovista de vegetación, con una costra mineral que cubre un regolito margoso sin prácticamente desarrollo edáfico y muy baja capacidad para retener agua. Junto a las propiedades de la superficie del suelo de MAR, las características topográficas asociadas a este tipo de tesela (altas pendientes y potencial para transportar sedimentos) favorecen el comportamiento hidrológico de estas teselas.

La tesela LIQ presenta una cubierta criptogámica muy desarrollada que va a ser la responsable de las altas tasas de escorrentía, ya que aunque el suelo es incipiente, presenta una cierta estructura y una porosidad muy alta lo que le debería conferir una capacidad de infiltración mayor que la de MAR e incluso que LIM y LQD. Sin embargo los coeficientes de escorrentía en esta tesela son tan altos como en MAR y mayores que en LIM y LQD. Por otra parte aunque las características topográficas de la unidad LIQ, sobre todo las elevadas pendientes, favorecen la generación de escorrentía, sin embargo no son muy diferentes de las de LIM o LQD y más suaves que las de la unidad MAR. Por lo tanto debe ser la baja permeabilidad de la cubierta liquénica la responsable de este comportamiento hidrológico, así como de las bajas tasas de erosión y de las características de la humedad del suelo, como vimos en el capítulo anterior.

Existe una gran controversia en torno a si las cubiertas liquénicas aumentan o disminuyen la capacidad de infiltración. Hace mucho tiempo que se piensa que las costras criptogámicas afectan a la infiltración en zonas áridas, pero existe una gran polémica en cuanto a como es este efecto. Aunque no se han encontrado investigaciones directas sobre este proceso, es concebible que las costras microfíticas (líquenes, hongos y algas) puedan interceptar alguna precipitación, esencialmente de lluvias suaves. Esto junto con la hidrofobicidad del suelo que se piensa producen muchas microfitas (Walker, 1979), podría conducir a una menor infiltración y percolación (Wood, 1988). Otros muchos autores piensan que las costras microfíticas influyen negativamente en la infiltración (Roges, 1977; Danin,

1978; Stanley, 1983), como ocurre en nuestra zona de estudio en las teselas LIQ.

Sin embargo otros autores han observado, en diferentes sitios, una mayor infiltración en teselas cubiertas con microfitas comparado con zonas desnudas, físico-químicamente acostradas o no (Gilfford, 1972; Blackburn, 1975; Hacker, 1986). Las costras criptogámicas aumentan el microrrelieve superficial cementando fragmentos, procedentes de la erosión por el agua o eólica, en unidades cohesivas, dando lugar a una mayor rugosidad superficial (Anderson et al. 1982). Esto podría explicar las altas tasas de infiltración que encontramos en la superficie LQC, donde la topografía favorece la infiltración y gracias a la rugosidad superficial existe mayor área de contacto y más tiempo de contacto, con el consecuente aumento de la infiltración (Warren et al., 1986). Pero lo más importante es que esta superficie presenta un suelo mucho más desarrollado que en LIQ y una mayor capacidad de retención de agua. Sin embargo no tiene éxito la colonización por plantas vasculares y evolución hasta otro tipo de tesela, esto podría explicarse por la presencia de altas cantidades de yeso en el suelo que probablemente favorecen la presencia de la cubierta líquénica y algunas plantas superiores dispersas e impiden el éxito de una cubierta dominada por plantas superiores.

9.4.1.2.- Erosión

En cuanto a la respuesta erosiva de las diferentes teselas se pone de manifiesto que el tipo de cubierta es determinante en los procesos erosivos, de manera que una cubierta vegetal constituye un freno a los procesos erosivos, y cuanto más densa es esta cubierta menor es la erosión, por lo que las teselas PER, ANU y STI presentan tasas de erosión muy bajas, como ponen de manifiesto los resultados de las simulaciones de lluvia, las parcelas de erosión y los clavos de erosión. La cubierta vegetal reduce el potencial para la erosión aún cuando las características topográficas de la superficie la potencien, como en el caso de la tesela STI, sin embargo en PER y ANU la cubierta vegetal a su vez va asociada a unos atributos topográficos que no favorecen la erosión como son bajas pendientes y bajo potencial para el transporte de sedimentos (bajos valores para el atributo LSF).

La presencia de la cubierta líquénica si bien favorece la generación de escorrentía, sin embargo protege al suelo de la erosión por el agua, lo cual se pone de manifiesto tanto en los experimentos de simulación de lluvia como en los datos registrados para las parcelas situadas en las teselas LIQ y LQC, así como en las tasas de erosión medidas mediante clavos de erosión. Numerosos autores ponen de

manifiesto la que la cubierta criptogámica actúa disminuyendo las tasas de erosión (Blackburn, 1975; Rushforth y Brotherson, 1982; Múcher et al., 1988; Harple y Marble, 1988). La resistencia de la costra criptogámica a la erosión se piensa que se debe a que los polisacáridos producidos por la cianobacteria unen células, filamentos y las partículas del suelo de alrededor constituyendo pequeños agregados (Tisdall and Oades, 1982). Estos agregados presentan una mayor estabilidad en el agua y ayudan a proteger al suelo de la erosión por el agua y eólica (Greene y Tongway, 1989), estas uniones se ponen de manifiesto a M.E con muestras de la superficie LIQ (figura 6.79).

Las teselas desprovistas de vegetación (MAR, LIM y LQD) presentan unas tasas de erosión mucho mayores que se ven favorecidas por las características topográficas asociadas a estas teselas que se resumen en pendientes elevadas y valores elevados de LSF (índice del potencial para el transporte de sedimentos). Además la erosión es mayor cuando la superficie del suelo está totalmente desnuda, únicamente con una costra mineral, caso de la tesela MAR, frente a superficies del suelo cubiertas por limos acostrados (LIM) o líquenes degradados (LQD) que presentan menores tasas de erosión, a su vez los atributos topográficos son menos extremos en ese mismo orden. Y en el caso de la tesela LQD, que presenta una costra criptogámica degradada o incipiente, la erosión es inferior a la registrada en LIM (más estable que MAR), pero mayor que en LIQ o LQC, al fin y al cabo el porcentaje cubierto por la costra criptogámica es menor en LQD, donde aparecen más claros de suelo desnudo, de acuerdo con Eldridge (1993) que constata que las superficies con una cubierta criptogámica alta son más estables y menos erosionables que las que presentaban una cubierta menor. Experimentos con *copas de splash* llevados a cabo en el área de estudio (Downward, K, comunicación personal) ponen de manifiesto que la erosión por impacto de las gotas de lluvia es mayor en MAR (costra estructural), seguida de LIM (costra deposicional), LQD (con líquenes degradados o incipientes) y por último LIQ (costras líquénicas).

Aunque el tamaño de la parcela no es adecuado para estudios de erosión en materiales tan erosionables, sirve para obtener la erodibilidad a escala relativa (Solé et al.1997). A esta escala no es posible recoger surcos y zonas entre surcos y no se integra la variabilidad espacial en la generación de escorrentía y en la exportación de sedimentos sin embargo si se consigue poner de manifiesto la diferencia entre las distintas teselas. Muchos investigadores han demostrado la dificultad de extrapolar datos de parcelas pequeñas a áreas grandes, debido a la importancia crítica de las variaciones espaciales en la generación de escorrentía (Yair et al. 1980) y sedimentos. La ventaja es que se estudian lluvias naturales, y se integra la variación temporal en su intensidad.

Las medidas de erosión mediante clavos de erosión ponen de manifiesto la variabilidad espacial en los procesos de erosión, los resultados indican que una misma tesela dependiendo de la posición que se considere se puede experimentar erosión o deposición, así la tesela MAR o LIM que presentaban altas tasas de erosión en parcelas cerradas, se observan procesos de deposición de material cuando se considera una parcela abierta localizada en la parte baja de la ladera. Cuando se estudian los procesos a escala de ladera, se observa que existe una gran variabilidad, en las laderas desprovistas de vegetación que está relacionada con la concentración de la escorrentía, de manera que en los surcos, donde se concentra la escorrentía (Bryan y Yair, 1982), es en donde se registran las mayores tasas de erosión (en algunos puntos hasta 8.7cm), mientras que las zonas entre surcos la erosión es bastante menor.

La variabilidad espacial en la erosión dentro de una tesela refleja la variabilidad espacial en la generación de escorrentía.

9.4.2.- Comportamiento hidrológico y erosivo integrado de las teselas. Escala de microcuenca.

9.4.2.1.- Escorrentía

En cuanto a la generación de escorrentía a escala de microcuenca, las 4 microcuencas estudiadas presentan comportamientos muy diferentes, que se explican por las diferencias en la escala de una cuenca a otra y sobre todo por el tipo de tesela que integran cada una de ellas. Las microcuencas 2 y 3 se comportan como zonas muy eficientes en la generación de escorrentía, lo que se explica porque están constituidas íntegramente (microcuenca 3) o en su mayor parte (microcuenca 2) por teselas caracterizadas por altas tasas de escorrentía, las teselas MAR y LIM. Sin embargo la microcuenca 4 está integrada mayoritariamente por teselas con capacidades de infiltración relativamente altas (PER y AUN) o intermedias-altas (STI), que además se distribuyen de forma que la posible escorrentía que se pueda generar en la tesela STI, drena a una amplia mesa constituida por PER y ANU, con lo que hay una gran probabilidad de que se infiltre la mayor parte de esa escorrentía.

El patrón de respuesta se hace más complejo cuando se examina la microcuenca 1, que incluye teselas con alta eficiencia en producción de escorrentía y otras con baja, presenta unos coeficientes de escorrentía menores que las microcuencas 2 y 3 debido a que casi un 60% de la cuenca está constituida por teselas poco eficientes en la generación de escorrentía, pero son superiores que los coeficientes de escorrentía de la microcuenca 4.

La respuesta diferenciada de las distintas cuencas se pone de manifiesto cuando se comparan las tasas de escorrentía acumuladas en un evento en las diferentes cuencas, como se puede observar en las figuras 9.34 y 9.35.

La escorrentía disminuye al aumentar el tamaño de la cuenca (de microcuencas 3 ó 2 a microcuencas 4 ó 1).

Las diferencias en la escorrentía inducen a pensar que no todo el área de la microcuenca 1 contribuye a la escorrentía de igual forma, sino serán las laderas con teselas del tipo MAR o LIM (similares a microcuencas 2 y 3), con mayor potencial para la generación de escorrentía, las que contribuyen realmente a la escorrentía total, sobre todo para eventos de precipitación de pequeña magnitud. Hay eventos pequeños en los que el aforador 4 no registra escorrentía o bien es muy pequeña la cantidad medida (que podría atribuirse a unas pequeñas teselas de MAR o LIM que hay en la cuenca 4).

El porcentaje del total de precipitación que se convierte en escorrentía es mayor a medida que aumenta la cantidad de la precipitación en la microcuenca 1 y este aumento es más rápido (mayor pendiente) conforme aumenta la intensidad de la lluvia tendencia que también se pone de manifiesto a escala de parcela. Para todas las teselas (datos de parcelas) existe una relación lineal significativa entre la escorrentía y la precipitación. Sin embargo ni a escala de parcela ni a escala de microcuenca la escorrentía parece depender de la humedad antecedente. A las dos escalas la cantidad de precipitación y su intensidad son las variables con mayor peso en el control de la generación de escorrentía.

El tipo de tesela o características de la superficie del suelo constituye el primer control, pues por muy intensa que sea la lluvia o grande el total de precipitación hay teselas que prácticamente no van a producir escorrentía. Y el comportamiento particular de cada uno de los tipos de teselas se ve afectado por la cantidad de lluvia y su intensidad, lo que se refleja en la respuesta a escala de cuenca.

La humedad antecedente no constituye un control importante en la generación de escorrentía en este ecosistema. Aparte del tipo de tesela (características de la superficie del suelo), la cantidad total de la precipitación y la intensidad de la lluvia son los principales controles de la respuesta las teselas y por lo tanto de su respuesta integrada a escala de cuenca.

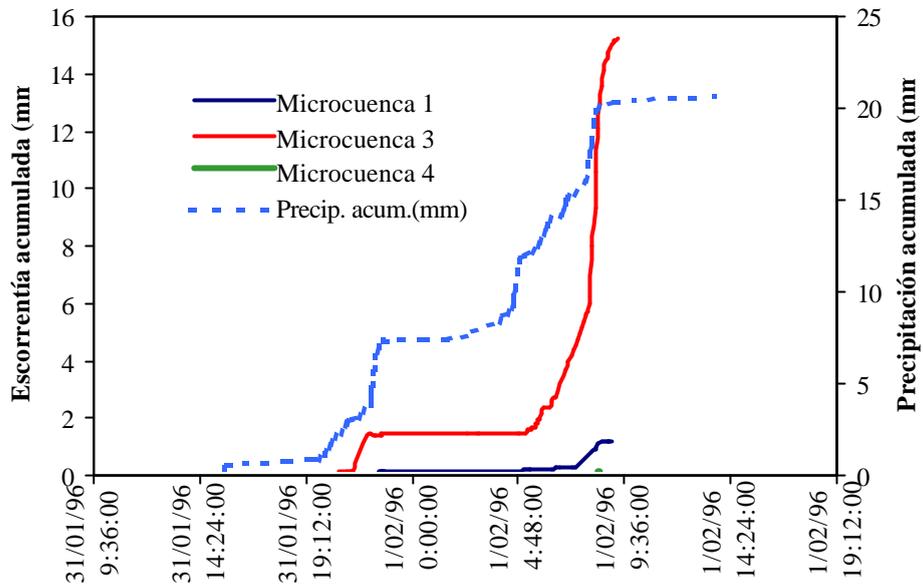


Figura 9.34: Escorrentía acumulada para las microcuencas 1,2 y 3 y precipitación acumulada para el evento 1/2/96.

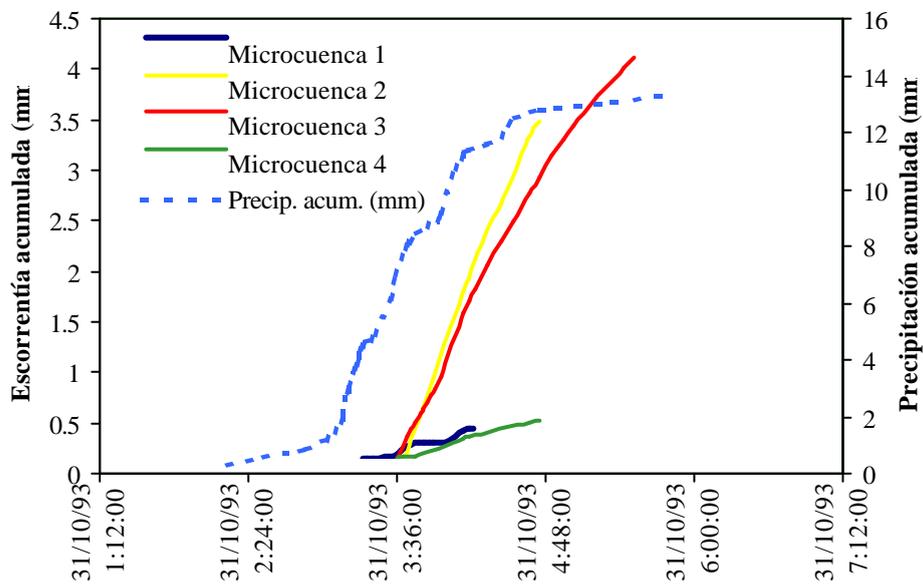


Figura 9.35: Escorrentía acumulada para las microcuencas 1,2,3 y 4 y precipitación acumulada para el evento 31/10/93.

Esto viene apoyado por los estudios que Morin y Benyamini (1977) llevaron a cabo, donde encontraron que el régimen de infiltración de los suelos desnudos está determinado por la lluvia, como resultado de la formación de la costra por el impacto de las gotas, pero no por cambios en la humedad del suelo. No es que el régimen de humedad del suelo no tenga efecto en la tasa de infiltración de los suelos, hecho que se ha probado en numerosos experimentos, sino que no constituyen el efecto dominante en la tasa de infiltración cuando se forma la costra por impacto de las gotas de lluvia. Esta costra tiene una conductividad mucho menor que el suelo previo a la formación de la costra, así que la mayor parte de las pérdidas de energía se dan en la costra, que se convierte en el factor que gobierna el proceso de infiltración. Asimismo, Yair y Laave (1985) señalan que la distribución espacial de la humedad del suelo no puede considerarse como un control importante en la generación de escorrentía en zonas áridas. Además apuntan que la generación de escorrentía en estos ambientes no es uniforme y a menudo solo una pequeña proporción del área de la cuenca contribuye a la generación de escorrentía. Tal y como ocurre en zonas húmedas la no uniformidad espacial en la generación de escorrentía está muy relacionada con la variabilidad espacial en la capacidad de infiltración. Sin embargo mientras que en las zonas húmedas esta variabilidad se atribuye a diferencias espaciales en la humedad del suelo, en las zonas semiáridas y áridas está controlada principalmente por las propiedades físicas y químicas del material superficial. Esto es muy importante tenerlo en cuenta, pues aunque en nuestra zona existe una gran variabilidad espacial en la humedad del suelo, sin embargo no parece constituir un control importante en la generación de escorrentía, serán las propiedades morfológicas, físicas y químicas de la superficie del suelo (es decir el tipo de tesela) las que determinan la generación de escorrentía, y su vez son responsables de la distribución diferencial de la humedad del suelo. También Calvo et al. (1991b) en estudios llevados en la misma zona, concluye que variables tales como la humedad antecedente o la pendiente, están enmascaradas por el efecto de la propiedades de cobertura y morfología de las superficies.

Para lluvias con características similares, en magnitud e intensidad la humedad antecedente, sobre todo diferencias importantes en esta variable como que el suelo esté seco o cercano a la saturación, influirán en la respuesta hidrológica de las teselas y como consecuencia de la cuenca. Con los eventos de precipitación disponibles no se pone de manifiesto el efecto de esta variable, excepto en los casos de un evento con más de un pico como 31/5/97 (figura 9.27), donde se comprueba que tras el primer pico el suelo mantiene una humedad muy elevada, y unos pocos milímetros de lluvia bastan para inducir nuevamente escorrentía.

9.4.2.2.- Erosión

Las teselas se caracterizan por susceptibilidades a la erosión muy diferentes, que se manifiestan a escala de microcuenca. Pese a los pocos datos disponibles, es posible reconocer que las cuencas integradas por teselas muy susceptibles a la erosión, como MAR, en el caso de la microcuenca 3 o microcuenca 2 son las que más se erosionan. Por el contrario cuando la cuenca está constituida por teselas vegetadas, STI, PER, ANU, LQC, la erosión está muy limitada, como ocurre en la microcuenca 4 donde las tasas de erosión son muy bajas. Y cuando se integran todas las teselas, como en la microcuenca 1, las tasas de erosión son en general bastante bajas, en contra de lo que se espera en este tipo de paisaje, pues solo las teselas como LIM, LQD, y principalmente MAR contribuyen a la erosión, el resto son bastante estables y poco erodibles.

Los resultados ponen de manifiesto que cuanto mayor es la precipitación más intensa es la erosión, sin embargo, esta relación se ve afectada por el patrón de precipitaciones previas, de manera que pueden existir una serie de eventos generadores o no de escorrentía que preparan el material e incluso pueden transportarlo en parte hasta los cauces, y en un momento dado un evento transporta hasta el aforo de la microcuenca la mayor parte de esos sedimentos, atribuyéndosele altas tasas de erosión. Dicho evento no tiene por qué introducir más energía al sistema que otros, pero se encuentra con unas condiciones en cuanto a preparación del material que hace que se requiera menos energía para producir más erosión. Esta complejidad en la respuesta a la erosión ya fue considerada por Campbell y Hosaker (1982) que concluyen que no existe una única función que una la erosión a la precipitación y que la limitación de los procesos de erosión en estos ecosistemas no es la disponibilidad de material meteorizado, sino la frecuencia y magnitud de eventos que transportan este material (Campbell, 1989; Bull y Kirby, 1997). Además esta complejidad la potencian las diferentes respuestas a la erosión de las teselas y estas respuestas variadas han de integrarse en la respuesta de toda la cuenca.

Por lo tanto sólo algunos eventos provocan cambios importantes en la evolución de este paisaje. Durante todo el periodo de estudio, tuvo lugar un evento que realmente provocó cambios interesantes en los clavos de erosión y exportó cantidades muy importantes de sedimentos (el evento 29/9/97 al 10/5/97, no incluido en el periodo de estudio de este trabajo), se midieron tasas de erosión con

clavos de más de 8cm en los surcos. En el campo se observa una importante exportación de sedimentos, los surcos (*rills*) se hicieron más profundos, se encontraron señales de importantes movimientos en masa y en general de erosión. Se intuye que eventos de este tipo son los responsables de cambios importante en este paisaje, el cual funciona a pulsos, con largos periodos de estabilidad, en los que tienen lugar eventos que preparan el material y lo exportan en parte, y eventos capaces de exportar el material previamente preparado.

En las zonas mediterráneas, los procesos erosivos estarán limitados a los periodos de invierno u otoño, durante los cuales periodos secos entre las tormentas, aumentan los umbrales de precipitación necesarios para generar escorrentía (Bryan y Yair, 1982). Cuando se estudia la distribución de las precipitaciones durante 6 años en este trabajo, se comprueba que aunque la variación interanual es muy alta, en general la mayor parte de la precipitación anual total (entre el 60 y el 90% de la precipitación total) cae en forma de eventos grandes, excepto en el año 95-96. Son muy pocos eventos, como máximo 4 ó 5 por año, y algunos años, solo 1 ó 2 eventos importantes (>20mm), de hecho el 86% de los eventos son menores de 10mm que es una cantidad cercana al umbral de precipitación necesario superar para generar escorrentía. Además la mayoría de los eventos que se registran en un año son poco intensos, aproximadamente el 70% en todo el periodo presentaron una I_5 máxima inferior a 10mm/h. En resumen, el patrón de precipitación característico de esta zona limita la generación de escorrentía y la erosión. Se dan bastante lluvias pequeñas, que si bien no generan escorrentía si humedecen el material, que posteriormente se seca, en definitiva dan lugar a ciclos de humectación-desección que preparan el material, para un evento que supere el umbral necesario para su movilización.

Según nuestra experiencia no existe limitación en la disponibilidad de sedimentos en este paisaje, la limitación a la erosión depende de que por un lado existen zonas vegetadas que no se erosionan y que representan la mitad del área de estudio, y por otra parte las precipitaciones capaces de generar escorrentía son escasas y aún más los eventos con gran potencial para transportar sedimentos. Los procesos de meteorización que afectan al material superficial actúan rápidamente. Sin embargo, como son pocas las lluvias que infiltran el agua en profundidad, los procesos de meteorización si estarán limitados en profundidad. No obstante como las tasas de erosión son tan bajas siempre existen sedimentos disponibles (pues la meteorización del material en superficie es muy rápida y la tasa de retirada de este material muy lento). Son los eventos de gran energía, capaces de movilizar y transportar fuera de la cuenca cantidades importantes de sedimentos, los que limitan la erosión. En cualquier caso para demostrarlo es necesario estudiar la dinámica de sedimentos en los cauces, que no se aborda en este trabajo y que será necesario estudiar en un futuro.

En cualquier caso lo que si es evidente es que las tasas de erosión no son tan elevadas como se intuye al observar este paisaje, debido por un lado a que sólo algunas teselas, las no vegetadas, contribuyen a la erosión y por otro a la limitación de precipitaciones capaces de provocar erosión. Para los años hidrológicos de 1991/92 a 1995/96 las tasas de erosión oscilaron entre 100.96g/m^2 (0.08mm/año) y 431.52g/m^2 (0.35mm/año), lo cual concuerda con las tasas de erosión encontradas en otras zonas de badlands. Bryan y Yair (1982) señalan que aunque hay *badlands* muy activos con tasas de erosión muy elevadas como los del S-E de Colorado y *South Dakota Badlands*, donde se han medido tasas de erosión en periodos cortos de 17.93mm/año (Schumm, 1956) y los *badlands* de Hong Kong con tasa de 17.36mm/año (Lam, 1977), sin embargo algunos *badlands* desarrollados alrededor de la cuenca del Mediterráneo, aunque parecen ser morfológicamente idénticos a los que se erosionan muy rápidamente, muchos estudios indican que las tasas de erosión son mucho menores, como en los *badlands* del Zin valley (Yair et al.1980) donde se calculan tasas de erosión de 0.48 mm/año o menores sobre parcelas pequeñas de 1.5 m^2 y de 0.17mm/año o menores en parcelas grande de 30m^2 . La evidencia arqueológica de *badlands* cerca de Guadix donde sedimentos y estructuras han sobrevivido 4000 años de denudación (Wise et al. 1982) confirma la estabilidad de estos *badlands* aparentemente activos. Todo esto modifica la hipótesis históricamente aceptada de altas tasas de escorrentía y producción de sedimentos característicos de las zonas de badlands.

9.4.3.- Respuesta hidrológica: evolución de la humedad del suelo en las teselas y generación de escorrentía.

Cuando se estudia conjuntamente la generación de escorrentía y la evolución en la humedad del suelo es posible comprobar el mecanismo de generación de escorrentía, de manera que cuando se satura la superficie del suelo, y la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración en las superficies del suelo con menores tasas de infiltración como MAR se inicia la escorrentía, y el aumento en la humedad del suelo es más lento a 3cm de profundidad, pues se está escurriendo parte del agua en lugar de infiltrarse para alcanzar los 3cm de profundidad. Las laderas desnudas (superficie MAR), constituirán las principales áreas fuente de escorrentía.

En la segunda parte del evento se pone de manifiesto que cuando la superficie del suelo está saturada son necesarios pocos milímetros de lluvia para originar escorrentía, por lo tanto aunque habíamos visto que el efecto de la humedad antecedente en la generación de escorrentía no es determinante, sin embargo cuando la capa superficial del suelo está próxima a la saturación, se genera rápidamente la escorrentía.

9.4.4.- Simulación de la generación de escorrentía a escala de microcuenca a partir de los comportamientos hidrológicos de las superficies que la integran.

Aunque el modelo debe ser mejorado en un futuro, sin embargo para los eventos de escorrentía sencillos se ajusta bien a la realidad, y nos permite estudiar los flujos de agua de unas teselas a otras.

Se pone de manifiesto que las teselas que contribuyen a la escorrentía son las desprovistas de cubierta vegetal (MAR y LIM), y la escorrentía se concentra en surcos, excepto en algunos momentos de eventos de magnitud importante en los que se genera escorrentía en zonas entre surcos. Por lo que en estas superficies los procesos de erosión serán más activos, confiriendo poca estabilidad lo que retralimenta la ausencia de cubierta vegetal.

La tesela LIQ es también eficaz en la generación de escorrentía. La escorrentía producida por esta unidad se infiltra posteriormente en muchas zonas con teselas vegetadas como PER y ANU situadas en pedimentos aguas abajo de las teselas LIQ, excepto en algunos puntos de convergencia de la escorrentía generada en LIQ que discurrirán a través de los pedimentos (concentrándose en flujos preferentes) sin que pueda ser infiltrada y alcanza los cauces.

Las teselas PER y ANU con altas capacidades de infiltración además de infiltrar la lluvia sobre ellas, reabsorben buena parte de la escorrentía que se genera en otras teselas (LIQ o STI). Sus elevadas capacidades de infiltración y la posibilidad de recibir agua de las partes altas de la ladera (tesela LIQ), tanto por escorrentía, como por drenaje (en capítulo 7 veíamos que para el año estudiado esta superficie presentaba drenaje durante 17 días) favorece la disponibilidad de agua en estas teselas, cuyo suelo presenta alta capacidad para retenerla retroalimenta la cubierta vegetal muy desarrollada comparada con el resto de la zona de estudio.

Por otra parte la presencia de plantas vasculares en el caso de STI y de líquenes en LIQ disminuyen la energía cinética de la lluvia y del flujo de agua ladera abajo, la rugosidad que confieren a la superficie del suelo provocará un movimiento no uniforme del agua, aumentando la sinuosidad del flujo de agua y disipando energía erosiva. En contrapartida, la presencia de la cubierta criptogámica favorece la escorrentía superficial que podría causar mayor erosión hídrica en las partes baja de la ladera (Stanley, 1983).

9.5.- CONCLUSIONES

- Las teselas o unidades del terreno que constituyen este ecosistema presentan unos comportamientos hidrológicos y erosivos diferenciados, siendo las teselas no vegetadas las más eficientes en la producción de escorrentía y sedimentos. Las vegetadas son poco eficaces en la generación de escorrentía y las tasas de erosión son muy bajas. La tesela LIQ es una unidad vegetada (líquenes) con un comportamiento diferente del resto de vegetadas y se caracteriza por altas tasas de escorrentía y bajas tasas de erosión.

- Existe variabilidad espacial en la erosión dentro de un mismo tipo de tesela, que refleja la variabilidad espacial en la distribución y generación de la escorrentía dentro de una tesela.

- El comportamiento hidrológico y erosivo a escala de cuenca está controlado por el tipo de tesela que integra la cuenca, de manera que la cuenca presenta más escorrentía y erosión cuanto mayor es el porcentaje de área ocupado por las teselas no vegetadas.

- Aparte del tipo de tesela, que es el control primario en la respuesta hidrológica y erosiva de este paisaje, son la cantidad de precipitación y la intensidad de la misma las variables que regulan la respuesta hidrológica y erosiva de la zona de estudio.

- Las teselas o unidades que integran este ecosistema constituyen un mosaico con unidades de respuesta hidrológica contrastadas y autorreguladas en el que zonas generadoras de escorrentía desembocan en zonas capaces de reabsorberla.

- La baja frecuencia de precipitaciones capaces de generar escorrentía y la presencia de teselas poco susceptibles a la erosión (superficies vegetadas), que integran buena parte del área, determinan que las tasas de erosión sean mucho menores de lo que podría parecer a simple vista, y modifican la hipótesis histórica de altas erosión asociadas a este paisaje.

CAPITULO 10

SINTEISIS Y CONCLUSIONES

10.1.- SINTEISIS

10.1.1.- Unidades del terreno.

En el paisaje de cárcavas del desierto de Tabernas, el clima, la topografía, el suelo, la cobertura biótica y abiótica y los procesos hidrológicos y erosivos interactúan de forma compleja para constituir unas unidades que configuran el paisaje. Estas unidades las llamamos *Unidades del Terreno o Teselas*, y se definen como la mínima unidad caracterizada por su homogeneidad en la cobertura biótica y abiótica, clima, litología, topografía, suelo, y comportamiento hidrológico y erosivo.

Los atributos que definen estas unidades y sus interacciones determinan la respuesta de estas unidades ante cualquier cambio o al paso del tiempo y explican la respuesta de este paisaje, a la escala de estudio, ante los procesos que controlan su evolución actual (procesos de erosión hídrica). Ante un evento de precipitación, en cada unidad las características de la superficie del suelo, de la topografía, del suelo y su contenido en agua y los comportamientos hidrológicos y erosivos interactúan junto con las características de la lluvia para dar lugar a la respuesta integrada de todas las unidades que se manifiesta como escorrentía y erosión total de la cuenca. Parte de la escorrentía o sedimentos generados en puntos de una unidad son reabsorbidos o depositados en otras zonas de la misma o en otras unidades, redistribución de agua y sedimentos que está dirigida por la topografía. La respuesta del paisaje ante dicho evento de precipitación es el resultado de las interacciones de las respuestas de las unidades que lo integran.

Estas unidades se organizan en el paisaje según unos gradientes ambientales, con la topografía como factor dominante, y constituyen un mosaico donde cada unidad tiene determinada susceptibilidad a la erosión.

A medida que aumenta la pendiente y la susceptibilidad a la erosión la presencia de las unidades no vegetadas es mayor, pues el alto potencial para los procesos erosivos limitan el desarrollo del suelo, la disponibilidad de agua y como consecuencia la cubierta vegetal, que a su vez se ve afectada directamente por la falta de estabilidad. En estas condiciones encontramos la unidad MAR asociada a pendientes muy elevadas, fuerte curvatura y alto potencial para el transporte de sedimentos, unas características topográficas que favorecen los procesos de erosión y escorrentía y limitan el desarrollo del suelo. No existe suelo desarrollado, sino más bien, un regolito con muy baja capacidad para retener agua y con características químicas muy similares al material parental y donde los procesos de lavado se limitan a la superficie, por la baja capacidad de infiltración. Estas condiciones constituyen una situación lo suficientemente inhóspita como para que sea evitada por prácticamente todo tipo de vegetación. La ausencia de cubierta vegetal además de no proteger frente a la erosión, no favorece el desarrollo edáfico, por lo que los procesos de escorrentía y erosión se retroalimentan. El resultado son las altas tasas de escorrentía y erosión de esta unidad, que genera la mayor parte de escorrentía y sedimentos del total de la cuenca, que en su mayor parte van directamente a los cauces y/o a los pedimentos más jóvenes de la rambla.

En este gradiente de estabilidad (o susceptibilidad a la erosión) la siguiente unidad es la unidad LIM, similar a MAR, pues también está asociada a pendientes muy elevadas y alto potencial para el transporte de sedimentos, aunque ligeramente inferiores. El suelo consiste en un regolito margoso sobre el que existe una capa de limos de algunos centímetros con una capacidad para retener agua algo superior a la de la unidad MAR. Presentan una costra en superficie que limita en parte los procesos erosivos, por lo que estas unidades aunque muestran altas tasas de escorrentía y erosión, éstas son inferiores a las de la unidad MAR. Cuando la pendiente no es muy elevada, la posición topográfica confiere una cierta estabilidad ante los procesos erosivos y si se ve favorecido el lavado del material superficial, puede aparecer una costra biológica con más o menos líquenes, la unidad LQD.

En la unidad LOD (líquenes degradados) la pendiente y el potencial para el transporte de sedimentos presentan valores inferiores a los de las unidades anteriores. En esta unidad son importantes pequeños cambios en la topografía o en las características químicas de la superficie del suelo que desencadenan la degradación o agradación de la cubierta liquénica. El ligero aumento en la estabilidad topográfica permite que el material sea menos susceptible a los

procesos de erosión y esto unido a un mayor lavado superficial (gracias a las extensas zonas de contribución de estas unidades) y valores menores del SAR permiten la aparición de cubiertas criptogámicas poco evolucionadas, que protegen de los procesos erosivos y potencian la edafogénesis. Las tasas de escorrentía son inferiores a las de MAR pero no a las de LIM, y las tasas de erosión son inferiores a las de dichas unidades.

En zonas con pendientes intermedias y potencial medio para el transporte de sedimentos aparece la unidad LIQ con áreas de contribución poco extensas, convexas en dirección a la pendiente. Su suelo incipiente tiene una capacidad intermedia para retener el agua y en general menor susceptibilidad a la erosión que las unidades no vegetadas. La cubierta liquénica parece jugar un papel muy importante en el desarrollo de este suelo incipiente, pues, por un lado estabilizan la superficie y reduce la erosión y enriquecen al suelo en carbono orgánico, favoreciendo la agregación. Además, la cubierta liquénica, como demuestra el estudio del régimen de humedad en esta unidad, limita la evaporación y favorece la conservación del agua a potenciales matriciales bajos. Es una unidad con altas tasas de escorrentía, pero con erosión baja.

Cuando el suelo alcanza un cierto desarrollo, en zonas de convergencia de agua, algunas plantas perennes comienzan a colonizar las unidades LIQ y retroalimentan las condiciones favorables (suelo de mayor espesor y estructura más desarrollada, mejora de las condiciones hidrológicas del suelo y mayor protección frente a la erosión) que potencian su expansión, dando lugar a laderas con un matorral disperso con líquenes en los claros.

La unidad LQC es característica de divisorias con pendientes muy suaves, ligeramente convexas, con áreas de contribución muy pequeñas (prácticamente sólo reciben el agua procedente de la precipitación) y con unas tasas de escorrentía y erosión muy reducidas. Estas características topográficas e hidrológicas permiten el desarrollo de un suelo más evolucionado que el de la unidad LIQ, con una capacidad para retener agua bastante mayor, una capacidad de infiltración elevada y unas características químicas muy singulares como la presencia de horizontes gypsicos. La presencia de estos horizontes pone de manifiesto la relativa estabilidad de esta unidad. El tipo de cubierta vegetal, dominada por criptógamas y pocas plantas anuales y vivaces pese a ser una superficie bastante estable, se explica por la influencia de 3 factores: la disponibilidad de agua está limitada topográficamente; el espesor del suelo es intermedio (contacto lítico a menos de 1m); y presencia de horizontes gypsicos a solo unos 20cm de la superficie.

La unidad LQB aparece en zonas con pendientes suaves, áreas de contribución intermedias y en general un potencial para el transporte de sedimentos no muy elevado. Sin embargo tienen características de terrazas aluvio-coluviales, con propiedades edáficas que condicionan el tipo de cubierta vegetal que se reduce a criptógamas y algunas halófitas dispersas. Aunque son suelos profundos, la alta concentración en sales y la baja capacidad para retener agua limita el desarrollo de la vegetación. Este alto contenido en sales se explica porque la cubierta líquénica puede limitar la infiltración y el lavado de sales y también por la baja frecuencia de precipitaciones.

Las unidades PER y ANU, presentan características comunes: ambas presentan una cobertura vegetal dominada por plantas superiores, perennes en el primer caso y anuales en el segundo. Aparecen en zonas con pendientes suaves, cóncavas en dirección transversal a la pendiente, donde topográficamente se favorece la acumulación de agua en el suelo y con muy bajo potencial para el transporte de sedimentos. Estas características topográficas justifican el desarrollo edáfico de estas unidades, con suelos de gran espesor y bastante más evolucionados que el resto, con mayor capacidad para retener agua, altas tasas de infiltración y baja escorrentía y erosión. Todo ello favorece la presencia de una cubierta vegetal desarrollada que a su vez potencia la edafogénesis, y limita la escorrentía y erosión.

Otras diferencias distintas de la propia cubierta vegetal (perennes y anuales) son las topográficas. La unidad PER tiende a ocupar zonas más cóncavas y sus zonas de contribución son mayores, es decir las plantas perennes tienden a localizarse en las zonas de mayor disponibilidad de agua, mientras que las anuales (unidad ANU) se sitúan en zonas con pendientes menores que las perennes, menos cóncavas en dirección a la pendiente, y con menor potencial para la erosión. Ocupan las zonas de los pedimentos menos susceptibles a la erosión, más estables, aunque con mayor limitación de agua porque sólo usan el agua de los centímetros más superficiales, y su estrategia es adaptar su ciclo de vida a la lluvia. Necesitan estabilidad, porque son muy vulnerables por su porte y limitado sistema radicular, además sus condiciones topográficas aseguran que su banco de semillas permanezca en un nicho adecuado para el siguiente ciclo.

La unidad STI aunque se sitúa sobre zonas con pendientes elevadas y alto potencial para el transporte de sedimentos, presenta una densa cubierta vegetal de perennes y un desarrollo edáfico considerable (suelos bastante profundos, con composición granulométrica más gruesa y capacidad de retención de agua menor que en las unidades PER y ANU, pero mayor que para las no vegetadas o LIQ).

Esto se explica porque se localiza sobre laderas situadas en niveles antiguos (Harvey, 1987) con una orientación que determina que la radiación incidente sea baja indicando una menor pérdida de agua por evapotranspiración. Además, presenta una importante cubierta de piedras que frena el agua de escorrentía, aumenta el tiempo de contacto del agua con el suelo favoreciendo la infiltración y asimismo protegen la superficie del suelo. Todo esto ha fomentado el desarrollo de esta cubierta vegetal, que debe desempeñar un papel muy importante en potenciar el desarrollo del suelo y evitar la erosión de estas laderas topográficamente favorables a los procesos erosivos. La escorrentía es intermedia y baja la erosión.

10.1.2.- Implicaciones de la organización de las teselas y sus interacciones. Efectos hidrológicos y geomorfológicos.

Las unidades del terreno definidas en la zona de estudio se organizan constituyendo un mosaico caracterizado por la gran variabilidad espacial en un área reducida. Esta heterogeneidad de unidades y su organización espacial intervienen en el control de la escorrentía y erosión que en definitiva son los procesos que controlan la evolución de este paisaje. La existencia de un patrón en mosaico de unidades con repuestas hidrológicas contrastadas, da lugar a un sistema autorregulado en el cual determinadas áreas generadoras de escorrentía drenan a otras zonas capaces de reabsorber esa escorrentía. Así la unidad LIQ con altos coeficientes de escorrentía suele aparecer aguas arriba de las unidades PER o ANU, que se caracterizan por su alta capacidad de infiltración y son capaces de absorber buena parte de la escorrentía generada aguas arriba (en las unidades LIQ o STI).

Por lo tanto, por muy intensa que sea la lluvia o grande el total de precipitación hay superficies que prácticamente no van a producir escorrentía ni erosión. Sólo una pequeña proporción del área de la cuenca contribuye a la escorrentía total y como consecuencia a la erosión (las teselas MAR y LIM).

La no uniformidad espacial en la generación de escorrentía está muy relacionada con la variabilidad espacial en las propiedades de la superficie del suelo que condicionan la capacidad de infiltración. Además dentro de una misma unidad los procesos de erosión varían espacialmente, como hemos comprobado en laderas de la unidad MAR, en determinadas zonas se puede producir intensa erosión, sobre todo en los surcos, mientras que en las zonas intersurcos la erosión puede ser menor o producirse sedimentación. La variabilidad en los procesos hidrológicos y erosivos dentro de una misma unidad también contribuye a la autorregulación del sistema.

Los procesos edafogénicos en la zona también están controlados por la organización espacial de las unidades definidas. En las unidades (como PER y ANU) que reciben la esorrentía generada en otras unidades los procesos de lavado son más intensos y las sales más solubles, como el yeso, están prácticamente ausentes (el yeso sólo aparece en horizontes profundos por la influencia del material parental, una marga yesífera). Estas unidades, que reciben agua y sedimentos de las unidades situadas aguas arriba, presentan un mayor desarrollo del suelo y unos regímenes de humedad que les permiten sostener una cubierta vegetal importante. Mientras que las unidades no vegetadas y con altas pendientes, que constituyen las áreas fuente de esorrentía y sedimentos, presentan un desarrollo edáfico muy limitado (suelo con características similares al material parental, como la presencia de cantidades importantes de yeso y otras sales solubles que sólo aparecen lavadas en los primeros centímetros del perfil). Por último la presencia de horizontes gypicos está relegada a unidades sin entradas de agua y sedimentos de otras unidades.

Los ciclos de humedecimiento-desección representan el principal proceso de meteorización. La distribución de la precipitación en este ecosistema se caracteriza porque las lluvias más frecuentes son de pequeña magnitud. Estas precipitaciones no desencadenan esorrentía pero humedecen el material en superficie, que se seca rápidamente. Como consecuencia de estos ciclos humectación-desección se produce disolución y recristalización de sales con un importante efecto meteorizante. Este proceso afecta sobre todo al regolito expuesto de la unidad MAR y solo en superficie. Sin embargo, existe una limitación a los procesos de meteorización para el material subsuperficial, ya que, en general, la capacidad de infiltración de la mayoría de las unidades de este paisaje es bastante baja, debido al acostramiento y sellado superficial a poco de comenzar la lluvia, o a la presencia de costras líquénicas poco permeables, o simplemente, y lo más importante, a que las precipitaciones importantes en magnitud que permitirían la penetración del agua hasta una profundidad considerable son muy pocas al año, limitando también los procesos edafogénicos.

La baja frecuencia de precipitaciones de gran magnitud capaces de generar esorrentía y de eventos de esorrentía con suficiente energía para transportar grandes cantidades de sedimentos, así como la presencia de unidades poco susceptibles a la erosión (unidades vegetadas, que representan la mitad del área de estudio) explican que las tasas de erosión, a escala de microcuenca, sean

mucho menores de lo que podría parecer a simple vista, por la espectacularidad del paisaje, y modifican la creencia histórica de una elevada erosión asociada a este paisaje.

En este paisaje acarcavado hemos comprobado que las zonas degradadas o susceptibles de degradarse constituyen una geoforma concreta, caracterizada por unos rangos de cada variable topográfica, los cuales pueden utilizarse como indicadores de degradación. En cuanto se superen determinados umbrales (que define esta geoforma) nos encontraremos en una zona degradada o susceptible de degradarse. No obstante existen otras zonas que aunque topográficamente no se incluyan en el rango de la geoforma anterior pueden ser muy susceptibles a la degradación debido a procesos de erosión remontante.

La organización espacial de las teselas y las consecuentes interacciones entre las unidades determinan la respuesta del ecosistema a la escala estudiada, ante cualquier cambio climático, del medio físico o al paso del tiempo. En este trabajo se ha desarrollado una metodología que permite predecir la distribución espacial de estas unidades a partir de la topografía, lo cual hace posible generar mapas de unidades del terreno en otras zonas del desierto de Tabernas (si se dispone del modelo digital de elevaciones), lo que capacita para emitir hipótesis acerca de la dinámica del paisaje en dichas zonas en función de la organización espacial de unidades del terreno.

Además se ha generado un modelo de simulación de escorrentía a partir del comportamiento hidrológico de cada unidad del terreno. Conociendo la distribución espacial de las unidades, se ha podido estimar la contribución a la escorrentía de cada tesela, los flujos de escorrentía superficial entre unidades y las salidas (escorrentía total) en zonas no instrumentadas. Este modelo permite simular como responde, en términos de escorrentía superficial, la zona de estudio u otras zonas del desierto de Tabernas ante precipitaciones muy intensas o muy prolongadas y a partir de los caudales generados en la simulación podríamos generar hipótesis en cuanto a la exportación de sedimentos (según las relaciones establecidas en este trabajo para caudal y concentración de sedimentos en la escorrentía) y su procedencia, según la distribución de teselas y la susceptibilidad a la erosión de cada unidad. Por lo tanto este modelo puede servir para generar hipótesis de la respuesta de este paisaje ante precipitaciones extremas a partir de la organización espacial de las unidades del terreno y sus interacciones.

No obstante, este modelo de simulación de escorrentía debe ser mejorado pues para eventos complejos, con varios picos, las predicciones no se ajustan todo lo bien que cabría esperar. Además sería muy interesante integrar en el modelo la

erosión que provocan la escorrentía simulada, lo que pretendemos completar en un futuro.

Actualmente se dispone de fotografías aéreas recientes e imágenes de satélite de una zona más extensa que la estudiada en esta tesis. La continuación de este trabajo debería comenzar con la mejora del modelo digital de elevaciones construido en base a las imágenes y fotografías mencionadas, a partir del cual se construirá el mapa de unidades del terreno y se simulará la escorrentía superficial. Se debería comprobar si se mantienen las mismas unidades a una escala mayor o si la dinámica del paisaje a otra escala presenta otro tipo de controles. Al mismo tiempo se debería continuar trabajando en la mejora del modelo de escorrentía y predicción de la erosión.

Para la gestión de paisajes como los *badlands* de Tabernas, hay que tener en cuenta que los cambios en los patrones espaciales y temporales del paisaje como consecuencia de alteraciones en el medio físico, climáticas o antrópicas, afectarán a los patrones hidrológicos, de la cubierta vegetal, diversidad de la vegetación y a los procesos ecológicos. Los patrones de diversidad biológicos están influenciados por las trayectorias del paisaje local, por lo que deben conocerse muy bien las relaciones entre los patrones del paisaje y las variables de interés. Es importante identificar los elementos o configuraciones del paisaje más significativos a la respuesta de las variables de interés y a que escalas. La diversidad de este paisaje, se manifiesta en el considerable número de unidades del terreno en un espacio tan reducido. Y esta diversidad de unidades conlleva una no uniformidad en los procesos clave para entender y gestionar este ecosistema.

10.2.- CONCLUSIONES

1.- El estudio de los patrones espaciales del paisaje en la zona acarcavada del desierto de Tabernas mediante un Sistema de Información Geográfica y de las variables medioambientales y sus relaciones ha permitido identificar unas unidades del terreno o teselas que constituyen este paisaje. Estas unidades se organizan en un mosaico y los procesos que tienen lugar en cada unidad y sus interacciones explican la respuesta de este paisaje ante los procesos que controlan su evolución actual. Estas unidades se definen por el tipo de cubierta y características del suelo, su disponibilidad de agua y comportamientos hidrológicos y erosivos.

2.- Se ha demostrado que la organización espacial de estas unidades en el paisaje está controlada por la topografía. Los contrastes topográficos, característicos de este paisaje, determinan la existencia de diferentes microambientes que favorecen la heterogeneidad de la cubierta superficial.

Mediante taxonomía numérica sobre la información topográfica distribuida espacialmente, es posible reconocer ocho geoformas que componen este paisaje. Estas geoformas presentan características topográficas contrastadas y se organizan en el espacio según unos patrones similares a los que presentan las unidades del terreno.

El área relativa ocupada por cada unidad varía a través de gradientes topográficos. Existe un gradiente de pendiente sobre el que se distribuyen las unidades y a medida que aumenta la pendiente disminuye el área ocupada por teselas vegetadas. El potencial para el transporte de sedimentos constituye un gradiente similar al de la pendiente. La curvatura transversal a la pendiente establece otro gradiente importante en el que las teselas vegetadas tienden a situarse en zonas cóncavas de convergencia de agua, con extensas áreas de contribución y donde topográficamente se favorece su almacenamiento. Las teselas no vegetadas se sitúan en los extremos opuestos de estos gradientes. Sin embargo, existen excepciones para unidades vegetadas como STI, donde la edad de estabilización, en este caso la más antigua, la cobertura de piedras, el efecto protector del escarpe que corona estas laderas y la orientación desempeñan un papel muy importante para el desarrollo de su cubierta vegetal.

Las variables topográficas relacionadas con los procesos de transferencia de agua y sedimentos son fundamentales en el control de la topografía de este paisaje y como consecuencia influyen sobre la distribución espacial de las teselas. Como el agua circula con baja frecuencia y cuando lo hace es en forma de flujo no

10.- Síntesis y Conclusiones

estacionario, la distribución de las unidades está condicionada menos significativamente por los gradientes de estas variables. Mientras que factores locales, como la pendiente, constituyen gradientes muy fuertes sobre los que se organizan las unidades.

A consecuencia de la topografía tan accidentada, los efectos de las sombras y la pendiente son muy importantes, pues generan unos patrones de insolación opuestos a los de la orientación. La insolación no limita la abundancia de teselas vegetadas, pese a que estudios previos en la zona dieron gran importancia a esta variable, en ese sentido, para explicar los patrones de distribución observados. De hecho, las unidades PER y ANU con vegetación superior, son las que más insolación reciben.

3.- Se demuestra que las características del suelo y la disponibilidad de agua en el suelo varían entre las unidades, condicionando el tipo de cubierta vegetal que es capaz de sostener ese suelo e influyendo en la organización espacial del mosaico de unidades que integran este paisaje. A su vez se comprueba que la cubierta de la tesela influye en las características del suelo, aumentando el contenido en materia orgánica, promoviendo la agregación (que hemos observado bajo cubiertas criptogámicas), mejorando las condiciones hidrológicas del suelo o evitando la erosión.

4.- Las diferencias en las propiedades de suelo están relacionadas con la posición en el paisaje y con la redistribución diferencial del agua. Los procesos de lavado son más intensos en unidades donde topográficamente se favorece la acumulación de agua y en estas unidades las sales más solubles, como el yeso, están prácticamente ausentes, mientras que los carbonatos se acumulan en horizontes más profundos dando lugar en determinadas localizaciones a horizontes cálcicos. Las zonas con altas pendientes y potencial para la erosión presentan suelos jóvenes con características similares al material parental, entre ellas la presencia de cantidades importantes de yeso y otras sales solubles que sólo aparecen lavadas en los primeros centímetros. Y por último se han encontrado horizontes gypsicos, descritos por primera vez en la zona de estudio, y cuya presencia está relegada a localizaciones topográficas muy concretas, donde los procesos de lavado están limitados.

El desarrollo del suelo, en general, es reducido debido a la escasez de lluvia y al acostamiento de la superficie del suelo que limita la infiltración y los procesos edafogénicos.

5.- El seguimiento de los patrones temporales y espaciales de la humedad del suelo, con una sonda que permite una medida en continuo de la humedad,

demuestra que la variabilidad en la disponibilidad de agua está controlada fundamentalmente por el tipo de cubierta y las características del suelo. El papel de la topografía sobre los regímenes de humedad queda enmascarado por el efecto de la cubierta como se comprueba en el caso de unidades con cubiertas criptogámicas que favorecen la conservación del agua en el suelo.

6.- Diseños experimentales de meteorización han permitido comprobar que unos pocos ciclos de humedecimiento-deseccación son suficientes para alterar de forma importante la roca madre. Como consecuencia, los procesos de meteorización se desencadenan con bastante rapidez cuando el material está expuesto, proporcionando material meteorizado disponible para la acción de procesos erosivos. Sin embargo, la escasez de precipitaciones de gran magnitud capaces de penetrar en profundidad y las bajas capacidades de infiltración de la superficie del suelo de la mayoría de las unidades limitan los procesos de meteorización del material subsuperficial y la edofogénesis.

7.-Las unidades presentan comportamientos hidrológicos y erosivos diferentes, siendo las no vegetadas las más eficientes en la producción de escorrentía y sedimentos. Las vegetadas presentan altas tasas de infiltración (excepto las unidades con cubierta criptogámica) y tasas de erosión muy bajas. Dentro de un mismo tipo de unidad la generación y distribución de la escorrentía y erosión varían espacialmente.

A escala de microcuenca se comprueba que la respuesta hidrológica y erosiva está controlada por los tipos de unidades que la integran y por su organización espacial, de manera que cuanto mayor es el porcentaje de área de la microcuenca ocupado por teselas no vegetadas, mayores son la escorrentía y la erosión.

8.- La modelización espacial de los procesos hidrológicos en un Sistema de Información Geográfica pone de manifiesto que las unidades que integran este paisaje constituyen un mosaico de unidades de respuesta hidrológica contrastadas y autorreguladas donde sólo algunas zonas generan escorrentía y sedimentos, y parte de la escorrentía generada en estas zonas desembocan en zonas capaces de reabsorberla.

9.- La respuesta hidrológica y erosiva de este paisaje está controlada aparte de por los tipos de unidades y su organización espacial, por la cantidad de precipitación y la intensidad de la misma. La baja frecuencia de precipitaciones capaces de generar escorrentía o eventos de gran energía y la presencia de unidades poco susceptibles a la erosión (teselas vegetadas), que integran buena parte del paisaje, provocan que las tasas de erosión sean mucho menores de lo que

se podría suponer a simple vista y modifican la hipótesis histórica de altas tasas de erosión asociadas a este tipo de paisaje.

10.- La asociación entre la topografía y la distribución espacial de las unidades del terreno nos ha permitido desarrollar una herramienta para generar mapas de teselas en otras zonas del desierto de Tabernas a partir del modelo digital de elevaciones.

A partir de la distribución espacial de las unidades, de su comportamiento hidrológico y de la topografía, que controla los flujos de agua y de sedimentos entre las unidades, hemos construido un modelo sencillo que simula la escorrentía ante cualquier precipitación. El seguimiento hidrológico de una cuenca instrumentada durante 5 años ha permitido validar este modelo, que es capaz de predecir la escorrentía de la microcuenca, como contribuye cada unidad a esta respuesta y los intercambios de agua entre las unidades en un evento de escorrentía.

La predicción de la distribución espacial de las teselas a partir de la topografía y la modelización espacial de la escorrentía permite: generar predicciones (a una escala similar a la estudiada) sobre la contribución de cada unidad a la escorrentía total y sobre los flujos de escorrentía entre las unidades en otras zonas del área acarcavada del desierto de Tabernas siempre y cuando se disponga de un modelo digital de elevaciones, así como simular eventos de precipitación extremos y emitir hipótesis acerca de sus consecuencias y en definitiva aproximarnos a la comprensión de la dinámica de este paisaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abrahams, A.D., Parsons, A.J., y Luk, S. (1988). Hydrologic and sediment responses to simulated rainfall on desert hillslopes in Southern Arizona. *Catena*, 15, 103-117.
- Abrahams, A.D. y Parsons, A.J. (1991). Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, Southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 122, 49-59.
- Alexander, D. (1982). Difference between "calanchi" and "biancane" badlands in Italy. En R. Bryan & A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (71-88). Norwich: Geo Books.
- Alexander, R.W. y Calvo, A. (1990). The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. En J.B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion*. (385-397). John Wiley & sons Ltd.
- Alexander, R.W., Harvey, A.M., Calvo, A., James, P.A. y Cerdá, A. (1994). Natural stabilisation mechanisms on badlands slopes: Tabernas, Almería, Spain. En C. Millington & K. Pye (Eds.), *Environmental change in drylands: Biogeographical and Geomorphological Perspectives*. (85-111). Chichester: John Wiley & sons.
- Anderson, D.C., Harper, K.T. y Holmgren, R.C. (1982). Factors influencing development of cryptogamic soil crusts in Utah deserts. *Journal of Range Management*, 35, 180-185.
- Anderson, M.G. y Burt, T.P. (1978). The role of topography in controlling throughflow generation. *Earth Surface Processes*, 3, 331-344.
- Anderson, M.G. y Kneale, P.E. (1980). Topography and hillslope soil moisture relationships in a catchment of low relief. *Journal of Hydrology*, 47, 115-128.
- Bailey, D., Mazurak, A.P. y Rosowski, J.R. (1973). Aggregation of soil particles by algae. *J Phycol*, 9, 99-101.
- Beckett, P.H y Webster, R. (1971). Soil variability: a review. *Soils and Fertilizers*, 34, 1-15.
- Belbin, L. (1991). PATN Technical reference. Canberra: CSIRO.
- Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1993). The influence of physico-chemical properties on erosion processes in badlands areas, Ebro basin, NE-Spain. *Z. Geomorph N F*, 37, 199-214.
- Bergkamp, G., Cammeraat, L.H. y Martínez-Fernández, J. (1996). Water movement and vegetation patterns on shrublands and an abandoned field in two

- desertification-threatened areas in Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 1073-1090.
- Berndtsson, R. y Larson, M. (1987). Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 90, 117-133.
- Beven, K.J. y Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contribution area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology. The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Beymer, R.J. y Klopatek, J.M. (1991). Potencial contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 5, 187-198.
- Birkeland, P.W. (1984). *Soils and Geomorphology*. New York: Oxford Univ. Press.
- Blackburn, W.H. (1975). Factors influencing infiltration rates and sediment production of semi-arid rangelands in Nevada. *Water Resources Research*, 11, 929-937.
- Blackburn, W.H., Pierson, F.B., Hanson, C.L., Thurow, T.L., y Hanson, A.L. (1992). The spatial and temporal influence of vegetation on surface soil factors in semiarid rangelands. *Transactions of the ASAE*, 35(2), 479-486.
- Boer, M., Del Barrio, G., y Puigdefábregas, J. (1996). Mapping soil depth classes in dry mediterranean areas using terrain attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 72, 99-118.
- Booth, W.E. (1941). Algae as pioneers in plant succession and their importance in erosion control. *Ecology*, 22, 38-46.
- Brakensiek, D.L., Osborn, H.B. y Rawls, W.J. (1979). *Field manual for research in agricultural hydrology*. Science and education administration. United States Department of Agriculture.
- Brotherson, J.D. y Rushforth, S.R. (1983). Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships on soils in Navajo National Monument. *Great Basin Naturalist*, 43, 73-78.
- Brown, D.G. (1994). Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. *Journal of Vegetation Science*, 5, 641-656.
- Brubaker, S.C., Jones, A.J., Lewis, D.T. y Frank, K. (1993). Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci Soc Am J*, 57, 235-239.
- Bryan, R.B., Yair, A. y Hodges, W.K. (1978). Factors controlling the initiation of runoff and piping in Dinosaur Provincial Park badlands, Alberta, Canada. *Z Geomorph N F*, 29, 151-168.

- Bryan, R.B. y Campbell, I.A. (1980). Sediment entrainment and transport during local rainstorms in the Steeveville badlands, Alberta. *Catena*, 7, 51-65.
- Bryan, R.B. y Yair, A. (1982). Perspectives on studies of badland geomorphology. En R. Bryan & A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (1-12). Norwich: Geo Books.
- Bryan, R.B. y Campbell, I.A. (1986). Runoff and sediment discharge in a semiarid ephemeral drainage basin. *Z Geomorph N F*, 58, 121-143.
- Bufalo, M. y Nahon, D. (1992). Erosional processes of Mediterranean badlands: a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma*, 52, 133-147.
- Bull, L.J. y Kirkby, M.J. (1997). Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 23, 354-374.
- Bunte, K. y Poesen, J. (1993). Effects of rock fragments covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow. *Water Resources Research*, 29, 1415-1424.
- Bunte, K. y Poesen, J. (1994). Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 115-135.
- Burt, T.P. y Butcher, D.P. (1985). Topographic controls of soil moisture distributions. *Journal of Soil Science*, 36, 469-486.
- Butler, J. y Goetz, H. (1986). Vegetation and Soil-Landscape relationships in the North Dakota Badlands. *Am Midl Nat*, 116, 378-386.
- Calvo, A. y Harvey, A.M. (1989). Morphology and development of selected badlands in Southeast Spain. En A.C. Imeson & R.S. de Groot (Eds.), *Landscape-ecological Impact of Climatic Change on Mediterranean region*. (1-15).
- Calvo, A., Harvey, A.M. y Paya-Serrano, J. (1991). Process interactions and badland development in SE Spain. En M. Sala, J.L. Rubio, & J.M. Garcia-Ruiz (Eds.), *Soil Erosion Studies in Spain*. (75-90). Logroño: Geoforma ediciones.
- Calvo, A., Harvey, A.M., Paya-Serrano, J. y Alexander, R.W. (1991b). Response of badlands surfaces in South East Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología*, 5, 3-14.
- Campbell, I.A. (1974). Measurements of erosion on badlands surfaces. *Z.Geomorph N F, Suppl. Bd. 21*, 122-137.
- Campbell, I.A. (1982). Surface morphology and rates of change during a ten-year period in the Alberta badlands. En R. Bryan & A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (221-237). Norwich, England: Geo Books.

- Campbell, I.A. y Hosaker, J.L. (1982). Variability in badlands erosion; problems of scale and threshold identification. En C.E. Thorn (Ed.), *Space and time in Geomorphology*. (59-79). London: George Allen and Unwin.
- Campbell, I.A. (1989). Badlands and badlands gullies. En David S.G.Thomas (Ed.), *Arid zone geomorphology*. (159-183). London: J. Wiley & sons.
- Carson, M.A. y Kirkby, M.J. (1972). *Hillslope forms and processes*. Oxford: Cambridge University Press.
- Casenave, A. y Valentin, C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130, 231-249.
- Cerdá, A. (1995). Spatial distribution of infiltration on the matorral slopes in a Mediterranean environment, Geneves, Spain. En R. Fantechi, R. Peter, D. Blabanis, & J.L. Rubio (Eds.), *Desertification in a European Context: Physical and Socio-economic impacts*. (427-436). European Commission.
- Cerdá, A. y García-Fayos, P. (1997). The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badlands landscapes. *Geomorphology*, 18, 77-90.
- Churchill, R.R. (1981). Aspect-related differences in badlands slope morphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 71, 374-388.
- Claridge, G.G.C. y Campbell, I.B. (1982). A comparison between hot and cold desert soils and soil processes. *Catena Supplement*, 1, 1-36.
- Conacher, A.J. y Dalrymple, J.B. (1977). The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, 18, 1-145.
- Cornet, A.F., Montana, C., Delhoume, J.P. y López-Portillo, J. (1992). Water Flows and the Dynamics of Desert Vegetation Stripes. En A.J. Hansen & F. di Castri (Eds.), *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. (327-345). New York: Springer-Verlay.
- D'herbés, J.M. y Valentin, C. (1997). Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 188-189, 18-42.
- Daniels, R.B., Gilliam, W., Cassel, D.K. y Nelson, L.A. (1985). Soil erosion class and landscape position in the North California Piedmont. *Soil Sci Soc Am J*, 49, 991-995.
- Danin, A. (1978). Plant species diversity and plant succession in a sandy area in the Northern Negev. *Flora*, 167, 409-422.
- Davis, F.W. y Goetz, S. (1990). Modelling vegetation using digital terrain data. *Landscape ecology*, 4, 69-80.

- Dawson, T.E. (1993). Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 95, 565-574.
- De Boer, D.H. (1992). Constraints on spatial transference of rainfall-runoff relationships in semiarid basins drained by ephemeral streams. *Hydrological Sciences*, 37, 491-504.
- Del Barrio, G., Boer, M.M. y Puigdefabregas, J. (1996). Selecting representative drainage basins in a large research area using numerical taxonomy on topographic and climatic raster overlays. En Rumor, M., McMillan, R. and Ottens, H.F.L. (Eds). *Geographic Information. From research to application through cooperation*. Amsterdam: IOS Press. 398-407.
- Del Barrio, G., Alvera, B., Puigdefabregas, J., y Diez, C. (1997). Response of high mountain landscape to topographic variables: Central Pyrenees. *Landscape ecology*, 12, 95-115.
- Delgado L. y Puigdefábregas, J.(1994). Caracterización geomorfológica y sedimentológica de los glaciares de la zona de el Cautivo, Tabernas (Prov. de Almería). En J. Arnaez, J.M. García Ruiz and A.Gómez Villar, (Eds). *Geomorfología en España*. Sociedad Española de Geomorfología. Logroño.
- Domingo, F., Sánchez, G., Moro, M.J., Brenner, A.J. y Puigdefabregas, J. (1998). Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and forest meteorology*, 2543, 1-18.
- Dune, T. y Leopold, L.B. (1978). *Water in environment planning*. San Francisco: Freeman.
- Dunne, T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. En M.J. Kirkby (Ed.), *Hillslope hidrology*. (227-293). New York: Wiley, J.
- d'Herbes, J.M. y Valentine, C. (1997). Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 188-189, 18-42.
- Eldridge, D.J. (1993). Cryptogams, vascular plants, and soil hydrological relations: some preliminary results from the semiarid woodlands of eastern Australia. *Great Basin Naturalist*, 53, 48-58.
- Emerson, W.W. y Greenland, D.J. (1990). Soil aggregates-Formation and stability. En M.F. De Boot & et al. (Eds.), *Soil colloids and thir associations in aggregates*. (485-511). New York: Plenum Press.
- Evenari, M., Shanan, L. y Tadmor, N. (1971). Landform and landscapes. En *The Negev. The challenge of a desert*. (39-75). Cambridge: Harvard University Press.

- Evenari, M., Shanan, L., & Tadmor, N. (1971b). *The Negev. The challenge of a desert*. Cambridge: Harvard University Press.
- FAO-UNESCO. Mapa mundial de suelos 1988. Informes sobre recursos mundiales de suelos.
- Finlayson, B.L., Gerits, J. y van Wesemael, B. (1987). Crusted microtopography on badlands slopes in southeast Spain. *Catena*, 14, 131-144.
- Fitzjohn, C., Ternan, J.L. y Williams, A.G. (1998). Soil moisture variability in a semiarid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena*, 32, 55-70.
- Francis, C.F., Thornes, J.B., Romero Diaz, A., Lopez-Bermudez, F., y Fisher, G.C. (1986). Topographic control of soil moisture, vegetation cover and land degradation in a moisture stressed mediterranean environment. *Catena*, 13, 211-225.
- Frank, T.D. (1988). Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1727-1734.
- Fritsch, F.E. (1922). The terrestrial algae. *J Ecology*, 10, 220-236.
- Galum, M. (1963). Autoecological and synecological observations on lichens of the Negev, Israel. *Israel Journal of Botany*, 12, 179-187.
- Gee, G.W. y Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. En *American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Methods of soil analysis, part.1. Physical and mineralogical methods- Agronomy monograph no.9 (2 nd. edition)*. (383-411).
- Gifford, G.F. (1972). Infiltration rate and sediment production on a plowed big sagebrush site. *Journal of Range Management*, 25, 53-55.
- Gonzalez-Hidalgo J.C. y Bellot, J. (1997). Soil moisture changes under shrub cover (*Rosmarinus officinalis*) and cleared shrub as response to precipitation in a semiarid environment: stemflow effects. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11, 187-199.
- Goudie, A.S. (1989). Weathering processes. En David S.G. Thomas (Ed.), *Arid zone geomorphology*. (11-24). London: J. Wiley & sons.
- Goudie, A.S. (1993). Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 369-376.
- Graetz, R.D. (1990). Remote sensing of terrestrial ecosystem structure: An ecologist's pragmatic view. En J. Hobbs & H.A. Mooney (Eds.), *Remote sensing of biosphere functioning*. (5-30). New York: Springer-Verlag.

- Grayson, R.B., Moore, I.D. y McMahon, T.A. (1992). Physically based hydrologic modelling 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 26, 2659-2666.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. y McMahon, T.A. (1992b). Physically based hydrologic modelling. 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, 28, 2639-2658.
- Gregorich, E.G. y Anderson, D.W. (1985). Effects of cultivation and erosion on soil of four toposequences in Canadian prairies. *Geoderma*, 36, 343-354.
- Guardia, R. y Ninot, J. (1992). Distribution of plants communities in the badlands of the Upper Llobregat basin (Southeastern Pyrenees). *Studia geobotanica*, 12, 83-103.
- Guardia, R., Ninot, J. y Clotet, N. (1992). On the vegetation-topography relationships in the badlands of the Upper Llobregat basin (Southeastern Pyrenees). *Geoökoplus*, 3, 45-54.
- Hacker, R.B. (1986). Effects of grazing on chemical and physical properties of an earthy sand in the Western Australian mulga zone. *Austr Rangeland J*, 8, 11-17.
- Haigh, M.J. (1977). The use of erosion pins in the study of slope evolution. *Technical Bulletins British Geomorphological Research Group*, 18, 31-49.
- Hairsine, P.B., Moran, C.J. y Rose, C.W. (1992). Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion. *Aust J Soil Res*, 30, 249-264.
- Hansen, A.J., Risser, P.G. y di Castri, F. (1992). Epilogue: Biodiversity and Ecological Flows Across Ecotones. En A.J. Hansen & F. di Castri (Eds.), *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. (423-437). New York: Springer-Verlag.
- Harper, K.T. y Marble, J.R. (1988). A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangelands. En P.T. Tueller (Ed.), *Application of Plant Sciences to Rangeland Management and Inventory*. (135-169). Amsterdam: Martinus Nijhoff / W. Junk.
- Harper, J.L. y Pendleton, R.L. (1993). Cyanobacteria and cyanolichens. can they enhance availability of essential minerals for higher plants? *Great Basin Naturalist*, 53, 59-72.
- Harvey, A.M. (1982). The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (317-335). Norwich: Geo Books (Geo Abstracts Ltd).

- Harvey, A.M. (1987). Patterns of Quaternary aggradational and dissectional landform development in the Almería region, southeast Spain: a dry-region, tectonically active landscape. *Die Erde*, 118, 193-215.
- Harvey, A.M. y Calvo, A. (1989). Distribution of badlands in Southeast Spain: Implications of climatic change. En A.C. Imeson y R.S. de Groot (Eds.), *Landscape-ecological Impact of Climatic Change, discussion report on Mediterranean region*. (1-14).
- Helalia, A.M., Letey, J. y Graham, R.C. (1988). Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. *Soil Sci Soc Am J*, 52, 251-255.
- Hillel, D. (1980). Soil Temperature and heat flow. En *Fundamentals of soil physics*. (287-313). London: Academic Press, I.N.C.
- Hodges, W.K. (1982). Hydraulic characteristic of a badlands pseudo-pediment slope system during simulated rainstorm experiments. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (127-151). Geo Books.
- Hodges, W.K. y Bryan, R.B. (1982). The influence of material behaviour on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (13-46). Geo Books.
- Honsaker, J.L., Campbell, I.A. y Bryan, R.B. (1984). Remote operating semi-automatic instrumentation for measuring stream flow and suspended sediment. *Can J Civ Eng*, 11, 993-996.
- Hoogmoed, W.B. y Stroosnijder, L. (1984). Crust formation on sandy soils in the Sahel. I. Rainfall and infiltration. *Soil & Tillage Research*, 4, 5-23.
- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*, 446-460.
- Howard, A.D. (1994). Badlands. En A.D. Abrahams & A.J. Parsons (Eds.), *Geomorphology of desert environments*. (213-242). London: Chapman & Hall.
- Hutchinson, M.F. (1995). Anudem versión 4.4. Manual.
- Mapa Geológico de España 1:50000. Hoja 1030 (23-42). I.G.M.E. Servicio Public. Mterio. Industria. Madrid: (1975).
- Mapa Geológico de España 1:50000. 1030 (23-43). I.G.M.E. Servicio Public. Mterio. Industria. Madrid: (1983).
- Ibañez, J.J., De-Alba, S., Bermúdez, F.F. y García-Alvarez, A. (1995). Pedodiversity: conceptos y medidas. *Catena*, 24, 215-232.
- Idrisi for Windows, 1.0. 1995.
- Imeson, A.C., Kwaad, F.J.P.M. y Verstraten, J.M. (1982). The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. En

- R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (47-70). England: Geo Books.
- Jackson, R.D., Kimball, B.A., Reginato, R.J. y Nakayama, S.F. (1973). Diurnal soil water evaporation: Time-depth-flux patterns. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 37, 505-509.
- Jeffries, D.L., Klopatek, J.M., Link, S.O. y Bolton, H. (1992). Acetylene reduction of cryptogamic crusts from a blackbrush community as related to resaturation/dehydration. *Soil Biol Biochem*, 24, 1101-1105.
- Jenny, M., Smettan, U. y Facklam-Moniak, M. (1990). Soil-vegetation relationships at several arid microsites in the Wadi Araba (Jordan). *Vegetatio*, 89, 149-164.
- Johansen, J.R. (1993). Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America. *J Phycol*, 29, 140-147.
- Johnston, C.A., Pastor, J. y Pinay, G. (1992). Quantitative Methods for Studying Landscape Boundaries. En A.J. Hansen y F. di Castri (Eds.), *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. (107-125). New York: Springer-Verlay.
- Jungerius, P.D. (1985). Soils and geomorphology. *Catena Supplement*, 6, 1-18.
- Kadmon, R., Yair, A. y Danin, A. (1989). Relationship between soil properties, soil moisture, and vegetation along loess-covered hillslopes, northern Negev, Israel. *Catena Supplement*, 14, 43-57.
- Karssenbergh, D.J.(1996). Manual PCRaster Version 2. Utrecht, The Netherlands: Dept. Physical Geography, Utrecht University.
- Kirkby, M.J., Atkinson, K. y Lockwood, J. (1990). Aspect, vegetation cover and erosion on semi-arid hillslopes. En J.B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion*. (25-39). John Wiley & sons Ltd.
- Kleiner, E.F. y Harper, K.T. (1972). Environment and community organisation in the grasslands of Canyonlands National Park. *Ecology*, 53, 299-309.
- Kleiner, E.F. y Harper, K.T. (1977). Soil properties in relation to cryptogamic groundcover in Canyonlands National Park. *Journal of Range Management*, 30, 202-205.
- Kleverlaan, K. (1989). Neogene history of the Tabernas basin (SE Spain) and its Tortonian submarine fan development. *Geologie en Mijnbouw*, 68, 421-432.
- Klubek, B. y Skujins, J. (1980). Heterotrophic nitrogen fixation in arid soil crusts. *Soil Biol Biochem*, 12, 229-236.

- Kreznor, W.R., Olson, K.R., Banwart, W.L. y Johnson, D.L. (1989). Soil, landscape, and erosion relationships in Northwest Illinois Watershed. *Soil Sci Soc Am J*,
- Kunkel, G. (1993). *Flórura del desierto almeriense*. Almería: Instituto de Estudios Almerienses.
- Lam, K.C. (1977). Patterns and rates of slopewash on the badlands of Hong Kong. *Earth Surface Processes*, 2, 319-332.
- Larone, J. (1982). Sediment and solute yield from Mancos Shale hillslopes, Colorado and Utah. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (181-193). Geo Books.
- Lázaro, R., y González Rebollar, J.L. (1988). Aproximación al estudio del paisaje vegetal almeriense por medio de la cuantificación fitoclimática. En L. Villar (Ed.), *Homenaje a Pedro Montserrat*. (617-626). Jaca: Insto. Estudios Altoaragoneses e Insto. Pirenaico de Ecología; monografías del Insto. Pir. de Ecología, 4.
- Lázaro, R. y Rey, J.M. (1990). Sobre el clima de la provincia de Almería (SE Ibérico): primer ensayo de cartografía automática de medias anuales de temperatura y precipitación. *Suelo y Planta*, 61-68.
- Lázaro, R. y Puigdefabregas, J. (1994). Distribucion de la vegetación terofítica en relación con la geomorfología en áreas acarcavadas cerca de Tabernas, Almería. *Monografías de Flora y Vegetación Béticas*.
- Lázaro Suau, R. (1995). Relaciones entre vegetación y geomorfología en el área acarcavada del Desierto de Tabernas. Tesis doctoral.
- Lázaro, R., Alexander, R.W. y Puigdefabregas, J. (1999). Cover distribution patterns of lichens, annuals and shrubs in the Tabernas Desert, Almería, España. En R.W. Alexander & A.C. Millington (Eds.), *Vegetation mapping: from patch to planet*. In press Chichester: Wiley.
- Levin, S.A. (1992). The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73, 1943-1967.
- Loope, W.L. y Gifford, G.F. (1972). Influence of a soil microfloral crust on selected properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah. *Journal of Soil and Water Conservation*, julio-agosto, 164-167.
- Lopez-Bermudez, F. y Romero-Díaz, M.A. (1989). Piping erosion and badlands development in south-east Spain. *Catena Supplement*, 14, 59-73.
- Lynch, J.M. y Bragg, E. (1985). Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv Soil Sci*, 2, 133-171.

- Malo, D.D., Worcester, B.K., Cassel, D.K. y Matzdorf, K. (1974). Soil-landscape relationships in a closed drainage system. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 38, 813-818.
- Margalef, R. (1982). *Ecología*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Martín de Santa Olalla Mañas, F. y de Juan Valero, J.A. (1993). *Agronomía del riego*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- McCay, D.H., Abrams, M.C. y DeMeo, T.E. (1997). Gradient analysis of secondary forest of Eastern West Virginia. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 124, 161-173.
- Meunier, M. Less bassins versants experimentaux de draix. etude et mesure de l'erosion. (1988). Informe de proyecto.
- Milne, G. (1935). Some suggested units for classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Res*, 4, 183-198.
- Moore, D.C. y Singer, M.J. (1990). Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Sci Soc Am J*, 54, 1117-1123.
- Moore, I.D. y Burch, G.J. (1986). Physical basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci Soc Am J*, 50, 1294-1298.
- Moore, I.D., Burch, G.J. y Mackenzie, D.H. (1988). Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *American Society of Agricultural Engineers*, 31, 1098-1107.
- Moore, I.D. y Grayson, R.B. (1991). Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*, 27, 1177-1191.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. y Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- Moore, I.D., Lewis, A. y Gallant, J.C. (1993). Terrain attributes for spatial modelling of hydrologic processes: methods of estimation and scale effects. En *modelling change in environmental systems*. (2-17). Canberra. Australia:
- Moore, I.D., Norton, T.W. y Williams, J.E. (1993). Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. *Journal of Hydrology*, 150, 717-747.
- Morin, J. y Benyamini, Y. (1977). Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resources Research*, 13, 813-817.
- Morin, J., Benyamini, Y. y Michaeli, A. (1981). The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in a profile. *Journal of Hydrology*, 52, 321-335.
- Mualem, Y. y Assouline, S. (1996). Soil sealing, infiltration and runoff. En A.S. Issar y S.D. Resnick (Eds.), *Runoff, infiltration and subsurface flow of*

- water in arid and semi-arid regions.* (131-181). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Mulligan, M. (1998). Modelling the geomorphological impact of climatic variability and extreme events in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 24, 59-78.
- Mücher, H.J., Chartres, C.J., Tongway, D.J. y Greene, R.S.B. (1988). Micromorphology and significance of the surface crusts of soils in rangelands near Cobar, Australia. *Geoderma*, 42, 227-244.
- Nash, M.S., Wierenga, P.J. y Gutjahr, A. (1991). Time series analysis of soil moisture and rainfall along a line transect in arid rangeland. *Soil Science*, 152, 189-198.
- Naveh, Z. y Lieberman, A.S. (1984). *Landscape ecology. Theory and application.* New York: Springer-Verlag.
- O'Loughlin, E.M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22, 794-804.
- Olsvig-Whittaker, L., Shachak, M. y Yair, A. (1983). Vegetation patterns related to environmental factors in a Negev Desert watershed. *Vegetatio*, 54, 153-165.
- Oostwoud Wijdenes, D. y Ergenzinger, P. (1998). Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *Catena*, 33, 179-200.
- O'Neill, R.V., Turner, S.L., Cullinan, V.I., Coffin, D.P., Cook, T., Conley, W., Brunt, J., Thomas, J.M., Conley, M.R. y Gosz, J. (1991). Multiple landscape scales: an intersite comparison. *Landscape ecology*, 5, 137-144.
- Parker, A.J. (1982). The topographic relative moisture index: an approach to soil moisture assessment in mountain terrain. *Phys Geogr*, 3, 160-168.
- Peinado, M., Alcaraz, F. y Martínez-Parras, J.M. (1992). *Vegetation of Southeastern Spain.* Berlin: J. Cramer.
- Pérez-Trejo, F. (1992). Landscape response units: process based self-organising systems. En D.R. Haines-Young y S.H. Green y Cousins (Eds.), *Landscape ecology and geographical information systems.* Londres: Taylor and Francis.
- Pérez Pujalte, A. y Oyonarte Gutiérrez, C. Mapa de Suelos. Escala 1:100000. TABERNAS-1030. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1987). Proyecto Lucdeme.
- Pickup, G. y Chewings, V.H. (1996). Correlation between DEM-derived topographic indices and remotely-sensed vegetation cover in rangelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 517-529.

- Pierson, F.B. y Mulla, D.J. (1990). Aggregate stability in the Paulose region of Washington: Effect of landscape position. *Soil Sci Soc Am J*, 54, 1407-1412.
- Pilgrim, D.H., Chapman, T.G. y Doran, D.G. (1987). Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. En The University of New South Wales & School of Civil Engineering (Eds.), *Rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions*.
- Pinder III, J.E., Kroh, G.C., White, J.D. y Basham May, A.M. (1997). The relationships between vegetation type and topography in Lassen Volcanic National Park. *Plant ecology*, 131, 17-29.
- Piñol, J., Lledó, M.J. y Escarré, A. (1991). Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, northeast Spain). *Hydrological Sciences*, 36, 95-107.
- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F. y Múcher, H. (1990). The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 653-671.
- Porta, J., López-acevedo, M. y Roquero de Laburo, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M. y Rodriguez, R. (1986). *Técnicas y experimentos en edafología*. Barcelona: A.E.A.C.
- Puigdefabregas, J. (1993). Comprender la dinámica del paisaje. *Ecosistemas* 22-27.
- Puigdefabregas, J., Del Barrio, G., Boer, M., Gutiérrez, L. y Solé, A. (1998). Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology*, 23, 337-351.
- Puigdefábregas, J. (1996). El papel de la vegetación en la conservación del suelo en ambientes semiáridos. En T. Lasanta Martínez y J.M. García-Ruiz (Eds.), *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*. (79-87). Logroño: Sociedad Española de Geomorfología.
- Puigdefábregas, J., Alonso, J.M., Delgado, L., Domingo, F., Cueto, M., Gutiérrez, L., Lázaro, R., Nicolau, J.M., Sánchez, G., Solé, A., Vidal, S., Aguilera, C., Brenner, A., Clark, S. y Incoll, L. (1996). The Rambla Honda field site: interactions of soil and vegetation along a Catena in semi-arid southeast Spain. En Brandt, J. y J.B. Thornes (Eds.) *Mediterranean Desertification and Landuse*. (137-167). Chichester: J.Wiley y sons.Ltd.
- Reynolds, S.G. (1970). The gravimetric method of soil moisture determination: Part 3. An examination of factors influencing soil moisture variability. *Journal of Hydrology*, 11, 288-300.

- Rodríguez Aizpeolea, J. (1992). Un ejemplo de la influencia del uso y abandono de bancales de fondo de canal en la evolución de Badlands (Petrer-Alacant). Actas del II Congreso Nacional de Geomorfología. 211p.
- Rogers, R.W. (1977). Lichens of hot arid and semi-arids lands. En M.R.D. Steward (Ed.), *Lichen Ecology*. (211-252). London: Academic Press.
- Rosenberg, N.J. (1974). *Microclimate: The biological environment*. New York: John Wiley & Sons.
- Rueda, F. (1982). *Ecosistema del subdesierto de Tabernas*. Sevilla: Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.
- Rushforth, S.R. y Brotherson, J.D. (1982). Cryptogamic soil crusts in deserts of North America. *Amer Biol Teacher*, 44, 472-475.
- Satterwhite, M.B. y Ehlen, J. (1982). Landform-vegetation relationships in the northern Chihuahuan desert. *Catena Supplement*, 1, 195-209.
- Scheidegger, A.E., Schumm, S.A. y Fairbridge, R.W. (1968). Badlands. In *Encyclopaedia of geomorphology*. (43-48).
- Schumm, S.A. (1956). The role of creep and rainwash on the retreat of badlands slopes. *American Journal of Science*, 254, 693-706.
- Scoging, H. (1982). Spatial variations in infiltration, runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (89-112). England: Geo Books.
- Sharma, M.L., Gander, G.A. y Hunt, G.C. (1980). Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology*, 45, 101-122.
- Sharma, K.D., Menenti, M., Huygen, J. y Fernandez, P.C. (1996). Distributed numerical rainfall-runoff modelling in an arid region using thematic mapper data and a GIS. *Hydrological Processes*, 10, 1229-1242.
- Singh, J.S., Milchunas, D.G. y Lauenroth, W.K. (1998). Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland. *Plant ecology*, 77-89.
- Smith, B.J. (1994). Weathering processes and forms. In A.D. Abrahams y A.J. Parsons (Eds.), *Geomorphology of desert environments*. (39-63). London: Chapman y Hall.
- Snedecor, G.W. y Cochran, W.G. (1984). *Métodos estadísticos*. México: C.E.C.S.A.
- Soil Survey Division Staff. USDA. (1993). *Soil Survey Manual*. Handbook N° 18. USDA (Eds) Washington.
- Solé, A. y Alexander, R.W. (1996). Contemporary processes in Tabernas basin, SE Spain. En A.E. Mather y M. Stokes (Eds.), *2nd Cortijo Urra field meeting southeast Spain: field guide*. (28-38). Plymouth: University of Plymouth.

- Solé-Benet, A., Calvo, A., Cerdá, A., Lázaro, R., Pini, R. y Barbero, J. (1997). Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31, 23-28.
- Spomer, R.G. y Piest, R.F. (1982). Soil productivity and erosion of Iowa loess soils. *Transactions of the ASAE*, 25, 1295-1299.
- St.Clair, L.L. y Johansen, J.R. (1993). Introduction to the symposium on soil crust communities. *Great Basin Naturalist*, 53, 1-4.
- Stanley, R.J. (1983). Soils and vegetation: An assessment of current status. En J. Messer y G. Mosely (Eds.), *What future for Australia's Arid Land?* (8-18). Canberra: Australian Conservation Foundation.
- Statistica for windows, 4.5. 1993.
- Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. (1985). *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill.
- Stewart, G.H., Basher, L.R., Burrows, L.E., Runkle, J.R., Hall, G.M.J. y Jackson, R.J. (1993). Beech-hardwood forest composition, landforms, and soil relationships, north Westland, New Zealand. *Vegetatio*, 106, 111-125.
- Swanson, F.J., Wondzell, S.M. y Grant, G.E. (1992). Landforms, Disturbance, and Ecotones. In A.J. Hansen & F. di Castri (Eds.), *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. (304-323). New York: Springer-Verlay.
- Thornes, J.B. (1985). The ecology of erosion. *Geography*, 222-235.
- Thornes, J.B. (1990). The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. En J.B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion*. (41-53). John Wiley & sons Ltd.
- Thornes, J.B. (1995). Mediterranean desertification and the vegetation cover. En R. Fantechi, R. Peter, D. Blabanis, & J.L. Rubio (Eds.), *Desertification in a European Context: Physical and Socio-economic impacts*. (169-195). European Commission.
- Tisdall, J.M. y Oades, J.M. (1982). Organic matter and water- stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- van Deursen, W.P.A., Wesseling, C.G. and Department of Physical Geography, Utrecht University. 1996. Utrecht, The Netherlands.
- Vidal, S. (1994). Sensor para la determinación simultánea en suelos de humedad y conductividad eléctrica. España. Patente 9401681.
- Vidal, S., Domene, M.A., Solé A. y Puigdefábregas, J. (1996). Desarrollo y calibración de un nuevo sensor de humedad del suelo. IV Simposio sobre el agua en Andalucía, p 101-109 ITGME, Madrid.

- Vidal, S., Solé, A., Lázaro, R. y Puigdefábregas, J. (1996). Estaciones automáticas de aforo y muestreo de caudales, de bajo costo y mantenimiento, para zonas remotas. IV Simposio sobre el agua en Andalucía (193-203). ITGME, Madrid.
- Walker, P.H., Hall, G.F. y Protz, R. (1968). Relation between landform parameters and soil properties. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 32, 101-104.
- Walker, B.H. (1979). Game ranching in Africa. En B.H. Walker (Ed.), *Management of semi-arid ecosystems*. (55-81). Amsterdam: Elsevier.
- Wardlaw, A.C. (1987). *Practical statistics for experimental biologists*. New York: New York: Wiley.
- Warren, S.D., Thurow, T.L., Blackburn, W.H. y Garza, N.E. (1986). The influence of livestock trampling under intensive rotation grazing on soil hydrologic characteristics. *Journal of Range Management*, 39, 391-395.
- Watson, A. (1979). Gypsum crusts in deserts. *Journal of Arid Environments*, 2, 3-20.
- West, N.E. (1990). Structure and function of microphytic soil crust in wildland ecosystem of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 20, 179-223.
- Wieder, M., Yair, A., y Arzi, A. (1985). Catenary soil relationships on arid hillslopes. *Catena Supplement*, 6, 41-57.
- Wierenga, P.J., Hendrickx, J.M.H., Nash, M.H., Ludwig, J. y Daugherty, L.A. (1987). Variation of soil and vegetation with distance along transect in the Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 13, 53-63.
- Wigmosta, M.S., Vail, L.V. y Lettenmaier, D.P. (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30, n° 6, 1665-1679.
- Wilcox, B.P., Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Wight, J.R. (1990). Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. *Water Resources Research*, 26, 2401-2410.
- Wise, S.M., Thornes, J.B. y Gilman, A. (1982). How old are the badlands ? A case study from south-east Spain. En R. Bryan & A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (259-277). Norwich, England: Geo Books.
- F.F. Munflower y F. Fisher. The role of topography in revegetation of disturbed lands. *Mont. Agric. Exp. Stn. Res. Rep.*, 194:
- Wood, M.K. (1988). Rangeland vegetation-hydrologic interactions. En P.T. Tueller (Ed.), *Vegetation Science Applications for Rangelands Analysis and Management*. (469-491). Kluwer, Dordrecht

- Yair, A., Sharon, D. y Laave, H. (1978). An instrumented watershed for the study of partial area contribution of runoff in an arid area. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29, 71-82.
- Yair, A. y Danin, A. (1980). Spatial variation in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Oecologia*, 47, 83-88.
- Yair, A., Lavee, H., Bryan, R.B. y Adar, E. (1980). Runoff and erosion processes and rates in the Zin valley badlands, Northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes*, 5, 205-225.
- Yair, A., Sharon, D. y Laave, H. (1980b). Trends in runoff and erosion processes over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Hydrol Sci Bull*, 25, 243-255.
- Yair, A., Goldberg, P. y Brimer, B. (1982). Long denudation rates in the Zin-Havarim badlands, northern Negev, Israel. En R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badlands Geomorphology and Piping*. (279-292). Norwich: Geo Books.
- Yair, A. y Lavee, H. (1985). Runoff generation in arid and semi-arid zones. En M.G. Anderson & T.P. Burt (Eds.), *Hydrological Forecasting*. (183-220). Wiley, J. & sons ltd.
- Yair, A. y Berkowicz, S.M. (1989). Climatic and non-climatic controls of aridity: the case of the Northern Negev of Israel. *Catena Supplement*, 14, 145-158.
- Yair, A. (1990). The role of topography and surface cover upon soil formation along hillslopes in arid climates. *Geomorphology*, 3, 287-299.
- Zaidenberg, R., Dan, J. y Koyumdjisky, H. (1982). The influence of parent material, relief and exposure on soil formation in the arid region of Eastern Samaria. *Catena Supplement*, 1, 103-116.
- Zhang, T. y Berndtsson, R. (1988). Temporal patterns and spatial scale of soil water variability in a small humid catchment. *Journal of Hydrology*, 104, 111-128.
- Zonneveld, I.S. (1972). Use of aerial photo-interpretation in geography and geomorphology. In *Textbook of photo-interpretation*. Enschede: ITC.
- Zonneveld, I.S. (1989). The land unit.-A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape ecology*, 3, 67-86.
- Zonneveld, I.S. (1989). Landscape survey and evaluation. *Journal of Arid Environments*, 17, 255-264.

SECCION A.5

		Geof. 1	Geof. 2	Geof. 3	Geof. 4	Geof. 5	Geof. 6	Geof. 7	Geof. 8
ALTITUD	Mínimo	254.5	254.8	257.0	254.5	261.3	254.6	254.5	254.4
	Media	278.5	279.8	324.5	279.0	292.5	284.7	293.8	269.5
	Máximo	379.5	381.7	381.0	327.0	371.5	382.0	361.8	306.8
PENDIENTE	Mínimo	1.0	8.2	15.0	21.5	16.4	1.0	12.1	1.0
	Media	13.9	33.1	38.1	44.7	33.1	18.5	31.5	13.3
	Máximo	30.3	75.2	70.1	79.8	55.7	37.7	64.7	50.9
ORIENTACION	Mínimo	0.0	0.0	167.0	64.8	76.6	121.4	0.0	0.0
	Media	30.4	41.0	340.6	237.7	264.6	310.4	90.0	246.3
	Máximo	238.3	202.0	360.0	359.8	360.0	360.0	360.0	359.5
CURV1	Mínimo	-1.3	-2.4	-1.9	-4.7	-2.1	-1.6	-2.1	-2.4
	Media	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	-0.1	-0.4
	Máximo	1.6	2.3	2.0	5.6	2.8	1.8	1.1	0.4
CURV2	Mínimo	-1.0	-2.1	-2.5	-4.2	-2.1	-1.9	-0.6	-0.2
	Media	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.3	0.3
	Máximo	1.0	1.8	2.0	2.9	2.6	1.4	1.9	1.6
ARE	Mínimo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9.0	198.3
	Media	4.0	3.0	4.0	4.0	3.0	2.0	133.0	13630.0
	Máximo	907.0	150.0	279.0	171.0	158.0	1108.0	13360.0	79221.0
W	Mínimo	0.8	-1.3	-0.7	-1.4	-0.3	0.3	2.7	6.7
	Media	3.1	1.6	1.7	1.2	1.6	2.1	5.4	10.9
	Máximo	9.6	5.5	6.3	5.0	6.2	11.1	10.2	15.0
L.S.F.	Mínimo	0.0	0.6	1.5	2.5	1.9	0.0	6.6	1.3
	Media	2.3	6.4	8.4	9.8	6.5	3.0	27.4	47.0
	Máximo	27.7	46.1	49.9	51.4	44.7	22.2	210.6	387.6
DIST	Mínimo	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	Media	10.0	8.5	10.0	6.8	18.6	8.8	2.4	0.0
	Máximo	34.0	32.4	35.0	31.7	33.8	35.1	21.5	3.8
RADIACION	Mínimo	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	3.0
	Media	22.9	11.4	8.8	5.5	12.7	20.5	11.4	19.7
	Máximo	29.9	23.8	19.9	17.6	22.6	30.1	22.1	28.6

Tabla A.5.1: Descripción estadística de cada geoforma.

STI	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	325.90	21.93	325.50	271.50	381.25	311.00	342.00
Pend (°)	33.94	8.68	34.94	1.75	68.36	29.05	39.05
Are (m ²)	43.61	165.19	5.00	1.00	2576.00	2.00	23.00
Orien.(°)	-	-	330.52	0.00	359.98	18.74	346.40
Curv1	0.00	0.24	0.00	-1.86	2.01	-0.13	0.11
Curv2	0.00	0.29	0.00	-2.51	1.50	-0.20	0.20
Dist (m)	29.87	15.85	29.00	1.00	67.00	17.00	42.00
Rad (MJ/m ² /dia)	10.08	5.47	9.24	0.00	29.46	6.71	13.22
W	2.42	1.75	2.08	-0.88	9.60	0.97	3.55
LSF	12.35	10.75	8.72	0.08	101.49	5.26	16.09

Anexo

PER	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	283.50	11.93	282.71	260.50	308.21	273.73	294.00
Pend (°)	21.05	9.75	19.49	0.00	66.52	13.75	27.44
Are (m ²)	31.98	127.85	5.00	1.00	2456.00	2.00	18.00
Orien.(°)	-	-	51.76	0.00	359.99	26.17	300.38
Curv1	0.00	0.24	0.00	-1.83	1.78	-0.09	0.08
Curv2	0.12	0.39	0.02	-1.70	1.56	-0.08	0.21
Dist (m)	12.48	9.14	10.66	1.00	40.60	5.00	18.24
Rad (MJ/m ² /dia)	18.04	5.69	18.86	0.00	29.33	14.09	22.57
W	2.90	1.74	2.62	-0.31	10.09	1.55	4.04
LSF	6.36	6.65	4.38	0.05	105.86	2.55	7.78

ANU	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	276.62	11.23	271.50	260.50	304.42	268.71	284.24
Pend (°)	17.22	8.66	14.99	0.00	55.33	10.61	23.03
Are (m ²)	22.88	102.16	4.00	1.00	2595.00	1.00	13.00
Orien.(°)	-	-	48.44	0.00	359.97	28.15	277.01
Curv1	0.02	0.20	0.00	-1.07	1.24	-0.05	0.09
Curv2	0.08	0.35	0.00	-1.24	1.28	-0.09	0.13
Dist (m)	14.25	9.61	13.31	1.00	43.01	5.66	20.35
Rad (MJ/m ² /dia)	20.59	4.68	21.76	0.00	29.49	17.55	24.00
W	2.92	1.65	2.57	-0.11	11.09	1.65	4.01
LSF	4.56	4.92	3.09	0.05	63.74	1.70	5.45

LQB	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	261.97	3.16	262.50	255.32	270.25	259.00	264.31
Pend (°)	21.60	8.76	21.28	1.38	49.96	14.86	27.26
Are (m ²)	16.08	49.40	3.00	1.00	693.00	1.00	9.00
Orien.(°)	-	-	63.19	0.00	359.60	29.94	283.72
Curv1	0.03	0.23	0.01	-1.06	1.01	-0.09	0.16
Curv2	-0.02	0.22	0.00	-0.87	0.78	-0.13	0.08
Dist (m)	8.45	4.56	8.00	1.00	22.63	5.00	11.31
Rad (MJ/m ² /dia)	17.55	4.94	17.78	1.49	28.61	14.36	21.59
W	2.42	1.50	2.07	-0.21	8.55	1.34	3.23
LSF	5.42	4.67	4.08	0.05	38.86	2.36	7.03

LQC	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	306.60	12.42	303.44	269.30	344.50	298.50	313.92
Pend (°)	24.62	10.87	26.22	0.32	49.17	15.78	33.70
Are (m ²)	8.77	33.05	3.00	1.00	820.00	1.00	7.00
Orien.(°)	-	-	75.99	0.00	359.97	22.38	309.79
Curv1	0.03	0.20	0.00	-1.44	1.37	-0.06	0.14
Curv2	-0.04	0.24	0.00	-1.46	1.00	-0.18	0.04
Dist (m)	18.46	10.63	16.56	1.00	45.00	10.00	25.83
Rad (MJ/m ² /dia)	16.49	6.81	16.19	0.42	30.04	10.73	22.14
W	2.11	1.19	2.06	-0.17	9.64	1.19	2.89
LSF	6.04	6.22	4.34	0.05	113.28	2.41	7.87

LIQ	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	282.34	13.40	280.25	256.92	324.00	272.27	290.00
Pend (°)	29.05	8.66	29.21	0.87	66.05	23.84	35.26
Are (m ²)	18.31	105.16	3.00	1.00	2592.00	1.00	9.00
Orien.(°)	-	-	63.03	0.00	359.99	33.70	286.91
Curv1	0.02	0.24	0.00	-2.11	2.82	-0.11	0.15
Curv2	-0.02	0.28	0.00	-2.09	2.78	-0.19	0.12
Dist (m)	17.90	8.30	18.19	1.00	42.53	11.66	24.00
Rad (MJ/m ² /dia)	13.42	5.40	13.23	0.00	29.82	9.38	16.89
W	2.04	1.38	1.78	-5.04	10.55	0.98	2.80
LSF	7.69	6.69	6.04	0.05	105.20	3.68	9.51

LQD	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	286.06	15.53	283.82	256.50	327.50	273.50	299.00
Pend (°)	35.77	8.82	36.87	0.64	60.07	30.59	42.24
Are (m ²)	23.57	100.39	3.00	1.00	1765.00	1.00	10.00
Orien.(°)	-	-	74.07	0.00	359.93	44.97	290.70
Curv1	0.00	0.29	0.00	-1.37	1.32	-0.18	0.18
Curv2	0.00	0.36	0.00	-1.25	1.63	-0.24	0.21
Dist (m)	15.73	11.62	13.07	1.00	44.21	5.83	23.41
Rad (MJ/m ² /dia)	8.91	4.97	8.39	0.00	27.88	5.16	11.82
W	1.90	1.56	1.54	-0.45	9.37	0.72	2.63
LSF	10.30	7.88	7.90	0.17	52.41	5.40	12.55

LIM	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	285.26	14.72	283.25	255.50	326.00	274.50	296.25
Pend (°)	38.95	10.82	39.63	0.00	75.68	32.58	45.58
Are (m ²)	14.52	76.53	3.00	1.00	1935.00	1.00	7.00
Orien.(°)	-	-	225.00	0.00	359.50	166.21	258.96
Curv1	0.07	0.42	0.02	-2.24	4.09	-0.16	0.25
Curv2	-0.02	0.41	0.00	-3.40	2.06	-0.26	0.22
Dist (m)	15.96	9.69	14.14	1.00	43.46	8.49	22.21
Rad (MJ/m ² /dia)	8.23	5.73	7.43	0.00	29.71	3.93	11.66
W	1.51	1.35	1.22	-1.41	9.90	0.58	2.08
LSF	9.68	6.78	8.36	0.05	87.47	5.50	11.80

MAR	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	279.52	13.80	276.75	254.46	342.00	270.00	287.25
Pend (°)	40.12	9.81	41.08	0.04	76.73	34.94	46.30
Are (m ²)	25.63	127.86	4.00	1.00	2597.00	2.00	10.00
Orien.(°)	-	-	231.01	0.00	360.00	188.75	262.40
Curv1	-0.05	0.38	-0.02	-4.70	5.64	-0.25	0.16
Curv2	0.01	0.39	0.00	-3.50	2.86	-0.23	0.23
Dist (m)	11.16	8.60	9.24	1.00	48.00	4.00	16.56
Rad (MJ/m ² /dia)	7.21	5.07	6.54	0.00	28.44	3.56	10.04
W	1.77	1.52	1.47	-1.29	10.85	0.66	2.48
LSF	11.54	8.65	9.43	0.05	135.37	6.25	13.89

Cauces	Media	Dev. Std.	Mediana	Mínimo	Máximo	Percentil25	Percentil75
Alt (m)	272.30	12.61	269.67	254.41	303.79	262.44	278.50
Pend (°)	13.97	8.27	12.44	0.00	51.98	7.61	18.73
Are (m ²)	17210.15	12419.72	15555.50	2632.00	78969.00	7389.00	23529.00
Orien.(°)	-	-	249.68	0.00	359.49	130.65	302.91
Curv1	-0.52	0.47	-0.44	-2.44	0.64	-0.85	-0.11
Curv2	0.35	0.31	0.28	-0.23	1.71	0.10	0.51
Dist (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rad (MJ/m ² /dia)	18.86	4.80	19.43	0.13	28.61	16.10	22.24
W	11.08	1.16	11.06	8.04	14.97	10.30	11.82
LSF	72.07	58.46	58.24	1.28	387.34	29.85	97.65

Tablas de A.5.2 a A.5.10: Descripción estadística de variables topográficas por tesela

Tabla A.5.11: Descripción estadística de variables topográficas en cauces.

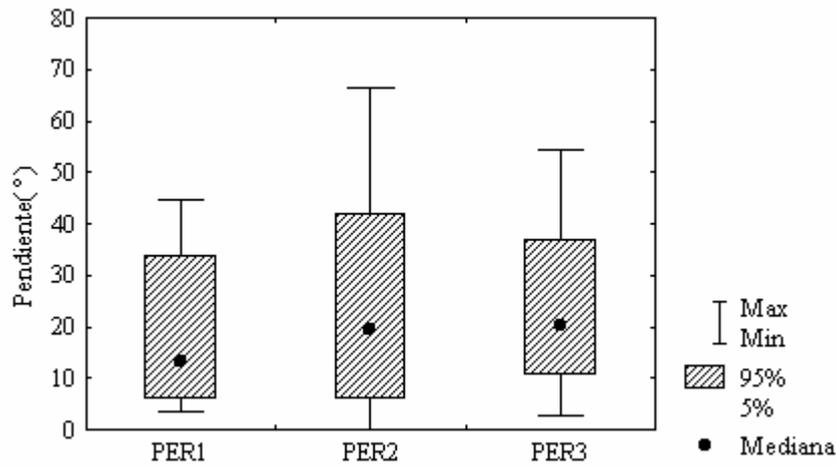


Figura A.5.1.: Distribución de la pendiente para las subclases PER1 (V1), PER2 (V2) y PER3 (V3) que representan zonas de menor a mayor densidad de la cubierta vegetal dentro de PER.

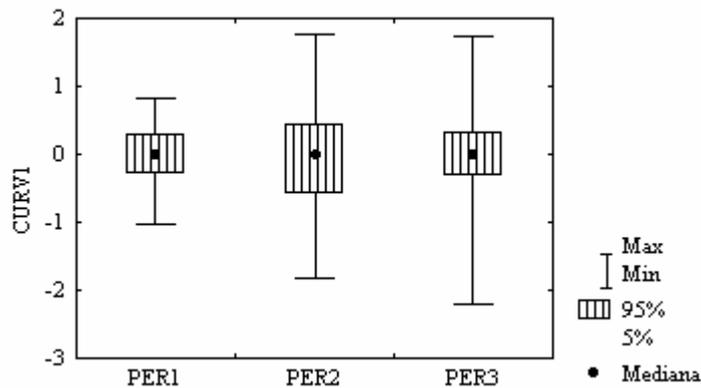


Figura A.5.2.: Distribución de la curvatura en la dirección de la pendiente para las subclases PER1 (V1), PER2 (V2) y PER3 (V3).

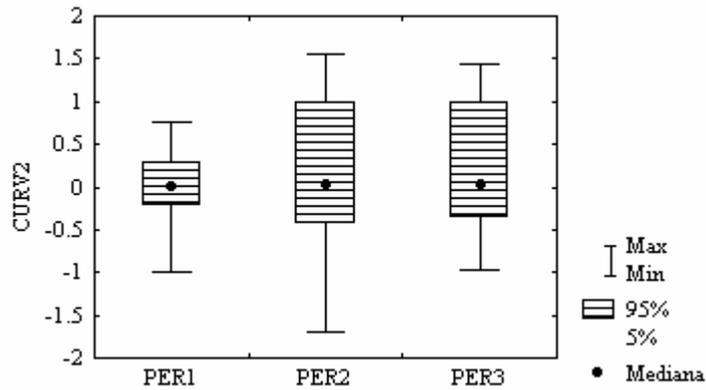


Figura A.5.3.: Distribución de la curvatura transversal a la pendiente para las subclases PER1 (V1), PER2 (V2) y PER3 (V3)

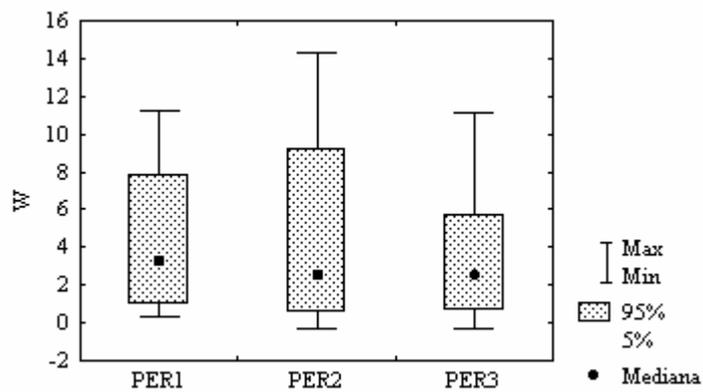


Figura A.5.4.: Distribución de W para las subclases PER1 (V1), PER2 (V2) y PER3 (V3)

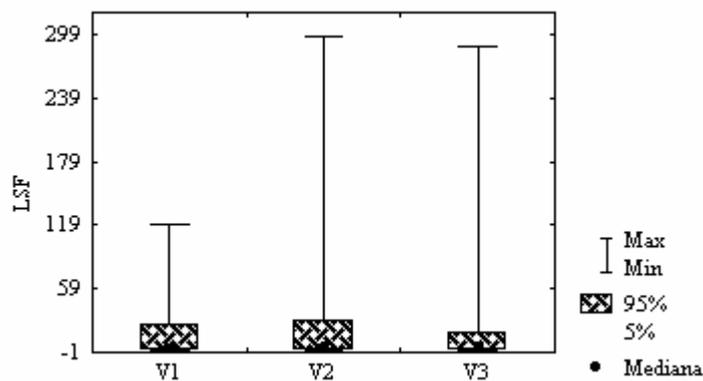


Figura A.5.5.: Distribución de L.S.F. para las subclases PER1 (V1), PER2 (V2) y PER3 (V3)

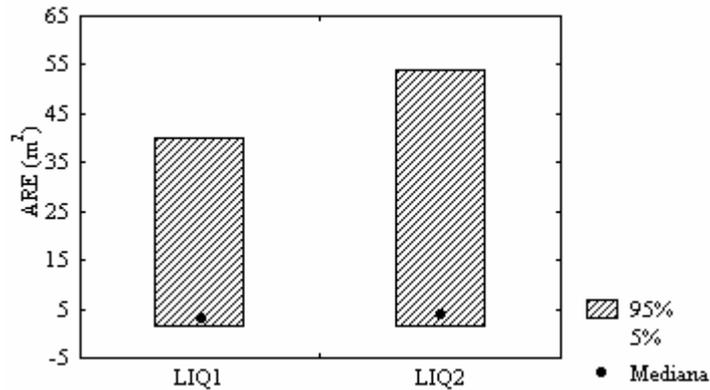


Figura A.5.6.: Distribución del área drenada para las subclases LIQ1 y LIQ2.

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7
ALT	0.78	-0.02	0.45	-0.27	0.07	0.39	-0.02
PEND	0.82	-0.03	0.34	-0.33	0.20	-0.26	0.00
ARE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CURV1(Concava)	0.75	-0.62	-0.19	-0.04	-0.03	0.01	-0.02
CURV1(Convexa)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CURV2(Concava)	0.41	-0.55	0.01	-0.07	0.02	0.00	-0.02
CURV2(Convexa)	0.80	0.57	-0.18	-0.07	-0.03	0.01	0.01
DIST	0.75	0.02	0.52	0.15	-0.44	-0.12	-0.08
RAD	0.76	0.07	0.09	0.57	0.16	0.01	-0.07
W	0.80	-0.22	0.19	0.29	-0.02	0.01	0.43
LSF	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% var.	60.52	21.96	6.37	6.05	1.90	1.78	0.86

Tabla A.5.12. Cargas de los Componentes Principales para cada variable.

A.6.1.- DESCRIPCION DE PERFILES:

PERFIL TV1N1

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIQ

Coordenadas U.T.M.: 549885.41, 4096485.21

Altitud: 273.55m

Posición fisiográfica: Ladera, parte alta.

Pendiente: 24.24°

Orientación: Este (45.99°)

Vegetación: Costra líquénica que constituye el 60% de la cubierta de la tesela y suelo acostrado en los claros.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pedregoso, piedras pequeñas. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-2	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura laminar delgada a media, moderada. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales, vesiculares e intersticiales. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones y nódulos de carbonato cálcico. Límite muy abrupto plano a ondulado.
C	2-30	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de roca y entre ellos material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Consistencia suelta. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
A	0-2cm	35.53	2.86	18.37	15.08	42.69	20.99	0.89	24.13	0.41	
C	2-30cm	69.62	9.19	11.76	14.53	43.81	20.71	0.72	18.76	26.08	

Hor.	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.78	0.217	33.44	27.14	19.49	14.31	10.24	6.92
C	7.4	0.947	35.06	25.45	20.72	15.56	12.71	14.01

Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)						
Hor.	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0708	0.0291	0.8641	0.2398	0.0613	0.1013
C	0.1713	0.0458	0.5891	0.7289	0.3444	0.2980

PERFIL TV1N2

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIQ

Coordenadas U.T.M.: 549893.75, 4096488.20

Altitud: 269.25m

Posición fisiográfica: Ladera, parte media.

Pendiente: 25.32°

Orientación: Norte (34.89°)

Vegetación: Costra líquénica que cubre casi toda la superficie y algunas anuales, suelo acostrado en los claros.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-2	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura laminar delgada a media, moderada. Consistencia en seco

frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales, vesiculares e intersticiales. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones y nódulos de carbonato cálcico. Límite muy abrupto plano a ondulado.

C 2-30

Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de roca entre los que hay material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Consistencia suelta. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-2cm	13.91	2.29	18.31	16.98	43.18	19.23	1.23	23.91	0.24
C	2-30cm	71.55	5.20	14.86	17.70	42.23	20.00	0.80	14.23	29.71

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.67	0.28	36.13	26.93	19.50	13.00	8.42	8.26
C	7.64	0.375	28.44	23.70	17.04	13.90	12.48	13.39

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.1213	0.0496	0.0878	0.3444	0.0346	0.0677
C	0.0738	0.0397	1.2169	0.3338	0.0924	0.2157

PERFIL TV1N3

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: ANU

Coordenadas U.T.M.: 549896.70, 4096492.72

Altitud: 67.8m

Posición fisiográfica: Pedimento de ladera

Pendiente: 7.8°

Orientación: Este (45.78°)

Vegetación: Matorral muy disperso, abundantes anuales y suelo acostrado en los claros y líquenes.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-2	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura laminar delgada, moderada. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, horizontales y vesiculares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas verticales. Límite muy abrupto plano.
C1	2-25	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular media y grande, moderada. Consistencia frágil. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Límite gradual plano
C2	25-47.5	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas, verticales. Aparecen inclusiones vermiformes de carbonato cálcico y nódulos. Límite gradual plano.

C3	47.5-70	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco-arcillo-limosa. Estructura poliédrica subangular fina y muy fina. Consistencia dura. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas, verticales. Nódulos e inclusiones vermiformes de carbonato cálcico. No se observa el límite. Con una sonda se comprueba que la roca madre meteorizada aparece a 1m de profundidad
----	---------	--

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-2cm	5.21	2.26	25.21	19.16	37.91	15.45	2.41	21.11	2.49
C1	2-25cm	3.83	0.98	22.36	18.30	37.99	20.36	0.88	24.80	0.12
C2	25-47.5cm	5.10	0.65	25.50	19.60	38.72	15.54	0.81	21.87	0.43
C3	47.5-70cm	59.78	0.06	8.79	14.24	49.08	27.83	0.74	26.38	2.08

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.46	0.1465	37.48	26.50	19.89	12.51	7.54	8.45
C1	8.08	0.0775	31.79	25.20	15.48	12.53	7.80	8.12
C2	7.70	0.466	35.08	25.11	17.00	11.74	7.60	7.93
C3	7.47	1.328	27.75	24.91	19.33	15.34	11.60	8.26

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0348	0.0385	0.3000	0.1070	0.0126	0.0553
C1	0.0424	0.0094	0.1991	0.0568	0.0091	0.0299
C2	0.1866	0.0071	1.2797	0.1523	0.1406	0.1569
C3	0.0837	0.0296	0.7219	0.6654	0.2582	0.3524

PERFIL TV1N4:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: PER

Coordenadas U.T.M.: 549906.45, 4096497.08

Altitud: 266.14m

Posición fisiográfica: Pedimento de ladera.

Pendiente: 6.44°

Orientación: Norte (28.34°)

Vegetación: Matorral disperso, anuales y suelo acostrado en los claros.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-7	Color 5Y 6/3 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura laminar débil en los dos primeros centímetros, y poliédrica subangular fina y media, moderada en el resto del horizonte. Consistencia en seco dura. Frecuentes poros finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas, verticales. Baja presencia de isópodos, lombrices y larvas de insectos. Límite abrupto plano.
C1	7-59(2mtras)	Color 5Y 6/3 en seco y 5 Y 4/3 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva a poliédrica subangular muy fina, moderada. Consistencia en seco frágil a ligeramente dura. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. Una grieta que recorre todo el perfil de 1cm de ancha. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Baja actividad biológica. Carbonato cálcico libre. Límite difuso ondulado.
C2	59-81	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/4 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva a poliédrica subangular muy fina débil.

Consistencia en húmedo friable. Abundantes poros muy finos, continuos, caóticos, y tubulares. La grieta del horizonte anterior continúa hasta los 65cm. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas, oblicuamente orientadas. Presencia de carbonato cálcico libre. Límite gradual plano.

C3 >81

Color 5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular media, moderada. Consistencia dura. Abundantes poros muy finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas. Nódulos e inclusiones vermiformes de carbonato cálcico. No se observa el límite. Con una sonda se comprueba que el horizonte C aparece a 110cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Gruoso	Fino				
A	0-7cm	3.01	2.36	29.69	22.10	34.45	11.40	1.51	16.40	0.10
C1(1)	7-30cm	4.72	0.14	25.74	21.11	33.90	19.12	1.29	24.28	0.12
C1(2)	30-59cm	3.17	0.43	19.32	21.81	37.08	21.35	1.05	21.93	0.16
C2	59-81cm	5.13	0.30	18.29	21.13	38.10	22.18	1.12	22.37	0.13
C3	81-92cm	5.75	0.20	8.76	18.75	46.94	25.35	1.35	28.94	0.62

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.7	0.1193	38.50	30.03	15.91	9.62	7.10	6.01
C1(1)	7.89	0.0578	34.01	29.66	18.50	11.50	8.12	7.16
C1(2)	7.72	0.059	38.95	33.14	20.57	12.24	9.04	7.62
C2	7.71	0.0472	30.94	31.62	20.14	12.13	8.61	7.43
C3	7.42	0.1735	32.74	28.80	18.57	12.24	10.05	9.03

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0335	0.0395	0.7652	0.1267	0.0107	0.0000
C1(1)	0.0212	0.0083	0.4794	0.0468	0.0264	0.0080
C1(2)	0.0209	0.0112	0.5338	0.0504	0.0097	0.0000
C2	0.0157	0.0185	0.5895	0.0370	0.0147	0.0023
C3	0.0213	0.0139	1.8324	0.1074	0.0424	0.0869

PERFIL TV1N5:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: PER

Coordenadas U.T.M.: 549899.35, 4096517.56

Altitud: 3.82m

Posición fisiográfica: Pedimento de ladera.

Pendiente: 8.99°

Orientación: Este (87.32°)

Vegetación: Matorral disperso, anuales en los claros y suelo acostrado.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-10	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco limosa. Estructura moderada poliédrica subangular fina y media. Consistencia en húmedo muy friable. Frecuentes poros muy finos y pocos finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y finas. Límite neto ondulado.
C1	10-25	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco limosa. Estructura fuerte poliédrica subangular fina y media. Consistencia en seco ligeramente dura. Frecuentes poros muy finos y finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No

		hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas. Límite neto ondulado.
C2	25-45	Color 5Y 5/3 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Ligeramente pedregoso, piedras muy grandes. Textura franco limosa. Estructura moderada poliédrica subangular fina, media y grande. Consistencia en seco dura. Abundantes poros muy finos y finos y pocos poros medios, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%, impregnaciones de sales sobre agregados. Pocas raíces medias y frecuentes raíces medianas, oblicuamente orientadas. Límite difuso ondulado.
C3	45-79	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Sin estructura. Abundantes grietas oblicuas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces finas y muy finas. Contacto lítico.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
A	0-10cm	1.81	0.90	26.19	19.76	36.26	16.89	1.55	20.77	0.33	
C1	10-25cm	3.46	0.77	26.81	18.88	35.88	17.67	0.98	20.45	0.16	
C2	25-45cm	20.25	0.31	24.96	18.64	36.71	19.38	1.03	19.60	0.11	
C3	45-79cm	66.61	0.70	10.00	17.90	46.31	25.10	1.30	23.55	2.84	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.67	0.0982	40.41	33.30	24.02	10.71	8.95	6.32
C1	7.74	0.0858	39.70	30.97	21.70	9.92	8.06	5.73
C2	7.41	0.528	36.90	32.73	16.82	10.14	8.66	6.43
C3	7.27	1.358	38.99	32.44	19.66	12.39	11.40	8.55

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0285	0.0292	0.8050	0.0720	0.0639	0.1191
C1	0.0380	0.0112	9.0234	0.0720	0.0095	0.0000
C2	0.0610	0.0131	1.7850	0.3358	0.2777	0.0465
C3	0.0601	0.0203	0.6172	2.0319	0.2759	0.2588

PERFIL TV1S1:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: MAR

Coordenadas U.T.M.: 549913.43, 4096505.20

Altitud: 264.3m

Posición fisiográfica: Ladera, parte baja.

Pendiente: 40.54°

Orientación: Suroeste (231.6°)

Cobertura de la superficie: Costra física. Superficie sellada, cubierta con gravas redondeadas de 1 a 3cm. Red de grietas que delimitan polígonos irregulares de 5 a 10cm de lado.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pocas piedras, gravas de marga. No hay afloramientos rocosos.

Descripción: No es un suelo propiamente dicho, sino el regolito de la marga, no hay horizontes reconocibles, está constituido por fragmentos de marga meteorizada entre los que hay material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que aumentan de tamaño con la profundidad. El material fino entre los fragmentos no tiene estructura. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociado a raíces.

Se toman 2 muestras: 0-2 cm y de 2-20cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
C1	0-2cm	74.88	2.76	18.86	17.80	42.67	17.90	0.96	24.66	21.72	
C2	2-30cm	82.67	12.75	22.00	14.84	38.10	12.31	0.94	23.49	29.60	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
C1	7.64	0.239	28.64	23.03	17.90	13.08	10.07	11.26
C2	7.37	0.75	27.05	20.54	13.71	12.50	12.00	10.07

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
C1	0.0543	0.0240	0.4313	0.0257	0.0309	0.1777
C2	0.1679	0.0731	0.9525	0.4444	0.0709	0.2457

PERFIL TV1S2:Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LQD

Coordenadas U.T.M.: 549915.6, 4096502.13

Altitud: 266m

Posición fisiográfica: Ladera, parte media baja.

Pendiente: 37.52°

Orientación: Suroeste (248.92°)

Vegetación: Costra física y biológica con líquenes degradados y cianofíceas.

Superficie sellada. Red de grietas que delimitan polígonos irregulares de 5 a 10cm.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pocas piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-1	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura laminar delgada

C1	1-30	<p>a media, fuerte. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales, vesiculares e intersticiales. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy pocas raíces finas y muy finas. Inclusiones y nódulos de carbonato cálcico. Límite muy abrupto plano a ondulado. Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de roca entre los que hay material fino de meteorización Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Consistencia suelta. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociado a raíces</p>
C2	30-60	<p>Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Constituido por fragmentos de roca entre los que hay material fino de meteorización. Fragmentos de marga de mayor tamaño que en el horizonte anterior y continúa la gradación, aumentan de tamaño con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Consistencia suelta. Frecuentes poros fisurales, intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, finas y pocas gruesas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato en las grietas de los fragmentos de marga.</p>

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-1cm	29.34	0.53	13.59	15.46	45.75	24.67	0.62	24.19	3.44
C1	1-30cm	50.25	1.80	16.72	18.82	44.07	18.59	1.51	22.62	13.15
C2	30-60cm	48.03	2.02	13.87	15.40	44.53	24.18	1.39	22.69	11.49

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.68	0.211	32.66	26.10	20.28	13.68	8.52	9.99
C1	7.45	0.34	27.33	20.93	14.86	11.25	9.65	8.10
C2	7.31	1.48	28.06	22.14	17.22	12.10	9.26	9.99

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0176	0.0208	1.1475	0.0593	0.0807	0.1215
C1	0.1451	0.0337	0.9609	0.3086	0.0939	0.1621
C2	0.0743	0.0530	0.6234	1.7593	0.2400	0.7095

PERFIL PEDCOL

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: PER

Coordenadas U.T.M.: 549974.54, 4096476.01

Altitud: 284.70m

Posición fisiográfica: Pedimento

Pendiente: 7.87°

Orientación: Noroeste (284.27°)

Vegetación: Matorral disperso, anuales en los claros, algunos líquenes y suelo acostrado.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-17.5(2mtras)	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/4 en húmedo. Seco. Ligeramente pedregoso. Textura franco-limosa. Estructura grumosa, media. Frágil. Abundantes poros finos y medios, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl

		al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas, verticales. Algunos nódulos poco cementados de carbonato cálcico de 1 centímetro de tamaño. Límite neto ondulado.
C1	17.5-34	Color 2.5Y 5/4 en seco y 2.5Y 4/4 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular fina y media fuerte. Consistencia ligeramente dura. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas, verticales. Frecuentes nódulos de carbonato e impregnaciones. Límite gradual ondulado.
C _k 2	34-50	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular grande y muy grande, fuerte. Consistencia dura. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos, continuos, caóticos, y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas, oblicuamente orientadas. Nódulos, pseudomicelios y cutanes de carbonato cálcico. Límite gradual plano.
C3	50-85	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica angular media y grande y poliédrica subangular media y grande, fuerte. Ligeramente dura. Abundantes poros muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas. Nódulos, pseudomicelios e inclusiones vermiformes de carbonato. Límite gradual recto.
C4	85-115	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica angular media fuerte. Consistencia frágil. Frecuentes poros muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy pocas raíces muy finas y finas. Nódulos, cutanes e

		inclusiones vermiformes de carbonato cálcico. Límite gradual recto.
C5	115-131	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia ligeramente dura. Abundantes poros muy finos y finos, continuos, caóticos y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas. Nódulos, cutanes e inclusiones vermiformes de carbonato cálcico. Entre este horizonte y el siguiente aparecen abundantes fragmentos de calcoarenita entre 1 y 12cm, que probablemente se habrían depositado sobre la marga y posteriormente fueron enterrados por el material coluvial.
R	131-170	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Pedregoso, con piedras pequeñas, medianas y grandes. Textura franco-limosa. Estructura masiva, se trata de un horizonte constituido por fragmentos de marga meteorizada angulares muy alterados. Porosidad fisural. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces finas y medianas, sin orientación definida. Impregnaciones de sales que recubren los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla			
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino		M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
A	0-10cm	2.27	1.22	29.61	17.25	35.49	16.43	2.04	24.89	0.07
C1(1)	10-17.5cm	6.47	1.71	26.35	15.62	35.83	20.48	1.63	23.84	0.27
C1(2)	17.5-34cm	6.53	0.56	20.47	14.60	39.59	24.78	1.25	23.39	0.14
C _k 2	34-50cm	9.23	1.08	19.90	13.72	38.52	26.78	1.37	28.44	0.13
C3	50-85cm	7.9	0.56	16.57	13.13	43.19	26.56	1.41	29.06	0.39
C4	85-115cm	4.03	0.43	13.02	21.08	43.10	22.37	0.95	30.64	0.49
C5	115-131cm	67.61	0.74	17.55	18.42	41.94	21.36	0.87	30.72	0.31
C6	131-170cm	64.48	0.37	10.37	16.32	48.24	24.70	1.13	33.40	1.34
R	>170cm	100	0.23	10.42	17.64	48.14	23.58	0.94	29.74	0.99

Anexo

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.364	0.1042	42.15	33.09	20.72	12.73	7.10	7.68
C1(1)	7.719	0.0532	38.45	30.73	19.33	12.54	8.74	9.21
C1(2)	7.461	0.0551	38.22	32.88	22.47	14.61	10.39	8.96
C _k 2	6.725	0.0735	37.55	33.30	22.68	14.97	10.97	11.25
C3	7.367	0.43	36.57	35.53	23.96	14.97	10.21	8.57
C4	7.429	0.633	37.14	33.52	20.54	10.66	7.80	6.47
C5	6.808	0.764	32.70	30.88	19.46	12.22	7.69	6.39
C6	7.381	1.169	28.92	27.41	20.03	13.52	9.38	7.92
R	7.675	1.984	30.00	27.77	20.12	13.03	9.23	7.59

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0897	0.0654	0.1875	2.2222	0.0422	0.0339
C1(1)	0.0514	0.0323	0.1015	0.5877	0.0039	0.0000
C1(2)	0.0411	0.0055	0.1044	0.0296	0.0300	0.0197
C _k 2	0.0652	0.0077	0.1650	0.2840	0.0081	0.0135
C3	0.0489	0.0096	0.7500	0.2716	0.1811	0.1701
C4	0.0685	0.0222	1.2240	0.6044	0.1352	0.1503
C5	0.0528	0.0388	0.8640	0.5926	0.3089	0.1669
C6	0.0978	0.1274	1.5840	1.5407	0.2346	0.2446
R	0.2073	0.1813	1.3300	2.0741	0.3444	0.3722

PERFIL LIQCOL:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIQ

Coordenadas U.T.M.: 549983.29, 4096481.99

Altitud: 287.77m

Posición fisiográfica: Ladera colgada.

Pendiente: 31.33

Orientación: Sudoeste (244.63°)

Vegetación: Costra líquénica que constituye el 40% de la cubierta de la superficie y suelo acostrado en los claros.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pedregoso, piedras de pequeñas a muy grandes (hasta 1m). No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-5	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras, pequeñas. Textura franco-limosa. Primeros milímetros estructura laminar delgada moderada, por debajo estructura grumosa fina. Consistencia en seco frágil. Frecuentes poros muy finos y finos, y pocos poros medianos, discontinuos, verticales, vesiculares e intersticiales. Abundantes grietas a partir de los 2 primeros milímetros, en todas las direcciones. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy abundantes raíces muy finas y finas, y abundantes raíces medias y gruesas, verticales. Límite muy abrupto plano a ondulado.
C1	5-21	Color 2.5Y 7/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de marga entre los que hay material fino de meteorización Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Textura franco-limosa. Consistencia suelta. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga.
C2	21-35	Color 5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de marga entre los que hay material fino de meteorización Tamaños de los fragmentos de marga mayor que el horizonte anterior y continúa la gradación aumentan de tamaño con la profundidad. Frecuentes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, finas y pocas gruesas, verticales. Inclusiones de yeso y

carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A1	0-2cm	23.07	1.62	24.65	17.38	37.50	18.85	1.09	29.11	0.62
A2	2-5cm	44.63	0.26	5.60	18.83	53.95	21.36	0.69	20.31	28.15
C1	5-21cm	63.42	0.46	17.41	15.95	50.74	15.43	0.76	23.93	26.01
C2	21-35cm	87.39	0.15	2.83	24.35	54.45	18.23	0.74	23.65	26.94

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A1	6.9665	0.0989	32.64	29.50	19.33	12.83	7.81	6.28
A2	6.907	0.1572	32.76	22.47	20.62	15.24	13.62	4.99
C1	6.744	0.322	28.84	22.45	18.56	14.01	12.95	7.03
C2	6.99	0.442	24.44	19.20	15.04	13.23	13.46	5.64

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A1	0.0261	0.0201	0.3035	0.1623	0.0050	0.0262
A2	0.0342	0.0179	0.9800	0.2535	0.0247	0.1079
C1	0.0152	0.0915	1.1200	10.1399	0.0286	0.2036
C2	0.0147	0.1538	0.8400	1.0864	0.1263	0.2572

PERFIL TV2N1:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIQ

Coordenadas U.T.M.: 549959.33, 4096420.98

Altitud: 281.79m

Posición fisiográfica: Ladera, parte alta.

Pendiente: 31.42°

Orientación: Norte (27.08°)

Vegetación: Costra liquénica que constituye el 80% de la cubierta de la superficie y suelo acostrado en los claros. Patrón de grietas que delimitan polígonos de 3 a 10cm.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Muy pocas piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-2	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Primeros milímetros estructura laminar delgada moderada, por debajo estructura grumosa fina. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos y finos, continuos, verticales, vesiculares, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y ocas raíces medianas. Aparecen nódulos y/o incrustaciones de carbonato cálcico. Límite abrupto ondulado.
C	2-30	Color 2.5Y 7/2 en seco y 5Y 5/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de marga entre bs que hay material fino de meteorización con gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina. Textura franco-limosa. Consistencia suelta. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas y rodeando a los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %				Arcilla	%		
			ARENA		LIMO			M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-2cm	12.78	0.55	14.53	15.32	45.75	23.84	0.64	23.74	3.54
C	2-30cm	55.12	0.46	10.10	19.16	50.87	19.42	0.63	20.32	18.05

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.86	0.371	32.77	25.66	20.04	14.54	10.03	9.83
C	7.37	0.318	32.88	24.88	19.60	13.80	11.43	10.28

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl	SO ₄ ²⁻
A	0.0774	0.0445	0.1232	0.3117	0.0270	0.1298
C	0.0620	0.0493	0.0891	0.2052	0.0853	0.2367

PERFIL TV2N2:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIQ

Coordenadas U.T.M.: 549952.1, 4096422.28

Altitud: 278.60m

Posición fisiográfica: Ladera, parte media baja.

Pendiente: 35.94°

Orientación: Este (57.36°)

Vegetación: Costra líquénica que cubre casi toda la superficie, matorral disperso y pocos terófitos, suelo acostrado en los claros.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pedregoso, con piedras entre 2 y 5cm. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A1	0-2	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura granular muy fina, débil. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros intergranulares, medios y gruesos, y porosidad intragranular abundante con poros muy finos y finos, continuos, caóticos e intersticiales. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales.

- Inclusiones y/o nódulos de carbonato cálcico y/o yeso, frecuentes. Límite abrupto ondulado.
- A2 2-5 Color en seco 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura granular muy fina, débil. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros intergranulares, medios y gruesos, y porosidad intragranular abundante con poros muy finos y finos, continuos, caóticos e intersticiales. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas verticales. Inclusiones y nódulos de carbonato cálcico Frecuentes nódulos y/o inclusiones de carbonato y/o yeso. Límite abrupto ondulado.
- C 5-30 Color en seco 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de marga entre los que hay material fino de meteorización, existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Estructura limitada a los intersticios, granular muy fina, a masiva. Textura franco-limosa. Consistencia frágil. Abundantes poros fisurales e intergranulares, continuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociados a las caras de los fragmentos de marga.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A1	0-2cm	12.39	1.45	22.29	21.14	37.81	17.31	2.12	23.50	0.24
A2	2-5cm	14.78	0.30	10.90	16.50	46.91	25.39	0.52	23.59	0.97
C	5-30cm	73.03	3.38	12.89	17.33	45.33	21.07	0.81	16.33	23.46

Anexo

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A1	7.79	0.282	37.84	28.73	25.72	14.56	9.37	9.07
A2	7.56	0.215	32.78	25.60	20.32	15.71	11.53	9.97
C	7.18	0.284	35.61	25.69	19.92	15.24	13.09	11.90

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A1	0.0971	0.0317	1.1875	0.2893	0.0828	0.1624
A2	0.0310	0.0219	0.4988	0.1251	0.0195	0.1368
C	0.0932	0.0359	0.4288	0.4609	0.0919	0.2165

PERFIL TV2ML:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LIM

Coordenadas U.T.M.: 549969.8, 4096421.61

Altitud: 275.87m

Posición fisiográfica: Pared de cárcava.

Pendiente: 36.67

Orientación: Sudeste (255.45°)

Vegetación: Costra física de limos de espesor variable de 3 a 20cm. Superficie sellada. Red de grietas que delimitan polígonos irregulares de 5 a 20cm. Aparecen pedestales con clastos y alguna *Salsola genistoides* muy dispersa.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pocas piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-3	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura laminar delgada a media, fuerte. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos, discontinuos, verticales, vesiculares. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. No se observan raíces. Límite muy abrupto ondulado.

C	3-30	Color 5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Fragmentos de margas entre los que hay material fino de meteorización. Textura franco-limosa. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de margas que se hacen más grandes con la profundidad. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de margas y asociado a los fragmentos de margas.
---	------	--

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
A	0-3cm	17.5	0.21	11.99	17.68	46.83	23.29	0.33	22.38	4.55	
C	3-30cm	73.62	0.28	12.10	15.45	47.43	24.74	1.37	22.82	10.90	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales						
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa	
A	7.92	0.62	33.44	27.14	19.49	14.31	10.24	6.92	
C	7.88	0.589	35.06	25.45	20.72	15.56	12.71	14.01	

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.1172	0.0383	1.3535	0.4278	0.1186	0.2414
C	0.1318	0.0337	0.0797	0.1903	0.0997	0.2514

PERFIL TV2MP:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: PER (Transición de LIQ a PER).

Coordenadas U.T.M.: 549970.30, 4096438.58

Altitud: 275.26m

Posición fisiográfica: Interfluvio, ladera cóncava, parte media

Pendiente: 16.36°

Orientación: Norte (321.1°)

Vegetación: Matorral disperso, anuales y líquenes, y en claros suelo acostrado.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pocas piedras pequeñas. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-8/14	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular fina, media, grande y muy grande, moderada. Consistencia en seco ligeramente dura. Pocos poros finos, muy pocos gruesos, continuos, verticales, dentro de los agregados y tubulares. Frecuentes grietas muy finas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Gran cantidad de restos fecales que ponen de manifiesto una elevada actividad biológica. Límite gradual entre plano y ondulado.
C1	8/14-45	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva a poliédrica subangular muy fina, débilmente desarrollada. Consistencia en seco ligeramente dura. Frecuentes poros muy finos y finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y frecuentes raíces finas, sin orientación. Nódulos vermiformes de carbonato cálcico o yeso y pseudomicelios. Límite neto ondulado.
C2	45-73/100	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Muy pedregoso, tamaño grava. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia en seco de ligeramente duro a duro. Porosidad fisural. Sin grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y frecuentes raíces finas, sin orientación. Precipitaciones o nódulos de carbonato cálcico y/o yeso vermiformes y tubulares de tamaño inferior a 1mm, asociados a las caras de los fragmentos de grava y a las raíces. Límite difuso ondulado.

C4	73/100-125	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia friable. Frecuentes poros muy finos, continuos, verticales, y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas. Nódulos e inclusiones vermiformes y pseudomicelios de carbonato cálcico y/ yeso. Límite abrupto ondulado.
C5	>125	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Textura franco-limosa. Sin estructura. Abundantes grietas oblicuas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces finas y muy finas.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-8/14cm	1.93	0.91	23.61	18.38	37.17	19.92	0.96	22.12	1.10
C1	8/14-45cm	16.17	0.22	19.63	17.72	41.58	20.86	1.50	21.36	0.11
C2	45-73/100	50.78	0.39	15.26	18.09	44.00	22.27	1.82	25.24	1.17
C3	73/100-125cm	30.44	0.24	17.53	18.22	42.42	21.58	1.11	24.16	1.11
C4	>125cm	58.84	0.56	13.40	16.72	45.37	23.94	0.53	19.31	21.61

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	8.03	0.101	34.63	25.56	18.43	13.39	9.95	6.74
C1	8.13	0.0795	36.50	28.89	20.67	15.34	10.35	10.71
C2	6.834	0.924	30.11	22.56	17.04	13.18	10.35	7.38
C3	7.64	1.695	30.03	23.91	17.23	12.85	9.61	6.43
C4	7.32	0.889	32.61	24.96	19.72	14.18	12.00	10.86

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0815	0.0300	0.2250	0.0694	0.0147	0.0219
C1	0.1136	0.0100	0.3875	1.2094	0.0324	0.0508
C2	0.2123	0.0162	1.2469	0.6481	0.2451	0.2004
C3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.0000	0.3354
C4	0.0476	0.0321	0.5293	0.2251	0.2211	0.2714

PERFIL TV2S1:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: MAR

Coordenadas U.T.M.: 549988.02, 4096458.23

Altitud: 279.34m

Posición fisiográfica: Ladera, parte alta.

Pendiente: 32.31°

Orientación: Sur (171.21°)

Cobertura de la superficie: Costra física. Superficie sellada cubierta con gravas de 1mm a 1cm. Red de grietas que delimitan polígonos irregulares de 5 a 10cm.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pocas piedras, gravas de marga. No hay afloramientos rocosos.

Descripción: No es un suelo propiamente dicho, sino el regolito de la marga, no hay horizontes reconocibles. Fragmentos de marga meteorizada entre los que aparece material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que aumentan de tamaño con la profundidad. El material fino entre los fragmentos no tiene estructura. Textura franco-limosa. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas y caras de los fragmentos de marga y asociado a raíces.

Se toman 2 muestras: 0-2 cm y de 2-20cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
C1	0-2cm	69.92	0.83	15.85	18.59	45.66	19.07	1.18	23.90	3.89	
C2	2-20cm	83.95	0.10	11.43	14.50	49.05	24.93	0.87	21.23	8.15	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
C1	7.74	0.665	24.05	20.97	15.40	11.34	9.00	6.81
C2	6.71	0.36	29.80	24.87	17.74	11.07	9.82	8.78

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
C1	0.0658	0.0564	0.6660	1.2731	0.1334	0.1741
C2	0.1239	0.1019	1.1963	0.1080	0.2596	0.3141

PERFIL TV2S2:Características macromorfológicas

Tipo de tesela: MAR

Coordenadas U.T.M.: 549986.55, 4096452.37

Altitud: 276.29m

Posición fisiográfica: Ladera, parte baja.

Pendiente: 31.56°

Orientación: Sur (204°)

Cobertura de la superficie: Costra física. Superficie sellada, cubierta de gravas de marga de 1-2mm hasta 2cm. Red de grietas que delimitan polígonos irregulares de 5 a 10cm.

Drenaje: Bien drenado.

Pedregosidad: Pocas piedras, gravas de marga. No hay afloramientos rocosos.

Anexo

Descripción: No es un suelo propiamente dicho, sino el regolito de la marga, no hay horizontes reconocibles. Fragmentos de marga meteorizada entre los que hay material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que aumentan de tamaño con la profundidad. El material fino entre los fragmentos no tiene estructura. Textura franco-limosa. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociado a raíces.

Se toman 2 muestras: 0-2 cm y de 2-20cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
C1	0-2cm	57.1	0.33	15.21	18.83	44.11	21.52	0.81	27.98	5.41	
C2	2-20cm	77.08	0.34	11.25	17.71	47.36	23.33	1.40	23.32	15.19	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
C1	7.5	0.223	23.89	20.00	14.38	11.09	8.86	7.18
C2	7.34	0.316	24.92	19.76	14.26	11.47	9.78	8.32

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
C1	0.0421	0.0136	0.0469	0.1415	0.0347	0.1666
C2	0.1157	0.0269	0.5688	0.4897	0.0912	0.2433

PERFIL TV3ME1:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: PER

Coordenadas U.T.M.: 550033.41, 4096382.42

Altitud: 297.67m

Posición fisiográfica: Mesa.

Pendiente: 4.7°

Orientación: Norte (331.87°)

Vegetación: Matorral disperso, anuales en los claros y suelo acostrado.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-15	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franca. Primeros 3 a 4mm estructura laminar moderada, los siguientes 3mm estructura granular muy porosa, con agregados organo-minerales. A partir del primer centímetro aparece una estructura poliédrica subangular grande a muy grande, de moderada a fuertemente desarrollada. Pocas piedras. Consistencia en seco ligeramente dura. Abundantes poros finos y frecuentes poros medios, continuos, verticales, dentro de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas verticales. Límite gradual plano.
C1	15-27/34	Color 2.5 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras. Textura franca. Estructura poliédrica subangular muy grande, fuerte. Consistencia en seco ligeramente dura. Frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro de los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Alguna actividad biológica. Límite gradual ondulado.
C _k 2	27/34-43	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva con tendencia a poliédrica subangular muy fina, débil. Consistencia en seco muy duro. Frecuentes poros muy finos, continuos, verticales y tubulares. Sin grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Abundantes nódulos de carbonato cálcico y/o yeso de tamaño variable desde unos milímetros a 2 ó 3 cm, en todo el horizonte. Límite gradual plano.

C3	43-78	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia en seco ligeramente duro. Abundantes poros muy finos, continuos, verticales y tubulares. Sin grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas, verticales. Actividad biológica representada por los restos de una lombriz de 1.5 cm de diámetro. Frecuentes nódulos de carbonato cálcico y/o yeso de tamaño variable desde un milímetro a 0.5 cm, en todo el horizonte. Límite gradual plano.
C4	78-130	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura masiva. Consistencia frágil. Frecuentes poros muy finos y finos, continuos, verticales y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Impregnaciones filamentosas de carbonato cálcico. No se observa el límite. A partir de 1.30m aparece el C, se observa con una sonda.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-15cm	1.8	0.60	35.13	19.29	30.17	14.81	1.33	18.96	0.28
C1	15-27/34cm	15.08	0.50	28.13	16.26	33.30	21.80	1.92	21.73	0.40
C _k 2	27/34-43cm	42.6	0.52	25.96	17.19	35.51	20.82	0.62	26.63	0.09
C3	43-78cm	34.39	0.35	10.85	20.49	45.23	23.07	0.55	27.36	0.21
C4	78-130cm	47.38	1.16	11.39	22.42	44.76	20.27	0.86	15.54	12.10

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.89	0.0805	36.05	25.58	16.30	11.51	7.42	7.97
C1	7.78	0.0944	37.20	26.95	19.96	14.72	9.78	7.88
C _k 2	8.05	0.0852	36.32	28.31	20.92	14.42	8.39	6.66
C3	7.46	0.309	38.76	34.63	25.27	13.58	7.53	7.30
C4	7.28	0.899	34.17	28.99	15.40	14.02	9.47	9.94

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0361	0.0202	0.6234	0.0360	0.0421	0.2776
C1	0.0428	0.0071	0.3052	0.0486	0.0365	0.1295
C _k 2	0.0571	0.0056	0.1750	0.0432	0.0418	0.0081
C3	0.2261	0.0103	0.3900	0.1317	0.1308	0.0815
C4	0.1833	0.0478	1.5531	2.0087	0.2369	0.2071

PERFIL TV3ME2:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LQC

Coordenadas U.T.M.: 550044.59, 4096383.86

Altitud:300.13m

Posición fisiográfica: Divisoria.

Pendiente: 12.41°

Orientación: Sur (297.66°)

Vegetación: Costra líquénica con abundantes anuales y suelo acostrado entre los líquenes.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-1	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura laminar muy delgada, moderada a fuerte. Consistencia en seco frágil. Abundantes poros muy finos y pocos poros vesiculares y tubulares. Frecuentes grietas verticales. Fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales.
ACy	1-16	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular muy fina, débil. Consistencia en seco

		frágil. Frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. No hay grietas. Fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y finas, verticales. Nódulos de yeso y/o carbonato cálcico. Límite gradual ondulado.
C1	16-40	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular fina, media y grande, débil. Consistencia en seco frágil. Pocos poros muy finos y finos, continuos, dentro y fuera de los agregados, tubulares. No hay grietas. Fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. No se observan nódulos pero si cristales intercalados de yeso. Límite gradual ondulado.
C2	40-50	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 5/1 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Textura franco-limosa. Sin estructura. Abundantes grietas oblicuas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces finas y muy finas. Contacto lítico.

Resultados analíticos

		Análisis granulométrico en %								
		ARENA		LIMO		Arcilla	%			
Hor.	Prof.	Gravas (%)	Gruesa	Fina	Grueso		Fino	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
AC _y	0-16cm	13.23	5.64	20.07	14.92	39.88	19.49	0.67	17.26	36.75
C1	16-40cm	52.66	9.02	14.34	13.91	41.14	21.59	0.15	20.93	27.95
C2	40-50cm	84.13	6.01	16.24	14.57	38.96	24.21	0.29	21.73	25.89

		pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
Horizonte		pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
AC _y		7.73	0.201	36.17	30.79	23.04	16.49	13.88	14.52
C1		7.3	0.351	37.52	30.56	25.01	17.35	12.19	13.60
C2		8.01	0.305	34.30	25.99	21.32	16.68	12.45	13.83

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
AC _y	0.0189	0.0149	0.9244	0.0895	0.0810	0.0946
C1	0.1352	0.0836	0.4296	0.7640	0.1132	0.1888
C2	0.0739	0.0718	0.4050	0.2428	0.0890	0.1282

PERFIL TV3ME3:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LQC

Coordenadas U.T.M.: 550069.22, 4096337.16

Altitud: 310.8m

Posición fisiográfica: Divisoria.

Pendiente: 10.35°

Orientación: Noroeste (315.91°)

Vegetación: Costra líquénica con abundantes anuales y suelo acostrado entre los líquenes.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Sin piedras. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A1	0-1	Color 5Y 6/2 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Ligeramente húmedo. Muy pocas piedras pequeñas. Textura franco-limosa. Estructura laminar muy delgada, moderada a fuerte. Consistencia friable. Muy pocos poros finos, discontinuos, horizontales, vesiculares y tubulares. Frecuentes grietas verticales. Muy pocas raíces finas, verticales. Limite neto ondulado.
AC1	1-12	Color 5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Ligeramente húmedo. Muy pocas gravas (de marga). Textura franco-limosa. Estructura grumosa muy fina débil. Consistencia de suelto a muy friable. Frecuentes poros finos y muy finos, continuos, verticales y oblicuos, dentro y fuera de los agregados, y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte

		efervescencia al HCl al 11%. Muy abundantes raíces muy finas y finas, verticales. Nódulos de yeso y/o carbonato cálcico. Límite gradual ondulado.
C1y	12-30	Color 5Y 7/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pedregoso, con piedras pequeñas y grava (ambas de marga). Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular fina, media y grande, débil. Consistencia en seco frágil. Frecuentes poros finos y medios, continuos, caóticos intersticiales y tubulares. Abundantes grietas irregulares. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas, verticales. No se observan nódulos pero si cristales intercalados de yeso secundario. Límite gradual ondulado.
C2	30-45	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Textura franco-limosa. Sin estructura. Abundantes grietas oblicuas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces finas y muy finas. Contacto lítico.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
A	0-1cm	1.33	1.61	14.87	20.82	43.23	19.47	1.80	17.81	1.77	
AC	1-12cm	26.93	0.07	10.18	21.90	44.75	23.09	0.76	11.69	27.52	
C1y	12-30cm	45.52	0.41	10.13	21.54	46.30	21.62	0.86	11.22	34.97	
C2	30-45cm	92.8	0.31	14.46	20.85	43.87	20.51	0.68	18.47	6.88	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.51	0.27	n.d.	36.01	23.85	13.79	n.d.	9.00
AC	7.66	0.216	n.d.	31.77	22.59	13.75	n.d.	12.98
C1y	7.67	0.228	n.d.	30.52	21.12	13.26	n.d.	13.13
C2	7.64	0.192	n.d.	28.81	19.76	12.66	n.d.	9.02

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0396	0.0312	1.2555	0.2067	0.0364	0.1544
AC	0.0196	0.0123	0.8160	0.0741	0.0060	0.1190
C1y	0.0219	0.0143	0.8308	0.1888	0.0046	0.1110
C2	0.1413	0.0436	0.4375	0.3621	0.0105	0.0935

PERFIL TV4E1:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: STI

Coordenadas U.T.M.: 550092.70, 4096265.68

Altitud: 350.72m

Posición fisiográfica: Ladera, parte alta.

Pendiente: 43.26°

Orientación: Oeste (273.32°)

Vegetación: Superficie muy pedregosa, con matorral muy disperso, y costra de líquenes y otra costra biológica, alguna anuales.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Extremadamente pedregoso, de tamaño desde grava hasta bloques de más de 1 m de sección. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-14	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Ligeramente húmedo. Pedregoso, con piedras pequeñas. Textura franco-arenosa. Estructura entre poliédrica subangular fina y media a grumosa media, débil. Consistencia en húmedo muy friable. Abundantes poros medios y gruesos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas y finas, verticales. Restos de fauna en macroporos. Límite muy abrupto ondulado.

C1	14-30	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/3 en húmedo. Húmedo. Sin piedras. Textura franca. Estructura poliédrica subangular media, moderada. Consistencia en húmedo friable. Frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Raíces muy finas muy abundantes, verticales. Límite neto ondulado.
Cy2	30-43	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Húmedo. Sin piedras. Textura franca. Estructura moderada poliédrica subangular fina a media. Friable. Frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Raíces muy finas, muy abundantes, verticales. Aparecen cristalizaciones de yeso de varios milímetros, fibrosas, frecuentes pseudomicelios de yeso. Límite neto ondulado.
C3	43-64	Color 5Y 6/3 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franca. Estructura débil, poliédrica angular fina y media a poliédrica subangular fina y media. Consistencia dura. Abundantes poros finos y medios, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados e irregulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Raíces muy finas muy pocas, verticales. Aparecen inclusiones de yeso. Límite gradual ondulado.
C4	64-90	Color 5Y 6/3 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Sin estructura. Fragmentos de marga entre los que hay material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Textura de la tierra fina franco-limosa. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociados a los fragmentos de marga. Contacto lítico a 90cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino					
A	0-14cm	26.76	1.50	61.99	12.50	14.62	9.38	0.58	16.21	0.30	
C1	14-30cm	15.15	0.85	36.14	19.44	26.82	16.75	0.83	20.99	0.55	
Cy2	30-43cm	19.81	0.49	45.79	21.15	16.83	15.73	0.70	16.24	17.51	
C3	43-64cm	46.15	0.75	29.09	19.04	30.32	20.80	0.44	18.97	15.11	
C4	64-90cm	82.28	1.81	11.57	21.82	39.90	24.90	0.40	20.55	10.28	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	7.51	0.052	30.03	22.28	9.32	6.63	5.21	4.35
C1	7.54	0.172	34.61	30.00	15.01	9.97	7.01	6.28
Cy2	7.49	0.191	38.61	27.42	17.22	11.22	9.92	9.03
C3	7.51	0.27	39.88	31.00	21.70	14.77	13.58	8.69
C4	7.43	0.47	38.43	31.61	20.42	13.37	11.97	8.57

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0179	0.0423	0.9750	0.0309	0.0010	0.0000
C1	0.0196	0.0092	1.2825	0.0963	0.0744	0.0862
Cy2	0.0159	0.0125	1.1294	0.0669	0.0006	0.0000
C3	0.0704	0.0237	0.9296	0.5558	0.0431	0.1278
C4	0.0484	0.0675	0.8859	0.8417	0.1614	0.4936

PERFIL TV4E2:Características macromorfológicas

Tipo de tesela: STI

Coordenadas U.T.M.: 550075.43, 4096288.46

Altitud: 331.97m

Posición fisiográfica: Ladera, parte media alta.

Pendiente: 30.42°

Orientación: Norte (344.67°)

Vegetación: Superficie muy pedregosa, con matorral disperso dominado por *Stipa tenacissima*, alguna anuales, costra de líquenes, otras costras biológicas y una costra física muy desarrollada.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Extremadamente pedregoso, desde gravas a bloques de hasta 1m de tamaño. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A _k	0-5.5	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Sin piedras. Textura franco-limosa. De 0 a 3mm aparece una costra con estructura laminar muy delgada, fuerte. Con abundantes grietas verticales. A partir de los 3mm aparece una estructura poliédrica subangular fina a media, débil. Consistencia frágil. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos y medios, continuos, caóticos, dentro de los agregados, tubulares. Abundantes grietas oblicuas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas y finas y muy pocas medias y gruesas, verticales. Límite abrupto ondulado.
Cy1	5.5-20	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Pedregoso, tamaño grava. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular muy fina, fina y media, débil. Consistencia frágil. Abundantes poros muy finos, frecuentes poros finos, medios y gruesos, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Raíces muy finas muy abundantes y frecuentes raíces medias y gruesas, verticales. Se observan abundantes precipitaciones de yeso sobre las caras de los agregados y gravas, y frecuentes cristalizaciones de yeso en cavidades de hasta 1cm. Frecuentes manchas ocreas procedentes de la meteorización de fragmentos de calcoarenita. Límite neto plano.
C2	20-43	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 5/2 en húmedo. Seco. Pedregoso, fragmentos tamaño grava de marga. Textura franco-limosa. Estructura moderada poliédrica subangular

muy fina y fina, débil. Duro. Abundantes poros muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de los agregados y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Raíces muy finas y finas abundantes y pocas raíces medias y gruesas, verticales. Aparecen cristalizaciones de yeso de varios milímetros, fibrosos, frecuentes pseudomicelios de yeso y abundantes manchas ocre procedentes de la meteorización de la calcoarenita. Límite neto ondulado.

C3 43-70cm Color 5Y 6/3 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Seco. Piedras dominantes, pequeñas. Sin estructura. Fragmentos de marga entre los que hay material fino de meteorización. Existe una gradación en el tamaño de los fragmentos de marga que se hacen más grandes con la profundidad. Textura franco-limosa del material fino. Abundantes poros fisurales e intergranulares, discontinuos y caóticos. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas, verticales. Inclusiones de yeso y carbonato cálcico en las grietas de los fragmentos de marga y asociado a los fragmentos de marga. Contacto lítico a 70cm.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A _k	0-5.5cm	19.97	2.76	18.16	16.32	41.10	21.66	0.36	30.13	0.49
Cy1	5.5-20cm	20.66	10.07	23.71	14.64	36.59	15.00	0.65	18.28	30.24
C2	20-43cm	64.33	3.26	16.13	20.33	48.86	11.41	1.02	18.19	22.60
C3	43-70cm	72.93	5.73	15.85	13.91	39.13	25.38	0.79	22.22	18.06

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A _k	7.64	0.217	37.21	29.73	21.71	13.69	8.05	8.52
Cy1	7.77	0.216	35.25	27.93	20.38	15.91	12.85	13.43
C2	7.44	0.32	32.48	27.35	20.83	16.25	13.46	10.86
C3	7.18	0.53	33.56	31.18	22.77	16.81	11.79	11.86

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A _k	0.0628	0.0234	0.8723	0.1782	0.0647	0.1344
Cy1	0.0274	0.0141	0.7629	0.1102	0.0548	0.1202
C2	0.1738	0.0413	0.7922	0.4293	0.0907	0.1847
C3	0.1009	0.1363	0.9028	0.0903	0.1144	0.3315

PERFIL TV4E3:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: STI

Coordenadas U.T.M.: 550069.73, 4096311.91

Altitud: 317.94m

Posición fisiográfica: Ladera, parte media baja.

Pendiente: 26.49°

Orientación: Norte (327.77°).

Vegetación: Superficie muy pedregosa, piedras desde 1mm hasta bloques de 1m de calcoarenita. Matorral disperso, predominando *Stipa tenacissima* y abundantes líquenes y otra costra biológica en los claros, alguna anuales.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Extremadamente pedregoso, desde gravas a grandes bloques de más de 1mm de sección. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-4	Color 2.5Y 6/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pedregoso, con piedras pequeñas, medias, grandes y muy grandes. Textura franco-arenosa. En los 5 primeros milímetros aparece una costra con estructura laminar fina a media, moderadamente desarrollada, con porosidad vesicular. A partir de los 5 primeros milímetros aparece una estructura poliédrica subangular muy fina y fina, débil. Consistencia frágil. Frecuentes poros muy finos y pocos poros finos, continuos, y caóticos. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Abundantes raíces muy finas y finas, verticales. No se observa actividad biológica. Límite neto ondulado.

C1	4-30	Color 2.5Y 7/2 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pedregoso, con piedras pequeñas, medias, grandes y muy grandes. Textura franca. Estructura poliédrica subangular muy fina, fina y media, débil. Consistencia en seco ligeramente dura. Abundantes poros muy finos y frecuentes poros finos, continuos, verticales, dentro y fuera los agregados, tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces finas y pocas medianas, verticales. No se observa actividad biológica. Límite neto plano.
C2	30-75	Color 10YR 5/3 en seco y 2.5Y 4/2 en húmedo. Seco. Piedras dominantes pequeñas, medias, grandes y muy grandes. Textura franco-arenosa. Estructura masiva a granular fina débil. Consistencia frágil. Porosidad intergranular. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Pocas raíces muy finas. No se observa el límite, debido a la existencia de un gran bloque enterrado no podemos continuar el perfil.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
A	0-4cm	43.88	3.13	53.96	10.95	19.92	12.03	1.59	20.12	0.10
C1	4-30cm	40.68	3.88	28.23	14.33	34.41	19.16	1.23	24.05	0.19
C2	30-75cm	39.27	1.84	54.46	10.94	20.77	11.99	1.50	17.93	0.08

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A	8.01	0.0921	25.80	17.77	12.80	9.97	7.99	5.92
C1	7.82	0.063	31.03	23.80	17.57	12.63	9.18	6.37
C2	7.82	0.125	27.44	18.95	11.71	8.50	6.37	5.74

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A	0.0418	0.0224	0.2056	0.0648	0.0096	0.0045
C1	0.0510	0.0048	0.1313	0.0424	0.0119	0.0108
C2	0.1141	0.0048	0.7500	0.0617	0.0743	0.0499

PERFIL TV4E4:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: STI

Coordenadas U.T.M.: 550054.86, 4096330.40

Altitud: 308.23m

Posición fisiográfica: Ladera, parte baja.

Pendiente: 23.47°

Orientación: Noroeste (313.96°)

Vegetación: Superficie muy pedregosa, piedras desde 1mm hasta bloques de 1m de calcoarenita. Matorral disperso, predominando *Stipa tenacissima* y abundantes líquenes y otras costras biológicas en los claros, alguna anuales.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Extremadamente pedregoso, desde gravas a grandes bloques de más de 1mm de sección. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
A	0-35/42	Color 2.5Y 6/2 en seco y 5Y 4/3 en húmedo. Ligeramente húmedo a húmedo. Pedregoso, con gravas y piedras pequeñas. Textura franca. En los 2 primeros milímetros aparece una costra con estructura laminar fina a media moderadamente desarrollada, con porosidad vesicular. A partir de los 2 primeros milímetros aparece una estructura entre masiva, poliédrica subangular muy fina, y grumosa fina, débilmente desarrollada. Consistencia muy friable. Frecuentes poros finos y medios, continuos, verticales, dentro y fuera de los agregados. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy abundantes

raíces muy finas y finas, y pocas raíces medianas, verticales. Límite gradual plano.

- C 35/42-82(3mtras) Color 5Y 5/3 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Muy pedregoso, con piedras muy grandes. Textura franca. Estructura masiva. Consistencia en seco dura. Pocos poros muy finos, continuos, verticales, y tubulares. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Frecuentes raíces muy finas, verticales. Nódulos blancos de menos de 1 cm de diámetro de yeso o carbonato. Encontramos una gran piedra y no podemos continuar el perfil.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %						% M.O. CO ₃ Ca Yeso		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso	
			Gruesa	Fina	Gruoso	Fino					
A(mtra 1)	0-15cm	2.79	2.57	36.87	16.56	30.40	13.59	1.17	15.61	0.30	
A(mtra 2)	15-38.5cm	33.76	6.20	44.49	13.02	22.57	13.73	1.32	18.32	0.22	
C(mtra 1)	38.5-65cm	22.72	6.45	43.32	12.79	23.21	14.24	1.29	18.20	0.21	
C(mtra 2)	65-82cm	40.29	6.98	50.92	10.46	19.93	11.71	1.07	16.67	0.17	

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
A(mtra 1)	7.77	0.0484	39.28	30.06	20.74	10.25	8.22	5.73
A(mtra 2)	7.79	0.0375	39.00	28.73	17.28	9.95	8.25	6.58
C(mtra 1)	7.69	0.057	39.16	28.63	20.88	8.75	6.90	5.56
C(mtra 2)	7.74	0.0477	33.86	25.71	21.42	8.39	6.91	5.23

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
A(mtra 1)	0.0148	0.0174	0.3953	0.0420	0.0158	0.0139
A(mtra 2)	0.0141	0.0354	0.8491	0.0267	0.0061	0.0000
C(mtra 1)	0.0177	0.0021	0.2397	0.0334	0.0102	0.0000
C(mtra 2)	0.0230	0.0021	0.2803	0.0334	0.0125	0.0000

PERFIL TERRA:

Características macromorfológicas

Tipo de tesela: LQB

Coordenadas U.T.M.: 549748.44, 4096570.14

Altitud: 254.75m

Posición fisiográfica: Pequeño pedimento de ladera.

Pendiente: 16.9°

Orientación: Sur (145.56°)

Vegetación: Superficie muy pedregosa, piedras pequeñas, abundantes líquenes y otra costra biológica, anuales, y alguna perenne como *Annabasis articulata*.

Drenaje: Bien drenado

Pedregosidad: Pedregoso. Piedras pequeñas y medianas. No hay afloramientos rocosos.

Hor.	Prof.(cm)	Descripción:
Ay	0-16	Color 5Y 6/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Pedregoso, con piedras pequeñas y medias. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular muy fina, fina y media, débil. Consistencia frágil. Abundantes poros muy finos, frecuentes poros finos y pocos poros medios, continuos y caóticos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares. Frecuentes grietas verticales. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy abundantes raíces muy finas y finas y frecuentes raíces medianas, verticales. No se observa actividad biológica. Aparecen algunas precipitaciones de yeso. Se observan algunas manchas ocre, de fragmentos meteorizados de calcoarenita. Límite abrupto ondulado.
C1	16-80	Color 5Y 5/2 en seco y 5Y 4/2 en húmedo. Seco. Piedras dominantes pequeñas, medias y grandes. Textura franco-limosa. Sin estructura. Consistencia no coherente. Abundantes poros intersticiales. No hay grietas. Muy fuerte efervescencia al HCl al 11%. Muy pocas raíces finas y muy finas, verticales. No se observa actividad biológica. Nódulos de carbonato cálcico o yeso de menos de 1mm, poco abundantes. Manchas ocres que aparecen

por la alteración de fragmentos de calcoarenita. Tras 80cm aún no se ha llegado a la roca.

Resultados analíticos

Hor.	Prof.	Gravas (%)	Análisis granulométrico en %					%		
			ARENA		LIMO		Arcilla	M.O.	CO ₃ Ca	Yeso
			Gruesa	Fina	Grueso	Fino				
Ay	0-16cm	30.1	4.83	25.34	19.05	35.67	15.11	0.68	18.51	12.79
C(mtra1)	16-25cm	58.18	5.65	22.02	20.36	35.80	16.17	0.71	19.73	4.39
C(mtra2)	25-50cm	42.39	4.62	29.89	19.24	31.09	15.16	0.58	19.49	8.20
C(mtra3)	50-80cm	68.11	6.53	24.02	20.16	33.00	16.28	0.52	19.91	9.36

Horizonte	pH y C.E. en extracto		Humedad (% gravimétrico) a distintos potenciales					
	pH	C.E.(S m ⁻¹)	-10	-33	-100	-300	-1000	-1500 kPa
ABy	7.74	0.685	39.63	28.60	25.17	10.02	8.97	7.49
C(mtra1)	7.61	2.38	31.07	23.98	20.89	9.49	8.65	6.73
C(mtra2)	7.55	2.02	30.99	23.81	19.29	8.70	8.12	6.78
C(mtra3)	7.58	1.61	35.57	21.49	18.67	10.08	8.84	6.91

Horizonte	Concentración de iones en extracto de pasta saturada (cmol kg ⁻¹)					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
ABy	0.0359	0.0500	1.4250	0.2284	0.1225	0.2631
C(mtra1)	0.0359	0.0558	0.2625	0.3333	0.3506	0.7381
C(mtra2)	0.1582	0.0385	1.4063	0.3827	0.1548	0.5129
C(mtra3)	0.1207	0.0308	1.1250	0.3704	0.1648	0.4854

Las figuras A.6.1 a A.6.7 muestran un foto de un perfil de suelo tipo en cada tesela:



A.6.1: Perfil en PER.



A.6.2a: Perfil en STI1 (alto)



A.6.2b: Perfil en STI2 (bajo)



A.6.3: Perfil LQC



A.6.4: Perfil en LQB.



A.6.5: Perfil en LIQ.



A.6.6: Perfil en LIM.



A.6.7: Perfil en MAR.

SECCION A. 7

	LIQ	ANU	PER	MAR1	MAR2	MAR3	STI1	STI2	STI3
HVER	9.32	7.79	5.79	3.40	3.21	2.80	8.20	5.98	4.91
HOTO	18.46	16.66	15.10	8.36	6.46	7.77	15.75	12.94	14.27
HINV	20.19	21.31	19.26	11.72	8.3	9.15	19.92	19.32	18.39
HPRIM	13.72	11.64	10.39	6.76		5.71	10.59	8.64	8.43
ARE	8.00	9.00	30.22	3.67	4.40	7.44	35.00	8.33	41.22
W	2.51	3.11	3.46	1.34	1.98	2.28	2.87	2.27	4.40
DIST	24.39	21.97	9.07	10.07	6.86	5.11	61.75	33.59	23.80
PLN	-0.06	0.02	-0.01	-0.11	-0.12	-0.06	0.09	-0.04	0.01
PRF	0.04	-0.10	-0.02	-0.05	0.00	0.02	-0.03	-0.03	0.02
PEND	24.88	12.89	7.51	33.83	26.28	27.35	31.60	24.49	10.81
RADV	27.93	32.20	34.44	24.17	27.87	27.26	26.35	29.94	35.43
RADO	6.39	12.02	15.78	2.83	5.85	5.34	2.43	5.59	11.82
RADI	6.23	11.90	15.71	2.67	5.68	5.16	2.25	5.39	11.65
RADP	27.70	32.06	34.38	23.84	27.37	27.02	25.96	29.66	35.30
AREN	20.80	27.47	29.62	16.68		15.54	20.92	57.09	39.44
LIM	58.90	57.08	54.56	64.25		62.94	57.42	30.88	46.97
ARC	20.30	15.45	15.82	19.07		21.52	21.66	12.03	13.59
POROS	62.85	55.29	53.33				59.2	52.33	50.57
M.O.	1.18	2.41	1.64	1.18		0.81	0.36	1.58	1.17
C.C.	26.3	31.15	36.84	25.17		24	31.88	22.27	39.07
P.M.P.	8.068	9.92	7.37	8.16		8.6	9.14	7.42	5.73

Tabla A.7.1: Promedios estacionales de la humedad del suelo y características topográficas y del suelo de los puntos de muestreo de la humedad del suelo.

HVER: Humedad media en verano; HOTO: Humedad media en otoño; HINV: Humedad media en invierno; HPRI: Humedad media en primavera

Variables topográficas: ARE: Area drenada; W: Índice topográfico de humedad; DIST: Distancia al cauce; PLN: Curvatura en dirección transversal a la pendiente; PRF: Curvatura en la dirección de la pendiente; PEND: Pendiente; RADV: Radiación media en verano; RADO: Radiación media en otoño; RADI: Radiación media en invierno; RADP: Radiación media en primavera.

Características del suelo: AREN: Contenido en arena del suelo (%); LIM: Contenido en limos(%); ARC: Contenido en arcillas (%); POROS: Porosidad (%);

M:O: Contenido en materia orgánica (%); C.C. Capacidad de campo; P.M.P.: Punto de marchitamiento permanente.

EVENTO	Preci.	Imax	Ipro	PER 3cm		PER 15cm		LIQ		MAR		STI	
				Hant	CH	Hant	CH	Hant	CH	Hant	CH	Hant	CH
10/07/96	1.45	12.55	5.74	0.03	0.000	0.04	0.000	0.06	0.000	0.01	0.000	0.05	0.000
01/09/96	2.61	1.88	1.09	0.04	0.000	0.05	0.000	0.07	0.000	0.02	0.000		0.000
09/09/96	1.16	4.5	0.61	0.04	0.000	0.05	0.000	0.07	0.000	0.01	0.000	0.04	0.000
12/09/96	31.9	14.7	0.63	0.04	0.220	0.05	0.241	0.09	0.217	0.02	0.166	0.05	0.214
14/10/96	19.4	10	1.33	0.12	0.136	0.14	0.033	0.13	0.183	0.04	0.155	0.08	0.175
12/11/96	2.03	1.39	0.16	0.11	0.000	0.13	0.000	0.15	0.000	0.05	0.000	0.10	0.000
14/11/96	3.77	6.71	0.96	0.12	0.016	0.13	0.002	0.17	0.047	0.07	0.022	0.13	0.055
16/11/96	9.28	8.56	1.058	0.14	0.049	0.13	0.001	0.20	0.077	0.09	0.093	0.17	0.083
05/12/96	22	9.88	0.198	0.10	0.176	0.12	0.157	0.15	0.147			0.11	0.142
09/12/96	13.3	10.5	0.76	0.21	0.017	0.23	0.000	0.23	0.031			0.20	0.035
15/12/96	5.51	3.93	0.78	0.19	0.026	0.22	0.001	0.21	0.045	0.11	0.040	0.18	0.056
16/12/96	3.77	2.48	1.47	0.21	0.011	0.22	0.003	0.25	0.031	0.15	0.040	0.22	0.032
19/12/96	13.3	9.56	0.76	0.21	0.021	0.22	0.007	0.26	0.024	0.16	0.036	0.22	0.033
20/12/96	1.45	1.94	0.61	0.21	0.004	0.23	-0.001	0.27	0.009	0.17	0.013	0.24	0.008
29/12/96	8.99	12.6	1.48	0.18	0.088	0.21	0.035	0.22	0.065	0.11	0.072	0.19	0.059
31/12/96	1.16	1.18	0.17	0.23	0.000	0.24	0.000	0.25	0.000	0.16	0.000	0.22	0.000
01/01/97	21.5	8.32	0.59	0.22	0.076	0.24	0.095	0.25	0.041	0.13	0.076	0.22	0.052
05/01/97	8.41	7.89	0.77	0.25	0.022	0.27	0.008	0.25	0.047	0.14	0.066	0.23	0.034
08/01/97	1.74	2.44	1.4	0.24	0.003	0.27	-0.001	0.25	0.014	0.15	0.012	0.23	0.011
17/01/97	1.16	3.19	1.3	0.21	0.000	0.24	0.000	0.21	0.000	0.11	0.000	0.18	0.000
20/01/97	1.74	2.87	0.13	0.21	0.000	0.24	0.000	0.20	0.000	0.10	0.000	0.18	0.000
23/01/97	17.7	6.33	0.55	0.21	0.034	0.24	0.013	0.21	0.078	0.10	0.086	0.19	0.061
03/02/97	3.48	18.2	4.19	0.21	0.002	0.24	0.001	0.25	0.010	0.13	0.000	0.20	0.023
25/03/97	2.32	2.34	0.37	0.11	0.000	0.15	0.000	0.10	0.000	0.03	0.000	0.07	0.000
09/04/97	13.6	6.39	1.14	0.09	0.083	0.13	0.001	0.09	0.207	0.03	0.175	0.05	0.191
21/04/97	14.2	11.1	0.65	0.10	0.069	0.13	0.000	0.14	0.150	0.06	0.131	0.09	0.160
23/04/97	2.9	13.6	0.19	0.16	0.000	0.14	0.000	0.28	0.000	0.13	0.000	0.20	0.000
25/04/97	2.32	3.33	0.2	0.13	0.000	0.15	0.000	0.21	0.000	0.12	0.000	0.17	0.000
14/05/97	1.16	0.38	0.094	0.06	0.000	0.10	0.000	0.10	0.000	0.04	0.000	0.06	0.000
31/05/97	16	25.9	2.21	0.05	0.232	0.07	0.167	0.09	0.202	0.03	0.143	0.05	0.198
18/06/97	2.9	10.8	2.06	0.09	0.000	0.13	0.000	0.08	0.000	0.03	0.000	0.04	0.000
27/09/97	80.9			0.06	0.225	0.10	0.152	0.10	0.206	0.04	0.158	0.06	0.205
03/11/97	4.78			0.16	0.027	0.16	0.004	0.14	0.088			0.14	0.064
05/12/97	65.2			0.14	0.205	0.15	0.213	0.17	0.136	0.06	0.149	0.14	0.137

Tabla A.7.3: Eventos registrados durante el periodo de estudio que provocaron un aumento en la humedad del suelo. Para cada evento se presenta el volumen total de precipitación (Preci.) en mm, las intensidades máxima (Imax) y promedio (Ipro) en ambos casos se refiere a $I_{5\text{minutos}}$ en mm/h. Para cada tesela se representa la humedad antecedente (Hant) y el cambio que se produce en la humedad del suelo tras el evento (CH) en mm.

	HVER	HOTO	HINV	HPRIM
ARE	0.24	0.44	0.47	0.11
W	0.31	0.58	0.58	0.29
DIST	0.66	0.55	0.61	0.38
PLN	0.61	0.68	0.71	0.38
PRF	-0.17	-0.12	-0.28	-0.08
PEND	-0.17	-0.45	-0.48	-0.29
RADV	0.15	0.44	0.50	0.22
RADO	0.12	0.40	0.41	0.28
RADI	0.12	0.40	0.41	0.28
RADP	0.16	0.45	0.50	0.22
AREN	0.07	0.19	0.45	0.01
LIM	-0.10	-0.19	-0.44	-0.02
ARC	0.04	-0.17	-0.43	0.00
POROS	0.96	0.85	0.55	0.88
M.O.	0.15	0.28	0.39	0.29
C.C.	0.15	0.43	0.43	0.25
P.M.P.	0.31	0.13	0.00	0.23

Tabla A.7.2. Coeficientes de correlación de Pearson. Valores en negrita son significativos para una $p < 0.05$, mientras que sombreados en gris aparecen los coeficientes con $p < = 0.1$

SECCION A.7.4: ECUACIONES DE AUMENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LAS TESELAS

Se presentan las ecuaciones que estiman el aumento de la humedad del suelo en cada tesela en función de la precipitación y la humedad antecedente del suelo. Se calculan 2 ecuaciones en cada para precipitaciones superiores o iguales a 5mm (ecuación a) y otra para precipitaciones inferiores a 5mm (ecuación b).

DH : Aumento de la humedad (mm)

P : Precipitación (mm)

H_a : Humedad antecedente (mm)

I_p : Intensidad de la lluvia (mm/h) solo aparece en ecuación b.

- Tesela PER:

$$a) \mathit{DH} = 0.0033 + 0.057 * \log(P) - 0.592 * H_a$$

$$F(2,13)=62.3; p<0.0000; R^2= 0.91$$

$$b) \mathit{DH} = 0.008 + 0.004 * \log(P) + 0.0001 * I_p - 0.047 H_a$$

$$F(3,7)=3.08; p<0.1; R^2= 0.6$$

- Tesela LIQ:

$$a) \mathit{DH} = 0.216 + 0.014 * \log(P) - 0.929 * H_a$$

$$F(2,13)=121.7; p<0.0000; R^2= 0.95$$

b) $DH = 0.067 + 0.005 * \log(P) + 0.003 * I_p - 0.294H_a$
 $F(3,7)=19.72; p<0.0008; R^2 = 0.89$

• Tesela STI:

a) $DH = 0.154 + 0.019 * \log(P) - 0.815 * H_a$
 $F(2,13)=195.24; p<0.0000; R^2 = 0.97$

b) $DH = 0.022 + 0.002 * \log(P) + 0.003 * I_p - 0.104H_a$
 $F(3,7)=10.9; p<0.005; R^2 = 0.8$

• Tesela MAR:

a) $DH = 0.092 + 0.021 * \log(P) - 0.765 * H_a$
 $F(2,11)=12.08; p<0.0000; R^2 = 0.96$

b) $DH = 0.011 + 0.004 * \log(P) + 0.0004 * I_p - 0.075H_a$
 $F(3,7)=2.99; p<0.1; R^2 = 0.58$

SECCION A.7.5: ECUACIONES DE SECADO DEL SUELO EN LAS TESELAS

Se calculan ecuaciones diferentes para cada tesela y dentro de cada tesela para cada estación del año. Se calculan mediante un modelo de regresión múltiple paso a paso y sólo se incluyen las variables significativas (medias diarias).

$\tilde{N}H$: Disminución diaria de la humedad del suelo (mm)

t : n° de días desde la última lluvia (días).

R : Radiación global (W/m^2)

T : Temperatura del aire ($^{\circ}C$)

V : Velocidad del viento (m/s)

• Tesela PER:

a) Invierno: $\tilde{N}H = -2.129 + 2.464 * \log(t) + 0.576 * V$
 $F(2,93)=209.7; p<0.0000; R^2 = 0.82$

b) Primavera: $\tilde{N}H = -2.984 + 3.358 * \log(t) + 0.127 * T$
 $F(3,59)=360.4; p<0.0000; R^2 = 0.92$

c) Verano: c.1: Si $H > 0.05mm$: $\tilde{N}H = 2.3999 + 4.916 * \log(t) - 0.178 * T$
 $F(2,64)=834.84; p<0.0000; R^2 = 0.97$

c.1: Si $H < 0.05mm$: $\tilde{N}H = 0.33 + 1.941 * \log(t) - 0.003 * R$
 $F(2,24)=827.02; p<0.0000; R^2 = 0.98$

d) Otoño: $\tilde{N}H = -1.537 + 3.477 * \log(t) + 0.026 * R - 0.184 * T$
 $F(3,63)=275.3; p<0.0000; R^2 = 0.93$

- Tesela STI:

a) Invierno: $\tilde{N}H = -2.382 + 3.161*\log(t) + 0.785*V$

$$F(2,69)=286.2; p<0.0000; R^2= 0.84$$

b) Primavera: $\tilde{N}H = -0.2299 + 5.757*\log(t)$

$$F(1,60)=770.3; p<0.0000; R^2= 0.93$$

c) Verano: c.1: Si H> 0.05mm: $\tilde{N}H = 4.734 + 3.030*\log(t)$

$$F(1,41)=252.24; p<0.0000; R^2= 0.86$$

c.1: Si H< 0.05mm: $\tilde{N}H = 3.411 + 0.601*\log(t) + 0.006* R + 0.226*V$

$$F(3,23)=42.8; p<0.0000; R^2= 0.85$$

d) Otoño: $\tilde{N}H = -2.162 + 3.971*\log(t) + 0.021*R - 0.184*T$

$$F(3,65)=639.3; p<0.0000; R^2= 0.95$$

- Tesela LIQ:

a) Invierno: $\tilde{N}H = -1.821 + 3.039*\log(t) + 0.011*R$

$$F(2,93)=451.7; p<0.0000; R^2= 0.91$$

b) Primavera: $\tilde{N}H = -4.486 + 5.612*\log(t) + 0.178*T$

$$F(2,54)=360.7; p<0.0000; R^2= 0.93$$

c) Verano: c.1: Si H> 0.05mm: $\tilde{N}H = 3.721 + 3.544*\log(t)$

$$F(1,41)=313.1; p<0.0000; R^2= 0.88$$

c.1: Si H< 0.05mm: $\tilde{N}H = 2.526 + 0.835*\log(t) + 0.009* R$

$$F(2,24)=49.06; p<0.0000; R^2= 0.80$$

d) Otoño: $\tilde{N}H = -2.147 + 4.640*\log(t) + 0.035*R - 0.199*T$

$$F(3,64)=273.4; p<0.0000; R^2= 0.93$$

- Tesela MAR:

a) Invierno: $\tilde{N}H = 0.835 + 2.39*\log(t) - 0.009*R$

$$F(2,93)=228.59; p<0.0000; R^2= 0.83$$

b) Primavera: $\tilde{N}H = 2.458 + 4.134*\log(t) - 0.121*T$

$$F(2,59)=391.7; p<0.0000; R^2= 0.93$$

c) Verano: c.1: Si H> 0.05mm: $\tilde{N}H = 3.155 + 2.099*\log(t)$

$$F(1,41)=254.4; p<0.0000; R^2= 0.86$$

c.1: Si H< 0.05mm: $\tilde{N}H = 0.706 + 0.268*\log(t) + 0.004* R$

$$F(2,24)=3.03; p<0.000; R^2= 0.72$$

d) Otoño: $\tilde{N}H = -0.997 + 3.249*\log(t) + 0.015*R$

$$F(2,50)=814.1; p<0.0000; R^2= 0.97$$

SECCION A.9.1. MODELO DE GENERACION DE ESCORRENTIA.

A.9.1.1.- Información inicial que se introduce al modelo

La información que requiere el modelo para su funcionamiento es:

Precipitación

Se incluye como un archivo numérico con la precipitación en milímetros cada dos minutos.

Topografía

A partir del M.D.E. se construye un mapa de dirección local del flujo (a partir de un algoritmo de dirección de flujo que determina desde cada celda a cual de sus 8 celdas vecinas más cercanas debe cederle el agua según la inclinación ladera abajo).

Tipos de teselas

Mapa de teselas de la microcuenca donde se lleva a cabo la simulación. Para cada celda de 1 m² sabemos qué tipo de tesela es y le podemos asignar la tasa de infiltración según la tesela.

Humedad del suelo (máxima y antecedente al evento).

Se introduce el valor de la humedad máxima registrada en el suelo para cada tipo de tesela en milímetros: teselas PER y ANU (0.3564); tesela LIQ y LQC (0.3625); tesela STI (0.3063) y teselas LIM y MAR (0.2547). Estos valores se obtienen a partir del estudio de los regímenes de humedad del suelo en las teselas más representativas (capítulo 7).

También se incluye el mapa de humedad antecedente del suelo con la humedad del suelo en cada tesela antes de comenzar la lluvia. Para obtener estos valores en cada tesela aplicamos el modelo de predicción de la humedad del suelo para cada tesela, a partir de la distribución de la precipitación tal y como se expone en el capítulo 7

Profundidad del suelo

Los experimentos de simulación de lluvia (Solé et al. 1997) y las observaciones de campo ponen de manifiesto que los frentes de humectación tras la lluvia son poco profundos en todas las teselas. Suponemos que el espesor de suelo activo en la generación de escorrentía corresponde a la capa de suelo hasta donde llega el frente de humectación en cada tesela medido en las simulaciones de lluvia

tras 1 hora de lluvia (PER y ANU: 10cm; STI: 11cm; LQC: 11cm; LIQ: 5cm; LIM 6cm; MAR: 2cm) y suponemos que por debajo de este espesor o no existe suelo o no llega el agua.

Localización del aforo

Se incluye un mapa que informa de la localización del aforo de la cuenca.

Temporizador

Se ha de indicar el intervalo de tiempo para el que se ejecuta cada horquilla completa del modelo (2 minutos) y el número de horquillas o pasos de que consta el evento (número de intervalos de dos minutos del evento de precipitación, que depende de la duración del mismo).

A.9.1.2.- Simulación de la escorrentía.

La escorrentía se simula a escala de evento de precipitación y se supone que el mecanismo de generación de escorrentía es Hortoniano y no se tienen en cuenta las pérdidas de agua por evapotranspiración. Además el objetivo de este modelo más que predecir la escorrentía total de la cuenca es disponer de una herramienta para analizar las relaciones espaciales en términos de escorrentía entre las teselas.

En primer lugar se calcula la cantidad de lluvia sobre cada m^2 cada dos minutos.

Para calcular la cantidad de agua procedente de la lluvia que se infiltra en cada celda, se introducen las ecuaciones de Horton para cada tipo de tesela, procedentes de las simulaciones de lluvia (Solé et al. 1997). Se incluyen dos ecuaciones para cada tesela sobre suelo seco y sobre suelo saturado

- Teselas PER y ANU

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 47.7 + (47.02 - 47.7) e^{-0.21t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 47.7 + (47.02 - 47.7) e^{-0.21t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

- Tesela STI

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 24.11 + (58.82 - 24.11) e^{-0.199t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 24.11 + (58.82 - 24.11) e^{-0.199t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

- Tesela LQC

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 41.17 + (57.06 - 41.17) e^{-0.69t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 40.47 + (62.94 - 40.47) e^{-2.31t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

- Tesela LIQ

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 12.03 + (57.09 - 12.03) e^{-1.3t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 12.46 + (61.95 - 12.46) e^{-1.37t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

- Tesela LIM

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 25.29 + (59.75 - 25.29) e^{-0.52t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 8.90 + (92 - 8.90) e^{-2.11t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

- Tesela MAR

a) Sobre suelo seco: $f_{i1} = 13.78 + (55.47 - 13.78) e^{-0.77t}$

b) Sobre suelo saturado: $f_{i2} = 2.5 + (91.2 - 2.5) e^{-2.59t}$

con t: tiempo acumulado desde el principio del evento

y $f_{i(1 \text{ ó } 2)}$: tasas de infiltración en mm/h

En los cauces, según la pendiente del cauce, se estima si existen o no depósitos de sedimentos. Estudios en la zona ponen de manifiesto que por debajo de una pendiente de 7° se acumulan sedimentos (Nogueras, 1998 comunicación personal). En las zonas donde no aparecen sedimentos se supone que la capacidad de infiltración de la roca madre es 0, y cuando aparecen sedimentos se aplican las tasas de infiltración de la tesela MAR.

Para elegir cual de las dos ecuaciones (la de suelo seco o suelo saturado) se ha de aplicar, se debe calcular como va aumentando el contenido en agua en el suelo a medida que llueve. En cada intervalo de tiempo se calcula para cada m² la cantidad de agua que se infiltra a partir del volumen de lluvia que cae en ese intervalo de tiempo y de las tasas de infiltración en cada tesela, aplicando la primera o la segunda ecuación (tasa sobre suelo seco o saturado) según la humedad del suelo en el intervalo de tiempo anterior.

La cantidad de agua (en m) que se puede infiltrar en cada tesela es Inf_t

$$Inf_t = f_{i1 \text{ ó } 2} * t / 1000$$

siendo $f_{i1 \text{ ó } 2}$ la tasa de infiltración sobre suelo seco o saturado que se elige según la humedad del suelo en el intervalo de tiempo anterior. En el primer intervalo se decide qué tasa se aplica según la humedad antecedente al evento.

y t : fracción de tiempo que dura el intervalo (en horas).

El volumen de agua procedente de la lluvia que entra en el suelo en el intervalo de tiempo t (V_{wint}) es:

$$\text{Si } P_{vt} > Inf_t \text{ entonces } Inf_t = V_{wint}$$

$$\text{Si } P_{vt} < Inf_t \text{ entonces } P_{vt} = V_{wint}$$

siendo P_{vt} el volumen de agua procedente de la lluvia que cae en ese intervalo de tiempo.

El nuevo volumen de agua en el suelo en el intervalo de tiempo t (V_{wt}) es igual al volumen de agua que se infiltra más el volumen existente en el intervalo de tiempo anterior ($V_{w(t-1)}$)

$$V_{wt} = V_{wint} + V_{w(t-1)}$$

Si $V_{wt} < V_{wmáx}$ entonces se aplica la tasa f_{i1} para calcular la escorrentía

Si $V_{wt} = V_{wmáx}$ entonces se aplica la tasa f_{i2} para calcular la escorrentía.

En el primer intervalo de tiempo el volumen de agua en el suelo $V_{w(t-1)}$ es la humedad antecedente introducida en el modelo (q_{ini}) por el espesor de suelo (D_{pt}). Y a este volumen de agua inicial en el suelo se le va sumando el volumen de agua procedente de la lluvia y de la reinfiltración de la escorrentía, aumentando así el volumen de agua en el suelo. Cuando el volumen de agua en el suelo se iguala al volumen máximo de agua que puede tener ese suelo, a partir de ese intervalo de tiempo se aplica la ecuación de Horton sobre suelo saturado.

Todas estas operaciones se hacen en cada m^2 y las ecuaciones tendrán parámetros con valores diferentes en función de la tesela a la que pertenezca la celda en cuestión.

La ecuación que calcula la escorrentía superficial es:

$$E_t = P - f_t$$

E_t : Escorrentía en el intervalo t en cada m^2 (mm/h)

P : Intensidad de la precipitación en mm/h

$f_t = f_{i1} \text{ ó } f_{i2}$ según el volumen de agua en el suelo en el intervalo de tiempo (mm/h).

Posteriormente mediante un algoritmo de distribución de flujo disponible en PCRaster “accuthresholdflux” (Karszenberg, 1996) se distribuye la escorrentía final sobre el modelo digital de elevaciones (siguiendo la dirección de la máxima pendiente).

Parte de esta escorrentía se puede infiltrar en el suelo (suponemos que con la misma tasa f_i). Esta cantidad que se puede infiltrar en cada celda se calcula mediante el algoritmo “accuthresholdstate” (Kassenberg, 1996) El volumen de agua se infiltra también contribuye a aumentar la humedad del suelo en este intervalo de tiempo y se suma a V_{wt} .

Cada intervalo de 2 minutos se guarda el mapa de escorrentía en cada m^2 de la cuenca, el mapa de humedad y el caudal que pasa por el aforo de la cuenca. Al final obtenemos un archivo con los caudales en mm/s cada 2 minutos en el punto de aforo de la cuenca y bs mapas con la escorrentía (mm/s) en cada m^2 de la cuenca.

SECCION A.9.2. REGRESIONES ESCORRENTIA vs PRECIPITACION PARA CADA TESELA.

Las ecuaciones de regresión que relacionan la Escorrentía, E , (mm) con la Precipitación, P (mm) para cada tesela son:

- Tesela PER:

$$E = -0.26 + 0.11 * P \quad F(1,75) = 25.88; p < 0.0000; R^2 = 0.26$$

- Tesela LQC:

$$E = -1.62 + 0.25 * P \quad F(1,45) = 55.96; p < 0.0000; R^2 = 0.55$$

- Tesela LIQ:

$$E = -2.06 + 0.38 * P \quad F(1,54) = 98.4; p < 0.0000; R^2 = 0.65$$

- Tesela LQD:

$$E = -1.27 + 0.25 * P \quad F(1,50) = 34.85; p < 0.0000; R^2 = 0.41$$

- Tesela LIM:

$$E = -1.93 + 0.29 * P \quad F(1,49) = 50.06; p < 0.0000; R^2 = 0.51$$

- Tesela MAR:

$$E = -2.59 + 0.41 * P \quad F(1,27) = 50.06; p < 0.0000; R^2 = 0.7$$

SUPERFICIE PER				P1			P10			P11		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	1.25	10.48	0.61	0.63	5.24	0.10	0.50	4.19	0.19
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.04	0.37	d	0.23	2.02	d	0.02	0.18	d
15/10/94	21.87	7.61	51.31	1.65	7.53	2.50	5.90	26.96	28.17	6.67	30.49	1.48
04/11/94	22.63	2.65	23.75	1.02	4.51	0.22	2.88	12.70	0.19	3.58	15.83	0.15
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.02	0.20	d	0.56	5.39	0.18	0.04	0.40	d
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.04	0.80	d	0.31	5.99	d	0.04	0.80	d
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.00	0.00	0.00	0.15	1.93	d	0.00	0.00	0.00
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.29	4.00	0.01	0.02	0.29	d	0.00	0.00	0.00
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.13	1.80	d	0.08	1.20	d	0.02	0.30	d
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.27	4.06	d	0.25	3.75	d	0.38	5.62	d
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.02	0.21	d	0.10	1.06	d	0.01	0.08	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.04	0.85	d	0.02	0.42	d	0.10	2.11	d
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.42	5.53	d	0.42	5.53	d	0.71	9.39	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	0.60	5.08	0.13	2.85	23.98	0.41	3.42	28.71	0.80
23/01/96	22.34	1.35	12.79	0.58	2.61	1.77	2.79	12.50	0.71	3.96	17.72	0.50
01/02/96	25.53	0.91	14.12	0.33	1.31	d	2.71	10.61	0.64	1.50	5.88	0.24
09/04/96	9.01	2.00	35.02	1.90	9.89	0.37	7.96	41.53	11.02	7.58	39.57	1.60
28/04/96	9.01	0.65	19.35	0.33	3.70	d	0.33	3.70	d	1.00	11.09	0.53
06/05/96	8.21	24.65	49.29	0.71	5.77	d	1.04	8.49	1.96	2.81	22.92	0.62
11/09/96	32.13	0.73	17.09	4.17	12.60	0.26	5.00	15.12	0.63	4.67	14.12	0.33
14/10/96	19.48	1.55	11.62	1.75	9.01	0.27	1.54	7.93	0.61	1.13	5.79	0.11
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.00	0.00	0.00	0.40	6.20	d	0.63	9.80	d
16/11/96	9.28	1.06	8.56	0.48	5.16	1.17	1.35	14.59	0.30	0.67	7.18	0.10
05/12/96	36.83	0.34	12.16	0.83	2.26	0.23	4.27	11.60	0.10	3.21	8.71	0.10
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.01	0.05	d	0.40	1.73	d	0.13	0.55	d
29/12/96	8.99	1.72	14.62	0.33	3.71	d	1.35	15.06	0.12	0.50	5.56	0.09
02/01/97	31.03	0.30	9.65	0.50	1.61	1.02	3.33	10.74	0.28	0.58	1.88	0.92
22/01/97	17.74	0.64	7.34	0.00	0.00	0.00	1.25	7.07	0.10	0.02	0.12	d
31/05/97	18.50	2.58	30.03	2.58	16.20	n.d.	6.17	38.66	n.d.	3.63	22.73	n.d.

Tabla A.9.1 Se presenta para la tesela PER las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I_5 (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I_5 máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm , el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m^2 . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

SUPERFICIE LIQ				P9			P4		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	3.13	26.21	3.12	3.23	27.08	6.20
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.33	2.94	d	0.08	0.73	d
15/10/94	21.87	7.61	51.31	13.42	61.36	10.55	10.00	45.73	296.97
04/11/94	22.63	2.65	23.75	9.90	43.73	2.80	5.94	26.24	11.84
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.33	3.19	0.43	0.31	2.99	0.03
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.21	3.99	d	0.13	2.39	d
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.04	0.55	d	0.02	0.30	d
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.33	4.58	0.03	0.83	11.44	0.14
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.50	7.18	0.07	0.63	8.98	0.61
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.48	7.18	0.12	0.42	6.25	0.05
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.25	2.54	d	0.01	0.08	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.13	2.54	d	0.08	1.69	d
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.50	6.63	d	0.17	2.21	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	2.65	22.23	0.39	3.00	25.21	0.43
23/01/96	22.34	1.35	12.79	3.00	13.43	0.64	7.04	31.52	5.18
01/02/96	25.53	0.91	14.12	3.42	13.38	0.46	8.58	33.62	5.70
09/04/96	9.01	2.00	35.02	3.50	18.26	2.19	6.08	31.74	30.90
28/04/96	9.01	0.65	19.35	0.77	8.55	0.56	1.81	20.11	3.13
06/05/96	8.21	24.65	49.29	2.71	22.07	9.24	6.60	53.81	95.65
11/09/96	32.13	0.73	17.09	12.42	37.56	5.76	15.21	46.00	50.97
14/10/96	19.48	1.55	11.62	3.46	17.80	0.72	3.67	18.87	10.55
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.00	0.00	0.00	0.19	2.94	d
16/11/96	9.28	1.06	8.56	1.88	20.20	0.25	1.42	15.27	1.39
05/12/96	36.83	0.34	12.16	8.79	23.87	0.84	7.42	20.14	1.75
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.90	3.91	0.46	0.75	3.27	0.45
29/12/96	8.99	1.72	14.62	3.13	34.76	1.54	5.04	56.08	4.67
02/01/97	31.03	0.30	9.65	11.17	35.99	32.08	12.50	40.28	4.83
22/01/97	17.74	0.64	7.34	4.21	23.79	0.61	2.79	15.78	1.77
31/05/97	18.50	2.58	30.03	11.25	70.53	n.d.	6.88	43.10	n.d.

Tabla A.9.2 Se presenta para la tesela LIQ las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I_5 (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I_5 máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm , el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m^2 . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

SUPERFICIE LQC				P2			P3		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	0.04	0.35	d	0.04	0.35	d
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.02	0.18	d	0.02	0.18	d
15/10/94	21.87	7.61	51.31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
04/11/94	22.63	2.65	23.75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.00	0.00	0.00	n.d.	n.d.	n.d.
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.04	0.57	d	0.06	0.86	d
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.00	0.00	0.00	n.d.	n.d.	n.d.
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	0.94	7.88	0.12	1.52	12.78	0.31
23/01/96	22.34	1.35	12.79	10.73	48.02	1.37	n.d.	n.d.	n.d.
01/02/96	25.53	0.91	14.12	6.42	25.13	54.61	0.83	3.26	0.77
09/04/96	9.01	2.00	35.02	2.17	11.31	1.01	n.d.	n.d.	n.d.
28/04/96	9.01	0.65	19.35	0.98	10.86	0.32	0.23	2.54	d
06/05/96	8.21	24.65	49.29	2.19	17.82	5.01	2.08	16.98	6.31
11/09/96	32.13	0.73	17.09	4.58	13.86	1.19	7.08	21.43	4.00
14/10/96	19.48	1.55	11.62	2.13	10.94	0.47	n.d.	n.d.	1.13
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.04	0.65	d	0.00	0.00	0.00
16/11/96	9.28	1.06	8.56	0.85	9.20	0.07	0.29	3.14	d
05/12/96	36.83	0.34	12.16	6.25	16.97	0.40	4.17	11.31	0.44
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.83	3.64	0.22	0.54	2.36	0.56
29/12/96	8.99	1.72	14.62	3.42	38.01	4.56	3.13	34.76	0.51
02/01/97	31.03	0.30	9.65	11.92	38.40	1.07	10.21	32.90	0.86
22/01/97	17.74	0.64	7.34	2.83	16.02	0.28	2.63	14.84	0.49
31/05/97	18.50	2.58	30.03	6.33	39.71	n.d.	4.71	29.52	n.d.

Tabla A.9.3 Se presenta para la tesela LQC las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I_5 (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I_5 máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm , el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m^2 . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

SUPERFICIE LQD				P12		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	2.38	19.92	20.36
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.21	1.83	0.11
15/10/94	21.87	7.61	51.31	n.d.	n.d.	n.d.
04/11/94	22.63	2.65	23.75	n.d.	n.d.	n.d.
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	n.d.
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.63	5.99	1.01
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.19	3.59	d
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.04	0.55	d
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.00	0.00	0.00
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.23	3.29	d
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.17	2.50	d
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.02	0.21	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.02	0.42	d
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.02	0.28	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	3.58	30.11	0.84
23/01/96	22.34	1.35	12.79	7.35	32.92	6.16
01/02/96	25.53	0.91	14.12	1.50	5.88	1.03
09/04/96	9.01	2.00	35.02	7.52	39.25	148.08
28/04/96	9.01	0.65	19.35	0.44	4.85	4.76
06/05/96	8.21	24.65	49.29	2.88	23.43	55.39
11/09/96	32.13	0.73	17.09	14.17	42.85	90.11
14/10/96	19.48	1.55	11.62	2.29	11.79	10.29
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.13	1.96	d
16/11/96	9.28	1.06	8.56	1.04	11.22	1.56
05/12/96	36.83	0.34	12.16	6.21	16.86	5.67
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.63	2.73	0.29
29/12/96	8.99	1.72	14.62	4.17	46.35	3.93
02/01/97	31.03	0.30	9.65	12.92	41.63	11.43
22/01/97	17.74	0.64	7.34	2.92	16.49	2.91
31/05/97	18.50	2.58	30.03	9.67	60.61	n.d.

Tabla A.9.4 :Se presenta para la tesela LQD las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I_5 (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I_5 máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm , el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m^2 . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

SUPERFICIE LIM				P5			P6			P7		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	3.25	27.25	16.71	1.54	12.93	9.71	1.83	15.37	42.16
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.00	0.00	0.00	0.17	1.47	d	0.19	1.65	0.46
15/10/94	21.87	7.61	51.31	9.92	45.35	76.62	n.d.	n.d.	n.d.	10.08	46.11	92.84
04/11/94	22.63	2.65	23.75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.19	4.60	20.34	43.25
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	61.07	n.d.	n.d.	24.37	n.d.	n.d.	73.40
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.08	0.80	0.09	0.31	2.99	d	0.08	0.80	d
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.00	0.00	0.00	0.29	5.59	d	0.02	0.40	d
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.02	0.28	d	0.19	2.49	d	0.02	0.28	d
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.44	6.01	0.27	0.40	5.43	0.0427	0.35	4.86	0.25
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.31	4.49	0.09	0.15	2.10	d	0.08	1.20	d
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.25	3.75	d	0.08	1.25	d	0.06	0.94	d
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.01	0.08	d	0.01	0.08	d	0.01	0.08	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.04	0.85	d	0.02	0.42	d	0.02	0.42	d
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.08	1.11	d	0.00	0.00	0.00	0.08	1.11	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	2.54	21.36	0.29	0.56	4.73	0.05	0.44	3.68	1.17
23/01/96	22.34	1.35	12.79	7.29	32.64	34.90	n.d.	n.d.	7.52	n.d.	n.d.	29.92
01/02/96	25.53	0.91	14.12	8.83	34.60	43.54	3.17	12.40	9.55	3.00	11.75	35.38
09/04/96	9.01	2.00	35.02	4.50	23.48	85.39	n.d.	n.d.	21.82	n.d.	n.d.	83.97
28/04/96	9.01	0.65	19.35	1.33	14.79	14.94	0.42	4.62	2.44	0.42	4.62	3.88
06/05/96	8.21	24.65	49.29	9.25	75.37	412.32	3.96	32.25	181.69	4.67	38.02	99.62
11/09/96	32.13	0.73	17.09	18.60	56.27	9.21	7.58	22.94	64.69	n.d.	n.d.	n.d.
14/10/96	19.48	1.55	11.62	4.04	20.80	18.64	n.d.	n.d.	31.09	1.00	5.15	56.60
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.10	1.63	d	0.02	0.33	d	0.00	0.00	0.00
16/11/96	9.28	1.06	8.56	0.88	9.43	2.04	0.23	2.47	d	0.23	2.47	d
05/12/96	36.83	0.34	12.16	7.67	20.82	27.85	3.00	8.15	8.13	2.75	7.47	40.05
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.33	1.45	d	0.08	0.36	d	0.06	0.27	d
29/12/96	8.99	1.72	14.62	4.38	48.67	14.08	1.88	20.86	6.51	1.67	18.54	15.84
02/01/97	31.03	0.30	9.65	11.13	35.85	51.33	4.75	15.31	5.75	2.46	7.92	0.20
22/01/97	17.74	0.64	7.34	1.88	10.60	4.71	0.63	3.53	1.32	0.42	2.36	2.62
31/05/97	18.50	2.58	30.03	7.00	43.89	n.d.	3.63	22.73	n.d.	3.50	21.94	n.d.

Tabla A.9.5 :Se presenta para la tesela LIM las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I_5 (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I_5 máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm, el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m^2 . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

SUPERFICIE MAR				P8		
EVENTO	P	Ipro	Imáx	E	C.Es.	SED
29/09/94	11.92	1.52	15.40	2.94	24.63	43.80
09/10/94	11.36	1.03	4.44	0.02	0.18	d
15/10/94	21.87	7.61	51.31	11.90	54.40	80.67
04/11/94	22.63	2.65	23.75	8.33	36.82	37.95
28/02/95	41.50	3.20	20.37	n.d.	n.d.	n.d.
07/03/95	10.44	1.19	5.61	0.29	2.79	0.43
11/03/95	5.22	2.30	6.21	0.04	0.80	d
20/06/95	7.54	1.14	4.91	0.00	0.00	0.00
26/06/95	7.28	4.23	17.02	0.00	0.00	0.00
23/08/95	6.96	5.15	9.65	0.27	3.89	1.96
07/12/95	6.67	1.11	6.88	0.21	3.12	d
15/12/95	9.86	0.37	3.84	0.08	0.85	d
30/12/95	4.93	0.42	4.05	0.04	0.85	d
09/01/96	7.54	1.28	4.20	0.08	1.11	d
17/01/96	11.90	1.24	16.76	1.81	15.23	1.11
23/01/96	22.34	1.35	12.79	7.92	35.43	48.58
01/02/96	25.53	0.91	14.12	9.38	36.72	43.72
09/04/96	9.01	2.00	35.02	n.d.	n.d.	n.d.
28/04/96	9.01	0.65	19.35	0.90	9.94	7.03
06/05/96	8.21	24.65	49.29	4.15	33.78	338.43
11/09/96	32.13	0.73	17.09	15.25	46.13	188.89
14/10/96	19.48	1.55	11.62	3.88	19.94	28.10
15/11/96	6.38	0.07	6.71	0.04	0.65	d
16/11/96	9.28	1.06	8.56	1.13	12.12	3.76
05/12/96	36.83	0.34	12.16	8.00	21.72	32.18
18/12/96	22.91	0.27	9.56	0.63	2.73	0.81
29/12/96	8.99	1.72	14.62	4.17	46.35	32.81
02/01/97	31.03	0.30	9.65	11.25	36.26	22.62
22/01/97	17.74	0.64	7.34	2.81	15.90	11.21
31/05/97	18.50	2.58	30.03	5.54	34.74	n.d.

Tabla A.9.6 :Se presenta para la tesela MAR las características principales de cada evento de precipitación, como P precipitación total en mm ; Ipro en mm/h es la I₅ (Intensidad de la lluvia a intervalos de 5 minutos) promedio; Imáx en mm/h es la I₅ máxima (Intensidad máxima en intervalos de 5 minutos). Además para cada parcela situada en ese tipo de tesela se presenta la Escorrentía (E) en mm , el Coeficiente de Escorrentía (C.Es) en %, y el total de sedimentos exportados (SED) en g/m² . n.d.: no disponible; d: cantidad despreciable.

LADERA S-W	Col.1	Col. 2	Col.3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9
Fila 1 (p. alta lad.)	3.11	0.54	0.36	0.50	0.24	0.41	-0.23	0.03	-0.67
Fila 2	-0.13	0.54	-2.16	0.62	-0.10	-0.14	0.97	0.03	0.12
Fila 3	0.35	1.00	-0.77	0.04	-1.66	-3.07	4.59	-0.16	-1.49
Fila 4	-2.17	-5.85	-0.05	0.47	-0.16	-0.02	0.56	0.44	-0.43
Fila 5	-4.43	-0.53	0.61	-0.06	-4.86	0.77	4.57	0.13	0.10
Fila 6	-8.13	0.40	0.95	1.39	-1.26	4.91	0.42	-0.14	0.80
Fila 7	-43.74	0.05	1.69	-1.80	0.53	-4.00	0.42	0.88	0.47
Fila 8	-32.16	-0.88	4.44	-0.73	-22.42	-7.98	-0.16	0.66	2.70
Fila 9(p. baja lad.)	-4.59	-8.03	0.20	0.23	5.82	0.64	-13.90	1.63	n.d.

Tabla A.9.7: Tasas de erosión (mm/año) para el periodo de muestreo del 8/12/95 al 14/11/97, para cada clavo situado en la ladera SW. Las filas y columnas (col.) representan la cuadrícula de clavos de 1m de tamaño de malla. Los valores negativos representan erosión y los positivos deposición.

LADERA SUR EVENTO DEL 27/9/97 AL 5/10/97									
	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9
Fila 1 (p. alta lad.)	2.26	0.52	0.08	0.97	-2.53	-0.86	-1.18	-1.05	-3.5
Fila 2	-1.45	-0.12	-7.3	-0.03	-0.11	-4.07	0.73	-0.81	-8.22
Fila 3	-0.14	-1.69	-1.54	-1.2	-4.52	-6.51	-0.1	-7.41	-0.37
Fila 4	-2.34	-11.8	-6.55	-15.99	-0.62	-0.18	-3.15	-0.51	-0.13
Fila 5	-8.34	-0.02	-1.78	-0.96	-3.56	-2.13	-0.65	-5.7	0.01
Fila 6	-15.87	-11.82	-0.32	-0.13	-1.2	4.25	-0.39	-1.14	0.7
Fila 7	-88.14	-0.3	-1.13	-2.94	-1.43	-12.3	-5.6	-0.06	0.29
Fila 8	-65.69	-11.5	-4.08	-8.49	-44.94	-16.88	-8.31	-0.06	-4.12
Fila 9(p. baja lad.)	-10.06	-21.78	-0.69	-0.15	0.66	-0.09	-27.93	0.91	

Tabla A.9.8: Tasas de erosión (mm) para el evento 27/9/97 al 5/10/97, para cada clavo situado en la ladera S-W. Las filas y columnas representan la cuadrícula de clavos de 1m de tamaño de malla. Los valores negativos representan erosión y los positivos deposición.

LADERA NORTE	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8
Fila 1 (p. alta lad.)	-3.66	-3.08	-1.77	-0.47	-0.5	-1.27	-3.48	0.61
Fila 2	-1.65	-0.3	8.14	-3.76	1.18	-0.84	-0.69	-1.92
Fila 3	1.04	-0.11	-0.37	0.38	-1.09	-11.27	0.03	-3.14
Fila 4	-2.64	-1.03	-0.18	-1.13	-0.38	8.8	0.06	-1.99
Fila 5	-4.62	-0.63	-0.45	-0.47	-0.93	-1.7	-0.08	1
Fila 6	0.1	0.09	0.22	1.68	-0.52	-1.78	0.22	0.08
Fila 7	2.2	-0.14	-1.57	1.8	-0.78	-2.7	0.02	-0.27
Fila 8	1.42	3.01	-0.02	0.57	2.13	8.7	-0.64	-3.98
Fila 9	-3.13	-6.84	-0.05	-0.88	0.48	2.44	0.19	1.37
Fila 10	0.26	0.1	-0.2	3.44	-2.67	-3.07	1.35	0.02
Fila 11(p. baja lad.)	0.54	-0.09	0.7	0.86	0.96	0.58	0.4	1.21

Tabla A.9.9: Tasas de erosión (mm/año) para el periodo de muestreo del 8/12/95 al 14/11/97, para cada clavo situado en la ladera N-E. Las filas y columnas representan la cuadrícula de clavos de 1m de tamaño de malla. Los valores negativos representan erosión y los positivos deposición.

LADERA NORTE EVENTO 27/9/97 A 5/10/97								
	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8
Fila 1 (p. alta lad.)	-1.040	-2.330	-1.070	0.130	-0.840	-0.132	0.016	-0.028
Fila 2	-0.010	-0.860	-1.620	-0.940	0.400	-0.016	-0.135	-0.001
Fila 3	-0.690	-0.210	0.230	-1.050	-1.010	-0.815	-0.066	-0.086
Fila 4	-1.490	-0.160	-1.770	-1.100	1.090	-0.054	-0.073	-0.092
Fila 5	-0.790	-0.070	-0.910	-0.040	0.050	-0.060	-0.154	0.038
Fila 6	-0.780	-1.250	-1.440	-0.610	-0.320	-0.002	-0.004	0.014
Fila 7	0.230	-1.560	0.090	0.980	-0.630	-0.017	-0.027	0.144
Fila 8	-0.340	1.520	-0.480	-0.260	-0.850	-0.042	-0.070	-0.160
Fila 9	-1.120	-2.430	0.020	-1.700	0.490	0.153	0.036	0.057
Fila 10	-0.340	0.170	-0.340	1.860	-0.880	-0.161	0.258	0.094
Fila 11(p. baja lad.)	0.060	-0.520	0.110	1.060	0.260	-0.003	0.035	-0.002

Tabla A.9.10: Tasas de erosión (mm) para el evento 27/9/97 al 5/10/97, para cada clavo situado en la ladera N-E. Las filas y columnas representan la cuadrícula de clavos de 1m de tamaño de malla. Los valores negativos representan erosión y los positivos deposición.

CUENCA 3	Sed. susp.	Sed. dis.	Sed. finos	Sed. gruesos	Total sed.	Er. finos	Er. gruesos	Er. Total
EVENTO	(g/L)	(g/L)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)
20/02/92	62.13	1.22	70.24	109.09	179.33	1132.85	1759.52	2892.37
31/10/93	7.22	1.73	2.20	0.47	2.67	35.49	7.55	43.04
16/02/94	n.d.	n.d.	n.d.	3.04	n.d.	n.d.	48.96	n.d.
28/02/94	n.d.	n.d.	n.d.	0.81	n.d.	n.d.	13.13	n.d.
15/10/94	n.d.	n.d.	n.d.	59.42	n.d.	n.d.	958.32	n.d.
04/11/94	n.d.	n.d.	n.d.	32.79	n.d.	n.d.	528.83	n.d.
28/02/95	1.05	1.45	3.08	23.92	27.01	49.74	385.89	435.62
17/01/96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	n.d.
23/01/96	5.28	n.d.	3.44	0.02	3.46	55.49	0.32	55.81
01/02/96	n.d.	n.d.	n.d.	1.07	n.d.	n.d.	17.22	n.d.
05/04/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.76	n.d.	n.d.	12.20	n.d.
06/05/96	n.d.	n.d.	n.d.	35.37	n.d.	n.d.	570.50	n.d.
11/09/96	31.20	2.30	29.25	60.30	89.55	471.80	972.61	1444.41
13/10/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.03	n.d.	n.d.	0.42	n.d.
05/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.49	n.d.	n.d.	7.95	n.d.
29/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.09	n.d.	n.d.	1.49	n.d.
02/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.73	n.d.	n.d.	11.85	n.d.
22/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.16	n.d.
31/05/97	n.d.	n.d.	n.d.	1.60	n.d.	n.d.	25.75	n.d.

Tabla A.9.11: Variables relacionadas con la erosión que se produce en la microcuenca 3 para los eventos que fue posible medir. Sed. Susp.: concentración media de sedimentos en suspensión; Sed. dis.: concentración media de sedimentos disueltos; Sed Finos: Total de sedimentos finos (incluye sólidos en suspensión y disueltos) exportados en cada evento (la concentración media de sedimentos finos de cada evento se multiplica por el total de agua exportada); Sed. gruesos: Total de sedimentos gruesos (arena gruesa, grava o fracciones de mayor tamaño) exportados; Total sed.: Total de sedimentos exportados en cada evento (sólidos disueltos, en suspensión y carga de fondo); Er. Finos: Tasa de erosión de sedimentos finos (transportados en suspensión o disueltos); Er. gruesos: Tasa de erosión de sedimentos gruesos; Er. Total: Tasa de erosión total (gruesos y finos).

CUENCA 2	Sed. susp.	Sed. dis.	Sed.finos	Sed.gruesos	Total sed.	Er.finos	Er.gruesos	Er.Total
EVENUTO	(g/L)	(g/L)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(σ/m^2)	(σ/m^2)	(σ/m^2)
21/06/92	55.44	1.65	67.01	2.76	69.77	297.83	12.28	310.11
07/11/92	n.d.	n.d.	n.d.	38.24	n.d.	n.d.	169.94	n.d.
01/02/93	3.08	1.90	3.38	27.24	30.62	15.01	121.08	136.08
31/10/93	8.96	1.26	7.66	0.00	7.66	34.06	0.00	34.06
16/02/94	2.62	0.91	31.94	26.21	58.15	141.95	116.50	258.45
28/02/94	37.53	1.67	42.14	1.18	43.32	187.29	5.24	192.53
15/10/94	n.d.	n.d.	n.d.	49.67	n.d.	n.d.	220.73	n.d.
04/11/94	n.d.	n.d.	n.d.	8.78	n.d.	n.d.	39.02	n.d.
28/02/95	n.d.	n.d.	n.d.	42.72	n.d.	n.d.	189.87	n.d.
17/01/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.00	n.d.	n.d.	0.00	n.d.
23/01/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	0.22	n.d.
01/02/96	n.d.	n.d.	n.d.	19.44	n.d.	n.d.	86.40	n.d.
05/04/96	n.d.	n.d.	n.d.	16.70	n.d.	n.d.	74.21	n.d.
06/05/96	n.d.	n.d.	n.d.	38.05	n.d.	n.d.	169.10	n.d.
13/09/96	n.d.	n.d.	n.d.	69.87	n.d.	n.d.	310.51	n.d.
14/10/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.07	n.d.	n.d.	0.29	n.d.
10/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.55	n.d.	n.d.	2.46	n.d.
29/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.15	n.d.	n.d.	0.65	n.d.
02/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.39	n.d.	n.d.	1.73	n.d.
22/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.04	n.d.
31/05/97	n.d.	n.d.	n.d.	13.92	n.d.	n.d.	61.85	n.d.

Tabla A.9.12 (Iden. Leyenda tabla A.9.11).

CUENCA 4	Sed. susp.	Sed. dis.	Sed.finos	Sed.gruesos	Total sed.	Er.finos	Er.gruesos	Er.Total
EVENUTO	(g/L)	(g/L)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(σ/m^2)	(σ/m^2)	(σ/m^2)
31/10/93	20.07	1.09	45.22	0.39	45.61	7.83	0.07	7.90
16/02/94	n.d.	n.d.	n.d.	6.09	n.d.	n.d.	1.05	n.d.
28/02/94	n.d.	n.d.	n.d.	5.30	n.d.	n.d.	0.92	n.d.
16/10/94	230.99	2.43	328.43	38.26	334.52	56.87	6.63	57.92
04/11/94	38.64	n.d.	1.71*	17.38	19.09*	0.30*	3.01	3.31*
28/02/95	n.d.	n.d.	n.d.	8.61	n.d.	n.d.	1.49	n.d.
17/01/96	n.d.	n.d.	n.d.	19.55	n.d.	n.d.	3.39	n.d.
23/01/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.88	n.d.	n.d.	0.15	n.d.
01/02/96	13.09	0.92	1.54	11.70	13.24	0.27	2.03	2.29
09/04/96	56.99	0.89	24.36	19.10	43.46	4.22	3.31	7.53
06/05/96	13.70	n.d.	26.86*	38.63	65.48*	4.65*	6.69	11.34*
11/09/96	37.52	1.55	15.95	55.52	71.47	2.76	9.61	12.38
14/10/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	0.01	n.d.
05/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.77	n.d.	n.d.	0.13	n.d.
29/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	0.69	n.d.	n.d.	0.12	n.d.
02/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.68	n.d.	nn	0.12	n.d.
22/01/97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	n.d.
31/05/97	40.17	0.67	18.35	8.81	27.16	3.18	1.53	4.70

Tabla A.9.13 (Iden. leyenda tabla A.9.11) *: En estos eventos no fue posible determinar los sedimentos exportados en forma disuelta.

Anexo

CUENCA 1	Sed. susp.	Sed. dis.	Sed.finos	Sed.gruesos	Total sed.	Er.finos	Er.gruesos	Er.Total
EVENTO	(g/L)	(g/L)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)
28/01/92	3.71	0.91	896.83	456.16	1353.00	47.71	24.27	71.98*
20/02/92	n.d.	n.d.	n.d.	895.49	n.d.	n.d.	47.64	n.d.
03/05/92	83.56	2.27	762.08	30.00	792.08	40.54	1.60	42.14
13/06/92	8.71	1.27	101.42	n.d.	101.42	5.40	n.d.	5.40
21/06/92	55.25	1.82	1492.85	586.25	2079.10	79.42	31.19	110.61
18/10/92	12.95	1.34	1.23	0.00	1.23	0.07	0.00	0.07
07/11/92	23.97	1.71	6417.65	630.51	7048.16	341.44	33.54	374.98
01/02/93	29.77	1.78	105.70	955.76	1061.45	5.62	50.85	56.47
02/02/93	n.d.	n.d.	n.d.	382.30	n.d.	n.d.	20.34	n.d.
31/10/93	43.98	1.69	258.69	45.00	303.69	13.76	2.39	16.16
06/01/94	8.84	1.01	4.23	0.00	4.23	0.22	0.00	0.22
16/02/94	29.08	1.07	1318.80	88.95	1407.75	70.16	4.73	74.90
28/02/94	9.46	1.61	33.26	148.71	181.97	1.77	7.91	9.68
16/10/94	0.04	n.d.	1.41	258.13	1599.07	0.08	13.73	85.08*
04/11/94	45.73	0.89	1010.05	71.22	1081.27	53.74	3.79	57.53
28/02/95	21.36	1.09	114.74	209.10	323.84	6.10	11.12	17.23
17/01/96	15.77	n.d.	4.03	1.17	5.19	0.21	0.06	0.28
23/01/96	12.11	0.84	101.35	211.67	313.02	5.39	11.26	16.65
01/02/96	6.90	0.92	150.61	223.29	373.90	8.01	11.88	19.89
09/04/96	116.11	1.90	812.57	395.44	1208.02	43.23	21.04	64.27
06/05/96	>28.26	n.d.	397.15	463.01	860.15	21.13	24.63	45.76*
13/09/96	n.d.	n.d.	n.d.	697.35	697.35	n.d.	37.10	n.d.
14/10/96	n.d.	n.d.	n.d.	41.11	41.11	n.d.	2.19	n.d.
05/12/96	n.d.	n.d.	n.d.	165.81	165.81	n.d.	8.82	n.d.
29/12/96	21.79	1.14	24.52	17.89	42.41	1.30	0.95	2.26
02/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	41.55	41.55	n.d.	2.21	n.d.
22/01/97	n.d.	n.d.	n.d.	0.78	0.78	n.d.	0.04	n.d.
31/05/97	36.91	1.60	1668.05	129.94	1797.98	88.74	6.91	95.66

Tabla A.9.14 :(Iden. leyenda tabla A.9.11) *: En estos eventos no fue posible determinar los sedimentos exportados en forma disuelta, pero no suele superar 3g/L, con lo que afectará poco a los totales exportados y tasa de erosión total.

RESUMEN

Los cambios en los patrones espaciales y temporales del paisaje debido a perturbaciones naturales y humanas suelen tener efectos importantes sobre los procesos ecológicos y sobre los organismos, por lo que existe un interés creciente por comprender y predecir dichos cambios. El desierto de Tabernas es un paisaje de cárcavas donde a medio y corto plazo los procesos de erosión hídrica constituyen el principal control de su dinámica actual. Dichos procesos están fuertemente influenciados por la cubierta y propiedades de la superficie del suelo. El objetivo final de esta tesis es comprender la variabilidad y organización espacial de los componentes (teselas) de un paisaje semiárido de cárcavas y sus procesos edáficos, hidrológicos y erosivos derivados. Se definen unas componentes, que denominamos *Unidades del Terreno o Teselas*, como la mínima unidad caracterizada por su homogeneidad en la cobertura biótica y abiótica, clima, litología, topografía, suelo y comportamiento hidrológico y erosivo. Estos atributos y sus interacciones determinan la respuesta de estas unidades ante un cambio o al paso del tiempo y la dinámica del paisaje a la escala de estudio.

La definición de las unidades o teselas que componen este paisaje comienza con la identificación del atributo más visible que es el tipo de cubierta del suelo (biótica y abiótica). Se comprueba que existe un control topográfico en la distribución espacial de dichas teselas, es decir, están asociadas a las geoformas. Dicha asociación se aprovecha para generar una herramienta que permite crear mapas de teselas en otras zonas del desierto de Tabernas, a partir de la topografía. Se investigan las relaciones entre gradientes topográficos y cada tipo de cubierta de la tesela para entender la organización espacial y sus consecuencias.

Se estudian las principales características físicas y químicas del suelo de cada tipo de tesela, los principales factores responsables del desarrollo diferencial del suelo y las relaciones entre las propiedades del suelo, las características topográficas y el tipo de cubierta. El desarrollo del suelo, en general, es reducido debido a la escasez de lluvia y al acostamiento de la superficie del suelo que limita la infiltración y los procesos edafogénicos. Las características del suelo varían entre las teselas, condicionando el tipo de cubierta vegetal que es capaz de sostener ese suelo y su organización espacial. Se comprueba que la cubierta de la superficie influye en las características del suelo afectando al contenido en materia orgánica, la agregación, las condiciones hidrológicas del suelo y a la erosión. Se constata que las diferencias en las propiedades de suelo están relacionadas con la posición en el paisaje por su influencia en la redistribución diferencial del agua.

Los procesos de lavado son más intensos en unidades donde topográficamente se favorece la acumulación de agua y las zonas con altas pendientes y potencial para la erosión presentan suelos jóvenes con características similares al material parental. Aparecen horizontes gypsicos asociados a localizaciones topográficas donde los procesos de lavado están muy limitados.

Se describen y comparan los regímenes de humedad del suelo de las unidades más representativas y se relacionan con el tipo de cubierta que presentan, con las características del suelo y con atributos topográficos. Y se demuestra que la variabilidad en la disponibilidad de agua está controlada fundamentalmente por el tipo de cubierta y las características del suelo. El papel de la topografía sobre los regímenes de humedad queda enmascarado por el efecto de la cubierta del suelo.

Las unidades presentan comportamientos hidrológicos y erosivos diferentes, siendo las no vegetadas las más eficientes en la producción de escorrentía y sedimentos. Las vegetadas presentan capacidades de infiltración relativamente elevadas (excepto las teselas con cubierta criptogámica) y presentan tasas de erosión muy bajas. Dentro de un mismo tipo de unidad la generación y distribución de la escorrentía y erosión varían espacialmente. A escala de microcuenca se comprueba que la respuesta hidrológica y erosiva está controlada por los tipos de unidades que la integran y por su organización espacial.

En este paisaje las propiedades del material superficial controlan los patrones de escorrentía superficial y así, al menos en parte, los procesos y tasas de erosión. A partir de los comportamientos hidrológicos de cada unidad y las características topográficas de la zona, se investiga la contribución de cada tesela a la respuesta de toda la cuenca. Y se construye un modelo distribuido y basado en procesos físicos que predice, a escala de evento de precipitación, la descarga de escorrentía en cada metro cuadrado de una cuenca. Se basa en la organización espacial de las teselas y en sus tasas de infiltración. El objetivo de este modelo es investigar las relaciones espaciales entre las teselas en términos de escorrentía. Se pueden generar mapas de unidades del terreno para otras zonas del desierto de Tabernas a partir de la topografía, y podemos simular el comportamiento hidrológico integrado de las unidades y la respuesta de zonas más extensas y explorar las interrelaciones entre las unidades a mayor escala.

Las unidades del terreno se organizan constituyendo un mosaico con elevada variabilidad espacial. La heterogeneidad de unidades y su organización espacial intervienen en el control de la escorrentía y erosión que en definitiva son los procesos que controlan la evolución de este paisaje. Esta tesis constituye una aproximación a la dinámica de los paisajes de cárcavas en zonas semiáridas.

ABSTRACT

Naturally occurring or man-induced changes of spatial and temporal patterns in the landscape may affect key-ecological processes and organisms. Due to these effects there is an increasing interest in understanding and predicting these changes. The Tabernas Desert in Southeast Spain is characterised by a landscape with abundant gullies (badland) where water erosion processes are the main driving force for changes at medium and long time scales. The intensity at which these processes operate mostly depends on the patterns of the ground cover and soil surface properties. The overall objective of this thesis is to understand the spatial patterns and variability of the different terrain units in this particular landscape and the associated pedological, hydrological and erosion processes. Terrain units have been defined in terms of their homogeneity in biotic and abiotic ground cover, climate, lithology, topography, soil and hydrological behaviour. These attributes and their interactions determine the development of these units in time and their response upon disturbance, and are therefore of key importance to understand the dynamics of the landscape at the studied scale.

The definition of the units forming the landscape starts with the classification of the most visible attribute, which is the nature of the ground cover (either biotic or abiotic). The relationships between the spatial distribution of ground cover types and topographic attributes was investigated in order to increase our understanding of terrain dependent driving forces and to develop a tool for the mapping of ground cover types in the rest of the Tabernas desert from topographic information only.

Soil physical and chemical characteristics were investigated to identify the main factors that cause the soil to develop differently in each terrain unit. In addition an analysis was made of the relationships between soil properties, topographic characteristics and ground cover types. The soils tend to be weakly developed due to both limited rainfall and soil crusting, which hinders infiltration and further constrains the activity of soil forming processes. Soil characteristics are usually different for every terrain type, and control the type of plant cover that the soil is able to support as well as its spatial distribution. It has been verified that the ground cover strongly influences soil profile characteristics, i.e., organic matter, aggregation, hydrological behaviour and erosion. It has been noticed that the differences in soil properties are mostly related to the position within the landscape due to its effects on the redistribution of surface runoff. Leaching processes are more intense in the units where topography favours water accumulation, while the

units with high slope gradients and high erosion rates have poorly developed soils with characteristics very similar to those of the parent material. Gypsic horizons appear in sites where topographic conditions restrict leaching.

Soil moisture regimes from the most representative units have been described, compared, and their relationship with ground cover, soil type and topographic attributes has been evaluated. It was shown that the variation in water availability is essentially controlled by ground cover type and soil characteristics. However, the topographic control of soil moisture regimes is masked by the effects of the ground cover.

Terrain units exhibit different hydrological and erosion behaviour: plant covered units are less efficient in terms of runoff production (except those covered with lichens), and present low erosion rates; on the other hand bare units are the most efficient in runoff production and sediment yield. Within a same terrain unit, runoff and erosion also present some spatial variation. When considering a small catchment, it has been shown that the hydrological and erosive response is controlled by the composition and spatial organisation of all terrain units that form the catchment.

In this type of landscape, runoff patterns and erosion rates are mainly controlled by the properties of the parent material. From the hydrological behaviour of every unit and the topographic characteristics of the area, the contribution of every unit to the whole catchment has been evaluated. A simple spatially distributed model, based on the Horton mechanism for overland flow generation, was built and applied on an instrumented catchment. The model is based on the spatial distribution of terrain units and calculates the runoff production of every square metre area from the rainfall input and their infiltration capacities. The model provides information about the pathways and significance of water fluxes among terrain units and generates a prediction for the discharge of the catchment.

This study provided tools for the mapping of terrain units in other areas of the Tabernas Desert from topographic data. The hydrological behaviour at different spatial scales can be simulated and the interrelationships among larger units can be explored.

In the Tabernas desert, terrain units are spatially organised in well developed mosaics. The heterogeneity of terrain units and their spatial distribution play an important role in the generation of runoff and erosion, which are the main driving forces operating in this landscape. This work provides an approach to the analysis of landscape dynamics in semiarid badlands.